

การศึกษาดัชนีผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ของการแยกอนุภาคด้วยชั้นบันไดกลิ้งนึ่ง



ปริญญาโททางวิศวกรรมเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๐

การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ของการแยกอนุภาคด้วยชั้นบันไดกลับหลัง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

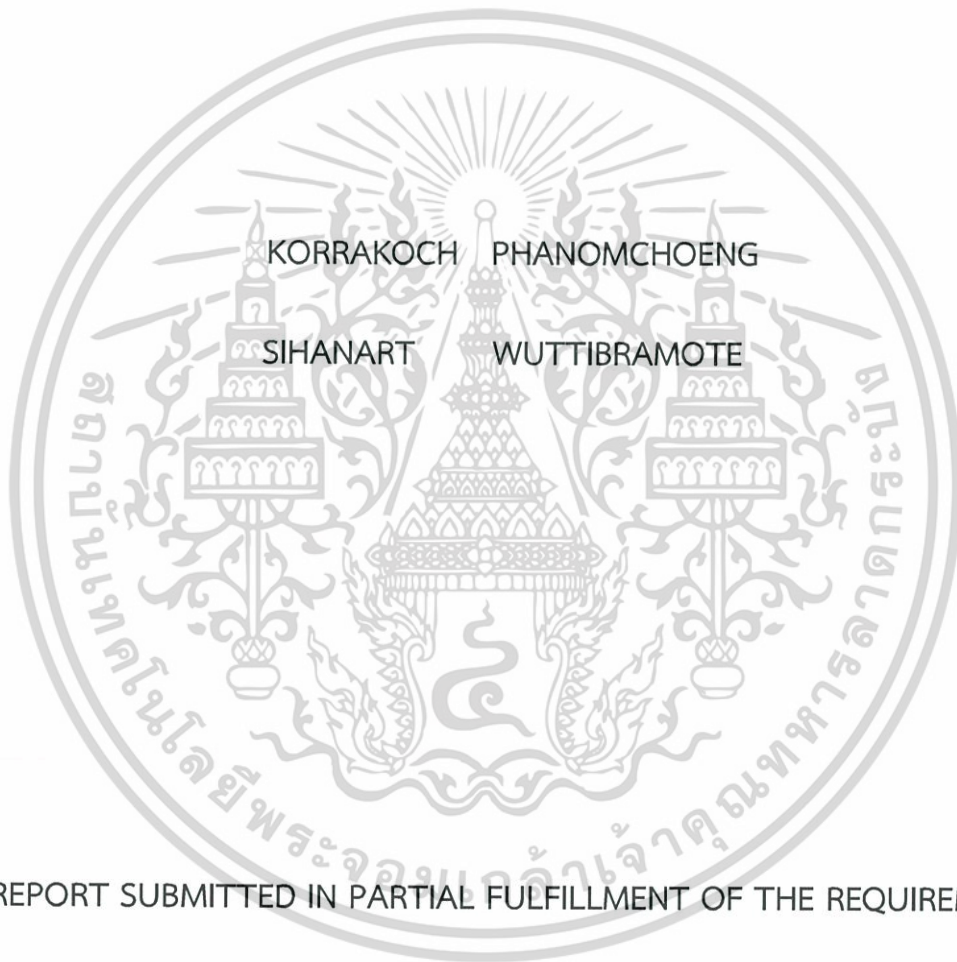
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2556
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS STUDY
OF PARTICLE SEPARATION VIA BACKWARD FACING-STEP



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง ACADEMIC YEAR 2013 ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการแยกอนุภาคด้วยชั้นบันได
กลับหลัง

โดย นายกรกช พนมเชิง
นายสีหนาท วุฒิปราโมทย์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

ประธานกรรมการ

(ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

กรรมการ

(ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์)

กรรมการ

(ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการแยกอนุภาคด้วยชั้นบันได
กลับหลัง

โดย นาย กรกช พนมเชิง

นาย สีหนาท วุฒิปราโมทย์

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

การไหลผ่านท่อที่ประกอบด้วยชั้นบันไดกลับหลัง (Backward facing-step) ถูกศึกษาด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อหาวิธีการจำลองที่เหมาะสมสำหรับรูปแบบการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน โดยตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนที่ศึกษาคือ 389 และ 18,400 ตามลำดับ แบบจำลองที่ศึกษาถูกกำหนดให้เป็นแบบจำลองสองมิติของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ โดยมีความหนืดคงที่ ผลการจำลองเบื้องต้นของการไหลทั้งสองรูปแบบถูกเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยผลการจำลองของการไหลทั้งสองรูปแบบพบที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่อ้างอิง จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกอนุภาคด้วยการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง โดยปรับเปลี่ยนรูปแบบของท่อโดยเพิ่มความสูงของชั้นบันไดกลับหลังให้มีความสูงมากขึ้นจากเดิม 4.9 mm เป็น 20 และ 50 mm เมื่อทำการจำลองพบว่าเมื่อความสูงของชั้นบันไดกลับหลังมากขึ้นจะทำให้การแยกอนุภาคที่มีขนาดต่างกันได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS STUDY OF PARTICLE SEPARATION
VIA BACKWARD FACING-STEP

By Mr. Korrakoch Phanomchoeng
Mr. Sihanart Wuttibramote

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2013

Advisor Dr. Santi Wattananusorn

ABSTRACT

The fluid flow over backward facing-step by using Computational Fluid Dynamics technique was studied to achieve the optimal models for laminar and turbulent flow. The Reynolds number of these flows were 389 and 18,400, respectively. The model was simplified to be two-dimensional. The fluid was considered to be incompressible Newtonian fluid with constant viscosity. The preliminary results were validated by comparing with the experimental results. The simulated results were in good agreement with the experimental data. Thus, the model was applied to simulate the separation by Backward-facing step. The separation models were modified by varying the step height from 4.9 mm. to 20 and 50 mm. The simulated separation results revealed that the separation efficiency was increased with increasing the step height.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำและความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคล
ต่างๆ คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ สำหรับคำแนะนำ การเหลือช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ คำปรึกษา และการ
ให้ความรู้ต่างๆมากมาย

อาจารย์ทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ อันเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัย

นาย เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่คอยช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็น
การสอนใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และคำปรึกษาต่างๆมากมาย จนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้
ด้วยดี

นายทัพไทย สีเทา นายณัฐวัตร ใจกลม และนางสาวดวงกมล อ่อนพรม สำหรับคำปรึกษาดีๆ
และคอยช่วยเหลือมาโดยตลอด

คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้คำอบรมสั่งสอนและเป็นที่ปรึกษาโดยตลอด อีกทั้งยังคอยเป็นห่วง
ยามที่ต้องกลับบ้านดึก

บาส แก๊บ ทราย ปราณ ที่คอยให้คำปรึกษาและอยู่เป็นเพื่อนเวลาที่มีปัญหาในด้านการทำงาน
และคอยสร้างความสุข ความสนุกสนานระหว่างการทำงาน

พี่ๆน้องๆ และเพื่อนวิศวะกรรมเคมีทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา หรือแนวทางการแก้ปัญหา ให้
กำลังใจและมอบความเป็นมิตรที่ดีตลอดมา

นายกรกช พนมเชิง

นายสีหนาท วุฒิปราโมทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 การทำงานของโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	4
2.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor).....	4
2.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solver).....	6
2.1.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor).....	8
2.2 ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the turbulent flow).....	9

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	10
2.3.1 สมการควบคุม (Governing equation).....	10
2.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation).....	10
2.5 การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (DNS) และการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (LES).....	11
2.6 สมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation).....	12
2.8 แบบจำลองมาตรฐาน k-omega.....	15
2.8.1 การจำลองประสิทธิภาพการแพร่กระจาย.....	15
2.8.2 การจำลองการเกิดการปั่นป่วน.....	16
2.8.3 การเกิดอัตราการผลิตตัวจำเพาะ (ω).....	17
2.8.4 รูปแบบการสลายตัวของความปั่นป่วน.....	17
2.9 Reynolds Stress Model (RSM).....	19
2.10 Discrete Phase Modeling[6,7].....	23
2.11 การไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง.....	26
2.12 วรรณกรรมปริทัศน์.....	27
บทที่ 3	29
การจำลอง.....	29
เอกสาร 3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง.....	29
3.1.1 แบบจำลองของชั้นบันไดกลับหลัง (Backward facing-step).....	29

เอกสาร 3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง.....

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกครั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 แบบจำลองของชั้นบันไดกลับหลัง (Backward facing-step).....

