

การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการไหลของของไหล

ในเขตบรรจุทรงกลมด้วยเทคนิคซีเอฟดี



T119510

สิทธิชาติ เมฆประดับ

พงศกร ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา

สรรเพชญ์ สุกปลั่ง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **119510**
วัน,เดือน,ปี **- 8 S.ค. 2554**

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

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

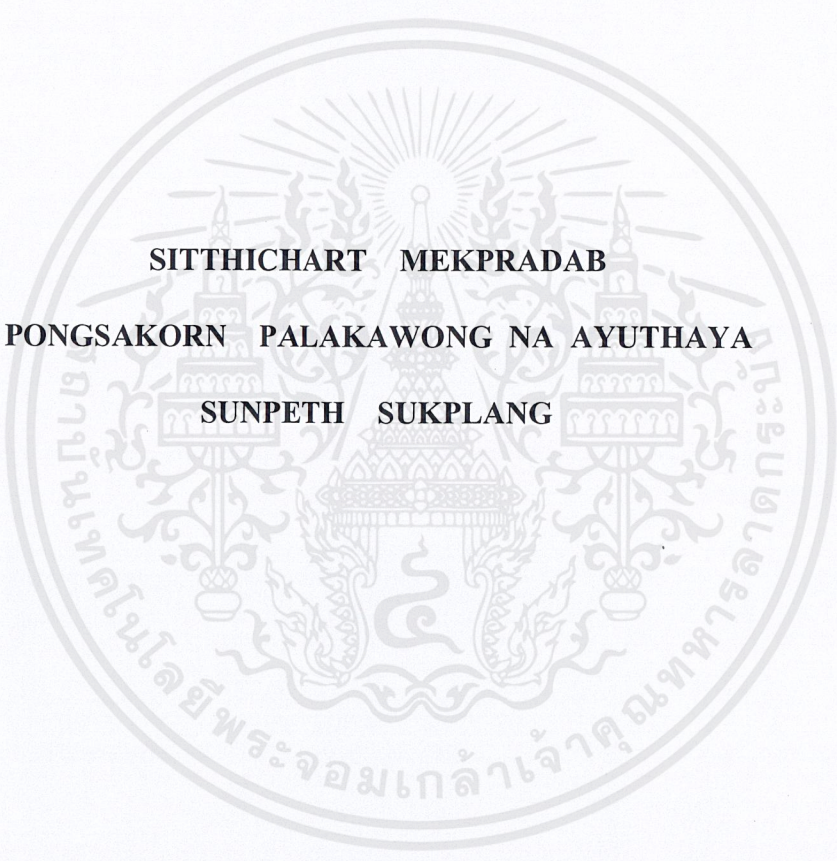
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

**CFD STUDY OF FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER
IN A PACKED BED OF SPHERES**



**SITTHICHART MEKPRADAB
PONGSAKORN PALAKAWONG NA AYUTHAYA
SUNPETH SUKPLANG**

**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการไหลของของไหล
ในเบดบรรจุทรงกลมด้วยเทคนิคซีเอฟดี

โดย

นายสิทธิชาติ เหมประดับ
นายพงศกร ปาลกะวงษ์ ณ อยุธยา
นายสรรเพชญ์ สุขปลั่ง

อาจารย์ที่ปรึกษา

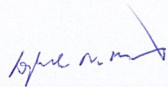
ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


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


.....กรรมการ
(ผศ.ดร. อภินันท์ นัมศรี)


.....กรรมการ
(รศ.ดร. ดวงมถ ณะรอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการไหลของของไหล

ในเบดบรจุทรงกลมด้วยเทคนิคซีเอฟดี

โดย นายสิทธิชาติ เมฆประดับ

นายพงศกร ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา

นายสรรเพชญ์ สุขปลั่ง

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2553

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) เพื่อศึกษาการถ่ายโอนความร้อนในเบดบรจุ แบบจำลองเป็นท่อทรงกระบอกใช้ความยาว 2 ความยาว คือ 0.42 และ 1.62 เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0508 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อทรงกลมเท่ากับ 2 โดยการจำลองนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก ความหนาแน่นของของไหล และแบบจำลองความปั่นป่วน ผลการทดลองแสดงเป็น โปรไฟล์อุณหภูมิและความเร็วที่เคลื่อนที่ผ่านเบด ผลของอัตราการไหลจากการจำลองพบว่า ที่อัตราการไหลของของไหลน้อย ลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิจะกระจายตัวต่ำกว่าที่อัตราไหลของของไหลมาก ส่วนค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วงพบว่าที่ความสูงเท่ากับ 0.42 เมตร ไม่พบความแตกต่างของรูปแบบความเร็วของของไหล แต่ที่ความสูง 1.62 เมตร พบความแตกต่างของรูปแบบความเร็วของของไหล ส่วนผลของความหนาแน่นพบว่าที่ความหนาแน่นน้อยกว่า ความร้อนจะแพร่เข้าไปในศูนย์กลางคอลัมน์ได้ดีกว่า นอกจากนี้ เราได้ศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 แบบอีกครั้ง พบว่า ผลที่ได้ตรงกันข้ามกับการศึกษาครั้งก่อนหน้านี้ คือผลการจำลองแบบ RNG k- ϵ มีความใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่าแบบ Standard k- ϵ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title CFD Study of Fluid Flow and Heat Transfer in a Packed Bed of Spheres

By Mr.Sitthichart Mekpradab
Mr.Pongsakorn Palakawong Na Ayuthaya
Mr.Sunpeth Sukplang

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2010

Advisor Dr.Santi Wattananusorn

ABSTRACT

This project is aimed to apply Computational Fluid Dynamics (CFD) technique for studying heat transfer in a gas – solid fixed bed. The project utilizes the models of cylindrical tube and two different longitudinal lengths at 0.42 and 1.62 m with a constant diameter 0.0508 m. The cylindrical tubes contain 44 and 176 solid spheres. There are variables used in this study such as flow rate, gravity, density of fluid and turbulence models. The results are shown in terms of temperature and velocity profiles. Effect of flow rate has shown that at the lower rate of fluid flow, the profile of temperature is lower than the higher. It is found that gravitational force does not play an important role in the velocity profiles at the height of 0.42 m. However, a small difference in the velocity profiles can be observed at the height of 1.62 m. Effect of density, the temperature profiles show a greater diffusion toward the center of column when compared with a higher-density fluid. Furthermore, two turbulence models are also re-investigated in contrast with the previous study the result shows that the RNG $k-\epsilon$ model agrees with the experiment more than the standard $k-\epsilon$.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับโครงการที่ทำ ตลอดจนข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหาของการทำโครงการครั้งนี้ ทำให้โครงการนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์บุญชัย โชติวิริยวณิช ที่ให้คำปรึกษาและให้ความรู้แก่กลุ่มข้าพเจ้า

นายนิวัฒน์ ภูเจริญ ที่ช่วยสอนการใช้โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น

นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ รุ่นพี่ที่คอยให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล และความรู้ต่างๆ จนทำให้กลุ่มข้าพเจ้าสามารถทำโครงการนี้ผ่านไปได้

ขอขอบคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และอบรมสั่งสอนตั้งแต่เริ่มเข้าศึกษาจนจบการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

นายสิทธิชาติ เมฆประดับ

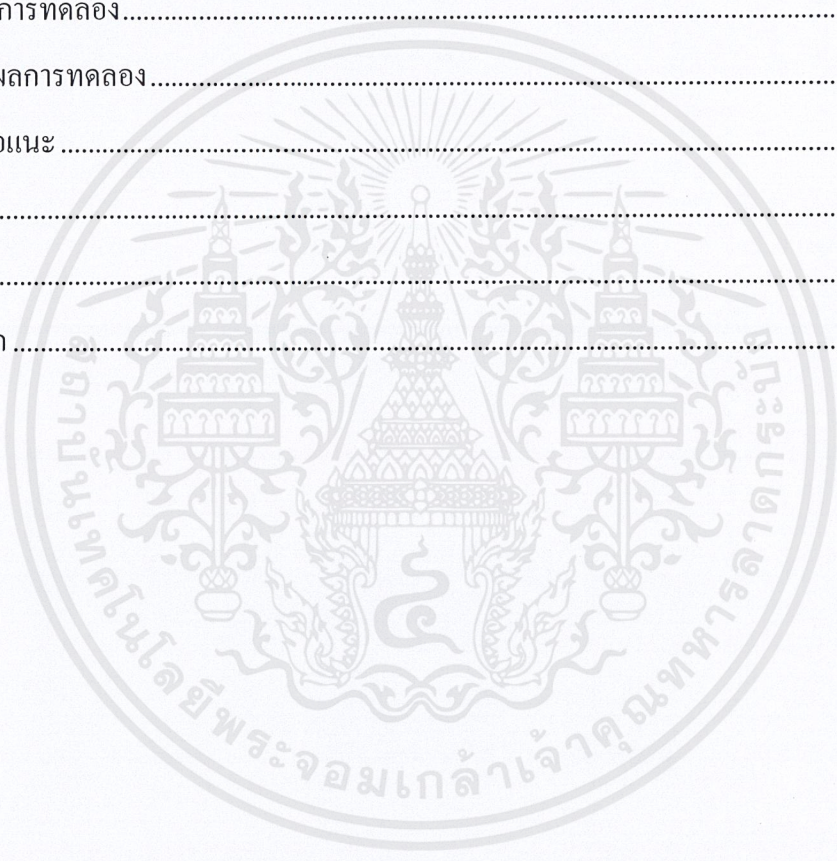
นายพงศกร ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา

นายสรรเพชญ์ สุขปลั่ง

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.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	4
2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	5
2.3 สมการควบคุม.....	6
2.4 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน.....	8
2.5 Standard $k-\epsilon$ Model.....	10
2.6 Renormalization group $k-\epsilon$ Model.....	12
2.7 ขั้นตอนวิธี SIMPLE.....	13
2.8 แรงโน้มถ่วง.....	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการทำการทดลอง.....	21
3.1 หอเบดบรรจุ (Packed bed column).....	21
3.2 คำอธิบายการทดลอง gas-solid fixed bed.....	22

3.3 คำอธิบายแบบจำลอง gas-solid fixed bed.....	25
3.4 ขั้นตอนการทำงานทดลอง	26
3.4 วิธีเก็บผลการทดลอง.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	50
4.1 ผลการทดลอง	50
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	56
บทที่ 5 สรุปผลและวิเคราะห์	58
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	58
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	59
5.3 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก	64



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สรุปจำนวนการทดลองทั้งหมด	26
ตารางที่ 3.2 การกำหนด Boundary แต่ละพื้นผิว	33
ตารางที่ 3.3 ค่าอุณหภูมิของแต่ละส่วน	41
ตารางที่ 3.4 การกำหนด Solution Method	42
ตารางที่ 3.5 ค่า Under-Relaxation Factors สำหรับแบบจำลอง Standard k-epsilon ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373	42
ตารางที่ ก-1 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองที่ 1 ที่คำนวณโดยใช้แบบจำลอง standard k-epsilon ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373	64

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	5
รูปที่ 2.2	ปริมาตรควบคุมใช้ในการแปลงรูปของสมการความต่อเนื่อง.....	16
รูปที่ 2.3	ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE	19
รูปที่ 3.1	หอเบดบรรจุ (Packed bed column)	21
รูปที่ 3.2	แพ็คกิ้งแบบ Raschig ring และแพ็คกิ้งที่มีโครงสร้างลักษณะพิเศษ	21
รูปที่ 3.3	หอเบดบรรจุที่ใช้ในการทดลองของ Michiel Nijemeisland และ Anthony G. Dixon	23
รูปที่ 3.4a	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติระหว่างอุณหภูมิ (θ) กับตัวแปรไร้มิติของความสูงของส่วนที่ไม่ให้ความร้อน.....	24
รูปที่ 3.4b	อุณหภูมิแต่ละส่วนของส่วนที่ไม่ให้ความร้อน.....	24
รูปที่ 3.5a	หอเบดบรรจุที่บรรจุอนุภาคทรงกลม 44 ลูก.....	25
รูปที่ 3.5b	ลักษณะการจัดเรียงอนุภาคทรงกลม.....	25
รูปที่ 3.6	หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6	27
รูปที่ 3.7	โปรแกรม Gambit 2.4.6	27
รูปที่ 3.8	ทรงกลมที่มีขนาดเท่ากับ 0.495	28
รูปที่ 3.9	ทรงกลมที่มีเส้นขอบ 4 เส้น.....	38
รูปที่ 3.10	ทรงกลม 44 ลูก.....	29
รูปที่ 3.11	ทรงกระบอกที่แบ่งเป็น 2 ส่วน.....	30
รูปที่ 3.12	คอลัมน์ที่มีการแบ่งส่วนอย่างสมบูรณ์.....	31
รูปที่ 3.13	แบบจำลองที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์.....	32
รูปที่ 3.14	แบบจำลองที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์	32

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.15 แบบจำลองที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์.....	33
รูปที่ 3.16 หน้าต่างการบันทึกข้อมูล.....	34
รูปที่ 3.17 หน้าต่างก่อนเข้าโปรแกรม Fluent 12.0.16.....	35
รูปที่ 3.18 โปรแกรม Fluent 12.0.16.....	35
รูปที่ 3.19 หน้าต่างการเลือกไฟล์.....	36
รูปที่ 3.20 แบบจำลองที่จะนำมาคำนวณ โดยโปรแกรม Fluent 12.0.16.....	36
รูปที่ 3.21 หน้าต่างการกำหนดขนาดของกริด.....	36
รูปที่ 3.22 หน้าต่างการตั้งค่าสมการพลังงาน.....	37
รูปที่ 3.23 หน้าต่างเลือกสมการการไหล.....	37
รูปที่ 3.24 หน้าต่างการตั้งค่าของ k-epsilon Model.....	38
รูปที่ 3.25 หน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ.....	38
รูปที่ 3.26 การกำหนด Boundary Condition ของ inlet.....	39
รูปที่ 3.27 การกำหนด Boundary Condition ของ outlet.....	40
รูปที่ 3.28 การกำหนด Boundary Condition ของ wall-bed.....	40
รูปที่ 3.29 การกำหนด Boundary Condition ของ wall-in1.....	41
รูปที่ 3.30 หน้าต่างแสดงการคำนวณเสร็จสิ้น.....	43
รูปที่ 3.31 หน้าต่างการกำหนด gravity.....	43
รูปที่ 3.32 หน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ.....	44
รูปที่ 3.33 หน้าต่างการตั้งค่าของ RNG.....	45
รูปที่ 3.34 หน้าต่างการสร้างกราฟระนาบต่างๆ.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.35 หน้าต่างการสร้างกราฟ plane - 16.....	47
รูปที่ 3.36 หน้าต่างการสร้างกราฟที่ความสูง 0.42	48
รูปที่ 3.37 หน้าต่างการสร้างกราฟที่ความสูง 1.62	48
รูปที่ 3.38 หน้าต่างการสร้างกราฟ line -17	49
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอกลมน์ (r/R) ของตอนที่ 1 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 และ 1922	51
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว (S) กับตัวแปรระยะทาง (X) ของ ตอนที่ 2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 ที่ความสูงวัด 0.42 m.....	52
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว (S) กับตัวแปรระยะทาง (X) ของตอนที่ 2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922 ที่ความสูงวัด 0.42 m.....	52
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว(S) กับตัวแปรระยะทาง(X) ของตอนที่ 2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 ที่ความสูงวัด 1.62 m	53
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว(S) กับตัวแปรระยะทาง(X) ของตอนที่ 2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922 ที่ความสูงวัด 1.62 m.....	53
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอกลมน์ (r/R) ของตอนที่ 3 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 ของอากาศ และตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5422 ของน้ำ.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิจุดหลอม (Θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอกลม (r/R) ของตอนที่ 4 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ และ Renormalization group k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373.....	55
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิจุดหลอม (Θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอกลม (r/R) ของตอนที่ 4 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ และ Renormalization group k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922.....	55



คำอธิบายสัญลักษณ์

ρ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
x, y, z	ทิศทางในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (เมตร)
u, v, w	ความเร็วในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (เมตรต่อวินาที)
F	แรง (นิวตัน)
m	มวลของของไหล (กิโลกรัม)
a	ความเร่งของของไหล (เมตรต่อวินาที ²)
f_x	แรงที่กระทำต่อปริมาตรในทิศทาง x (นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)
f_y	แรงที่กระทำต่อปริมาตรในทิศทาง y (นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)
f_z	แรงที่กระทำต่อปริมาตรในทิศทาง z (นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)
p	ความดัน (บรรยากาศ)
τ_{ij}	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง j บนผิวหน้าตัดที่มี normal vector ในทิศทาง i (กิโลกรัมต่อเมตร·วินาที ²)
u_i	ความเร็วในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที)
λ	มีค่าเป็น $-2/3$ ของความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตร·วินาที ²)
∇	Divergence
μ	ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตร·วินาที ²)
U	เวกเตอร์ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
\bar{U}	เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)
U	ขนาดของเวกเตอร์ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
F	เวกเตอร์ของแรง (นิวตัน)
$\dot{q}_x, \dot{q}_y, \dot{q}_z$	ฟลักซ์ของการนำความร้อนในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (วัตต์ต่อพื้นที่)
k	ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร·องศาเซลเซียส)
T	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
e	พลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวล (จูลต่อกิโลกรัม)
\bar{u}_i	ความเร็วเฉลี่ยในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

u'_i	ความเร็วเนื่องจากการเกิด fluctuation ในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที)
\bar{u}'_i	ความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากการเกิด fluctuation ในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที)
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (เมตรต่อวินาที)
\bar{P}	ความดันเฉลี่ย (นิวตันต่อตารางเมตร)
P'	ความดันเนื่องจากการเกิด fluctuation (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\bar{\tau}^{(t)}$	พลักซ์ของโมเมนตัมที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (กิโลกรัมต่อเมตร)
μ_t	turbulent viscosity coefficient (กิโลกรัมต่อเมตร·วินาที ²)
μ_{eff}	effective viscosity coefficient (กิโลกรัมต่อเมตร·วินาที ²)
k	พลังงานเชิงกล (จูล)
C_μ	ค่าคงที่ เท่ากับ 0.09 (สำหรับแบบจำลอง standard $k-\mathcal{E}$) และเท่ากับ 0.0845 (สำหรับแบบจำลอง Renormalization group $k-\mathcal{E}$)
\mathcal{E}	อัตราของการ dissipation
G_k	พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนท์ความเร็วเฉลี่ย (กิโลกรัม·วัตต์·เมตร ⁻³)
G_b	พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว (กิโลกรัม·วัตต์·เมตร ⁻³)
$S_k, S_\mathcal{E}$	source terms (กิโลกรัม·วัตต์·เมตร ⁻³)
σ_k	ตัวเลขแปรผันเทิลแบบปั่นป่วนสำหรับ k
$\sigma_\mathcal{E}$	ตัวเลขแปรผันเทิลแบบปั่นป่วนสำหรับ \mathcal{E}
β	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อน (องศาเคลวิน ⁻¹)
g_i	เวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงในทิศทาง i (เมตรต่อวินาที ²)
Pr_t	ตัวเลขแปรผันเทิลแบบปั่นป่วนสำหรับพลังงาน
μ	สัมประสิทธิ์พลศาสตร์ความหนืด (กิโลกรัม·เมตร ⁻¹ ·วินาที ⁻¹)
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (จูล/กิโลกรัม·องศาเคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ XII ศึกษาคณะนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