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 สภาวะขอบเขต.....	29
3.1.3 สมมติฐานของแบบจำลอง.....	30
3.1.4 สมการควบคุม.....	30
3.2 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	31
3.3 ศึกษาอิทธิพลของความสูงชั้นบันได.....	32
3.4 ศึกษาอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	34
4.1 การหากริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบ (Grid independent).....	34
4.2 การเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการจำลองกับการทดลองของการไหลแบบราบเรียบที่ตำแหน่ง x^* แตกต่างกัน.....	38
4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองของการไหลแบบปั่นป่วนที่ตำแหน่ง x^* แตกต่างกัน.....	40
4.4 การจำลองโดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคที่ความสูงชั้นบันไดต่างๆกัน.....	47
4.5 วิเคราะห์ผลการจำลอง.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง	59
---------------------	----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงสมการที่ใช้ข้างต้นให้เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจริงเพื่อความสะดวกในการใช้งาน	21
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงจุดเด่นและจุดด้อยของแบบจำลองแบบ Reynolds Stress Model (RSM)	23
ตารางที่ 3.1 สภาวะขอบเขต.....	29
ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	31
ตารางที่ 3.3 ความสูงของชั้นบันได.....	32
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของแบบจำลอง.....	33
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบคุณภาพและปริมาณของกริดที่มีขนาดแตกต่างกัน.....	36
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-3} m ที่มี ความเร็วแตกต่างกัน.....	47
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-4} m ที่มี ความเร็วแตกต่างกัน.....	48
ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-5} m ที่มี ความเร็วแตกต่างกัน.....	49
ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-6} m ที่มี ความเร็วแตกต่างกัน.....	50
ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-7} m ที่มี ความเร็วแตกต่างกัน.....	51
ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-8} m ที่มี ความเร็วแตกต่างกัน.....	52

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-9} m ที่มี ความเร็วแตกต่างกัน.....	53
---	----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.2 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน.....	9
รูปที่ 2.2 วิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน.....	11
รูปที่ 2.3 การไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง.....	26
รูปที่ 3.1 กริดของแบบจำลองที่สร้างโดยใช้โปรแกรม GAMBIT.....	29
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	31
รูปที่ 3.3 ขอบเขตของแบบจำลอง.....	32
รูปที่ 3.4 ขอบเขตของแบบจำลอง.....	33
รูปที่ 4.1 แบบจำลองของชั้นบันไดกลับหลัง.....	34
รูปที่ 4.2 การหาค่ากริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบของแบบจำลองที่ความสูงของชั้นบันไดเท่ากับ 4.9 mm และขนาดของกริดที่ทำการหาค่ากริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบคือ (ก) 1 mm (ข) 0.75 mm (ค) 0.5 mm (ง) 0.25 mm.....	35
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนกริดที่ใช้ในการจำลองที่มีขนาดของกริดที่แตกต่างกัน.....	37
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการจำลองกับการทดลองของการไหลแบบราบเรียบ.....	38
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองของการไหลแบบปั่นป่วนที่ตำแหน่ง x^* ต่างกัน.....	40
รูปที่ 4.6 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} m ข.) 10^{-4} m ค.) 10^{-5} m ง.) 10^{-6} m จ.) 10^{-7} m ฉ.) 10^{-8} m ซ.) 10^{-9} m ที่ของไหลมีความเร็ว 0.05933 m/s.....	42
รูปที่ 4.7 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} m ข.) 10^{-4} m ค.) 10^{-5} m ง.) 10^{-6} m จ.) 10^{-7} m ฉ.) 10^{-8} m ซ.) 10^{-9} m ที่ของไหลมีความเร็ว 0.11866 m/s.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} m ข.) 10^{-4} m ค.) 10^{-5} m ง.) 10^{-6} m จ.) 10^{-7} m ฉ.) 10^{-8} m ซ.) 10^{-9} m ที่ของไหลมีความเร็ว 0.17799 m/s	44
รูปที่ 4.9 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} m ข.) 10^{-4} m ค.) 10^{-5} m ง.) 10^{-6} m จ.) 10^{-7} m ฉ.) 10^{-8} m ซ.) 10^{-9} m ที่ของไหลมีความเร็ว 0.23732 m/s	45
รูปที่ 4.10 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} m ข.) 10^{-4} m ค.) 10^{-5} m ง.) 10^{-6} m จ.) 10^{-7} m ฉ.) 10^{-8} m ซ.) 10^{-9} m ที่ของไหลมีความเร็ว 0.29665 m/s.....	46
รูปที่ 4.11 การเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าสู่ท่อ.....	54
รูปที่ 4.12 ลักษณะการไหลของของไหลที่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

C_{ij}	พจน์ของการพา
C_D	สัมประสิทธิ์ความหน่วง
$D_{L,ij}$	การแพร่ของมวลโมเลกุล
$D_{T,ij}$	การแพร่ความปั่นป่วน
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
\bar{f}_i	แรงจากน้ำหนักวัตถุเฉลี่ย
G_B	การสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัว
G_{ij}	ผลจากแรงลอยตัว
G_k	การสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์เฉลี่ย
G_ω	การสร้างอัตราการสลายตัวเฉพาะซึ่งถูกนิยามได้จากพื้นที่รอบข้าง
g_i	ความเร่งเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงในทิศทาง i
k	พลังงานจลน์ปั่นป่วน
P_{ij}	ผลผลิตจากความเครียด
p	ความดัน
Re_p	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 S
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลของเอกสารนี้ในครั้งที่มีการนำไปใช้

S_{ij}	เทนเซอร์เฉื่อยของอัตราความเครียด
S_{Mx}	แหล่งของโมเมนตัมในทิศทาง x
S_{My}	แหล่งของโมเมนตัมในทิศทาง y
S_{Mz}	แหล่งของโมเมนตัมในทิศทาง z
S_k	แหล่งกำเนิดพลังงานจลน์ที่จะนิยามตามการใช้งาน
S_{user}	แหล่งกำเนิดที่จะนิยามตามการใช้งาน
S_ω	แหล่งกำเนิดการสลายตัวเฉพาะที่จะนิยามตามการใช้งาน
S_ε	แหล่งกำเนิดการสลายตัวที่จะนิยามตามการใช้งาน
u'	ความเร็วแกว่ง
\bar{u}	ความเร็วเฉลี่ย
u, v, w	ความเร็วในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ
u_i	ความเร็วของแก๊ส
u_{pi}	ความเร็วของอนุภาค
V	ความเร็วของของไหล
Y_d	สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเส้นผ่าน ศูนย์กลางอนุภาคที่สนใจ
Y_k	การสลายตัวของพลังงานจลน์เนื่องจากความปั่นป่วน
Y_m	ผลกระทบของการขยายตัวแบบแกว่งในความปั่นป่วนที่สามารถอัดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y๑

การสลายตัวของอัตราสลายตัวเฉพาะเนื่องจากความปั่นป่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ตัวอักษรกรีก

α^*	สัมประสิทธิ์ซึ่งเป็นตัวปรับแก้สำหรับตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ
Γ_k	ประสิทธิภาพการแพร่กระจายของ k
Γ_ω	ประสิทธิภาพการแพร่กระจายของ ω
δ_{ij}	เดลตาโครเนกเกอร์
ε	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน
ε_{ij}	การสลายตัว
μ	ความหนืดของของไหล
μ_t	ความหนืดปั่นป่วน
ν_t	ความหนืดจลศาสตร์ปั่นป่วน
Π_{ij}	ความเครียดของความดัน
ρ	ความหนาแน่นของของไหล
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาค
σ_k	ตัวเลขพลันด์ทอลล์ที่ปั่นป่วนสำหรับพลังงานจลน์
σ_ω	ตัวเลขพลันด์ทอลล์ที่ปั่นป่วนสำหรับอัตราการสลายตัวเฉพาะ
τ	เทนเซอร์ของความเค้น
ϕ	ตัวแปรอิสระ
Ω_{ij}	ผลผลิตโดยระบบที่มีการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันกระบวนการแยกอนุภาคเข้ามามีบทบาทสำคัญในทางอุตสาหกรรมอย่างเช่น กระบวนการแตกสลาย (Cracking) ขนาดอนุภาคที่ได้จากกระบวนการอาจมีหลายขนาด การใช้ประโยชน์จริงๆนั้นอาจใช้เพียงแค่บางขนาดเท่านั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการคัดแยกขนาดขึ้น เพื่อประสพผลสำเร็จในการคัดแยกจำเป็นต้องมีเทคนิคที่มีประสิทธิภาพเข้ามาช่วย การประยุกต์เอา ปรากฏการณ์ของการไหลภายในท่อที่ประกอบด้วยชั้นบันไดกลับหลัง (Backward facing-step) มาช่วยในการคัดแยกนับว่าเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังนั้นเป็นการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงของหน้าตัดอย่างฉับพลัน (Sudden expansion) จึงเหนี่ยวนำให้เกิด กระแสไหลวนข้างหลังชั้นบันได ซึ่งกระแสไหลวนดังกล่าวจะช่วยให้เกิดการแยกของของไหลขึ้น อีกทั้งอนุภาคที่มีขนาดที่แตกต่างกันนั้นจะทำให้มีแรงหน่วง (Drag force) และแรงยก (Lift force) ที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้ระยะการตกของอนุภาคนั้นแตกต่างกันซึ่งจะนำไปสู่การแยกของอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาออกแบบการไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังมีงานวิจัยมากมายศึกษาเพื่อ เพิ่มประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Armaly และคณะ[1] เป็นการศึกษาความยาวของบริเวณ การเกิดหมุนวน (Reattachment length) หลังชั้นบันไดกลับหลังที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆและที่อัตราส่วน การขยาย (Expansion ratio) แตกต่างกัน[2] ซึ่งจะนำระยะการเกิดการหมุนวนนี้มาประยุกต์ใช้การแยก อนุภาคต่อไป ในการทดลองศึกษาการไหลภายในท่อที่ประกอบด้วยชั้นบันไดกลับหลังเป็นการวิเคราะห์ ทางทฤษฎี (Analytical method) อาจทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากการไหลนั้นค่อนข้างซับซ้อน จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical method) มาใช้ในการคำนวณแทน ซึ่งวิธีนี้สามารถ แสดงผลได้ในหลายรูปแบบ เช่น กราฟ คอนทัวร์ และเวกเตอร์ เป็นต้น ซึ่งง่ายต่อการนำมาวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจนและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาเทคนิคพลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ

การคัดแยกอนุภาคโดยใช้การไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง โดยวิเคราะห์ผ่านตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ขนาดอนุภาค ความสูงของชั้นบันไดและอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาในกระบวนการคัดแยกอนุภาคในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาปรากฏการณ์การไหลทั้งแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนผ่านชั้นบันไดกลับหลังด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ เทียบกับการทดลอง
- 1.2.2 ศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนที่แตกต่างกัน เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนผ่านชั้นบันไดกลับหลังด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ
- 1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรได้แก่ ขนาดของอนุภาค ความสูงชั้นบันได และ ตัวเลขเรย์โนลด์ ที่ส่งผลต่อการแยกอนุภาคด้วยการประยุกต์การไหลแบบราบเรียบของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ตรวจสอบผลการจำลองการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนผ่านชั้นบันไดกลับหลัง เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Armaly และคณะ[1]และ K.F.YU และคณะ [2] ตามลำดับ
- 1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนได้แก่ k-epsilon, k-omega และ RSM ที่ส่งผลต่อการทำนายปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วนผ่านชั้นบันไดกลับหลังด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ
- 1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคได้แก่ 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} และ 10^{-9} m ที่ส่งผลต่อการแยกอนุภาคด้วยการประยุกต์การไหลแบบราบเรียบของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของความสูงของชั้นบันไดได้แก่ 4.9, 20 และ 50 mm ที่ส่งผลต่อการแยกอนุภาคด้วยการประยุกต์การไหลแบบราบเรียบของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ
- 1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์ได้แก่ 38.9, 77.8, 116.7, 155.6 และ 194.5 ที่ส่งผลต่อการแยกอนุภาคด้วยการประยุกต์การไหลแบบราบเรียบของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
- 1.4.2 สามารถใช้โปรแกรม GAMBIT และ FLUENT ในการสร้างแบบจำลองและจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้
- 1.4.3 สามารถนำผลการจำลองของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของรูปแบบโดเมนและความเร็วต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดที่ใช้ในการแยกอนุภาคที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การทำงานของโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล[3]

การแก้ปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณหาผลลัพธ์มีข้อดี คือ สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของแบบจำลองได้โดยไม่ต้องสร้างแบบจำลองขึ้นใหม่ซึ่งใช้เวลาไม่นานและยังเสียค่าใช้จ่ายการดำเนินงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการสร้างแบบจำลองของจริงขึ้นมา อีกทั้งสามารถศึกษาระบบที่มีความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดอันตรายได้ แต่ข้อเสียของการใช้โปรแกรมในการคำนวณคือ ไม่สามารถที่จะทำให้ผลลัพธ์ของการจำลองให้ตรงตามผลการทดลองได้ แต่สามารถทำให้มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองได้

โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลเป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นด้วยลำดับขั้นตอนของการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถแก้ปัญหาคำนวณได้ ผู้ใช้ที่ไม่มีความชำนาญนั้นสามารถเชื่อมโยงเครื่องมือนี้ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อเชื่อมโยงปัญหาทางวิศวกรรมที่ศึกษาไปสู่ข้อมูลในรูปของพารามิเตอร์เพื่อป้อนเข้าสู่โปรแกรมหลัก และหลังจากได้ผลลัพธ์จากการคำนวณแล้วจะมีโปรแกรมอีกส่วนหนึ่งที่แปลงข้อมูลไปเป็นรูปแบบที่สามารถเข้าใจได้ง่ายโดยผู้ใช้ เพราะฉะนั้นการคำนวณพลศาสตร์ของไหลทุกโปรแกรมจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักดังนี้ (I) Pre-processor (II) Solver (III) Post-processor ซึ่งพอจะสรุปหน้าที่ของแต่ละส่วนดังนี้

2.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

Pre-processor ประกอบด้วยส่วนที่ป้อนข้อมูลของปัญหาการไหลในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้งาน และจะเปลี่ยนข้อมูลนี้ให้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมตามวิธีของโปรแกรมคำนวณที่เลือกใช้ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- นิยามรูปร่างของขอบเขตที่สนใจซึ่งเป็นการแบ่งขอบเขตปัญหาที่ต้องการคำนวณ (Computational domain)

- การสร้างกริด (Grid หรือ Mesh) คือการแบ่งขอบเขตปัญหาที่ต้องการคำนวณเป็นส่วนเล็กๆ ไม่ว่าจะกรณีนี้นั้นมีจำนวนมากๆและไม่เกิดการซ้อนทับกันของส่วนเล็กๆเหล่านี้ ได้แก่ กริดหรือร่างตาข่าย

(Mesh) ของเซลล์ (Cell) หรือปริมาตรควบคุม (Control volume) และ เอลิเมนต์ (Element)

- เลือกปรากฏการณ์ทางธรรมชาติทางฟิสิกส์และเคมีที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลอง
- นิยามคุณสมบัติของของไหล
- กำหนดขอบเขตที่เหมาะสมที่เซลล์ซึ่งตรงกับหรือสัมผัสขอบเขตของปัญหา
- คำตอบของปัญหาการไหล (ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ) ถูกนิยามภายในแต่ละเซลล์

ความแม่นยำของคำตอบที่เกิดขึ้นจากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลถูกควบคุมโดยจำนวนของเซลล์ โดยทั่วไปจำนวนเซลล์ยิ่งมากคำตอบยิ่งแม่นยำ ทั้งนี้ความแม่นยำของคำตอบ ต้นทุนของเครื่องคอมพิวเตอร์และเวลาการคำนวณขึ้นอยู่กับความละเอียดของกริดหรือตาข่าย โดยทั่วไปกริดหรือตาข่ายที่มีลักษณะที่ดีจะมีการแบ่งที่สม่ำเสมอ มีความละเอียดในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของคำตอบอย่างมาก และหยาบขึ้นในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลเฉลยเพียงเล็กน้อยเพื่อความประหยัดทรัพยากรและเวลาในการคำนวณ โดยได้มีความพยายามสร้างโปรแกรมที่สามารถปรับขนาดของกริด ให้เหมาะสมตามความเปลี่ยนแปลงของผลเฉลยได้ด้วยตัวมันเอง (หรือที่เรียกว่า Adaptive mesh) จนในที่สุดจึงมีโปรแกรมที่สามารถปรับขนาดของกริดให้ละเอียดได้อัตโนมัติในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่อผลเฉลยได้

เวลาที่ใช้ในโครงการที่เกี่ยวข้องกับงานด้านการคำนวณพลศาสตร์ของไหลส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปกับการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่ศึกษา การสร้างรูปร่างของปัญหาและการสร้างกริด ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้ทักษะของทรัพยากรบุคคลทางด้านด้านการคำนวณพลศาสตร์ของไหลได้อย่างเต็มที่ จำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อกันระหว่างงานทางด้าน CAD ที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ทั่วไปกับงานด้าน Pre-processor ซึ่งทำให้โปรแกรมส่วนใหญ่ต้องมี CAD interface ที่สามารถรับถ่ายข้อมูลจากโปรแกรมทาง CAD ได้อย่างดีจึงจะสามารถรองรับปัญหาที่ซับซ้อนได้ เพื่อให้การออกแบบ จำนวนกริดที่ใช้ การกำหนดกรอบของปัญหา ฯลฯ มีความเหมาะสม โดยมีความแม่นยำเพียงพอกับความต้องการภายใต้ต้นทุนที่ยอมรับได้ เป็นต้น

นอกจากนี้ Pre-processor ยังได้ให้ผู้ใช้สามารถเปิดข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุสำหรับของไหลรวมทั้งแบบจำลองของทางกายภาพแบบพิเศษต่างๆ และปฏิกริยาทางเคมี (เช่น แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล การแผ่รังสีความร้อน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น)

2.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solver)

วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขอาจกล่าวได้ว่ามีอยู่ 4 แบบ ได้แก่ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) โดยขั้นพื้นฐานของโปรแกรมคำนวณเป็นตามขั้นตอนดังนี้

- การประมาณตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย
- การแปลงในการทำงานของค่าโหนด (Discretisation) โดยการแทนค่าตัวแปรที่ประมาณไว้ในสมการควบคุมการไหลและในขั้นตอนต่อมาทำการจัดรูปสมการคณิตศาสตร์
- การหาคำตอบของสมการพีชคณิต (Algebraic equation)

ความแตกต่างระหว่าง 4 วิธีดังกล่าวอยู่ที่วิธีการประมาณค่าตัวแปร และขั้นตอนการแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของค่าตัวแปรที่โหนด

2.1.2.1 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนี้จะแปลงรูปสมการอนุพันธ์ของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งในกรณีนี้นิยมให้เป็น ϕ ของปัญหาการไหล โดยพิจารณาให้ตัวแปรอยู่ที่จุดตัดของแนวเส้นซึ่งเรียกว่า กริด โดยทั่วไปอนุกรมกำลังแบบ Taylor ซึ่งตัดพจน์อันดับสูงออกไป จะถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลต่างสี่เหลี่ยมซึ่งทำให้ได้สมการพีชคณิต (Algebraic equation) ของตัวแปรไม่ทราบค่า ϕ ของแต่ละกริดออกมา Smith (1985) ได้ให้รายละเอียดเพิ่มเติมของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมไว้อย่างครอบคลุมซึ่งสามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้

2.1.2.2 วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ได้สมมติฟังก์ชันอย่างง่ายขึ้นมาในแต่ละชั้นส่วนย่อยๆ นั้น (เช่น ฟังก์ชันเชิงเส้น หรือฟังก์ชัน Quadratic เป็นต้น) ซึ่งจะใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่า นั้น (เช่น ค่า ϕ เป็นต้น) โดยที่สมการควบคุม (Governing equation) จะถูกสร้างขึ้นเพื่อให้การหาคำตอบของ ϕ เป็นที่น่าพอใจ ถ้าฟังก์ชันที่สมมติขึ้นเพื่อแทนค่าประมาณของ ϕ ถูกแทนไปในสมการควบคุมซึ่งจะทำให้ไม่ได้คำตอบที่แท้จริง (Exact solution) ดังนั้นค่าเศษตกค้าง (Residual) จะถูกนิยามเพื่อวัดค่าผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้น ค่าเศษตกค้างหรือค่าผิดพลาดจะถูกทำให้น้อยลง โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คูณเข้ากับกลุ่มของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weight Function) ผลลัพธ์จากการอินทิเกรตจะทำให้ได้กลุ่มของสมการพีชคณิต ซึ่งประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้ค่าของฟังก์ชันการประมาณที่กำหนดขึ้น

อย่างไรก็ดีทฤษฎีของไฟไนท์เอลิเมนต์ถูกพัฒนาขึ้นมาในตอนแรกเริ่ม เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งเป็นปัญหาเกี่ยวกับความเค้นและการเสียรูปร่างของของแข็ง ภายหลังได้มีการประยุกต์ใช้กับปัญหาของไหล เช่น Zienkiewicz และ Taylor (1991) เป็นต้น

2.1.2.3 วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method)

วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมถูกพัฒนาเริ่มมาจากวิธีของผลต่างสี่เหลี่ยมแบบสเปกตรัล กล่าวคือมีการตัดพจน์อันดับสูงออก ในที่นี้จะสนใจเพียงสูตรและวิธีที่ถูกสร้างขึ้นจนเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์หลายตัว เช่น FLUENT และ STAR-CD เป็นต้น ลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การอินทิเกรตสมการควบคุมของของไหลทั้งปริมาตรควบคุมเล็กๆ ทุกปริมาตรภายใต้ขอบเขตของปัญหา
- การแปลงรูปสมการ ซึ่งประกอบด้วย การแทนค่าเทอมต่างๆ (การพา การแพร่ การก่อดำ หรือ การสูญเสีย) ของสมการควบคุมที่อินทิเกรตแล้วนั้น ด้วยการประมาณค่าที่อยู่ในรูปแบบที่เหมือนกับผลต่างสี่เหลี่ยม คือ เทอมที่อยู่ในรูปแบบของค่าผลเฉลยที่โหนด การประมาณค่าดังกล่าวมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ทั้งนี้การแปลงรูปสมการนี้ทำให้เกิดระบบสมการพีชคณิตขึ้น
- การหาค่าตอบของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ (Iterative processes)

ขั้นตอนแรก คือ การอินทิเกรตปริมาตรควบคุม ซึ่งเป็นการทำให้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมแตกต่างจากเทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลอื่นๆทั้งหมด โดยขั้นตอนในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขนี้ยังคงสะท้อนให้เห็นหรืออีกนัยหนึ่งกล่าวคือ ยังอยู่บนพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์สสารและพลังงานตามหลักทางฟิสิกส์ไว้ในแต่ละเซลล์เล็กๆ ที่มีขนาดแน่นอนเหล่านั้น สิ่งนี้เองที่ทำให้เกิดความชัดเจนในความสัมพันธ์ระหว่างลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Algorithm) กับกฎการอนุรักษ์ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐาน จึงทำให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจแนวคิดของวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ และวิธีสเปกตรัล

การอนุรักษ์ตัวแปรการไหลในกรณีทั่วไป เช่น ค่า ϕ (เช่น ความเร็วในแนวแกนหรือเอนทัลปี) (แม้ว่าการอนุรักษ์เชิงตัวเลขที่ง่ายที่สุดของปริมาณเหล่านี้จะทำได้โดยการใช้ค่าเฉลี่ยที่โหนด) สามารถอธิบายเป็นสมการระหว่างกระบวนการต่างๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้น ของ ϕ ภายใน ปริมาตรควบคุม เทียบกับเวลา	=	ฟลักซ์สุทธิของ ϕ เนื่องจากการพาใน ปริมาตรควบคุม	+	ฟลักซ์สุทธิของ ϕ เนื่องจากการแพร่ใน ปริมาตรควบคุม	+	อัตราการเพิ่ม ϕ สุทธิใน ปริมาตรควบคุม
--	---	--	---	--	---	--

โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลประกอบด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงรูปที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ย้ายที่ประกอบไปด้วย เทอมของการพา (เนื่องจากการไหลของของไหล) และเทอมของการแพร่ (เนื่องจากความไม่เท่ากันของค่า ϕ ระหว่างจุดหนึ่งกับอีกจุดหนึ่ง) รวมทั้งเทอมของแหล่งกำเนิดหรือทำลาย (เทียบกับการสร้างและการทำลายของ ϕ) และเทอมของการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ขั้นพื้นฐานมีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการหาคำตอบแบบกระทำซ้ำจึงจำเป็นต้องนำมาใช้ วิธีการหาคำตอบที่นิยมใช้มากที่สุดคือ TDMA แบบ Line by Line ส่วนลำดับขั้นของการหาคำตอบคือ แบบ SIMPLE ให้แน่ใจว่าการเชื่อมโยงระหว่างความดันและความเร็วถูกต้อง โปรแกรมเชิงพาณิชย์บางโปรแกรมอาจจะให้ผู้ใช้เลือกเทคนิคที่ทันสมัยกว่า เช่น Stone's Algorithm และ วิธี Conjugate gradient เป็นต้น

2.1.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor)

Post-processor เป็นส่วนที่ใช้แสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ปัจจุบันโปรแกรมเชิงพาณิชย์การคำนวณพลศาสตร์ของไหลได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการทำกราฟิกที่ตีรวมทั้งสะดวกต่อการใช้งาน นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถแสดงผลจากการคำนวณในรูปแบบต่างๆเช่น

- รูปร่างของขอบเขตของปัญหาและแสดงกริด
- เวกเตอร์
- คอนทัวร์และเส้น
- ฟลิวต์พื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ
- เส้นการวิ่งของอนุภาค (Particle Tracking)
- จัดภาพการมองให้เหมาะสม (ในการหมุน การเคลื่อนที่ การย่อ-ขยาย เป็นต้น)
- การสร้างไฟล์ Postscript เป็นสี

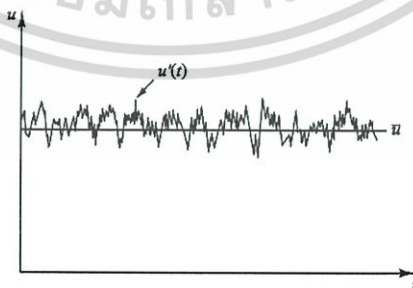
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันได้มีการทำภาพเคลื่อนไหวเสมือนจริง (Animation) สำหรับการแสดงผลเชิงพลศาสตร์ และนอกจากนี้ยังแสดงผลลัพธ์ที่แสดงอักษร รวมทั้งการทำข้อมูลส่งออก (Export) ไปยังโปรแกรมอื่นๆ