Y_m	ผลของการกอดัดเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน (กิโลกรัม·วัตต์· เมตร ⁻³)
M_t	turbulent Mach number
v	องค์ประกอบของความเร็วยกของของไหลที่ไหลขนานกับเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที)
u	องค์ประกอบของความเร็วยกของของไหลที่ไหลตั้งฉากเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที)
α_k	inverse effective Prandtl numbers for k
α_ϵ	inverse effective Prandtl numbers for ϵ
R_ϵ	ผลของ swirl
ϕ	คุณสมบัติ ϕ ในปริมาตรควบคุม
p_i	ความดัน ณ ตำแหน่ง i
δx_i	ความกว้างของปริมาตรควบคุมในแกน x ของโมเมนต์ในทิศทาง i
δy_i	ความกว้างของปริมาตรควบคุมในแกน y ของโมเมนต์ในทิศทาง i
$b_{i,j}$	เทอมการสร้างโมเมนต์
ΔV_u	ปริมาตรของเซลล์ที่ใช้หาความเร็วในทิศทาง 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

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันวิทยาการทางด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและได้เข้ามามีบทบาทสำคัญ โดยเฉพาะในงานทางด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมาก ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากในปัจจุบันมีการแข่งขันกันค่อนข้างสูงในการผลิตอุปกรณ์เชิงวิศวกรรมแขนงต่างๆ อีกทั้งเมื่อมีการเปิดการค้าเสรีขึ้น การแข่งขันระหว่างบริษัทผู้ผลิตสินค้าในลักษณะเดียวกันย่อมต้องเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นสิ่งที่วิศวกรหรือผู้ประกอบการทุกคนต้องคิดทบทวนและตระหนักให้มากในเวลานี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถผลิตสินค้าที่มีคุณภาพสูง ที่สำคัญต้องรวดเร็วทันต่อความต้องการของลูกค้า ต้นทุนการผลิตต่ำ เพื่อสามารถแข่งขันกับบริษัทผู้ผลิตสินค้ารายอื่นได้ ดังนั้นเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์จึงตอบทุกโจทย์ปัญหาต่างๆ ข้างต้นเป็นอย่างดี โดยเฉพาะงานวิศวกรรมด้านพลศาสตร์ของไหลมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้ความสามารถจากเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบทุกกระบวนการ เนื่องจากมีความซับซ้อนมากทั้งในแง่มุมของการออกแบบ ทั้งในส่วนของการวิเคราะห์หรือแม้แต่ในส่วนของการผลิตชิ้นงานก็ตาม

เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) นั้นถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหล โดยจำลองการไหลของของไหลและศึกษาการถ่ายโอนความร้อนในเบดบรรจุแบบคงที่ (fixed bed) สำหรับการศึกษานี้ โครงการครั้งนี้ได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหล แรงโน้มถ่วง ความหนาแน่น และแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อเปรียบเทียบโปรไฟล์อุณหภูมิและความเร็ว และสามารถวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายโอนความร้อนของอากาศผ่านเบดที่จำลองด้วยเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์
- 1.2.2 ศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อโปรไฟล์อุณหภูมิของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบด
- 1.2.3 ศึกษาผลของแรงโน้มถ่วงของโลกที่มีต่อโปรไฟล์ความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบด
- 1.2.4 ศึกษาผลของความหนาแน่นของของไหลที่มีต่อโปรไฟล์อุณหภูมิของอากาศและน้ำที่เคลื่อนที่ผ่านเบด
- 1.2.5 ศึกษาผลของแบบจำลองแบบปั่นป่วนที่มีต่อโปรไฟล์อุณหภูมิของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบด

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

- 1.3.1 ศึกษาเทคนิคการใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ และนำไปประยุกต์ใช้
- 1.3.2 สร้างแบบจำลองให้มีความถูกต้อง โดยสามารถทำนายพฤติกรรมการไหลและการถ่ายโอนความร้อนของของไหลได้
- 1.3.3 ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหล แรงโน้มถ่วง ความหนาแน่น และแบบจำลองแบบปั่นป่วน
- 1.3.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณโดยทำการเปรียบเทียบโปรไฟล์อุณหภูมิและความเร็ว
- 1.3.5 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์และข้อเสนอแนะที่ควรทำวิจัยต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการงาน

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 สามารถเข้าใจถึงวิธีการใช้โปรแกรม Gambit และ Fluent ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและการจำลองการไหล

1.4.3 ทำให้ทราบผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อโปรไฟล์อุณหภูมิและความเร็วของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านเบด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) [1]

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

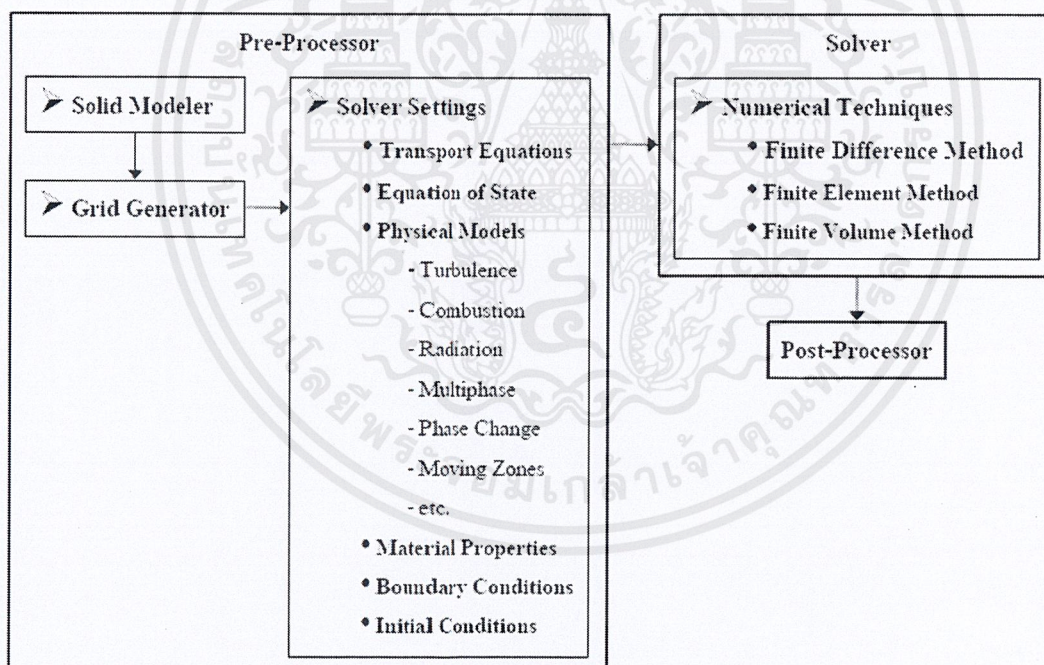
- อากาศพลศาสตร์ของอากาศยานและยานพาหนะ เช่น แรงยกและแรงต้าน เป็นต้น
- อุทกศาสตร์ของเรือ
- เครื่องจักรผลิตกำลัง เช่น การผสมและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การไหลของของไหลทำงาน เป็นต้น
- วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การทำความเย็นบนอุปกรณ์รวมทั้งวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์
- วิศวกรรมเคมี เช่น การผสมและการแยกสาร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

2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล [1]

โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลถูกสร้างขึ้นด้วยลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลได้ โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลประกอบด้วย 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

สมการอนุรักษ์มวล (Continuity equation)

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

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 “สมการอนุรักษ์มวลของของไหลที่อัดตัวได้ในสถานะไม่คงตัว”

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

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

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่า “แรงเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม”

ซึ่งสามารถเขียนสมการโมเมนตัมในสามมิติได้ดังนี้

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

โดยที่ p คือ ความดัน (pressure)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_M คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล เช่น แรงโน้มถ่วง, แรงทางแม่เหล็ก, ฯลฯ

สมการพลังงาน (Energy equation)

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์กล่าวว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหลเท่ากับอัตราการเพิ่มความร้อนในอนุภาคของไหลรวมกับอัตราของงานที่กระทำต่ออนุภาคของไหล” (กฎการอนุรักษ์พลังงาน) ซึ่งสามารถเขียนสมการพลังงานได้ดังนี้

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

โดยที่ E คือ พลังงานจำเพาะของของไหล (specific energy)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity)

T คือ อุณหภูมิ (temperature)

S_E คือ อัตราการเพิ่มของพลังงานที่กระทำต่อปริมาตรของของไหล

สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน

(Navier-Stokes Equations for a Newtonian Fluid)

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

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.5)$$

โดยที่ μ คือ ความหนืดของของไหล (viscosity)

ซึ่งสมการที่ (2.5) เป็นกฎความหนืดของนิวตันที่เขียนอยู่ในเทอมของความเค้นเฉือน (shear stress)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ g คือ ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational constant)

เรียกสมการที่ (2.6) ว่า “สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลของนิวตัน”

2.4 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence and Turbulence Model)

[2]

ความปั่นป่วนประกอบด้วยการแกว่ง (fluctuation) ในสนามการไหลของเวลาและระยะทาง ความปั่นป่วนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลักคือ เป็นระบบสามมิติ สภาวะไม่คงตัว (unsteady) และประกอบด้วยขนาดหลายๆขนาด ความปั่นป่วนส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหล ความปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเมื่อผลของแรงเฉื่อย (inertia force) มีมากกว่าผลของความหนืด (viscous force) ซึ่งลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) มีค่าสูง

ตามหลักการแล้ว สมการนาเวียร์-สโตกส์สามารถอธิบายการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนโดยไม่จำเป็นต้องใช้สมการอื่นช่วยอธิบาย อย่างไรก็ตาม การไหลแบบปั่นป่วนที่ตัวเลขเรย์โนลด์จริงจะมีความยาวของความปั่นป่วน (turbulent length) และขนาดของเวลา (time scale) อยู่ในช่วงกว้าง โดยทั่วไปแล้วขนาดของความยาว (length scale) จะมีขนาดเล็กกว่ากริดของปริมาตรสี่เหลี่ยมที่เล็กที่สุดที่ใช้วิเคราะห์เชิงตัวเลขในทางปฏิบัติ การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (The Direct Numerical Simulation, DNS) ของการไหลเหล่านี้จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง

เพื่อที่จะทำนายผลกระทบของความปั่นป่วน นักวิจัยทางด้านการคำนวณพลศาสตร์ของไหลจำนวนมากมีความสนใจวิธีที่เรียกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model) ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วนถูกเจาะจงในการศึกษาผลกระทบของความปั่นป่วนโดยไม่จำเป็นต้องใช้กริดที่ละเอียดและการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วนส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนเชิงสถิติ (statistical turbulence model)

สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS)

[3]

เริ่มต้นจากการนิยามค่าเฉลี่ย ϕ ของสมบัติการไหล ϕ ดังนี้

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi(t) dt \quad (7)$$

โดยที่ Δt คือ ขนาดของเวลาซึ่งใหญ่เมื่อเทียบกับการแกว่งของความปั่นป่วน แต่เล็กเมื่อเทียบกับขนาดของ เวลาเมื่อใช้ในการคำนวณ

ในการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ คำตอบของตัวแปรในสมการนาเวียร์-สโตกส์แบ่งเป็นค่าเฉลี่ย และองค์ประกอบของการแกว่ง เช่น องค์ประกอบของความเร็ว

$$\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{u}' \quad (8)$$

โดยที่ \mathbf{U} คือ ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบความเร็ว

\mathbf{u}' คือ องค์ประกอบความเร็วของการแกว่ง

ในทำนองเดียวกันกับปริมาณสเกลาร์อื่น

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (9)$$

โดยที่ ϕ เป็นปริมาณสเกลาร์อื่น เช่น ความดัน, พลังงาน, หรือความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.8) และสมการที่ (2.9) ลงในสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมและใช้นิยามค่าเฉลี่ย $\bar{\phi}$ ของสมบัติการไหล $\bar{\phi}$ จะได้สมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยของเรย์โนลด์

ดังแสดงในสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11) ตามลำดับ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) + [-\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}' \mathbf{u}')] + S_M \quad (11)$$

โดยที่ \mathbf{U} คือ เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย (velocity vector) ซึ่ง $\mathbf{U} = U\mathbf{i} + V\mathbf{j} + W\mathbf{k}$

\mathbf{u}' คือ เวกเตอร์ความเร็วของการแกว่ง (fluctuation velocity vector) ซึ่ง $\mathbf{u}' = u'\mathbf{i} + v'\mathbf{j} + w'\mathbf{k}$

ในสมการที่ (2.11) เรียกเทอม $-\rho \mathbf{u}' \mathbf{u}'$ ว่า “ความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds stress)”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ที่ได้แสดงในสมการที่ (2.11) สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของ ปริมาณสเกลาร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\Phi U) = \nabla(\Gamma_{\Phi} \nabla\Phi) + [-\nabla(\rho u' \phi')] + S_{\Phi} \quad (12)$$

2.5 Standard k-ε Model [4]

พลังงานจลน์ของการปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน (ε) หาได้จากสมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.13)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} + (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon} \quad (2.14)$$

ในสมการนี้ G_k คือ การสร้างพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.15)$$

G_b คือ การสร้างพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัว (buoyancy) ซึ่งหาได้จาก

$$G_b = \beta g_i \frac{\partial \mu_t}{\partial Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.16)$$

Y_M คือ การขยายออกของการแจกแจงของการแกว่งในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด

$$Y_m = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย M_t คือ turbulent Mach number

S_ε, S_k คือ ผลของ Source term

$C_{3\varepsilon}$ คือ ค่าคงที่ซึ่งหาได้จาก

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right| \quad (2.18)$$

โดย v คือ องค์ประกอบของความเร็วยกของของไหลที่ไหลขนานกับ gravitational vector

u คือ องค์ประกอบของความเร็วยกของของไหลที่ไหลตั้งฉากกับ gravitational vector

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ และ $C_{3\varepsilon}$ คือ ค่าคงที่

σ_k และ σ_ε คือค่า Prandtl Number ของความปั่นป่วนของ k และ ε ตามลำดับ

S_k และ S_ε คือ ผลของ Source term

การจำลองความหนืดของการปั่นป่วน

ความหนืดของความปั่นป่วน (μ_t) คำนวณจากค่า k และ ε ดังสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

เมื่อ C_μ คือ ค่าคงที่

ค่าคงที่แบบจำลอง

ค่าคงที่แบบจำลอง $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k$ และ σ_ε มีค่าต่างๆ ดังนี้

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

ค่าเหล่านี้คำนวณจากการทดลองโดยใช้อากาศและน้ำ

2.6 Renormalization group k-ε Model [5]

แบบจำลอง Renormalization group k-ε ถูกพัฒนามาจากสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier - Stokes) โดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Renormalization group ซึ่งมีผลทำให้สมการมีความแตกต่างจากแบบจำลอง Standard k-ε ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังนี้

- 1.) แบบจำลอง Renormalization group k-ε มีการเพิ่มเทอมในส่วนของสมการ dissipation rate of turbulent kinetic energy (ε) ซึ่งจะทำให้เกิดความแม่นยำสำหรับ rapidly strained flow
 - 2.) ผลของ swirl บนความปั่นป่วนได้ถูกรวมเข้าไปในแบบจำลอง Renormalization group k-ε เพื่อเพิ่มความแม่นยำสำหรับ swirling flow
 - 3.) แบบจำลอง Renormalization group k-ε กำหนดสมการสำหรับ turbulent Prandtl number แต่ในขณะที่ Standard k-ε กำหนดเป็นค่าคงที่
 - 4.) แบบจำลอง Renormalization group k-ε สามารถครอบคลุมค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ ได้
- สมการของแบบจำลอง RNG k-ε สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_B - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (2.20)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} + G_B) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.21)$$

โดยที่สามารถหาค่า μ_{eff} ได้จาก

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (2.22)$$

$$\text{โดยที่} \quad \hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad (2.23)$$

$$\text{และ} \quad C_v \approx 100 \quad (2.24)$$

โดยที่เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงสามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.25)$$

โดยที่ $C_\mu = 0.0845$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่า 0.09 ของแบบจำลอง Standard k- ε

R_ε คือ ผลของ swirl ซึ่งหามาได้จากความสัมพันธ์

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (2.26)$$

โดยที่

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}, \quad \eta_0 = 4.38, \quad \beta = 0.012 \quad (\text{จากการทดลอง})$$

โดย $C_\mu = 0.0845, \sigma_k = 0.7194, \sigma_\varepsilon = 0.7194, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68, \eta_0 = 4.38$

2.7 ขั้นตอนวิธี SIMPLE [1]

SIMPLE ย่อมาจาก Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations ขั้นตอนวิธีนี้นำมาใช้ครั้งแรกโดย Patankar และ Spalding (1972) และเป็นขั้นตอนที่จำเป็นกับการคาดคะเนเพื่อความแม่นยำสำหรับการคำนวณความดันบนกริดที่เหลื่อมกัน (staggered grid) วิธีนี้แสดงให้เห็นโดยพิจารณาสมการการไหลคงตัวแบบราบเรียบ 2 มิติ ในพิกัดคาร์ทีเซียน

ในตอนเริ่มต้น กระบวนการคำนวณแบบ SIMPLE จะเดาค่าสนามความดัน p^* สมการโมเมนตัมจะแก้โดยใช้การเดาสนามความดันเพื่อให้ผลของ u^* และ v^* ดังสมการ (2.27) และ (2.28)

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.27)$$

$$a_{i,j} v_{i,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.28)$$

จากนั้น เราทำการนิยามค่าแก้ของความดัน p' คือ ความแตกต่างระหว่างสนามความดันที่ถูกต้อง p และความดันที่คาดเดา p^*

$$p = p^* + p' \quad (2.29)$$

ในการทำงานเดียวกัน เรานิยามค่าแก้ของความเร็ว u' และ v' เพื่อให้ได้ความเร็วที่ถูกต้อง u และ v จากการเดา u^* และ v^*

$$u = u^* + u' \quad (2.30)$$

$$v = v^* + v' \quad (2.31)$$

ทำการแทนค่าสนามความดันที่ถูกต้อง p ลงในสมการโมเมนตัม จะได้ค่าความเร็ว (u, v) ทำการลบสมการ (2.27) และ (2.28) ด้วยสมการโมเมนตัม จะได้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p_{i-1,j} - p_{i-1,j}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.32)$$

$$a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p_{i,j-1} - p_{i,j-1}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.33)$$

ใช้สูตรค่าปรับแก้สมการ (2.29) - (2.31) สมการ (2.32) - (2.33) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.34)$$

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.35)$$

จากจุดนี้ เราประมาณค่า โดยการตัดพจน์ $\sum a_{nb}u'_{nb}$ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ นี้ออก เพื่อให้สมการ (2.34) และ (2.35) อยู่ในรูปอย่างง่ายสำหรับการปรับแก้ความเร็ว การละเว้นพจน์เหล่านี้เป็นการประมาณค่าของขั้นตอนวิธี SIMPLE จะได้ว่า

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.35)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่
$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \quad \text{และ} \quad d_{I,j} = \frac{A_{I,j}}{a_{I,j}} \quad (2.37)$$

สมการ (2.35) และ (2.36) แสดงค่าปรับแก้ จะถูกนำไปแทนในสูตรความเร็ว (2.30) และ (2.31) จะได้

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{I-1,j} - p'_{I,j}) \quad (2.38)$$

$$v_{I,j} = v_{I,j}^* + d_{I,j} (p'_{I,j-1} - p'_{I,j}) \quad (2.39)$$

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

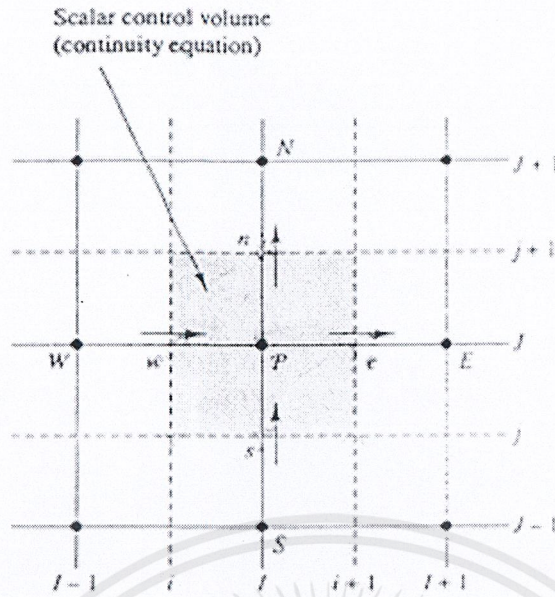
$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j} (p'_{I,j} - p'_{I+1,j}) \quad (2.40)$$

$$v_{I,j+1} = v_{I,j+1}^* + d_{I,j+1} (p'_{I,j} - p'_{I,j+1}) \quad (2.41)$$

โดยที่
$$d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}} \quad \text{และ} \quad d_{I,j+1} = \frac{A_{I,j+1}}{a_{I,j+1}} \quad (2.42)$$

ถึง ณ จุดนี้ เราได้พิจารณาเพียงสมการ โมเมนต์ตัม แต่ที่พิจารณาก่อนหน้านี้ สนามความเร็วก็ควรนำมาคิดด้วยตามสมการความต่อเนื่อง ความต่อเนื่องถูกสร้างขึ้นจากรูปแบบความไม่ต่อเนื่องของปริมาตรควบคุมแบบสเกลาร์ ดังรูปที่ 2.2

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho u A)_{I,j+1} - (\rho u A)_{I,j}] = 0 \quad (2.43)$$



รูปที่ 2.2 ปริมาตรควบคุมใช้ในการแปลงรูปของสมการความต่อเนื่อง[1]

แทนค่าความเร็วที่ถูกต้องสมการ (2.38 - 2.41) ลงในสมการความต่อเนื่องที่แปลงรูปแล้ว (2.43) จะ
ได้

$$\begin{aligned} & \left[\rho_{i+1,j} A_{i+1,j} (u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j} (p'_{i,j} - p'_{i+1,j})) \right. \\ & \left. - \rho_{i,j} A_{i,j} (u_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})) \right] \\ & + \left[\rho_{i,j+1} A_{i,j+1} (v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1} (p'_{i,j} - p'_{i,j+1})) \right. \\ & \left. - \rho_{i,j} A_{i,j} (v_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.44)$$

ซึ่งอาจจัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} & [(\rho dA)_{i+1,j} + (\rho dA)_{i,j} + (\rho dA)_{i,j+1} + (\rho dA)_{i,j}] p'_{i,j} \\ & = (\rho dA)_{i+1,j} p'_{i+1,j} + (\rho dA)_{i,j} p'_{i-1,j} + (\rho dA)_{i,j+1} p'_{i,j+1} \\ & \quad + (\rho dA)_{i,j} p'_{i,j-1} \\ & \quad + [(\rho u^* A)_{i,j} - (\rho u^* A)_{i+1,j} + (\rho v^* A)_{i,j} - (\rho v^* A)_{i,j+1}] \end{aligned} \quad (2.45)$$

สัมประสิทธิ์ p' อาจเขียนได้เป็น

$$a_{i,j} p'_{i,j} = a_{i+1,j} p'_{i+1,j} + a_{i-1,j} p'_{i-1,j} + a_{i,j+1} p'_{i,j+1} + a_{i,j-1} p'_{i,j-1} + b'_{i,j} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $a_{I,J} = a_{I+1,J} + a_{I-1,J} + a_{I,J+1} + a_{I,J-1}$ และสัมประสิทธิ์เป็นดังนี้

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

สมการ (2.46) แสดงสมการความต่อเนื่องที่แปลงรูปโดยที่มีการปรับแก้ความดัน p' พจน์ b' ในสมการคือความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพิ่มขึ้นจากสนามความเร็วที่ไม่ถูกต้อง u^*, v^* จากการแก้สมการ(2.46) ตัวปรับแก้ความดัน p' สามารถสังเกตได้ทุกจุด เมื่อรู้ค่าตัวปรับแก้ความดัน สนามความดันที่ถูกต้องอาจหาได้จากสูตร (2.29) และองค์ประกอบของความเร็วหาผ่าน (2.38) ถึง (2.41) จากสูตรปรับแก้ การละเว้นพจน์ $\sum a_{nb} u_{nb}$ จะไม่มีผลต่อคำตอบสุดท้าย เพราะว่าตัวปรับแก้ความดัน และตัวปรับแก้ความเร็วจะเป็นศูนย์เมื่อได้คำตอบที่ถูกต้อง จะได้ $p^* = p, u = u^*$ และ $v = v^*$

สมการการปรับแก้ความดันจะไม่ลู่เข้าหาคำตอบถ้าไม่ใช้ under relaxation ในระหว่างกระบวนการทำซ้ำ และปรับปรุงค่าความดันใหม่ p^{new} หาได้จาก

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \tag{2.47}$$

เมื่อ α_p คือ Under-relaxation factor ถ้าเราให้ค่า α_p เท่ากับ 1 สนามความดันที่เดา p^* จะถูกปรับแก้ด้วย p' โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสนามความดันที่เดา p^* มีค่าต่างจากคำตอบมาก ค่านี้ย่อมมีค่ามากเพื่อการคำนวณที่เสถียร การใช้ค่า α_p ระหว่าง 0 กับ 1 จะช่วยให้เราเดาค่าสนามความดัน สัดส่วนค่าปรับแก้ความดัน มากพอเพื่อทำให้เกิดกระบวนการทำซ้ำต่อไป แต่ไม่มากเกินไปเพื่อให้เกิดการคำนวณที่เสถียร

ความเร็วก็ใช้ under relaxation เช่นกัน กระบวนการทำซ้ำก็ช่วยปรับปรุงองค์ประกอบ u^{new} และ v^{new} หาได้จาก

$$u^{new} = \alpha_u u + (1 - \alpha_u) u^{n-1} \tag{2.48}$$

$$v^{new} = \alpha_v v + (1 - \alpha_v) v^{n-1} \tag{2.49}$$

เมื่อ α_u และ α_v คือ under relaxation factor ของความเร็ว u และ v มีค่าระหว่าง 0 กับ 1 โดยที่ u และ v คือองค์ประกอบของความเร็วที่ปรับแก้แล้วโดยไม่ใช้ relaxation และ u^{n-1} กับ v^{n-1} คือความเร็วที่ได้จากการทำซ้ำครั้งก่อนหน้า ทำการแทนค่าตามสมการที่ได้นี้ เข้าไปในสมการแปลงรูปของโมเมนตัม ในทิศ ความเร็ว u และ v และจัดรูปใหม่จะได้ดังนี้

$$\frac{a_{i,j}}{\alpha_u} u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{i-1,j} - p_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[(1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} \right] u_{i,j}^{(n-1)} \quad (2.50)$$

$$\frac{a_{l,j}}{\alpha_v} v_{l,j} = \sum a_{nb} v_{nb} + (p_{l,j-1} - p_{l,j}) A_{l,j} + b_{l,j} + \left[(1 - \alpha_v) \frac{a_{l,j}}{\alpha_v} \right] v_{l,j}^{(n-1)} \quad (2.51)$$

สมการการปรับแก้ความดันก็จะถูกปรับเปลี่ยนด้วย โดยใช้ under-relaxation ของความเร็ว และพจน์ d ของสมการการปรับแก้ความดัน จะกลายเป็น

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j} \alpha_u}{a_{i,j}}, \quad d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j} \alpha_u}{a_{i+1,j}}, \quad d_{l,j} = \frac{A_{l,j} \alpha_v}{a_{l,j}} \quad (2.52)$$

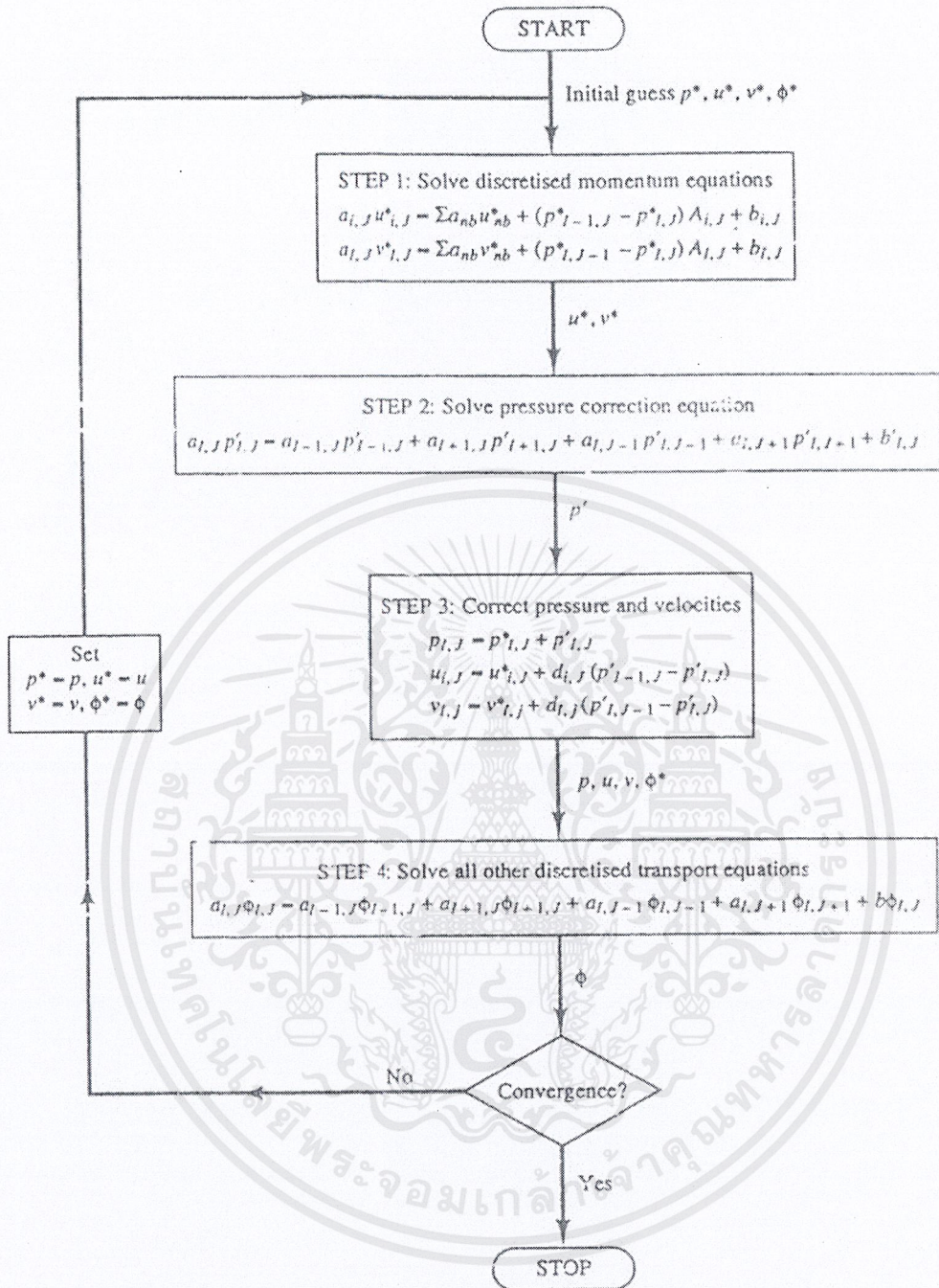
และ
$$d_{l,j+1} = \frac{A_{l,j+1} \alpha_v}{a_{l,j+1}} \quad (2.53)$$

สังเกตได้ว่าในสูตร $a_{i,j}, a_{i+1,j}, a_{l,j}$ และ $a_{l,j+1}$ คือสัมประสิทธิ์ของสมการความเร็วที่แปลงรูปแล้วที่ตำแหน่ง $(i, j), (i+1, j), (l, j)$ และ $(l, j+1)$ รอบๆจุดศูนย์กลาง P

วิธีการเลือก α อย่างถูกต้องเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อการจำลองที่มีประสิทธิภาพ หากค่า α มากเกินไป จะทำให้เกิดการแกว่ง และค่าที่ได้น้อยเกินไปจะทำให้เกิดการลู่เข้าหาค่าตอบช้ามากๆ ค่า α ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับกริดและจำเป็นต้องพิจารณาแต่ละกรณี

วิธีการที่สมบูรณ์ [1]

ขั้นตอนวิธีแบบ SIMPLE เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณความดันและความเร็ว วิธีนี้อาศัยการทำซ้ำ เมื่อมีสมการอื่นมาใช้กับสมการโมเมนตัม การคำนวณจะต้องทำเป็นลำดับขั้น ลำดับขั้นในการดำเนินการใน CFD เราจะใช้วิธี SIMPLE ดังรูป



รูปที่ 2.3 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 แรงโน้มถ่วง [6]

แรงโน้มถ่วง ในทางฟิสิกส์ คือแรงที่กระทำระหว่างมวล แรงโน้มถ่วงเป็นหนึ่งในสี่แรงหลัก ซึ่งประกอบด้วย แรงโน้มถ่วง แรงแม่เหล็กไฟฟ้า แรงนิวเคลียร์แบบอ่อน และ แรงนิวเคลียร์แบบเข้ม ในจำนวนแรงทั้งสี่แรงหลัก แรงโน้มถ่วงมีค่าน้อยที่สุด ถึงแม้ว่าแรงโน้มถ่วงจะเป็นแรงที่เราไม่สามารถรับรู้ได้มากนักเพราะความเบาบางของแรงที่กระทำต่อเรา แต่ก็เป็แรงเดียวที่ยึดเหนี่ยวเราไว้กับพื้นโลก แรงโน้มถ่วงมีความแรงแปรผันตรงกับมวล ไม่มีการลดทอนหรือถูกดูดซับเนื่องจากมวลใด ๆ ทำให้แรงโน้มถ่วงเป็นแรงที่สำคัญมากในการยึดเหนี่ยวเอกภพไว้ด้วยกัน

นอกเหนือจากแรงโน้มถ่วงที่เกิดระหว่างมวลแล้ว แรงโน้มถ่วงยังสามารถเกิดขึ้นได้จากการที่เราเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เช่น การเพิ่มหรือลดความเร็วของวัตถุ การเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ เป็นต้น

ในปี พ.ศ. 2230 ไอแซก นิวตัน ได้ค้นพบกฎแรงโน้มถ่วงดังนี้

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

(2.54)

เมื่อ

F คือ แรงโน้มถ่วงระหว่างมวลทั้งสอง

G คือ ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง

m_1 คือ มวลของวัตถุแรก

m_2 คือ มวลของวัตถุที่สอง

r คือ ระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสอง

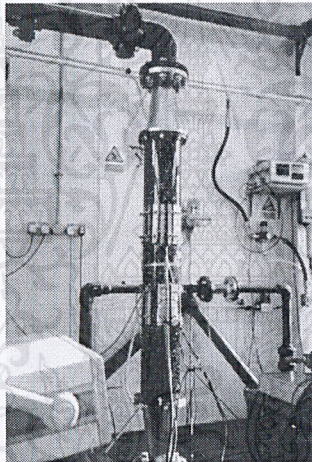
นั่นคือแรงโน้มถ่วงแปรผันตรงกับมวล (มวลมากก็มีแรงโน้มถ่วงมาก) และแปรผกผันกับระยะห่างกำลังสอง (ระยะห่างมากก็มีแรงโน้มถ่วงน้อย)

บทที่ 3

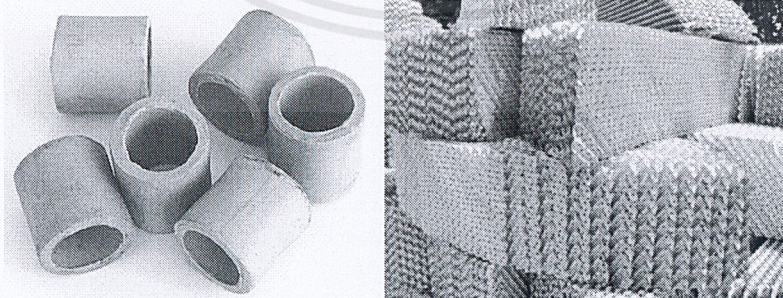
ขั้นตอนการทดลอง

3.1 หอบעדบรรจุ (Packed bed column) [7]

ในอุตสาหกรรมเคมี หอบעדบรรจุ (Packed bed column) จะมีลักษณะเป็นท่อกลวง หรือถัง ซึ่งบรรจุไปด้วยแพ็คกิ้ง (Packing material) ซึ่งอาจจะเป็น Raschig ring หรือแพ็คกิ้งที่มีโครงสร้างลักษณะพิเศษ ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 หอบעדบรรจุ (Packed bed column) [7]



รูปที่ 3.2 แพ็คกิ้งแบบ Raschig ring และแพ็คกิ้งที่มีโครงสร้างลักษณะพิเศษ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

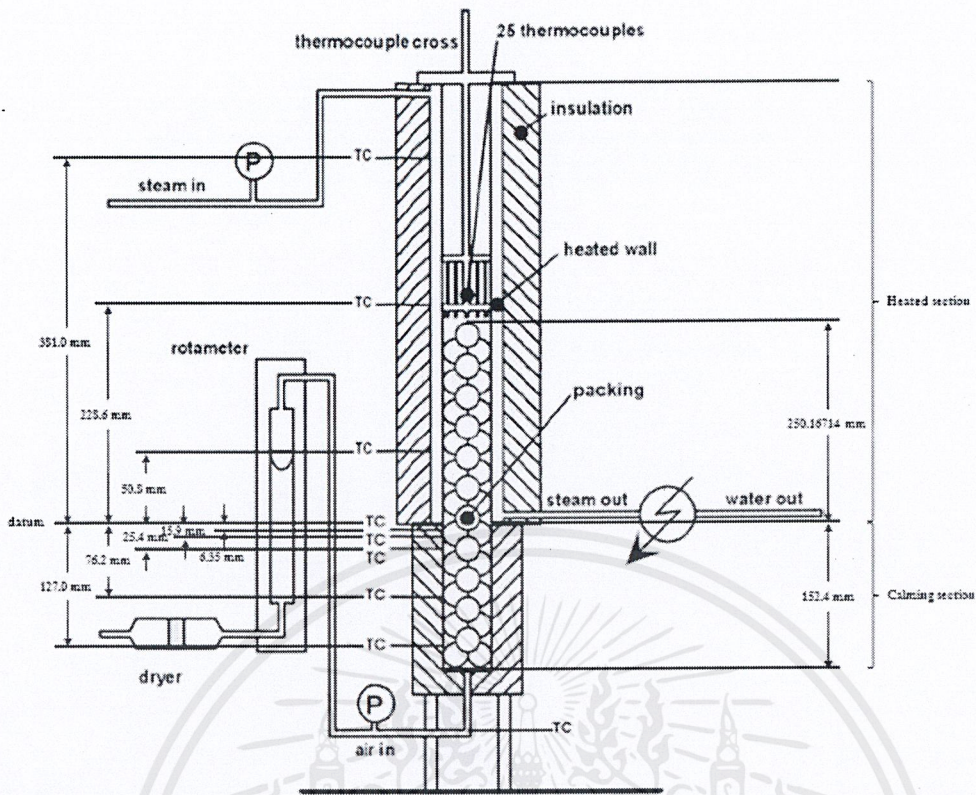
จุดประสงค์ทั่วไปของการใช้หอเบดบรรจุ เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเฟส 2 เฟสในกระบวนการเคมี ซึ่งหอเบดบรรจุสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เคมี หรือในกระบวนการแยก เช่น หอกั่น หอดูดซับ เป็นต้น รวมทั้งในบางครั้งหอเบดบรรจุอาจนำมาใช้ในการเก็บความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในกรณีนี้แก๊สร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านหอเบดบรรจุ

จนกระทั่งแก๊สก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นป้อนสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตเข้าหอเบดบรรจุ เพื่อให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นสูงขึ้นก่อนเข้ากระบวนการผลิตต่อไป