2.2 ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the turbulent flow)[4]

การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะดังต่อไปนี้

- สภาวะไม่คงตัวสูง (Highly unsteady): การไหลมีสภาวะไม่คงตัวสูง ความเร็วเป็นฟังก์ชันกับเวลาและรูปแบบของการวัดความเร็ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1
- มีความไม่ปกติ (Irregularity): การไหลมีความผิดปกติ ไม่สม่ำเสมอ เป็นลักษณะการไหลที่ทำให้การหาค่าตอบแบบแม่นยำตรงเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางสถิติ (Statistical)
- การแพร่ (Diffusivity): การไหลมีการแพร่กระจายตัวรูปแบบการไหลมีลักษณะสุ่ม (Random) แต่ไม่แสดงการกระจายตัวของการแกว่งไปมาของความเร็วที่รอบๆของไหล การไหลนี้จะไม่เรียกเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัม ความร้อนและมวล
- สามมิติ (Three dimensional): การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบสามมิติและเกิดการหมุนวน (Rotational) ของของไหล
- การสลายตัว (Dissipative): การไหลแบบปั่นป่วนสามารถสลายตัวได้
- ตัวเลขเรย์โนลด์สูง (Reynolds number): การไหลแบบปั่นป่วนมักเกิดที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง



รูปที่ 2.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล[5]

2.3.1 สมการควบคุม (Governing equation)

2.3.1.1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

2.3.1.2 สมการโมเมนตัม

$$\text{x component : } \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\text{y component : } \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + S_{My} \quad (3)$$

$$\text{z component : } \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + S_{Mz} \quad (4)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วของของไหล S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz} คือ แหล่งของโมเมนตัมในทิศทาง x, y, z

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล u, v, w คือ ความเร็วในทิศทาง x, y, z

ตามลำดับ

p คือ ความดัน τ คือ เทนเซอร์ของความเค้น

2.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

สมการนาเวียร์-สโตกส์ เป็นสมการที่ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งถูกสร้างขึ้น โดยการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันบนของไหล ร่วมกับสมมติฐานว่าความเค้นบนของไหล คือ ผลรวมของเทอมของความหนืดของการกระจายตัวและเทอมของความดัน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ ที่ไม่มีการระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่แน่นอน แต่จะระบุเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงแทน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ไม่สามารถใช้ระบุตำแหน่งได้ แต่สามารถบอกความเร็วได้ ทำให้คำตอบของชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ ถูกเรียกว่าสนามความเร็วหรือสนามการไหล ซึ่งเป็นตัวอธิบายถึงความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่ง และเวลาที่กำหนด โดยทั่วไปสมการนาเวียร์-สโตกส์

จะประกอบด้วยชุดสมการที่เกี่ยวข้อง 3 ชุดสมการด้วยกันคือ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน

2.5 การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (DNS) และการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (LES)

การคำนวณเพื่อหาลักษณะของการไหลผ่านชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์โดยตรง (Direct Numerical Simulation, DNS) นั้น จำเป็นที่จะต้องอาศัยทรัพยากรจำนวนมหาศาลเพื่อใช้ร่วมกับการคำนวณดังกล่าว เช่นจำเป็นต้องใช้กริด ที่มีขนาดเล็กมากในการคำนวณ โดยขนาดของกริดต้องเล็กมากพอที่จะสามารถวัดลักษณะการไหลของกระแสการไหลเล็กๆที่เกิดขึ้นได้ หรือต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงมาก เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ละเอียดและครบถ้วน จากการคำนวณผ่านชุดสมการนั้นในการใช้งานทางวิศวกรรมส่วนมากจะไม่เน้นถึงความละเอียดจากการจำลองมาก จึงได้ลดข้อจำกัดที่เกิดขึ้นนี้โดยนำชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์มาประยุกต์ให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น โดยเฉลี่ยความเร็วของกระแสการไหลนั้นและเพิ่มพจน์ของความเร็วแกว่ง เข้าไปในสมการเพื่ออธิบายถึงลักษณะการไหลนั้น ณ เวลาใดๆ ค่าความเร็วแกว่งที่เพิ่มเข้ามาในสมการจะถูกระบุในรูปของแบบจำลอง (Models) ต่างๆ ซึ่งจะทำให้ความต้องการทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณลดลงไปตามจำนวนแบบจำลองที่เพิ่มเข้าไปด้วย แต่ความผิดพลาดในการคำนวณที่เกิดจากการใช้แบบจำลองก็จะมากขึ้นตามไปด้วย เช่น LES หรือ RANS ดังรูปที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือดัดแปลงข้อมูลใดๆในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 วิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน

2.6 สมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation)

สมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์หรือ RANS เป็นแบบจำลองหนึ่งที่แสดงถึงลักษณะการไหลของของไหล ณ ช่วงเวลาเฉลี่ยหนึ่งโดยแบบจำลองนี้จะใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลัก ซึ่งชุดสมการในแบบจำลองสามารถใช้การประมาณค่าคุณสมบัติต่างๆตามองค์ความรู้ของการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อนำไปใช้เป็นค่าประมาณเฉลี่ยที่ใช้แก้ปัญหาในสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยที่รูปแบบสมการเมื่อของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้และมีลักษณะเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\rho \frac{\partial \overline{u'_j u'_i}}{\partial x_j} = \rho \overline{f_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\overline{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (5)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของของไหล u' คือ ความเร็วแกว่ง \overline{u} คือความเร็วเฉลี่ย μ คือความหนืดของของไหล $\overline{f_i}$ คือ แรงจากน้ำหนักวัตถุเฉลี่ย และ δ_{ij} คือ เดลตาโครเนกเกอร์ (Kronecker delta)

จากสมการพจน์ทางด้านซ้ายมือจะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าโมเมนตัมเฉลี่ยขององค์ประกอบในของไหลเนื่องมาจากความไม่คงที่ของการไหลเฉลี่ย และการนำพาโดยกระแสของการไหลเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกชดเชยด้วยค่าเฉลี่ยของแรงที่กระทำต่อวัตถุ (Body force) ซึ่งประกอบด้วย

- ค่า Isotropic stress เนื่องจากสนามความดันเฉลี่ย
- ค่า Viscous stresses
- ค่า Apparent stress, $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ เนื่องจากสนามความเร็วแกว่ง

ซึ่งค่าทั้ง 3 จะเรียกโดยทั่วไปว่า Reynolds stress โดยที่พจน์ของ Nonlinear Reynolds stress จำเป็นที่จะต้องเพิ่มแบบจำลองอื่นๆเข้ามาอีกเพื่อให้ใกล้เคียงกับสมการ RANS ซึ่งทำให้แตกแขนงเป็นแบบจำลองความปั่นป่วนอีกมากมาย เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบจำลองศูนย์สมการ Mixing length
2. แบบจำลองหนึ่งสมการ Spalart-Almaras
3. แบบจำลองสองสมการ $k-\varepsilon$ style (Standard, RNG, Realizable), $k-\omega$ และ ASM
4. แบบจำลองเจ็ดสมการ Reynolds stress

2.7 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon ($k-\varepsilon$)

แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 แบบใน $k-\varepsilon$ คือ Standard, RNG และ Realizable โดย 3 วิธีนี้มีการคำนวณที่คล้ายคลึงกันซึ่งมีทั้งสมการ k และ ε แต่ความแตกต่างของแบบจำลองคือ 1.) วิธีการคำนวณความหนืดปั่นป่วน 2.) การควบคุมตัวเลขพลันต์ที่ที่มีความปั่นป่วน 3.) การสร้างและสลายตัวในแต่ละพจน์ของสมการ ε สำหรับการใช้รูปแบบ Standard นั้นมีความถูกต้องพอสมควรในการอธิบายการไหลแบบความปั่นป่วนโดยทั่วไปซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรมและการจำลองการถ่ายโอนความร้อน แต่การคำนวณนี้ได้ถูกพัฒนาให้ดีขึ้นโดยใช้ Realizable $k-\varepsilon$ ซึ่งมีการคำนวณความหนืดของความปั่นป่วนโดยใช้สูตรและมีสมการที่ใช้คำนวณการสลายตัวแบบใหม่โดยถูกพิสูจน์มาจากสมการแม่นยำตรงสำหรับการถ่ายโอนของการแกว่งของการหมุนวนเฉลี่ย ซึ่งเพิ่มความละเอียดในการคำนวณมากขึ้น และใช้ Renormalization ในการจำลองซึ่งเหมาะสมกับแบบจำลองที่กำลังศึกษาโดยมีหลักการคำนวณเป็นดังต่อไปนี้

แบบจำลอง Renormalization group $k-\varepsilon$ ถูกพัฒนามาจากสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Renormalization group ซึ่งทำให้สมการมีความแตกต่างจากแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังนี้