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ (packed bed reactor) ส่วนของแก๊สก็จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว ประโยชน์ของการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุคือ การให้ค่าแปลงผันทางเคมีต่อน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอื่น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าขนาดของเครื่องปฏิกรณ์

3.2 คำอธิบายการทดลอง gas-solid fixed bed [7]

จากการทดลองของ Michiel Nijemeisland และ Anthony G. Dixon [7] ชุดทดลองประกอบด้วยหอเบดบรรจุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2 นิ้ว (50.8 mm) โดยหอเบดบรรจุแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นส่วนที่ไม่ให้ความร้อน (Calming section) และส่วนที่สองเป็นส่วนที่ให้ความร้อน (heated section) มีแก๊สเป็นทรงกลมที่ทำจากไนลอนจำนวน 44 ลูก โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 นิ้ว (25.4 mm) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 หอบเขตบรรจุที่ใช้ในการทดลองของ Michiel Nijmeisland และ Anthony G. Dixon [7]

จากการทดลองพบว่าส่วนที่ไม่ให้ความร้อน จะมีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (θ) โดยที่

$$\theta = \frac{(T - T_{\text{ขาเข้าคอล์มน์}})}{(T_{\text{ผนังคอล์มน์}} - T_{\text{ขาเข้าคอล์มน์}})} \quad (3.1)$$

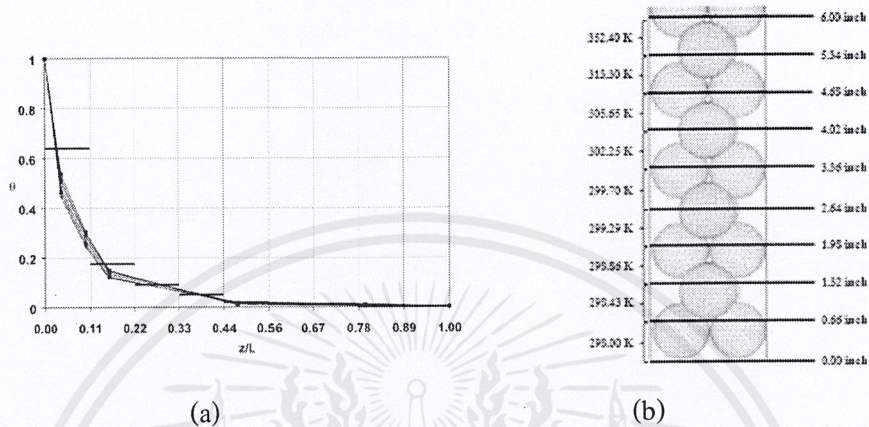
เมื่อ

$T_{\text{ผนังคอล์มน์}}$ คือ อุณหภูมิของผนังคอล์มน์มีค่าเท่ากับ 383 K

$T_{\text{ขาเข้าคอล์มน์}}$ คือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าคอล์มน์มีค่าเท่ากับ 298 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับตัวแปรไร้หน่วยของความสูงของส่วนที่ไม่ให้ความร้อน (z/L) โดยที่ z คือความสูงของส่วนที่ไม่ให้ความร้อน และ L คือความสูงทั้งหมดของส่วนที่ไม่ให้ความร้อน (6 นิ้ว) ดังรูปที่ 3.4a และรูปที่ 3.4b



รูปที่ 3.4a กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยระหว่างอุณหภูมิ (θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของความสูงของส่วนที่ไม่ให้ความร้อน (z/L) [7]
รูปที่ 3.4b อุณหภูมิแต่ละส่วนของส่วนที่ไม่ให้ความร้อน [7]

ในการทดลองนี้ Michiel Nijemeisland และ Anthony G. Dixon [7] ใช้อากาศในการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนในท่อเบดบรรจุโดยนิยามตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม (d_p) กับคุณสมบัติของอากาศโดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Re = \frac{d_p v \rho}{\mu} \quad (3.2)$$

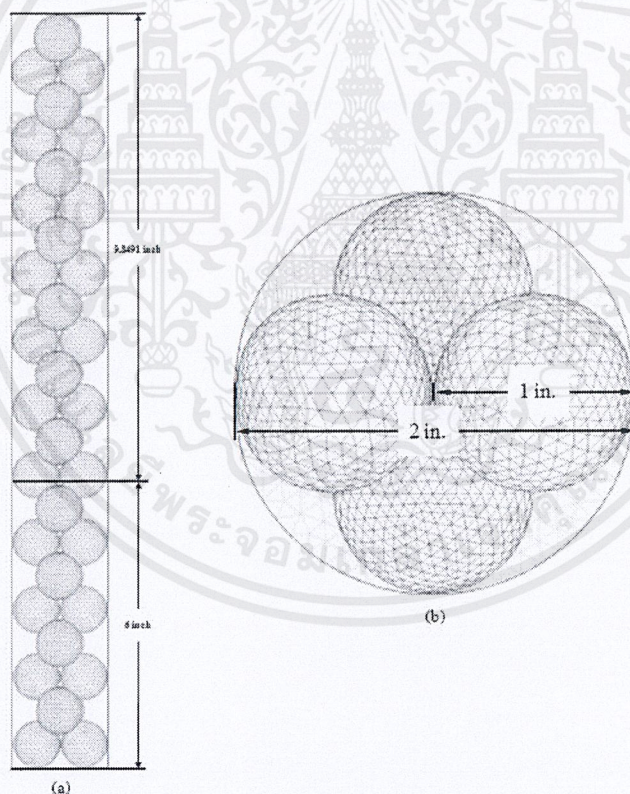
- โดยที่
- v คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)
 - ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (1.225 kg/m^3)
 - μ คือ ความหนืดของอากาศ ($1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 คำอธิบายแบบจำลอง gas-solid fixed bed [7]

จากชุดทดลองของ Michiel Nijemeisland และ Anthony G. Dixon [7] แบบจำลองที่สร้างขึ้นแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ โดยส่วนแรกคือ หอบดบรรจุ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น หอบดบรรจุที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ให้ความร้อน (Calming section) โดยส่วนที่ไม่ให้ความร้อนแบ่งเป็น 9 ส่วนย่อย ดังรูปที่ 3.4b และส่วนที่ให้ความร้อน (Heated section)

ส่วนที่สองคือแพ็คกิ้งที่เป็นอนุภาคทรงกลม เนื่องจากขีดจำกัดทางด้านเวลาในการสร้างกริดและขีดจำกัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงทำการลดขนาดรัศมีของอนุภาคทรงกลมจาก 0.5 นิ้ว เป็น 0.495 นิ้ว เรียกแบบจำลองนี้ว่า “near-miss model” ดังรูปที่ 3.5a และรูปที่ 3.5b



รูปที่ 3.5a หอบดบรรจุที่บรรจุอนุภาคทรงกลม 44 ลูก

รูปที่ 3.5b ลักษณะการจัดเรียงอนุภาคทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการทำการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 4 ตอน สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สรุปจำนวนการทดลองทั้งหมด

ตอนที่	ตัวแปรต้น	อัตราการไหล เข้า	ความสูง วัด	ค่าความเร่ง (g)	ของไหล	แบบจำลองความ ปั่นป่วน
1	อัตราการไหล ของของไหล	0.21451 m/s 1.10533 m/s	0.42 m	-	Air	Standard k-epsilon Model
2	ค่าความเร่งซึ่ง ทำให้เกิดแรง ดึงดูดของโลก	0.21451 m/s	0.42	- -9.81 m/s ²	Air	Standard k-epsilon Model
			1.62	- -9.81 m/s ²		
		1.10533 m/s	0.42	- -9.81 m/s ²	Air	Standard k-epsilon Model
			1.62	- -9.81 m/s ²		
3	ความ หนาแน่นของ ของไหล	0.21451 m/s	0.42 m	-	Air Water	Standard k-epsilon Model
4	แบบจำลอง ความปั่นป่วน	0.21451 m/s 1.10533 m/s	0.42 m 0.42 m	- -	Air Air	Standard k-epsilon RNG k-epsilon Model
						Standard k-epsilon RNG k-epsilon Model

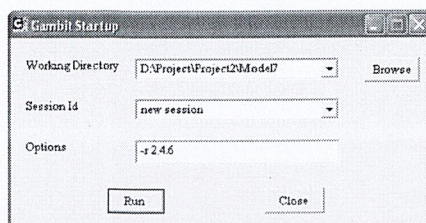
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นการคำนวณพลศาสตร์ของไหลทุกโปรแกรมจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ (I) Pre-processor (II) Solver (III) Post – processor โดยคณะผู้จัดทำได้เลือกโปรแกรมในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและการสร้างกริด (Pre-processor) คือ โปรแกรม Gambit 2.4.6 ส่วนในขั้นตอนการคำนวณและการแสดงผล (Solver and Post-processor) ใช้โปรแกรม Fluent 12.0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 (แบบจำลองที่ 1) [7]

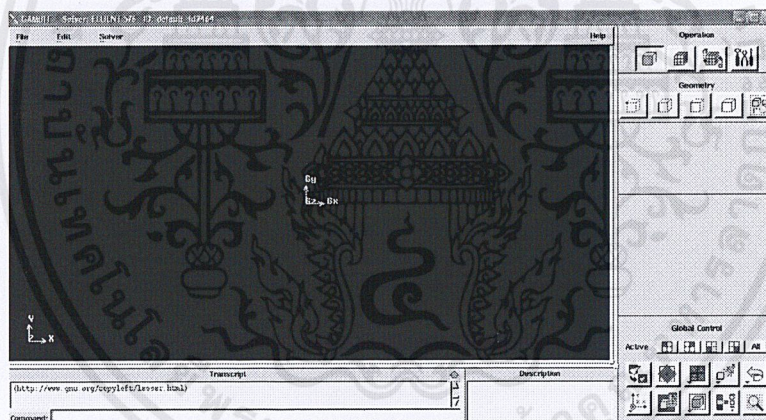
- ส่วนที่ 1 การสร้างแบบจำลอง

1. เลือก start/All Programs/Fluent Inc Products/Gambit 2.4.6/Gambit2.4.6 จะเห็นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หน้าต่างก่อนการเข้าโปรแกรม Gambit 2.4.6

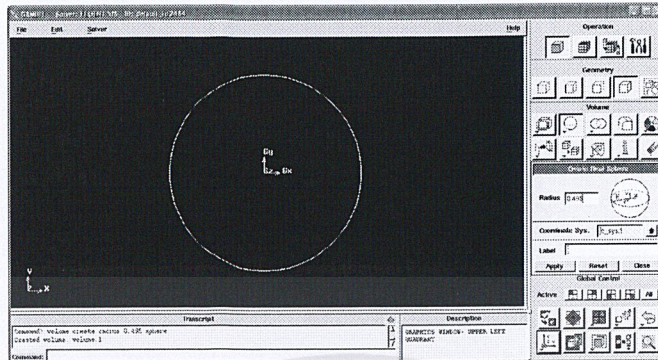
2. เลือก Working Directory และ Session Id ตามที่ต้องการ แล้วเลือก Run จะเห็นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โปรแกรม Gambit 2.4.6

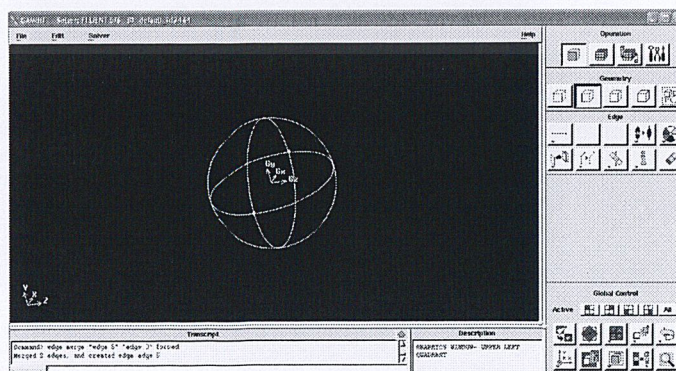
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สร้างทรงกลมโดยเลือก Geometry/Volume/Sphere/Create Real Sphere กำหนดขนาดรัศมีเท่ากับ 0.495 แล้วเลือก Apply แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ทรงกลมที่มีขนาดเท่ากับ 0.495

4. สร้างเส้นขอบบนทรงกลม 4 เส้น โดยวิธีตัดทรงกลมด้วยระนาบ ดังนี้
- 4.1 เลือก Geometry/Face/Circle/Create Real Circular Face กำหนดขนาดรัศมีเท่ากับ 1 เลือก ระนาบ XY แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำอีกครั้งหนึ่งแต่เปลี่ยนจากระนาบ XY เป็นระนาบ XZ)
 - 4.2 เลือก Geometry/Volume/Split Volume เลือกทรงกลม (volume.1) เปลี่ยน Split With จาก Volumes (Real) เป็น Faces (Real) เลือกระนาบที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 4.1 (face.2 และ face.3) แล้วเลือก Apply
 - 4.3 เลือก Geometry/Volume/Merge Volume เลือกส่วนของทรงกลม (volume.1 ถึง volume.4) แล้วเลือก Apply
 - 4.4 เลือก Geometry/Edge/Merge Edges เลือกเส้นขอบ (edge.3 และ edge.5) แล้วเลือก Apply จะได้ทรงกลมที่มีเส้นขอบ 4 เส้น แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ทรงกลมที่มีเส้นขอบ 4 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สร้างทรงกลม 44 ลูก ดังนี้

5.1 เลือก Geometry/Volume/ Move/Copy Volumes เลือกทรงกลม (volume.1) เลือก Move กำหนด Operation เป็น Translate กำหนด Global x, y, z เป็น 0, 0, 0.5 แล้วเลือก Apply

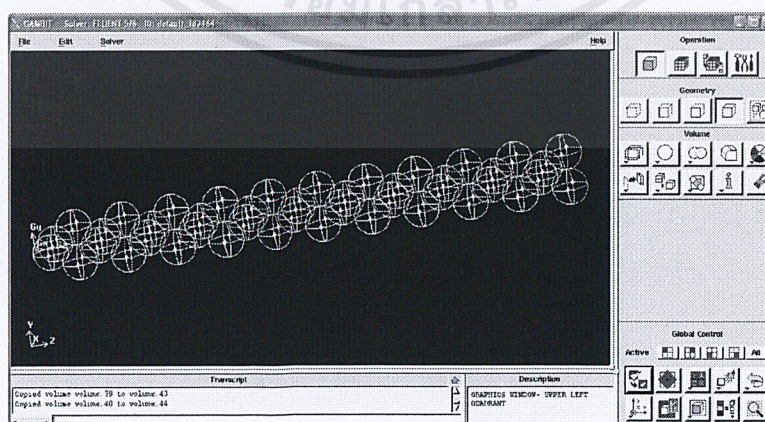
5.2 เลือก Geometry/Volume/ Move/Copy Volumes เลือกทรงกลม (volume.1) เลือก Copy พร้อมกำหนดจำนวน Copy เท่ากับ 3 กำหนด Operation เป็น Translate กำหนด Global x, y, z เป็น 0, 0, 0 แล้วเลือก Apply

5.3 เลือก Geometry/Volume/ Move/Copy Volumes เลือกทรงกลม (volume.1) เลือก Move กำหนด Operation เป็น Translate กำหนด Global x, y, z เป็น 0.5, 0, 0 แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำอีกครั้งแต่เปลี่ยนจาก volume.1 เป็น volume.2 แล้วเปลี่ยน Global x, y, z จาก 0.5, 0, 0 เป็น -0.5, 0, 0)

5.4 เลือก Geometry/Volume/ Move/Copy Volumes เลือกทรงกลม (volume.3 และ volume.4) เลือก Move กำหนด Operation เป็น Translate กำหนด Global x, y, z เป็น 0, 0, 0.7071 แล้วเลือก Apply

5.5 เลือก Geometry/Volume/ Move/Copy Volumes เลือกทรงกลม (volume.3) เลือก Move กำหนด Operation เป็น Translate กำหนด Global x, y, z เป็น 0, 0.5, 0 แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำอีกครั้งแต่เปลี่ยนจาก volume.3 เป็น volume.4 แล้วเปลี่ยน Global x, y, z จาก 0, 0.5, 0 เป็น 0, -0.5, 0)

5.6 เลือก Geometry/Volume/ Move/Copy Volumes เลือกทรงกลม (volume.1 ถึง volume.4) เลือก Copy พร้อมกำหนดจำนวน Copy เท่ากับ 10 กำหนด Operation เป็น Translate กำหนด Global x, y, z เป็น 0, 0, 1.4142 แล้วเลือก Apply จะได้ทรงกลม 44 ลูก แสดงดัง รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ทรงกลม 44 ลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สร้างคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 2 นิ้ว สูง 22 นิ้ว และแบ่งส่วนเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ให้ความร้อน (Calming section) และส่วนที่ให้ความร้อน (Heated section) ดังนี้

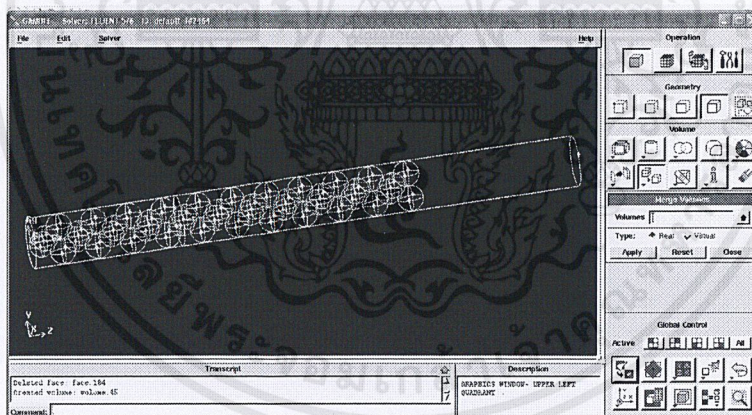
6.1 สร้างทรงกระบอกโดยเลือก Geometry/Volume/Cylinder/Create Real Cylinder กำหนดขนาดรัศมีเท่ากับ 1 ความสูง 22 และกำหนด Axis Location เป็น Positive Z แล้วเลือก Apply

6.2 สร้างระนาบเพื่อแบ่งคอลัมน์เป็น 2 ส่วนโดยเลือก Geometry/Face/Circle/Create Real Circular Face กำหนดขนาดรัศมีเท่ากับ 1.25 เลือกระนาบ XY แล้วเลือก Apply

6.3 เลือก Geometry/Face/ Move/Copy Faces เลือกระนาบที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 6.2 (face.184) เลือก Move กำหนด Operation เป็น Translate กำหนด Global x, y, z เป็น 0, 0, 6 แล้วเลือก Apply

6.4 เลือก Geometry/Volume/Split Volume เลือกทรงกระบอก (volume.45) เลือก Split With เป็น Faces (Real) เลือกระนาบที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 6.2 (face.184) แล้วเลือก Apply

6.5 เลือก Geometry/Volume/Merge Volume เลือกทรงกระบอก (volume.45 และ volume.46) แล้วเลือก Apply จะได้ทรงกระบอกที่แบ่งเป็น 2 ส่วน แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ทรงกระบอกที่แบ่งเป็น 2 ส่วน

7. แบ่งส่วนที่ไม่ให้ความร้อนเป็น 9 ส่วน เพื่อใช้กำหนดอุณหภูมิของการนำความร้อนจากส่วนที่ให้ความร้อน (Calming section) มาที่ส่วนไม่ให้ความร้อน (Heated section) ดังนี้