- 1.) แบบจำลอง Renormalization group $k-\varepsilon$ มีการเพิ่มพจน์ในส่วนของสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ความปั่นป่วน (ε) ซึ่งทำให้เกิดความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดอย่างรวดเร็ว
- 2.) ผลของการหมุนวนบนความปั่นป่วนได้ถูกรวมเข้าไปในแบบจำลอง Renormalization group $k-\varepsilon$ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการไหลหมุนวน

3.) แบบจำลอง Renormalization group $k-\varepsilon$ กำหนดสมการสำหรับตัวเลขพลันต์ที่ของความปั่นป่วนแต่ในขณะที่ยังคงใช้แบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ กำหนดเป็นค่าคงที่ ซึ่งมีการนำไปใช้

4.) แบบจำลอง Renormalization group $k-\varepsilon$ ครอบคลุมตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ ได้

สมการของแบบจำลอง Renormalization group $k-\varepsilon$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_B - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (6)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_B) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (7)$$

โดยที่สามารถหาค่า μ_{eff} ได้จาก

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (8)$$

โดยที่

$$\hat{\nu} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$$

และ

$$C_\nu \approx 100$$

โดยที่เมื่อตัวเรย์โนลด์มีค่าสูงสามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้เป็น

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

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

R_ε คือผลของการหมุนวนซึ่งหามาได้จากความสัมพันธ์

โดยที่ $\eta \equiv S k / \varepsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$ (จากการทดลอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

โดยที่ $C_\mu = 0.0854$, $\sigma_k = 0.7194$, $\sigma_\varepsilon = 0.7194$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\eta_0 = 4.38$ ใช้

2.8 แบบจำลองมาตรฐาน k-omega

ใน ANSYS FLUENT ใช้แบบจำลองของ Wilcox ซึ่งในการคำนวณผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ (Low Reynolds effects) การอัด (Compressibility) และการกระจายตัวของการไหลแบบเฉือน (Shear flow spreading) ซึ่ง Standard model เป็นโมเดลที่ได้มาจากการทดลองด้วยสมการการถ่ายโอนของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k) และ อัตราการสลายตัวเฉพาะ (Specific dissipation rate, ω) โดยแบบจำลองนี้ถูกแก้ไขให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นและสมการการถ่ายโอนของแบบจำลอง Wilcox's นี้จะถูกนำมาใช้ใน ANSYS FLUENT สมการเป็นดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (11)$$

เมื่อ G_k คือ การสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก เกรเดียนท์ของความเร็วและ G_ω คือ การสร้าง ω ซึ่งถูกนิยามได้จากพื้นที่รอบข้าง เช่นเดียวกับแบบจำลอง k-epsilon Γ_k และ Γ_ω คือ ประสิทธิภาพการแพร่กระจายของ k และ ω ตามลำดับ, Y_k และ Y_ω คือ การสลายตัวของ k และ ω เนื่องจากความปั่นป่วน (Turbulence), S_k และ S_ω คือ แหล่งกำเนิด (Source terms) ที่จะนิยามตามการใช้งาน

2.8.1 การจำลองประสิทธิภาพการแพร่กระจาย

ประสิทธิภาพการแพร่กระจายสำหรับ $k-\omega$ จะกำหนดให้

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (14)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (15)$$

ที่ σ_k และ σ_ω คือ ตัวเลขพลันด์ทลที่ปั่นป่วนสำหรับ k และ ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 μ_t คือความหนืดปั่นป่วนที่ถูกคำนวณโดยรวม k และ ω ตามสมการดังต่อไปนี้
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทั้งหมดให้ลดเป็นสิ่งที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (16)$$

ตัวปรับแก้ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ

สัมประสิทธิ์ α^* ซึ่งเป็นตัวปรับแก้สำหรับตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆทำให้ความหนืดปั่นป่วนลดลง กำหนดให้

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + \text{Re}_t / R_k}{1 + \text{Re}_t / R_k} \right) \quad (17)$$

โดยที่

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (18)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_t}{3} \quad (19)$$

$$R_k = 6 \quad (20)$$

$$\beta_t = 0.072 \quad (21)$$

ตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงในแบบจำลองของ $k-\omega$ สัมประสิทธิ์ α^* ถูกกำหนดให้เป็น $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$

2.8.2 การจำลองการเกิดการปั่นป่วน

การเกิดพลังงานจลน์การปั่นป่วน

พจน์ของ G_k คือพลังงานจลน์การปั่นป่วน เป็นดังต่อไปนี้

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (22)$$

G_k ที่สอดคล้องกับสมมติฐาน Boussinesq คือ

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่ S คือโมดูลัสของเทนเซอร์เฉื่อยของอัตราความเครียดซึ่งเป็นวิธีเดียวกับรูปแบบของ $k-\varepsilon$ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้สงวนสิทธิ์ในลิขสิทธิ์และสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนำไปใช้

2.8.3 การเกิดอัตราการสลายตัวจำเพาะ (ω)

การเกิดของอัตราการสลายตัวจำเพาะถูกกำหนดให้

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (24)$$

โดยสัมประสิทธิ์ α ถูกกำหนดให้คือ

$$\alpha^* = \frac{\alpha_\infty}{\alpha} \left(\frac{\alpha_0 + \text{Re}_l / R_\omega}{1 + \text{Re}_l / R_\omega} \right) \quad (25)$$

โดยที่ $R_\omega = 2.97$, α^* และ Re_l เหมือนกับสมการข้างบน และที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงในแบบจำลอง $k-\omega$ จะมีค่า $\alpha = \alpha_\infty = 1$

2.8.4 รูปแบบการสลายตัวของความปั่นป่วน

การสลายตัวของพลังงานจลน์การปั่นป่วน

การสลายตัวของพลังงานจลน์การปั่นป่วนถูกกำหนดให้โดย

$$Y_k = \rho \beta^* f_\beta k \omega \quad (26)$$

โดยที่

$$f_\beta = \begin{cases} 1 & x_k \leq 0 \\ \frac{1+680x_k^2}{1+400x_k^2} & x_k > 0 \end{cases} \quad (27)$$

โดยที่

$$x_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (28)$$

และ

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_t)] \quad (29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเอกสารที่ออกให้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/15 + (\text{Re}_i / R_\beta)^4}{1 + (\text{Re}_i / R_\beta)^4} \right) \quad (30)$$

$$\zeta^* = 1.5 \quad (31)$$

$$R_\beta = 8 \quad (32)$$

$$\beta_\infty^* = 0.09 \quad (33)$$

$$\text{Re}_i = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (34)$$

การสลายตัวของ ω

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (35)$$

โดยที่

$$f_\beta = \frac{1 + 70x_\omega}{1 + 80x_\omega} \quad (36)$$

$$x_\omega = \frac{|\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}|}{(\beta_\infty^* \omega)^3} \quad (37)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (38)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (39)$$

โดยที่ S_{ij} คือ เทนเซอร์เฉื่อยของอัตราความเครียด

$$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_i) \right] \quad (40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่า β_i^* จากสมการด้านบนและ $F(M_i)$ คือ ตัวปรับแก้ความสามารถการบีบอัดได้ซึ่ง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(M_i) = \begin{cases} 0 & M_i > M_{i0} \\ M_i^2 - M_{i0}^2 & M_i \leq M_{i0} \end{cases} \quad (41)$$

โดยที่

$$M_i^2 \equiv \frac{2k}{\alpha^2} \quad (42)$$

$$M_{i0} = 0.25 \quad (43)$$

$$\alpha = \sqrt{\gamma RT} \quad (44)$$

ที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงในแบบจำลอง $k-\omega$ ค่า $\beta_i^* = \beta_\omega^*$ และกรณีที่ไม่สามารถถอดตัวได้ $\beta^* = \beta_i^*$

ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองนี้

$$\alpha_\infty^* = 1, \alpha_\omega^* = 0.52, \alpha_0 = \frac{1}{9}, \beta_\omega^* = 0.09, \beta_i = 0.072, R_\beta = 8$$

$$R_k = 6, R_\omega = 2.95, \zeta^* = 1.5, M_{i0} = 0.25, \sigma_k = 2.0, \sigma_\omega = 2.0$$