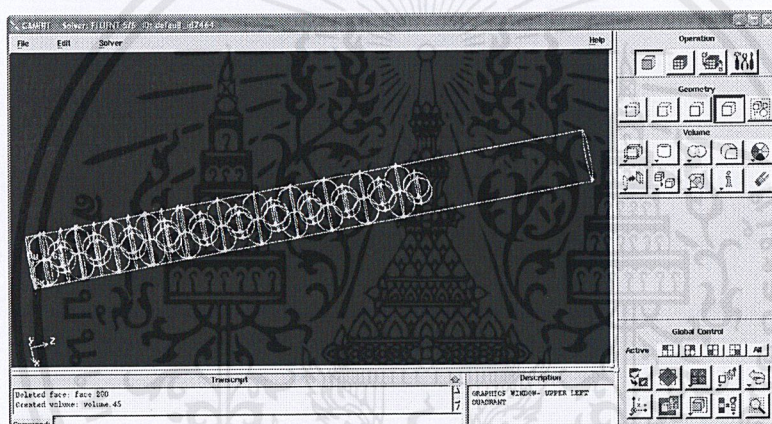
7.1 สร้างระนาบเพื่อแบ่งคอลัมน์ในส่วนที่ไม่ให้ความร้อนเป็น 9 ส่วน โดยเลือก Geometry/Face/Circle/Create Real Circular Face กำหนดขนาดรัศมีเท่ากับ 1.25 เลือกระนาบ XY แล้วเลือก Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 เลือก Geometry/Face/Move/Copy Faces เลือกระนาบที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 7.1 (face.186) เลือก Move กำหนด Operation เป็น Translate กำหนด Global x, y, z เป็น 0, 0, 5.34 แล้วเลือก Apply

7.3 เลือก Geometry/Volume/Split Volume เลือกทรงกระบอก (volume.45) เลือก Split With เป็น Faces (Real) เลือกระนาบที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 7.1 (face.186) แล้วเลือก Apply

7.4 เลือก Geometry/Volume/Merge Volume เลือกทรงกระบอก (volume.45 และ volume.46) แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำขั้นตอนที่ 7.1 ถึง 7.4 แต่เปลี่ยน Global z จาก 5.34 เป็น 4.68, 4.02, 3.36, 2.64, 1.98, 1.32 และ 0.66 ตามลำดับ) จะได้คอลัมน์ที่มีการแบ่งส่วนอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 คอลัมน์ที่มีการแบ่งส่วนอย่างสมบูรณ์

8. สร้างสนามการไหลของอากาศเพื่อให้โปรแกรม Fluent ทราบว่ามีการไหลของอากาศส่วนใดบ้าง โดยเลือก Geometry/Volume/Split Volume เลือกทรงกระบอก (volume.45) เลือก Split With เป็น Volumes (Real) เลือกทรงกลมทั้งหมดที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 5 (volume.1 ถึง volume.44) แล้วเลือก Apply

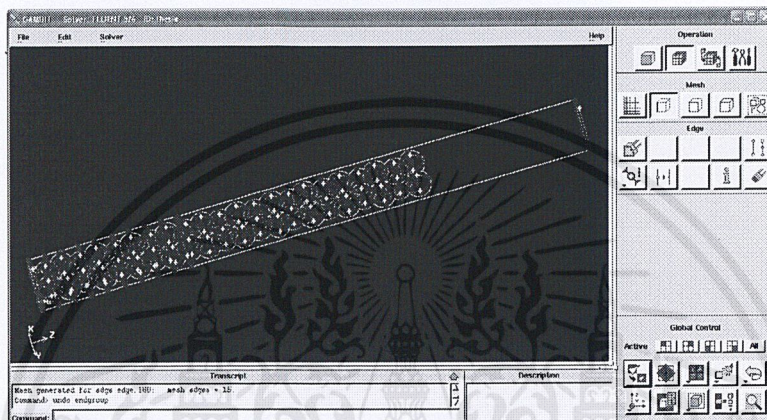
- ส่วนที่ 2 การสร้างกริด (Grid Generation or Mesh Generation)

1. การสร้างกริดบนเส้นขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 เลือก Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ (edge.181, edge.182, edge.184, edge.186, edge.188, edge.190, edge.192, edge.194, edge.196, edge.198, edge.200) กำหนด Spacing โดยเปลี่ยน Interval size เป็น Interval count พร้อมกำหนด Interval count เท่ากับ 60 แล้วเลือก Apply

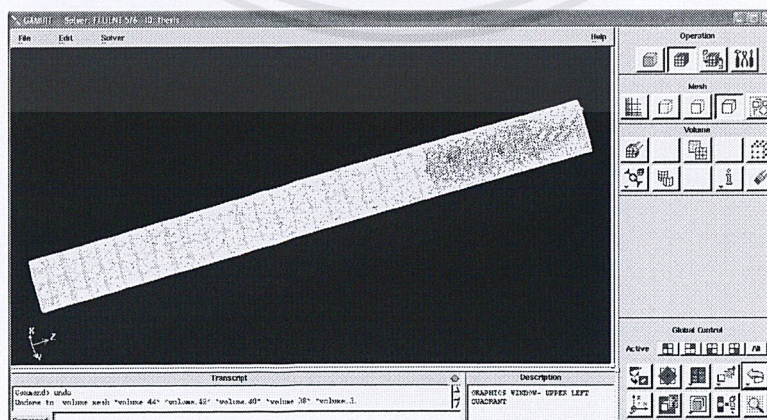
1.2 เลือก Mesh/Edge/Mesh Edge เลือกเส้นขอบ (เลือกทุกเส้นขอบ ยกเว้นเส้นขอบที่กำหนดไว้ในข้อที่ 1.1) กำหนด Spacing เป็น Interval count พร้อมกำหนด Interval count เท่ากับ 15 แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แบบจำลองที่มีการสร้างกริดบนเส้นขอบอย่างสมบูรณ์

2. การสร้างกริดบนพื้นผิว

เลือก Mesh/Face/Mesh Faces เลือกพื้นผิวทุกพื้นผิว กำหนด Elements เป็น Tri และ Type เป็น Pave แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการกำหนดกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.14

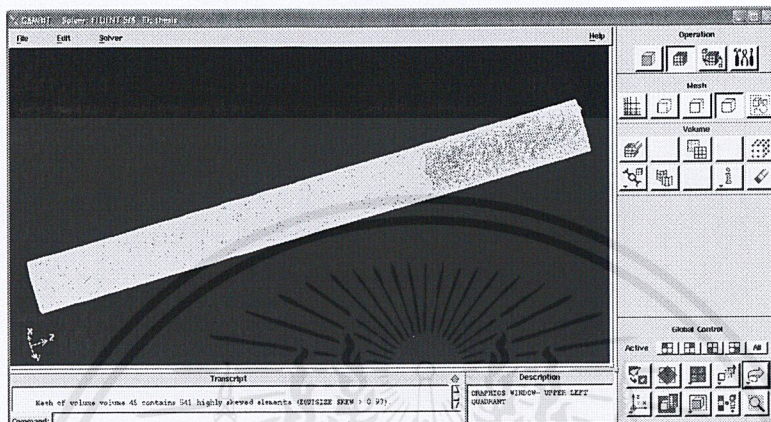


รูปที่ 3.14 แบบจำลองที่มีการสร้างกริดบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การสร้างกริดในปริมาตร

เลือก Mesh/volume/Mesh volumes เลือกปริมาตรทั้งหมด กำหนด Elements เป็น Tet/Hybrid และ Type เป็น TGrid แล้วเลือก Apply จะได้แบบจำลองที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แบบจำลองที่มีการสร้างกริดในปริมาตรอย่างสมบูรณ์

4. การกำหนด Boundary และ Continuum

4.1 เลือก Zones/Specify Boundary Types เลือกพื้นผิว (face.181) กำหนด Name เป็น Inlet พร้อมกำหนด Type เป็น VELOCITY_INLET แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำแต่เปลี่ยนพื้นผิว เปลี่ยน Name และเปลี่ยน Type ตามตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2 การกำหนด Boundary แต่ละพื้นผิว

พื้นผิว	Name	Type
face.183	Outlet	PRESSURE_OUTLET
face.201	Wall-In1	WALL
face.199	Wall-In2	WALL

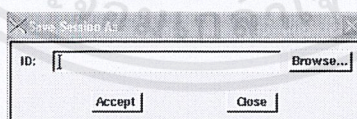
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

face.197	Wall-In3	WALL
face.195	Wall-In4	WALL
face.193	Wall-In5	WALL
face.191	Wall-In6	WALL
face.189	Wall-In7	WALL
face.187	Wall-In8	WALL
face.185	Wall-In9	WALL
face.182	Wall-Out1	WALL
เลือกทุกพื้นผิวยกเว้นพื้นผิวที่เลือกไปแล้วข้างต้น	Wall-Bed	WALL

4.2 เลือก Zones/Specify Continuum Types เลือกปริมาตร (volume.45) กำหนด Name เป็น Air พร้อมกำหนด Type เป็น FLUID แล้วเลือก Apply (ทำซ้ำแต่เปลี่ยนปริมาตรเป็น volume.1 ถึง volume.44 เปลี่ยน Name เป็น Bed และเปลี่ยน Type เป็น SOLID)

5. การบันทึกข้อมูล

5.1 เลือก File/Save As จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 หน้าต่างการบันทึกข้อมูล

5.2 พิมพ์ ID ตามต้องการ แล้วเลือก Accept

6. การบันทึก Mesh เพื่อส่งไปคำนวณในโปรแกรม Fluent 12.0.16

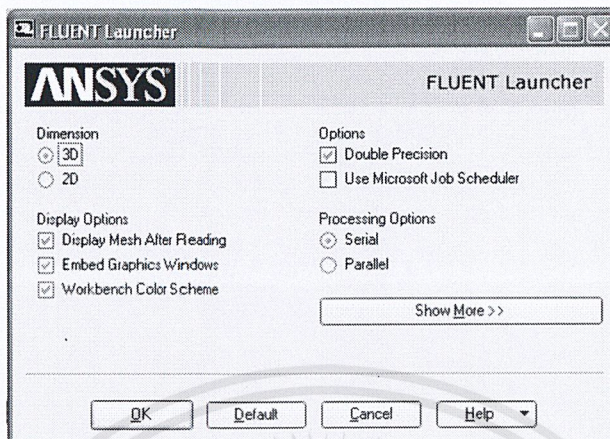
6.1 เลือก File/Export/Mesh ตรวจสอบ File Name ว่าถูกต้องหรือไม่ ถ้าถูกต้องแล้วเลือก

Accept

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

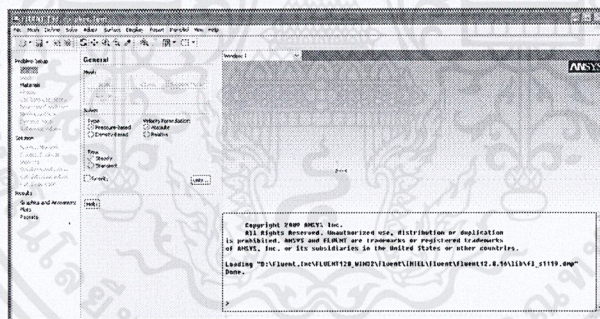
- ส่วนที่ 3 การคำนวณโดยโปรแกรม Fluent 12.0.16

1. เลือก Fluent 12.0.16 จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.17



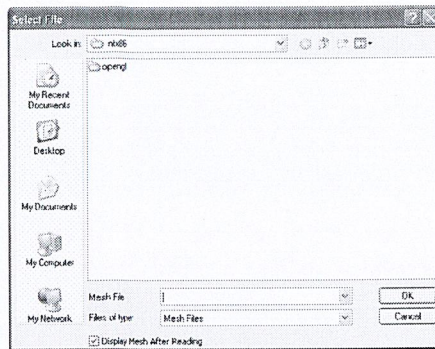
รูปที่ 3.17 หน้าต่างก่อนเข้าโปรแกรม Fluent 12.0.16

2. กำหนด Dimension เป็น 3D และกำหนด Options เป็น Double Precision แล้วเลือก OK จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.18



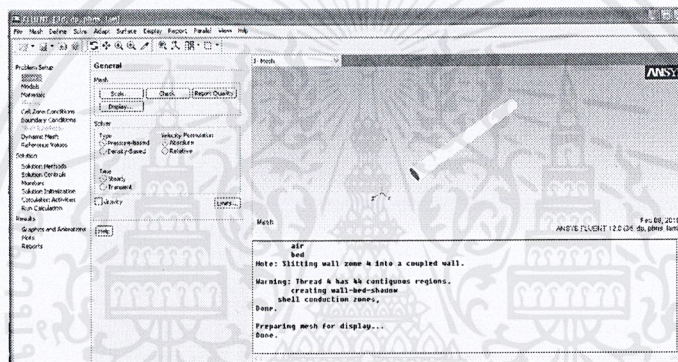
รูปที่ 3.18 โปรแกรม Fluent 12.0.16

3. เลือก File/Read/Mesh จะเห็นหน้าต่างดังรูปที่ 3.19



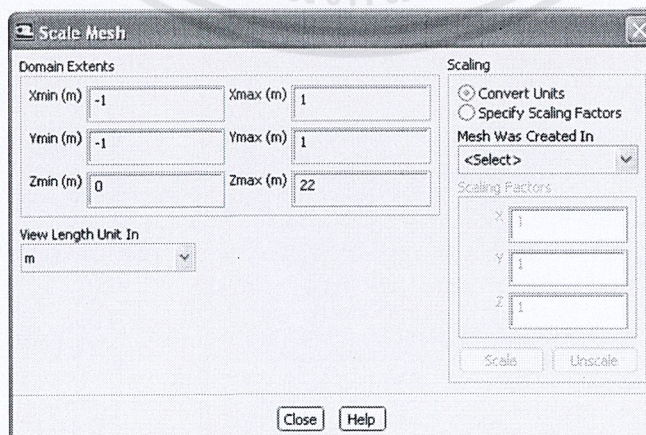
รูปที่ 3.19 หน้าต่างการเลือกไฟล์

4. เลือกไฟล์ (.msh) ที่บันทึกเอาไว้ แล้วเลือก OK โปรแกรมจะแสดงแบบจำลองที่เลือกดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แบบจำลองที่จะนำมาคำนวณ โดยโปรแกรม Fluent 12.0.16

5. เลือก General/Mesh/Check โปรแกรมจะทำการตรวจสอบแบบจำลองที่เลือก
6. เลือก General/Mesh/Scale โปรแกรมจะแสดงดังรูปที่ 3.21



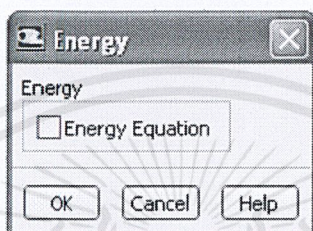
รูปที่ 3.21 หน้าต่างการกำหนดขนาดของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดขนาดแบบจำลอง เนื่องจากโปรแกรม Gambit 2.4.6 ไม่มีหน่วยตั้งนั้นก่อนทำการคำนวณ ต้องกำหนดหน่วยของแบบจำลองก่อน ด้วยการเลือก Mesh Was Created In เป็น in แล้วเลือก Scale โปรแกรมจะคำนวณขนาดของแบบจำลอง แล้วเลือก Close

7. ตั้งค่าสมการที่ใช้ในการจำลอง

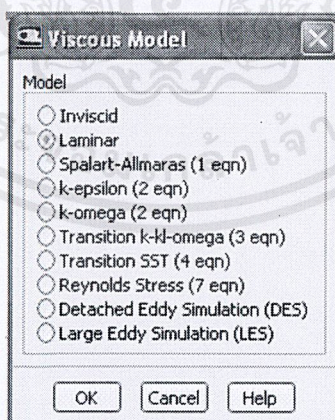
7.1 เลือก Models แล้วเลือก Energy – Off แล้วเลือก Edit โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 หน้าต่างการตั้งค่าสมการพลังงาน

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

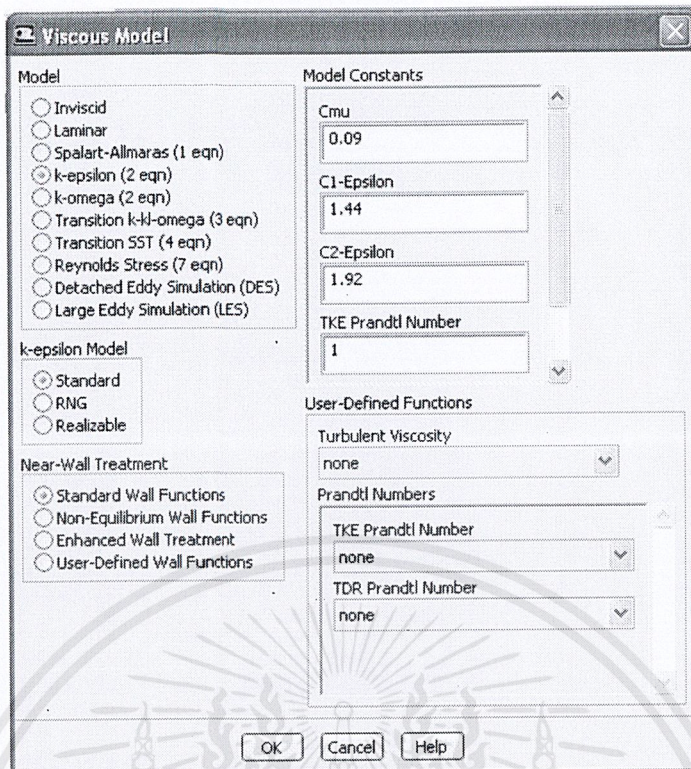
7.2 เลือก Models แล้วเลือก Viscous – Laminar แล้วเลือก Edit โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 หน้าต่างเลือกสมการการไหล

เลือก k-epsilon (2 eqn) โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.24

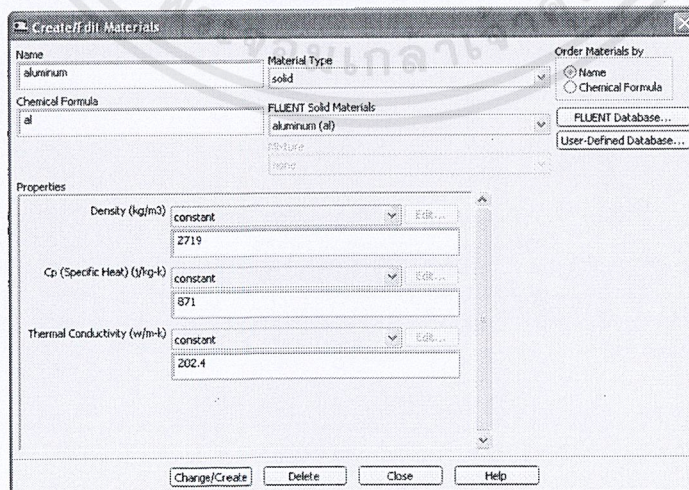
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 หน้าต่างการตั้งค่าของ k-epsilon Model

กำหนด k-epsilon Model เป็น Standard พร้อมกำหนด Near-Wall Treatment เป็น Enhanced Wall Treatment แล้วเลือก OK

8. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ด้วยการเลือก Materials/aluminum เลือก Create/Edit โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.25



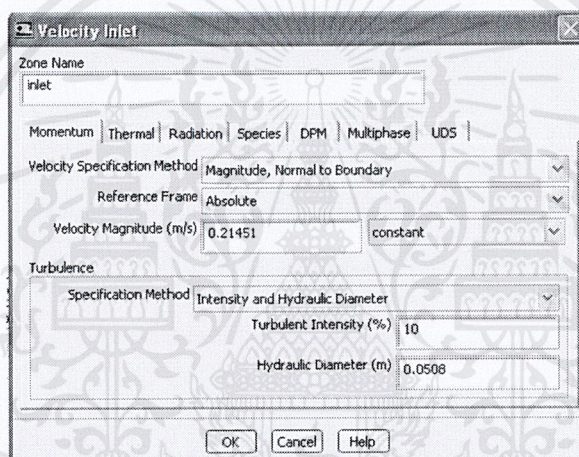
รูปที่ 3.25 หน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยน Name จาก aluminum เป็น nylon และเปลี่ยน Chemical Formula จาก al เป็น nylon พร้อมกำหนด Density เท่ากับ $1,300 \text{ kg/m}^3$, Cp (Specific Heat) เท่ากับ $1,000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ และ Thermal Conductivity เท่ากับ $0.242 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ แล้วเลือก Change/Create โปรแกรมจะถามว่า “Change/Create mixture and Overwrite aluminum?” ให้เลือก Yes แล้วเลือก Close

9. กำหนด Boundary Conditions

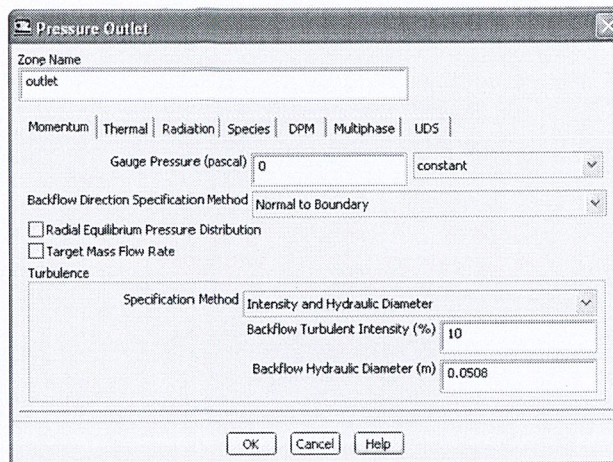
9.1 กำหนด Boundary condition ของอากาศขาเข้า ด้วยการเลือก Boundary Conditions/inlet เลือก edit กำหนดค่าตัวแปรตามรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การกำหนด Boundary Condition ของ inlet

และเลือก Thermal กำหนด Temperature (K) เท่ากับ 298 เลือก OK

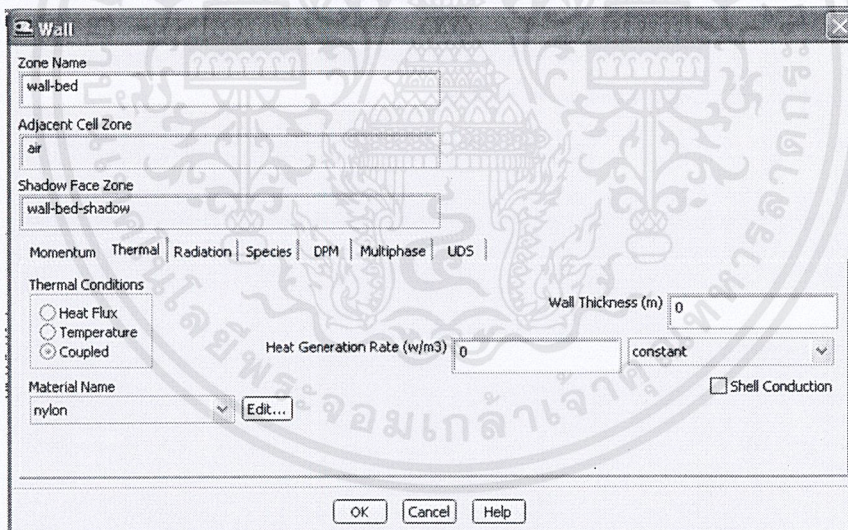
9.2 กำหนด Boundary condition ของอากาศขาออก ด้วยการเลือก Boundary Conditions/outlet เลือก edit กำหนดค่าตัวแปรตามรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 การกำหนด Boundary Condition ของ outlet

และเลือก Thermal กำหนด Temperature (K) เท่ากับ 298 เลือก OK

9.3 กำหนด Boundary condition ของเบด ด้วยการเลือก Boundary Conditions/wall-bed เลือก edit กำหนดค่าตัวแปรตามรูปที่ 3.28

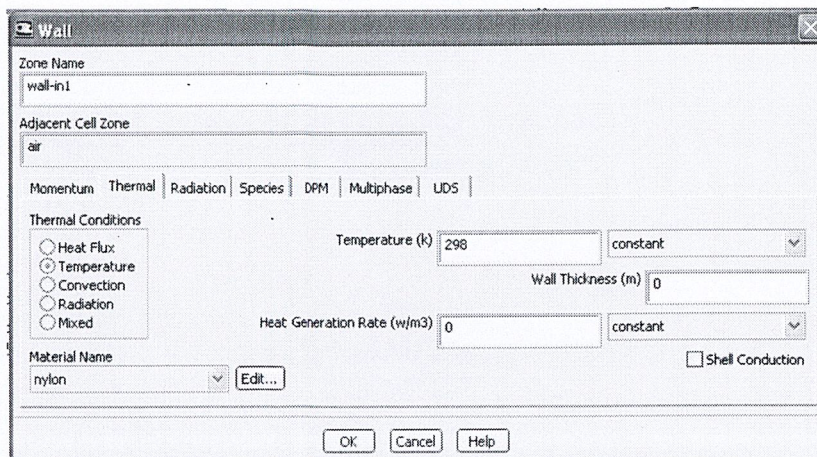


รูปที่ 3.28 การกำหนด Boundary Condition ของ wall-bed

(ทำซ้ำแต่เปลี่ยนจาก wall-bed เป็น wall-bed-shadow)

9.4 กำหนด Boundary condition ของคอลัมน์ ด้วยการเลือก Boundary Conditions/wall-in1 เลือก edit กำหนดค่าตัวแปรตามรูปที่ 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 การกำหนด Boundary Condition ของ wall-in1

(ทำซ้ำแต่เปลี่ยน Zone และอุณหภูมิตามตารางที่ 3.3)

ตารางที่ 3.3 ค่าอุณหภูมิของแต่ละส่วน

Zone	Temperature (K)
wall-in2	298.43
wall-in3	298.86
wall-in4	299.29
wall-in5	299.70
wall-in6	302.25
wall-in7	305.65
wall-in8	313.30
wall-in9	352.40
wall-out1	383.00

10. เลือก Solution Methods แล้วกำหนดวิธีการหาคำตอบตามตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 การกำหนด Solution Method

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

11. เลือก Solution Controls แล้วกำหนด Under-Relaxation Factors ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่า Under-Relaxation Factors สำหรับแบบจำลอง Standard k-epsilon ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373

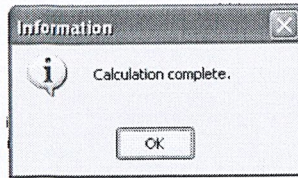
Pressure	0.02	Turbulent Kinetic Energy	0.8
Density	1	Turbulent Dissipation Rate	0.8
Body Forces	1	Turbulent Viscosity	1
Momentum	0.01	Energy	0.8

12. เลือก File/Write/Case ตั้งชื่อตามที่ต้องการ แล้วเลือก OK

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

14. เลือก Run Calculation แล้วเลือก Calculate โปรแกรมก็จะเริ่มทำการคำนวณ เมื่อการคำนวณเสร็จสิ้น โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



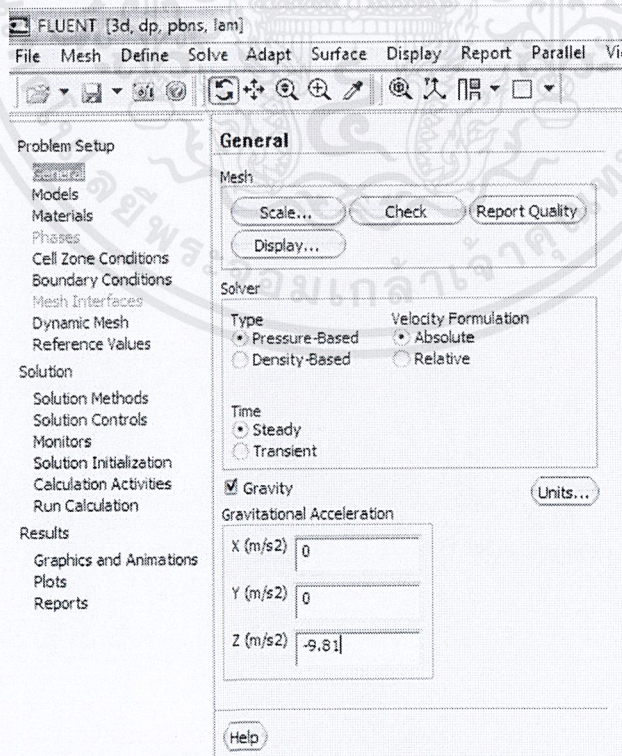
รูปที่ 3.30 หน้าต่างแสดงการคำนวณเสร็จสิ้น

15. เลือก File/Write/Case & Data พิมพ์ชื่อตามที่ต้องการแล้วเลือก OK
16. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยน Boundary condition ของอากาศขาเข้าจากความเร็ว 0.21451 m/s เป็น 1.10533 m/s แล้วทำการคำนวณใหม่
17. เมื่อทำการทดลองครั้งที่ 2 เสร็จแล้ว ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 16 แต่เปลี่ยน k-epsilon Model จาก Standard เป็น RNG

ตอนที่ 2

ทำการจำลองเช่นเดียวกับตอนที่ 1 แต่เพิ่มจากขั้นตอนที่ 6 ดังนี้

1. General ทำเครื่องหมายถูกที่ Gravity แล้วกำหนดค่า - 9.81m/s² ดังรูป



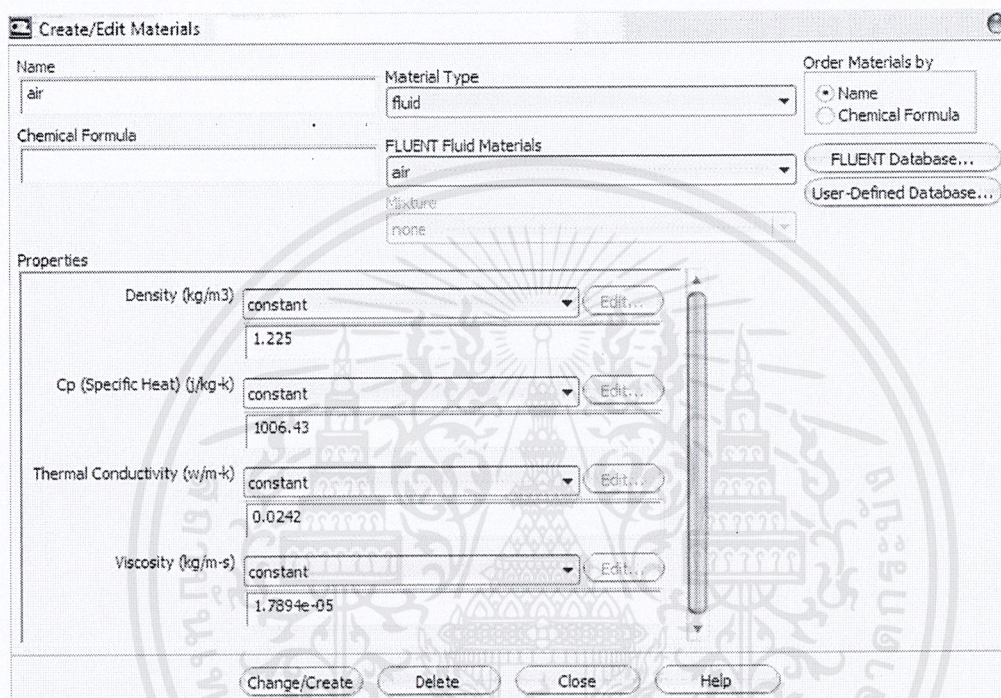
รูปที่ 3.31 หน้าต่างการกำหนด gravity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3

ทำการจำลองเช่นเดียวกับตอนที่ 1 แต่เพิ่มจากชั้นตอนที่ 8 ดังนี้

1. เลือก Materials/air เลือก Create/Edit โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูป



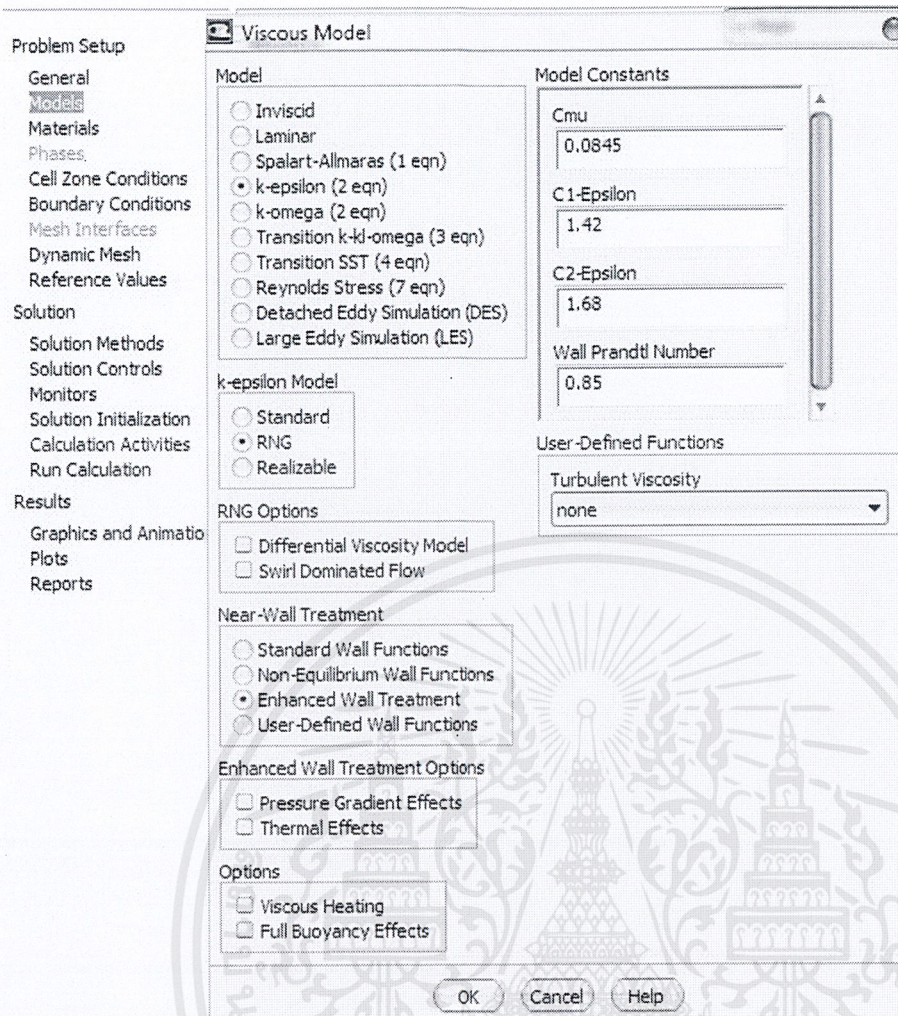
รูปที่ 3.32 หน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

เปลี่ยน Name จาก air เป็น water-liquid และเปลี่ยน Chemical Formula เป็น H_2O <|> พร้อมกำหนด Density เท่ากับ 998.2 kg/m^3 , Cp (Specific Heat) เท่ากับ $4,182 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ และ Thermal Conductivity เท่ากับ $0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ Viscosity เท่ากับ $0.001003 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ แล้วเลือก Change/Create โปรแกรมจะถามว่า “ Change/Create mixture and Overwrite aluminum? ” ให้เลือก Yes แล้วเลือก Close

ตอนที่ 4

ทำการจำลองเช่นเดียวกับตอนที่ 1 แต่เปลี่ยนข้อ 7.2 จาก Standard เป็น RNG ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 หน้าต่างการตั้งค่าของ RNG

3.5 วิธีการเก็บผลการจำลอง

ตอนที่ 1

1. เลือก Surface/Plane แล้วเลือกค่าต่างๆ ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Plane Surface

Options

Aligned with Surface
 Aligned with View Plane
 Point and Normal
 Bounded
 Sample Points
 Plane Tool

Sample Density

Edge 1
Edge 2

Surfaces

default-interior
default-interior:001
inlet
outlet
wall-bed
wall-bed-shadow
wall-in1
wall-in2
wall-in3

Points

x0 (m)	x1 (m)	x2 (m)
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
y0 (m)	y1 (m)	y2 (m)
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="-0.0254"/>	<input type="text" value="0.0254"/>
z0 (m)	z1 (m)	z2 (m)
<input type="text" value="0.42"/>	<input type="text" value="0.5588"/>	<input type="text" value="0.5588"/>

Normal

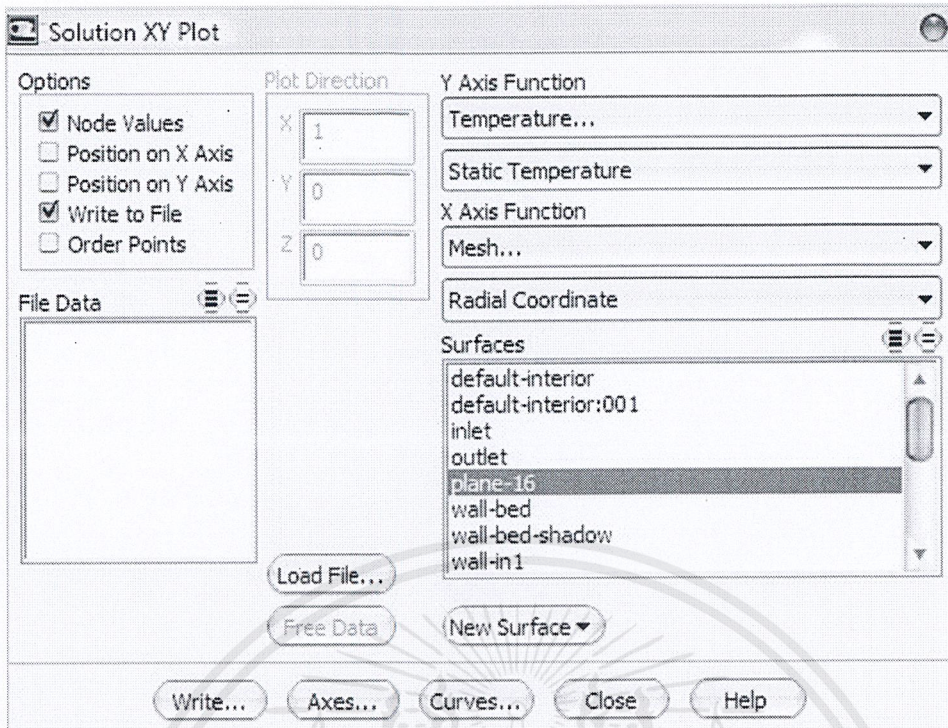
ix (m)
<input type="text" value="0"/>
iy (m)
<input type="text" value="0"/>
iz (m)
<input type="text" value="1"/>

New Surface Name

รูปที่ 3.34 หน้าต่างการสร้างกราฟระนาบต่างๆ

- เลือก Create/Close
- เลือก Plot/XY Plot/Set Up แล้วเลือกค่าต่างๆดังรูป โดยแถบเลือกสีน้ำเงินให้อยู่เฉพาะ Plane ที่เราสร้างใหม่ ในรูปคือ Plane -16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 หน้าต่างการสร้างกราฟ plane - 16

4. เลือก Write จากนั้นตั้งชื่อตามต้องการ
5. เลือกสถานที่จัดเก็บตามต้องการ จากนั้นกด OK
6. จะได้ไฟล์อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนระนาบที่ความสูง 0.42 m