2.9 Reynolds Stress Model (RSM)

Reynolds Stress Model (RSM) เป็นแบบจำลองที่อธิบายถึงลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลที่ใกล้เคียงกับสมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (RANS) แบบจำลองหนึ่งในแบบจำลองนี้ได้เพิ่มสมการที่ใช้ในการคำนวณถึงลักษณะของการเคลื่อนที่ที่เกิดจากค่า Reynolds Stress ในลักษณะต่างๆเข้าไว้ด้วยกัน โดยสมการที่ถูกเพิ่มเข้ามาจะใช้เพื่อจำลองถึงปัจจัยอันเนื่องมาจากการเกิดความเครียดในระดับสูงของการไหลและปัจจัยอันเนื่องมาจากค่า Reynolds Stress ที่ส่งผลต่อลักษณะของการไหลที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง โดยจะมีการคำนวณจากค่า Reynolds Stress ของแต่ละตำแหน่งที่ต่างกันออกไป, $\overline{\rho u_i' u_j'}$ หรือเขียนในรูปของ Kinematic Reynolds Stress โดยเป็น

$$R_{ij} = \frac{-\tau_{ij}}{\rho} = \overline{u_i' u_j'} \quad \text{โดยที่ } \tau \text{ เป็นค่า Reynolds Stress Tensor และมีสมการเคลื่อนย้ายดังนี้}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{\rho u_k u_i' u_j'}) = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + p (\delta_{ij} u_k' + \delta_{ik} u_j') \right] - \rho \left(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)$$

$$\begin{aligned}
& + p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x'_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x'_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x'_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x'_k} - 2\rho\omega_k \left(\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x'_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x'_k} \left(\overline{u'_i u'_j} \right) \right] - \rho\beta \left(g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta} \right) + S_{user} \quad (45)
\end{aligned}$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล u' คือ ความเร็วแกว่ง u คือ ความเร็ว μ คือ ความหนืดของของไหล p คือ ความดันของของไหล ε_{jkm} คือ Permutation Symbol ω คือ สัดส่วนโดยมวล δ_{ij} คือ เดลตาโครเนกเกอร์ (Kronecker delta) β คือ การไล่ระดับของความเร็วที่พื้นผิว และ g แรงจากน้ำหนักวัตถุต่อมวล หรือเขียนได้ในรูป

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\overline{\rho u'_i u'_j} \right) + C_{ij} = D_{T,ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Omega_{ij} + D_{L,ij} + G_{ij} + S_{user} \quad (46)$$

โดยที่

C_{ij}	หมายถึง พจน์ของการพา	$D_{T,ij}$	หมายถึง การแพร่ความปั่นป่วน
$D_{L,ij}$	หมายถึง การแพร่ของมวลโมเลกุล	P_{ij}	หมายถึง ผลจากความเครียด
G_{ij}	หมายถึง ผลจากแรงลอยตัว	Π_{ij}	หมายถึง ความเครียดของความดัน
ε_{ij}	หมายถึง การสลายตัว	Ω_{ij}	หมายถึง ผลผลิตโดยระบบที่มีการหมุน
S_{user}	หมายถึง แหล่งกำเนิดที่จะนิยามตามการใช้งาน		

โดยที่ค่าในเทอมของ $D_{L,ij}$ G_{ij} และ S_{user} เป็นค่าที่ถูกเพิ่มเข้ามาในชุดสมการเพื่อให้การคำนวณรูปแบบการไหลของของไหลในบางรูปแบบมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ชุดรูปแบบสมการ RSM โดยทั่วไปเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\overline{\rho u'_i u'_j} \right) + C_{ij} = P_{ij} + D_{T,ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Omega_{ij} \quad (47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงไปของสนามการไหลตามค่า Reynolds Stress ที่ถูกระบุไว้
 ในสมการการเคลื่อนที่ในสมการการเคลื่อนที่ในแต่ละสมการย่อยทั้ง 6 สมการนั่นเอง โดยในการ

คำนวณจะมีการแปลงบางชุดสมการที่ใช้ข้างต้นให้เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจริงเพื่อความสะดวกในการใช้งานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงสมการที่ใช้ข้างต้นให้เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจริงเพื่อความสะดวกในการใช้งาน

พจน์	สมการจริง	รูปแบบชุดสมการในการคำนวณ	ที่มาของชุดสมการ
$D_{T,ij}$	$\frac{-\frac{\partial}{\partial x_k} [\overline{\rho u'_i u'_j u'_k}] + p(\delta_{ij} u'_i + \delta_{ik} u'_j)}{}$	$-\frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{v_i}{\sigma_k} \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_m} \right)$	การตั้งสมมติฐานในการไล่ระดับของการแพร่
Π_{ij}	$-p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x'_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x'_i} \right)$	$-C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right)$	โดยปกติจะใช้รูปแบบการคำนวณแบบ Launder model
ε_{ij}	$2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}$	$\frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij}$	คำนวณจากสมการ ε มาตรฐาน

โดยที่ v_i คือ ความหนืดจลศาสตร์ของความปั่นป่วน

P คือ ความดัน โดยจะมีค่าเท่ากับ $0.5 P_{ii}$

C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ 1.8 และ $0.6P$ ตามลำดับ (ในกรณีที่ใช้รูปแบบสมการในการคำนวณแบบ Launder Model)

สำหรับแบบจำลองนี้ พจน์ที่มีความสำคัญ คือ พจน์ของ Pressure Strain (Π_{ij}) ซึ่งเป็นพจน์ที่ใช้ในการปรับแก้ค่าความผันแปรของความดันที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระแสนวนที่เกิดขึ้นด้วยตัวเอง และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระแสนวนกับพื้นที่ที่มีการไหลของของไหลด้วยความเร็วเฉลี่ยที่ต่างกันไป ผลที่เกิดขึ้นจากการปรับแก้ด้วยตัวแปรนี้คือปรับแก้ค่า Normal Reynolds Stress

ให้ความปั่นป่วนเป็นรูปแบบ Isotropic มากขึ้น ด้วยการกระจายพลังงาน และค่า Shear Reynolds Stress ลง โดยเฉพาะในบริเวณที่ใกล้ผนัง เพราะผนังจะส่งผลให้เกิดความผันแปรของความดันที่มีความปั่นป่วนเป็นแบบ Anisotropic โดยเกิดการลดทอนของ Normal Reynolds Stress ในทิศทางที่ตั้งฉากกับผนังนั่นเอง

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นมาของพจน์นี้จึงส่งผลให้การจำลองโดย RSM ไม่จำเป็นที่จะต้องตั้งสมมติฐานให้ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากความผันแปรของความดันมีรูปแบบ Isotropic เสมอไป ส่งผลให้แบบจำลองนี้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

ถึงแม้ว่าแบบจำลอง RSM จะค่อนข้างซับซ้อน แต่ถือได้ว่าเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดในกลุ่มของแบบจำลองที่มีศักยภาพในการจำลองปรากฏการณ์ของความปั่นป่วนได้อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะการไหลที่เป็นเส้นโค้งมีการหมุนและมีอัตราความเครียดในการไหลสูง เช่น กระแสการไหลในไซโคลอน ในเตาเผาหรือกระแสการไหลของกระบวนการแยกต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการทำนายลักษณะการไหลในรูปแบบต่างๆ ได้เหมือนกันหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าแบบจำลอง k-epsilon อีกด้วย เนื่องจากความต้องการทรัพยากรในการคำนวณสูงมากจึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมนักในการนำไปใช้กับโปรแกรมสำเร็จรูป แต่ยังมีนักพัฒนาวิจัยกันเรื่อยมา จนในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปหลายโปรแกรมที่มีแบบจำลองนี้ให้ตัวเลือกใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงจุดเด่นและจุดด้อยของแบบจำลองแบบ Reynolds Stress Model (RSM)

จุดเด่น	จุดด้อย
<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นแบบจำลองที่ศึกษาผลกระทบของแบบการไหลมากที่สุดแบบหนึ่ง 2. การคำนวณต้องการเพียงแค่เงื่อนไขและ/หรือค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่เกี่ยวข้องเท่านั้น 3. ครอบคลุมทั้งความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากความผันแปรของความดันมีรูปแบบ Isotropic และ Anisotropic โดยไม่ต้องตั้งสมมติฐานให้เป็นเฉพาะ Isotropic เสมอไป 4. มีความแม่นยำสูงในการคำนวณคุณสมบัติการไหล รวมทั้งค่า Reynolds Stress ทั้งการไหลอย่างง่ายและการไหลที่ซับซ้อน เช่น การไหลในช่องที่ไม่สมมาตร เป็นต้น 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก 2. ยังไม่ได้รับการตรวจสอบกับการทดลองมากเทียบเท่ากับแบบจำลองแบบ k-epsilon 3. ผลการจำลองในลักษณะการไหลบางแบบก็ยังมีผลที่ไม่แตกต่างจากแบบจำลองแบบ k-epsilon เช่น การไหลของลำเจ็ตแบบอิสระ (Unconfined Jet) เป็นต้น

2.10 Discrete Phase Modeling[6,7]

เป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าอนุภาคเป็นทรงกลมกระจายตัวอย่างเบาบางในเฟสของของไหล ดังนั้นปริมาตรของอนุภาคในของไหลจะน้อยมากจนตัดทิ้งได้ (สัดส่วนโดยปริมาตรน้อยกว่า 10-20%)

สำหรับแบบจำลอง Lagrangian discrete phase ในโปรแกรม FLUENT จะใช้ตามวิธีของ Eulerian-Lagrangian ซึ่งสถานะของไหลจะถูกทำให้ต่อเนื่อง โดยใช้เวลาเฉลี่ยของสมการนาเวียร์-สโตกส์ในการหาค่าตอบ และสถานะที่กระจายตัวอยู่ จะหาค่าตอบได้โดยติดตามอนุภาคจำนวนมากผ่านการคำนวณบนสนามการไหล ซึ่งสถานะที่กระจายตัวจะสามารถแลกเปลี่ยนโมเมนตัม มวล และพลังงานกับสถานะของไหลภายใต้กรอบของ Eulerian-Lagrangian