ตอนที่ 2

1. เลือก Surface/Line/Rake

ถ้าความสูงวัดเท่ากับ 0.42 เลือกค่าต่างๆดังรูป

Line/Rake Surface

Options Line Tool

Type: Line Number of Points: 10

End Points

x0 (m)	-0.0254	x1 (m)	0.0254
y0 (m)	0	y1 (m)	0
z0 (m)	0.42	z1 (m)	0.42

Select Points with Mouse

New Surface Name: line-17

รูปที่ 3.36 หน้าต่างการสร้างกราฟที่ความสูง 0.42

ถ้าความสูงวัดเท่ากับ 1.62 เลือกราค่าต่างๆดังรูป

Line/Rake Surface

Options Line Tool

Type: Line Number of Points: 10

End Points

x0 (m)	-0.0254	x1 (m)	0.0254
y0 (m)	0	y1 (m)	0
z0 (m)	1.62	z1 (m)	1.62

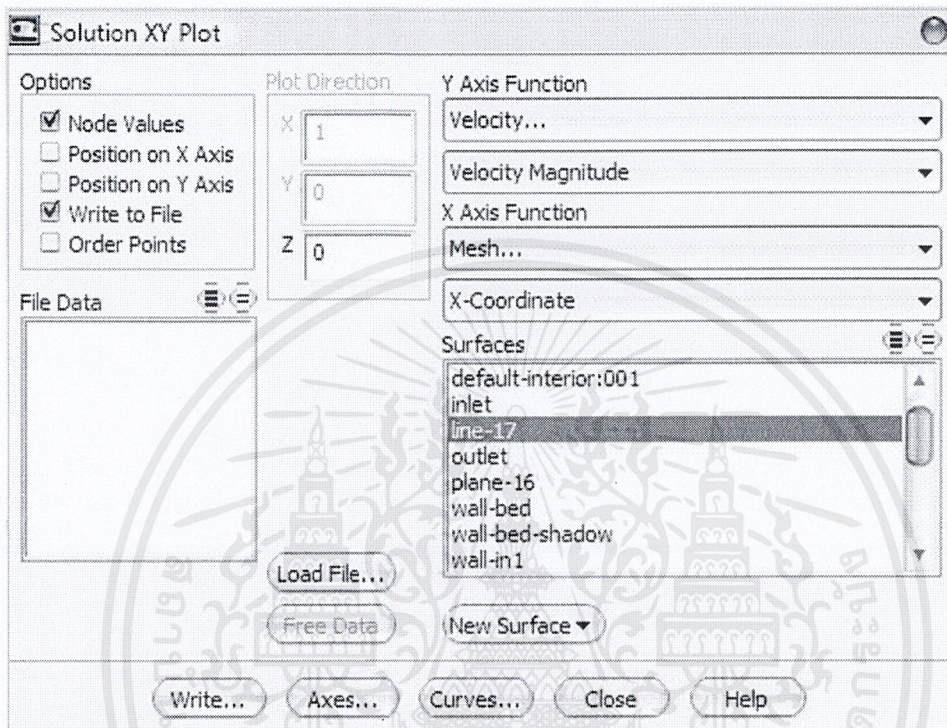
Select Points with Mouse

New Surface Name: line-17

รูปที่ 3.37 หน้าต่างการสร้างกราฟที่ความสูง 1.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เลือก Create/Close
3. เลือก Plot/XY Plot/Set Up แล้วเลือกค่าต่างๆดังรูป โดยแถบเลือกสีน้ำเงินให้อยู่เฉพาะ Line ที่เราสร้างใหม่ ในรูปคือ line-17



รูปที่ 3.38 หน้าต่างการสร้างกราฟ line -17

4. เลือก Write จากนั้นตั้งชื่อตามต้องการ
5. เลือกสถานที่จัดเก็บตามต้องการ จากนั้นกด OK
6. จะได้ไฟล์ข้อมูลหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนเส้นที่ความสูง 0.42 m และ 1.62 m

ตอนที่ 3 และตอนที่ 4 ทำเช่นเดียวกันกับตอนที่ 1

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลอง

ตอนที่ 1

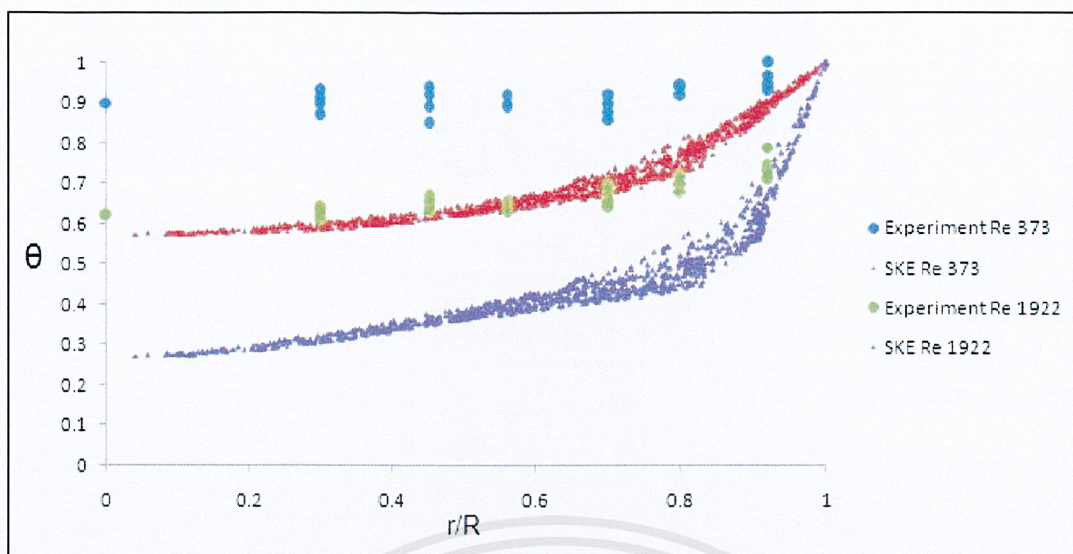
ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลอง Standard k-ε ในการทำนายพฤติกรรมของอากาศ ซึ่งไหลผ่านเบ็ดด้วยอัตราการไหลของอากาศเข้าคอลัมน์เท่ากับ 0.21451 เมตรต่อวินาที ($Re = 373$) และ 1.10533 เมตรต่อวินาที ($Re = 1922$) สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (θ) โดยที่

$$\theta = \frac{T - T_{\text{ขาเข้าคอลัมน์}}}{T_{\text{ผนังคอลัมน์}} - T_{\text{ขาเข้าคอลัมน์}}}$$

เมื่อ $T_{\text{ผนังคอลัมน์}}$ เท่ากับ 383 K

$T_{\text{ขาเข้าคอลัมน์}}$ เท่ากับ 298 K

กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอลัมน์ (r/R) โดยที่ r คือความยาวตามแนวรัศมีคอลัมน์และ R คือความยาวทั้งหมดของรัศมีคอลัมน์ (0.0254 เมตร) ดังรูป



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอลัมน์ (r/R) ของตอนที่ 1 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 และ 1922

ตอนที่ 2

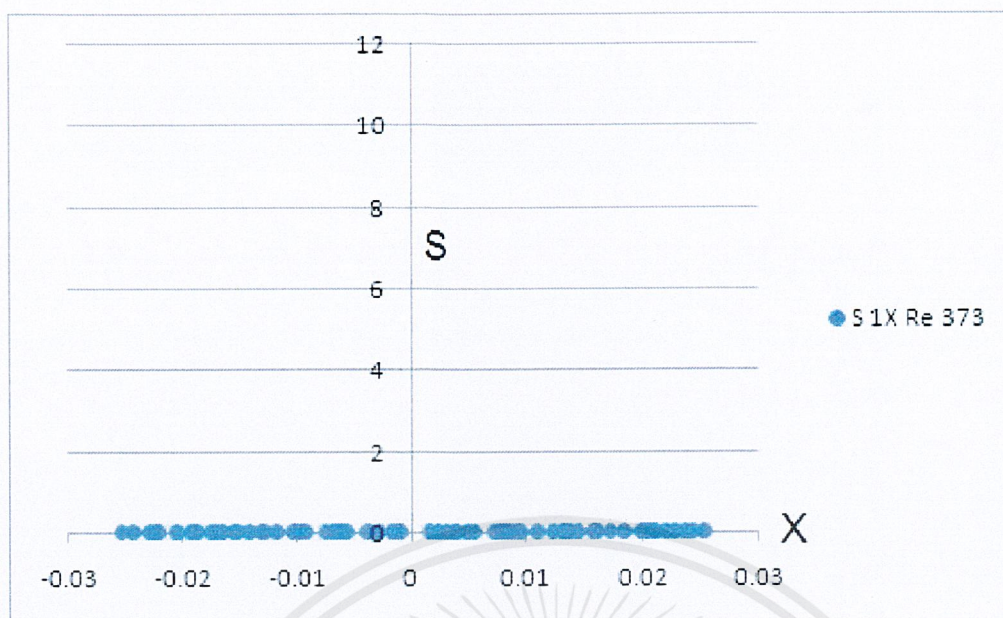
ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ในการทำนายพฤติกรรมของอากาศซึ่งไหลผ่านเบดด้วยอัตราการไหลของอากาศเข้าคอลัมน์เท่ากับ 0.21451 เมตรต่อวินาที ($Re = 373$) และ 1.10533 เมตรต่อวินาที ($Re = 1922$) สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว (S) โดยที่

$$S = \frac{|\Delta v|}{10^{-6}}$$

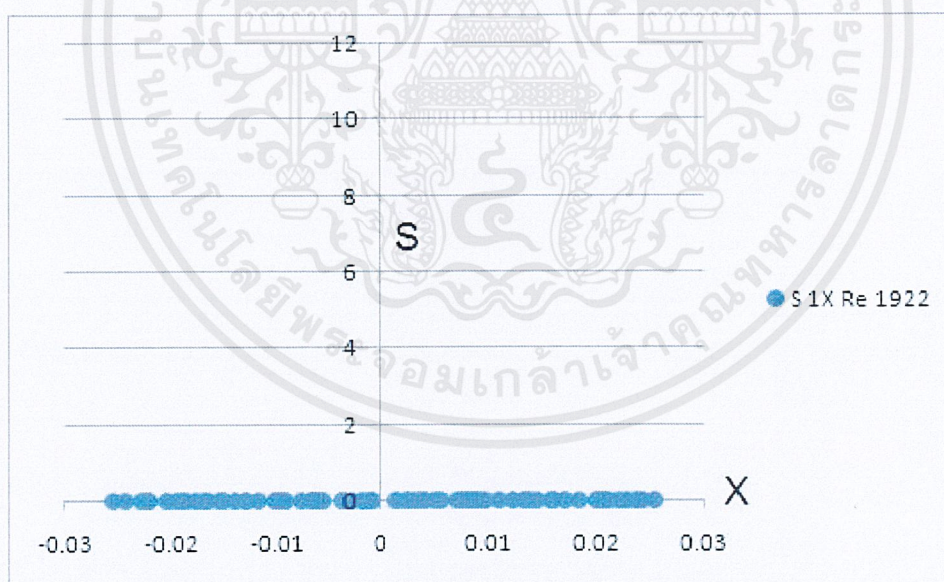
เมื่อ v = ความเร็วของกรณีไม่มี g และมี g ในตำแหน่งเดียวกัน

กับตัวแปรระยะทาง (X) โดย X คือระยะทางในแนวแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

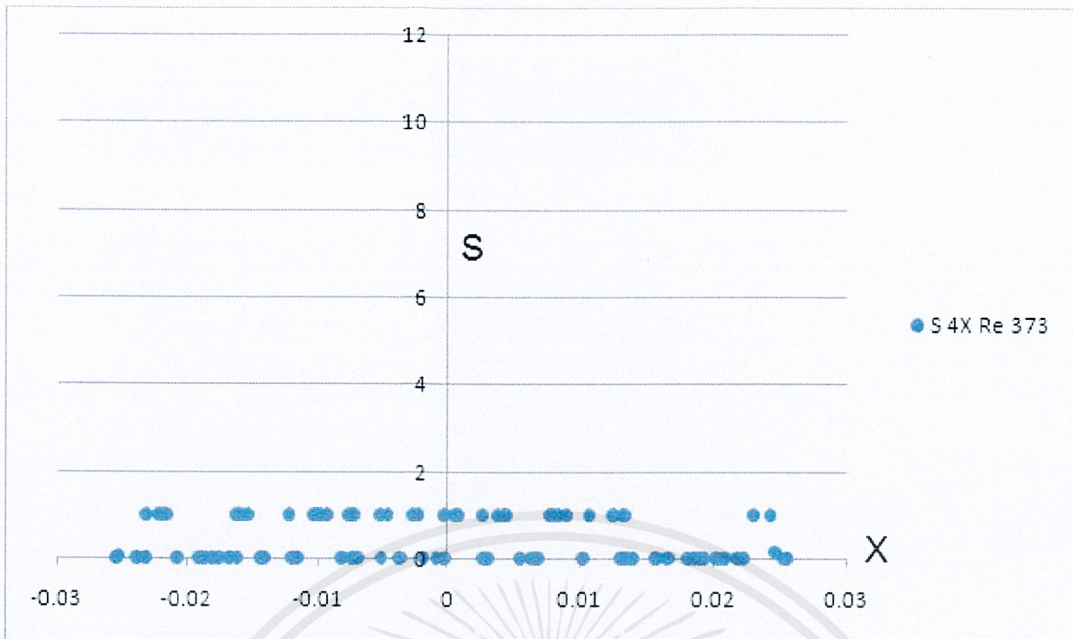


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว (S) กับตัวแปรระยะทาง (X) ของตอนที่ 2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 ที่ความสูงวัด 0.42 m

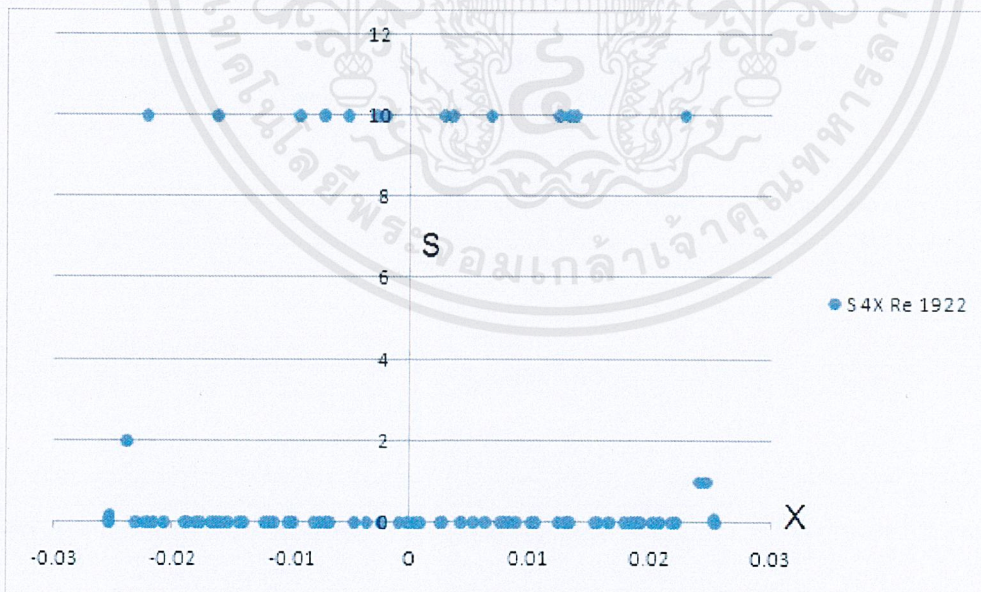


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว(S) กับตัวแปรระยะทาง (X) ของตอนที่ 2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922 ที่ความสูงวัด 0.42 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว(S) กับตัวแปรระยะทาง(X) ของตอนที่ 2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 ที่ความสูงวัด 1.62 m

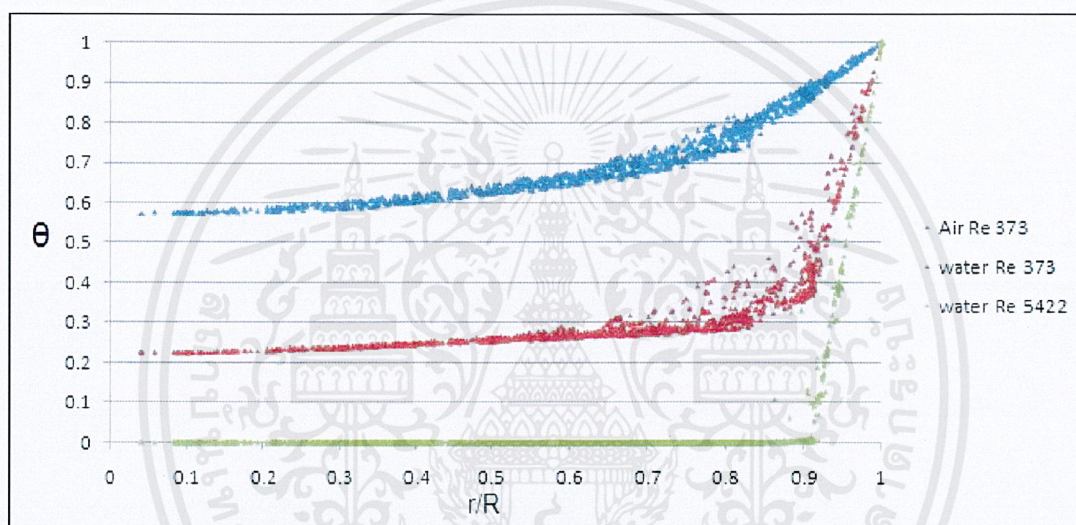


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของแตกต่างของความเร็ว(S) กับตัวแปรระยะทาง(X) ของตอนที่ 2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922 ที่ความสูงวัด 1.62 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3

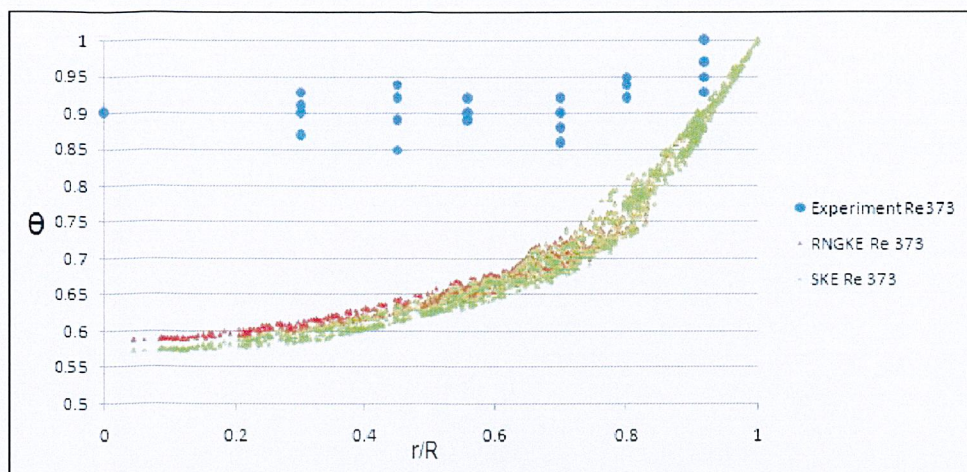
ผลที่ได้จากการจำลองความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลโดยใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ในการทำนายพฤติกรรม ซึ่งไหลผ่านเบ็ดด้วยอัตราการไหลของอากาศเข้าคอลัมน์เท่ากับ 0.21451 เมตรต่อวินาที ($Re = 373$) และอัตราการไหลของน้ำเข้าคอลัมน์เท่ากับ 0.21451 เมตรต่อวินาที ($Re = 5422$) สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอลัมน์ (r/R) ดังรูป



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอลัมน์ (r/R) ของตอนที่ 3 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 ของอากาศ และตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5422 ของน้ำ

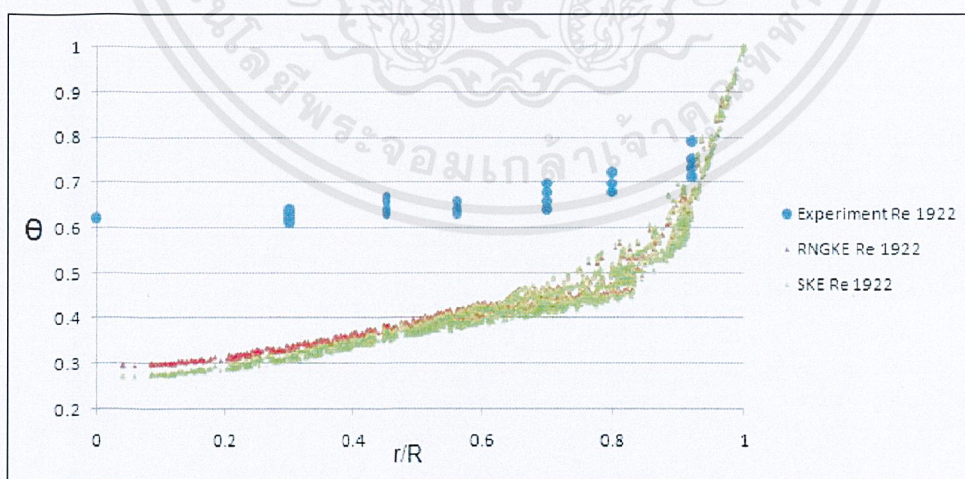
ตอนที่ 4

ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ และ Renormalization group k- ϵ ในการทำนายพฤติกรรมของอากาศ ซึ่งไหลผ่านเบ็ดด้วยอัตราการไหลของอากาศเข้าคอลัมน์เท่ากับ 0.21451 เมตรต่อวินาที ($Re = 373$) สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอลัมน์ (r/R) ดังรูป



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (Θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอลัมน์ (r/R) ของตอนที่ 4 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ และ Renormalization group k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373

ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ และ Renormalization group k- ϵ ในการทำนายพฤติกรรมของอากาศ ซึ่งไหลผ่านเบ็ดด้วยอัตราการไหลของอากาศเข้าคอลัมน์เท่ากับ 1.10533 เมตรต่อวินาที ($Re = 1922$) สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (Θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอลัมน์ (r/R) ดังรูป



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ (Θ) กับตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอลัมน์ (r/R) ของตอนที่ 4 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ และ Renormalization group k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟรูปที่ 4.1 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k-E ในการจำลองการไหลจะพบว่าสำหรับช่วงที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 ที่ตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอกลมน์ (r/R) ตั้งแต่ 1 ถึง 0.8 อุณหภูมิของอากาศจะลดลงด้วยความชันมาก และ (r/R) ตั้งแต่ 0.8 ถึง 0 อุณหภูมิจะค่อยๆลดลง โดยที่ (r/R) เท่ากับศูนย์ อุณหภูมิ θ มีค่า 0.57 ส่วนที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922 ที่ตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอกลมน์ (r/R) ตั้งแต่ 1 ถึง 0.8 อุณหภูมิของอากาศจะลดลงด้วยความชันมาก และ (r/R) ตั้งแต่ 0.8 ถึง 0 อุณหภูมิจะค่อยๆลดลง โดยที่ (r/R) เท่ากับศูนย์ อุณหภูมิ θ มีค่า 0.27 และเมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลอง พบว่าผลการจำลองให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองในช่วงแรก (r/R เข้าใกล้ 1) แต่หลังจากนั้นผลจากการจำลองจะห่างจากผลการทดลองมากยิ่งขึ้น และที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 มีการกระจายตัวของอุณหภูมิน้อยกว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 1922

จากกราฟรูปที่ 4.2 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k-E ในการจำลองการไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 จะพบว่า ไม่มีความแตกต่างของความเร็ว S ที่ตำแหน่งวัด 0.42 เมตร ในทุกระยะ X

จากกราฟรูปที่ 4.3 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k-E ในการจำลองการไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922 จะพบว่า ไม่มีความแตกต่างของความเร็ว S ที่ตำแหน่งวัด 0.42 เมตร ในทุกระยะ X เช่นเดียวกัน

จากกราฟรูปที่ 4.4 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k-E ในการจำลองการไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 จะพบว่าไม่มีความแตกต่างของความเร็ว S ที่ตำแหน่งวัด 1.62 เมตร ที่ X มีค่าใกล้ -0.0254 และ 0.0254 และพบว่ามีความแตกต่างของความเร็ว S ที่ตำแหน่งวัด 1.62 เมตร ที่ X ตำแหน่งอื่นๆ เกิดขึ้นเท่ากับ 1

จากกราฟรูปที่ 4.5 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k-E ในการจำลองการไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1922 จะพบว่าไม่มีความแตกต่างของความเร็ว S ที่ตำแหน่งวัด 1.62 เมตร ที่ X มีค่าใกล้ -0.0254 และ 0.0254 และพบว่ามีความแตกต่างของความเร็ว S ที่ตำแหน่งวัด 1.62 เมตร ที่ $X = 0.024$ เกิดขึ้นเท่ากับ 1 ถึง 2 และพบว่ามีความแตกต่างของความเร็ว S ที่ตำแหน่งวัด 1.62 เมตร ที่ X ตำแหน่งอื่นๆ เกิดขึ้นเท่ากับ 10

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า ที่ความสูงของแบบจำลองมากขึ้นจะทำให้เห็นความแตกต่างของความเร็ว และที่ตัวเลขเรย์โนลด์์มากจะเห็นความแตกต่างได้มากขึ้น

จากกราฟรูปที่ 4.6 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ ในการจำลองการไหลของอากาศที่ตัวเลขเรย์โนลด์์เท่ากับ 373 ที่ตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอแลมันน์ (r/R) ตั้งแต่ 1 ถึง 0.8 อุณหภูมิของอากาศจะลดลงด้วยความชันมาก และ (r/R) ตั้งแต่ 0.8 ถึง 0 อุณหภูมิจะค่อยๆลดลง โดยที่ (r/R) เท่ากับศูนย์ อุณหภูมิ θ มีค่า 0.58 ส่วนแบบจำลอง Standard k- ϵ ในการจำลองการไหลของน้ำตัวเลขเรย์โนลด์์เท่ากับ 5422 ที่ตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอแลมันน์ (r/R) ตั้งแต่ 1 ถึง 0.92 อุณหภูมิของอากาศจะลดลงด้วยความชันมาก แล้วมีค่าคงที่ θ เท่ากับ 0 ที่ตัวแปรไร้หน่วยของรัศมีคอแลมันน์ (r/R) ตั้งแต่ 0.92 ถึง 0 นั่นคืออุณหภูมิของน้ำบริเวณกลางท่อมีค่าเท่ากับอุณหภูมิขาเข้า

จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าความร้อนแพร่ไปไม่ถึงบริเวณกลางท่อซึ่งมีน้ำไหลภายในท่อ โดยที่ลักษณะกราฟที่แตกต่างกันเพราะว่าตัวเลขเรย์โนลด์์ที่แตกต่างกัน ซึ่งน้ำมีตัวเลขเรย์โนลด์์ที่สูงกว่า จึงทำให้มีลักษณะอุณหภูมิเป็นแบบ Turbulent ที่มากกว่าอากาศ

จากกราฟรูปที่ 4.7 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ และ Renormalization group k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์์เท่ากับ 373 จากการนำผลมาเทียบกันพบว่ากราฟที่ได้ใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลอง Renormalization group k- ϵ มีแนวโน้มที่อุณหภูมิ θ สูงกว่าเล็กน้อย โดยค่าอุณหภูมิ θ ต่ำสุดที่ 0.59 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการจำลองมากกว่าแบบจำลอง Standard k- ϵ ที่อุณหภูมิ θ ต่ำสุดที่ 0.57

จากกราฟรูปที่ 4.8 เมื่อใช้แบบจำลอง Standard k- ϵ และ Renormalization group k- ϵ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์์เท่ากับ 1922 จากการนำผลมาเทียบกันพบว่ากราฟที่ได้ใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลอง Renormalization group k- ϵ มีแนวโน้มที่อุณหภูมิ θ สูงกว่าเล็กน้อย โดยค่าอุณหภูมิ θ ต่ำสุดที่ 0.29 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการจำลองมากกว่าแบบจำลอง Standard k- ϵ ที่อุณหภูมิ θ ต่ำสุดที่ 0.27

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองที่ศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ได้แก่ อัตราการไหลของของไหล ค่าความเร่งซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดของโลก ความหนาแน่นของของไหล และแบบจำลองความปั่นป่วน โดยเมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของของไหลจากผลการจำลองพบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ อุณหภูมิเฉลี่ยจะต่ำกว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับผลการทดลอง แต่ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองให้ผลต่ำกว่าการทดลอง เนื่องจากการลดขนาดของทรงกลมอันเป็นผลมาจากขีดจำกัดในการสร้างแบบจำลอง

ส่วนค่าความเร่งซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดของโลกนั้น จากผลการจำลองพบว่าที่ความสูง 0.42 เมตร ไม่พบความแตกต่างของรูปแบบความเร็วของของไหล แต่ที่ความสูง 1.62 เมตร พบความแตกต่างของรูปแบบความเร็วของของไหลทศนิยมตำแหน่งที่ 6 ที่ความเร็วเริ่มต้นของของไหล 0.21451 เมตรต่อวินาที และพบความแตกต่างของรูปแบบความเร็วของของไหลทศนิยมตำแหน่งที่ 5 ที่ความเร็วเริ่มต้นของของไหล 1.10533 เมตรต่อวินาที เนื่องจากที่ความสูงมากจะทำให้เห็นผลของความเร่งซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดของโลกได้ดีขึ้น และความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้เห็นผลของความเร่งซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดของโลกได้ดีขึ้นเช่นกัน

ส่วนความหนาแน่นของของไหลที่แตกต่างกันนั้น จากผลการจำลองพบว่าที่ความหนาแน่นน้อยความร้อนจะแพร่เข้าไปในศูนย์กลางคอลัมน์ได้มากกว่าที่ความหนาแน่นมาก เนื่องจากสารที่มีความหนาแน่นมากจะมีมวลมากกว่าสารที่มีความหนาแน่นน้อยที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเดียวกัน นั่นคืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมีค่ามากกว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ จากนิยามความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, c_p) คือความร้อนที่ทำให้สาร(วัตถุ) มวลหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศาเคลวิน ซึ่ง c_p ของอากาศเท่ากับ 1006.43 J/kg.K และ c_p ของน้ำเท่ากับ 4182 J/kg.K จะเห็นได้ว่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่ามากกว่าอากาศถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 เท่า และด้วยอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมากกว่า ยิ่งทำให้ต้องใช้ความร้อนในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ละเคลวินมาก

ส่วนการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่แตกต่างกัน โดยใช้ แบบจำลอง Standard k- ϵ กับแบบจำลอง Renormalization group k- ϵ พบว่าผลที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Renormalization group k- ϵ ให้ผลการจำลองที่ได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า Standard k- ϵ เนื่องจากแบบจำลอง Renormalization group k- ϵ มีการกำหนดสมการสำหรับ Turbulent Prandtl number แต่แบบจำลอง Standard k- ϵ กำหนด Turbulent Prandtl number เป็นค่าคงที่

ซึ่งขัดแย้งกับโครงการ “การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนใน gas – solid fixed bed โดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล” ของรุ่นพี่ปีที่แล้ว พบข้อผิดพลาดที่สรุปว่าแบบจำลอง Renormalization group k- ϵ ให้ผลการจำลองที่ได้ใกล้เคียงกับการทดลองน้อยกว่า Standard k- ϵ

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

1. เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองจริงนั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการจำลอง เนื่องจากการจำลองการไหลของอากาศนั้น ทางคณะผู้จัดทำกำหนดให้ทางเข้าของอากาศมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ จึงทำให้โปรไฟล์การไหลของอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากผลการทดลอง

2. เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องคอมพิวเตอร์จึงทำให้ไม่สามารถสร้างขนาดของกริดให้มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณในส่วน of ชั้นขอบเขต (Boundary layer) การไหลของอากาศได้ จึงทำให้ผลการจำลองที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

3. ลักษณะของกริดที่ใช้มีขนาดที่ไม่สมมาตร คือ เนื่องจากกริดที่ใช้เป็นทรงสี่หน้า (พีรามิดฐานสามเหลี่ยม) ในการคำนวณ ซึ่งคุณภาพของกริดจะมีผลโดยตรงต่อความแม่นยำหรือความถูกต้องของคำตอบและเวลาที่ใช้สำหรับการ convergence ซึ่งปกติแล้วดัชนีที่ใช้ในการวัดคุณภาพของกริดจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ค่าคือ ค่าเบ้ (Skewness) ค่าเรียบ (Smoothness) และค่าอัตราส่วนระหว่างด้านที่ยาวที่สุดของกริดต่อด้านที่สั้นที่สุดของกริด (Aspect ratio) โดยสำหรับค่า Skewness เมื่อทำ

การสร้างกริดแบบทรงสี่หน้าควรมีค่าไม่เกิน 0.85 และค่า Aspect ratio ควรมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง แต่กริดที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองนั้น กริดที่มีคุณภาพต่ำที่สุดมีค่า Skewness เท่ากับ 0.99 และค่า Aspect ratio เท่ากับ 88 จึงทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของกริดทั้งหมดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เพราะกริดที่สร้างขึ้นเป็นอิสระต่อผลที่ได้จากการจำลอง (หมายถึง กริดไม่มีผลต่อคำตอบที่ได้จากแบบจำลอง)

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การให้คอมพิวเตอร์คำนวณครั้งแรกจะต้องมีการปรับค่า Under-Relaxation Factors ก่อนการคำนวณจริงอีกครั้ง ถ้าผู้ทำการจำลองไม่สร้าง Case ใหม่ จะทำให้โปรแกรมจำค่าเก่าที่ได้มีการคำนวณไว้ในครั้งแรกดังเช่นกลุ่มของรุ่นพีพีทีแล้ว ดังนั้นการคำนวณทุกครั้งควรสร้าง Case ใหม่ทุกครั้ง
2. จากผลการจำลองค่าความเร่งซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดของโลก ถ้าเพิ่มความสูงของคอลัมน์น้ำให้มากขึ้นอาจจะทำให้เห็นผลจากความเร่งซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดของโลกได้มากขึ้น
3. ควรสร้างแบบจำลองให้มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองให้มากที่สุดโดยใช้วิธีการสร้างกริดแบบแบ่งส่วน (partition) โดยกริดที่ใช้ควรเป็นแบบทรงสี่หน้า ซึ่งการสร้างกริดดังกล่าวจะสามารถสร้างกริดที่สมมาตรมากกว่า นั่นหมายถึงค่า Aspect ratio จะมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง (ด้านทุกด้านของกริดมีค่าใกล้เคียงกัน) แม้ว่าจะใช้เวลาในการสร้างค่อนข้างมากแต่ความถูกต้องของผลการจำลองที่ได้จะมีความแม่นยำและถูกต้องมากกว่า
4. ต้องสร้างความสัมพันธ์ของคุณสมบัติต่างๆ ของสสาร ในรูปของฟังก์ชันของตัวแปรต่างๆ เนื่องจากคุณสมบัติของสารต่างๆมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับสถานะต่างๆที่ทำการศึกษา เช่น ความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน
5. ควรพยายามออกแบบการจัดเรียงตัวของเบดให้มีลักษณะที่สามารถกักหรือกีดขวางการไหลของของไหลได้ดี โดยควรป้องกันไม่ให้เกิดการไหลของของไหลผ่านเบด โดยไม่มีการสัมผัสระหว่างของไหลกับเบด กล่าวคือ ควรให้ของไหลไหลภายในเบดได้นานยิ่งขึ้น หรืออาจพูดอีกนัยหนึ่งคือพื้นที่สัมผัสระหว่างของไหลกับอนุภาคทรงกลมมาก

6. เพื่อนำไปใช้ประยุกต์ได้ในแง่ของวงการอุตสาหกรรม คณะผู้จัดทำจึงได้เสนอแนะ โดยเพิ่มในส่วนของปฏิกิริยาทางเคมีเข้ามา เนื่องจากในการทำอุตสาหกรรม จุดที่มีการใช้เบคในลักษณะนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (เบค) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรืออาจจะศึกษาการเกิดความดันตกคร่อมเบคและอัตราเร็วของของไหลเนื่องจากยิ่งความเร็วของของไหลมากความดันตกคร่อมก็มากตาม แต่ถ้ามองในมุมของการถ่ายโอนความร้อนแล้วจะสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (1995). An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson, England
- [2] Ron Darby (2001). Chemical Engineerig Fluid Mechanics, Marcel Dekker, New York.
- [3] Ansys Inc. (2009). ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Ansys Inc, USA
- [4] Ansys Inc. (2009). ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide, Ansys Inc, USA
- [5] จารุวัตร เจริญสุข. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา **Computational Fluid Dynamics**. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552 Ansys
- [6] Wikipedia. **gravity**. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/gravity>
- [7] เสฏฐวุฒิ ปิยะตันติ, อัญญรัตน์ เลิศเขมทัต และ เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนในเบดบรรจุแบบคงที่ในระบบแก๊ส-ของแข็งโดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก - 1 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองที่ 1 ที่คำนวณโดยใช้แบบจำลอง Standard k-epsilon ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373

รัศมี (เมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	รัศมี (เมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	รัศมี (เมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)
0.0238364	378.945	0.0254	383	0.0234996	375.704
0.0235392	378.175	0.0254	383	0.0254	383
0.0254	383	0.0239301	379.177	0.0230581	374.148
0.0254	383	0.0254	383	0.0232812	377.152
0.0254	383	0.0239893	379.636	0.0232652	377.107
0.0254	383	0.0254	383	0.0254	383
0.0254	383	0.0241859	380.228	0.0254	383
0.0254	383	0.0246903	381.38	0.0254	383
0.0245779	381.05	0.0254	383	0.0232962	377.193
0.0254	383	0.0254	383	0.0254	383
0.0254	383	0.0254	383	0.0230359	376.372
0.0254	383	0.0240857	380	0.0244351	379.9
0.0239587	379.414	0.0230388	376.861	0.0230535	375.288
0.0254	383	0.0236254	376.201	0.0230326	376.507
0.0241158	379.805	0.023626	376.203	0.0230876	374.19
0.0233354	377.841	0.0254	383	0.0254	383
0.02357	378.447	0.0254	383	0.0240961	378.752
0.0254	383	0.0236199	376.18	0.0254	383
0.0245773	381.276	0.0254	383	0.0254	383
0.0254	383	0.0254	383	0.0237631	378.808

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก - 1 ตัวอย่างข้อมูลดิบของแบบจำลองที่ 1 ที่คำนวณโดยใช้แบบจำลอง Standard k-epsilon ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 373 (ต่อ)

รัศมี (เมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	รัศมี (เมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	รัศมี (เมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)
0.0238508	379.032	0.0234642	376.802	0.0240148	379.329
0.0238866	379.124	0.0254	383	0.0231058	376.709
0.0254	383	0.0254	383	0.0239628	379.192
0.0254	383	0.0254	383	0.0231003	376
0.0232119	377.396	0.0234779	376.846	0.0254	383
0.0230891	374.214	0.0254	383	0.0240953	379.543
0.0254	383	0.0230971	375.576	0.0254	383
0.0254	383	0.0230975	375.665	0.0254	383
0.0243099	380.493	0.0254	383	0.0231092	377.19
0.0254	383	0.0254	383	0.0254	383
0.0242183	380.283	0.0247511	380.739	0.0254	383
0.0244142	380.733	0.0254	383	0.0240475	378.391
0.0230047	377.558	0.0252035	382.314	0.0254	383
0.0235945	376.497	0.0254	383	0.0230394	374.912
0.0254	383	0.0254	383	0.0248601	381.072
0.0254	383	0.024445	379.839	0.0230874	375.043
0.0254	383	0.0254	383	0.0254	383
0.0235828	376.454	0.0230739	375.062	0.0254	383
0.0236011	376.52	0.0254	383	0.0250124	381.965

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.0254	383	0.0254	383	0.0254	383
--------	-----	--------	-----	--------	-----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้