เส้นทางโคจรของอนุภาคถูกคำนวณภายใต้กรอบของ Eulerian-Lagrangian ระหว่างการคำนวณของสถานะของไหล ซึ่งทำให้ได้ตัวแบบที่เหมาะสม สำหรับการไหลที่บรรทุกอนุภาคอยู่ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบรรทุกอนุภาคในระบบจะมีค่าน้อยกว่า (3-5%) ดังนั้นจึงสมมติว่าการมีอยู่ของอนุภาคไม่มีผลกระทบต่อสนามการไหล (One-way coupling) เพราะฉะนั้นในรูปของวิธี Eulerian-Lagrangian (One-way coupling) สมการของการเคลื่อนที่จะสามารถตัดพจน์ของแรงกระทำระหว่างอนุภาคที่เพิ่มเข้ามา เช่น เกรเดียนต์ของความดัน (Pressure gradient), Thermophoretic, Rotating reference frame, Brownian และ Saffman lift เป็นต้น ออกไป จะได้รูปสมการเป็น

$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} (u_i - u_{pi}) + \frac{(\rho_p - \rho) g_i}{\rho_p} \quad (48)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (49)$$

ซึ่งเทอม $\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24}$ คือแรงหน่วง (Drag force) ต่อมวลหนึ่งหน่วยของอนุภาค ρ และ μ คือความหนาแน่นและความหนืดการไหลตามลำดับ ρ_p และ d_p คือความหนาแน่นและเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตามลำดับ C_D คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง (Drag coefficient) u_i และ u_{pi} เป็นความเร็วของแก๊สและอนุภาคตามลำดับ g_i คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในทิศทาง i Re_p คือค่าตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (50)$$

ในโปรแกรม FLUENT สัมประสิทธิ์ความหน่วงสำหรับอนุภาคทรงกลม คือ การคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ที่พัฒนาโดย Morsi และ Alexander ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์ (Re_p) และสำหรับการกระจายตัวของอนุภาคในการป้อนเข้าสู่ระบบจะเป็นไปตามวิธีของ Rosin-Rammler Diameter Distribution ซึ่งจะแบ่งอนุภาคเป็นหลายขนาด จำเป็นต้องกำหนดข้อมูลดังนี้

1.) ขนาดอนุภาค 3 ขนาดในการกระจายตัว คือ ขนาดเล็กสุด ขนาดใหญ่สุดและขนาดเฉลี่ย (\bar{d})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2.) ตัวแปรการกระจาย (Spread parameter, n) คำนวณจากสมการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทั้งหมด ให้ลดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d/\bar{d})} \quad (51)$$

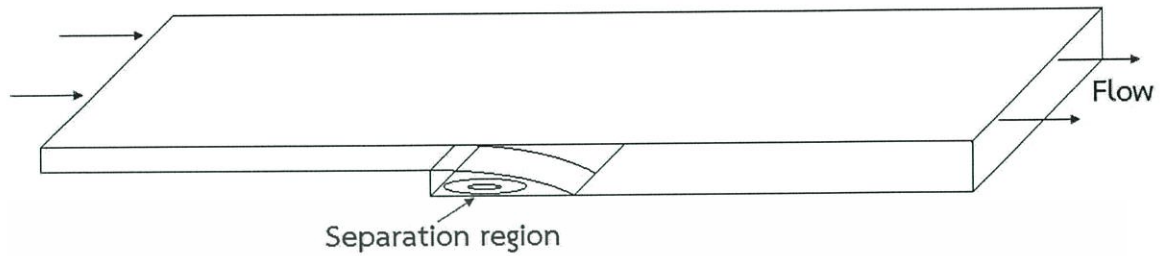
เมื่อ Y_d คือสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่สนใจ (d)

3. จำนวนของอนุภาคแต่ละการกระจายขนาด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 การไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง



รูปที่ 2.3 การไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง

ของไหลจะเข้าสู่ท่อในด้านที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็ก แล้วเคลื่อนที่ผ่านยังไปยังชั้นบันไดกลับหลังที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันนี้จะทำให้รูปแบบการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยของไหลจะมีความเร็วพื้นที่ผิวสัมผัสลดลงจนมีความดันของการไหลมีค่าเป็นศูนย์และเกรเดียนต์ของความเร็วที่จุดนี้มีค่าเป็นศูนย์ เรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะการแยก (Separation) หลังจากนั้นเกิดการไหลย้อนกลับซึ่งเกิดขึ้นจากของไหลที่เคลื่อนที่ไปมีความดันที่ต่ำกว่าความดันที่ปลายทางจึงทำให้เกิดความดันที่เป็นบวก ($\frac{dp}{dx} > 0$) เรียกว่า ความดันแตกต่างตรงกันข้าม (Adverse pressure gradient)

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น จึงทำให้เกิดการนำมาประยุกต์ใช้ในการนำการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังนี้มาใช้แยกขนาดของอนุภาค ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นจะเคลื่อนที่จากการที่ของไหลเคลื่อนที่เข้ามาปะทะกับอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นเกิดจากแรง 2 ประเภท คือ แรงดูด (Drag force) และแรงยก (Lift force) ซึ่งแรงดูดเป็นแรงที่มีทิศทางขนานกับทิศทางการไหลของของไหล แรงดูดนั้นสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท แรงดูดเนื่องจากความเค้นเฉือนซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่าแรงเสียดทานผิว (Skin friction force) และแรงดูดที่เกิดจากความดัน (Pressure force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 วรรณกรรมปริทัศน์

-การจำลองการไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังโดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

K.F. YU และคณะ ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนที่มีอนุภาคไหลผ่านเข้าไปในชั้นบันไดกลับหลัง สำหรับเฟสของไหลนั้นจะใช้การจำลองแบบการหมุนวนขนาดใหญ่ขณะที่(อนุภาคไม่ส่งผลต่อสนามการไหล) ซึ่งจะพิจารณาผลกระทบของแรงจุด และแรงโน้มถ่วงที่เกิดขึ้นบนอนุภาค การจำลองนี้ดำเนินการโดยใช้ตัวแปรการไหลและขนาดของแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบซึ่งเป็นการทดลองของ Fessler and Eaton ซึ่งจะวัดจากสนามการไหลใน 2 มิติของทั้งสองสถานะ โดยเฟสของของไหลมีตัวเลขเรย์โนลด์เป็น 18,400 และอนุภาคเป็นทองแดงมีขนาด $70 \mu\text{m}$ และอนุภาคเป็นแก้วมีขนาด $150 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมกับการทดลอง การจำลองนั้นจะทำนายรายละเอียดเกี่ยวกับสนามการไหลของทั้ง 2 เฟส

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการกระจายตัวของอนุภาคที่มีตัวเลขโตกส์ที่แตกต่างกันในสนามการไหลที่มีความปั่นป่วน การเคลื่อนที่ของอนุภาคแก้วทรงกลมที่ขนาด 2, 20, 50, 100 และ $200 \mu\text{m}$ รูปแบบของแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของ Fessler และ Eaton ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่เป็น 2 มิติโดยที่แกน z ให้ถือว่ามีความกว้างมากๆ และแกน y มีอัตราส่วนความสูงที่ 5:3 โดยอากาศที่ไหลมีตัวเลขเรย์โนลด์ 18,400 ที่ความเร็วสูงสุด 10.5 m/s และความสูงของชั้นบันได 26.7 mm และมีความยาวท่อด้านหลังชั้นบันไดเป็น 34 เท่าของความสูงชั้นบันได ในที่นี้ได้แนะนำอนุภาคที่ใช้คือทรงกลมแก้วมีขนาด $150 \mu\text{m}$ ความหนาแน่น $2,500 \text{ kg/m}^3$ และทรงกลมทองแดงมีขนาด $70 \mu\text{m}$ ความหนาแน่น $8,800 \text{ kg/m}^3$

ผลสรุปของงานวิจัยนี้คือ ยิ่งขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคหลุดออกจากการหมุนวนของของไหลง่ายขึ้น จนกระทั่งการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค และหากต้องการให้อนุภาคขนาดใหญ่สามารถอยู่ในกระแสหมุนวนของของไหลได้จะต้องลดความเร็วของของไหลเข้าและผลของแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่ออนุภาคที่เคลื่อนที่ในแนวแกน x นั้นจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นน้อยมากแต่แรงโน้มถ่วงที่กระทำกับอนุภาคในแนวแกน y จะส่งผลต่ออนุภาคที่มีขนาด $100 \mu\text{m}$ ขึ้นไปโดยที่อนุภาคนี้อาจเคลื่อนที่ตกลงมาต่ำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การศึกษาลักษณะการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง

จากการศึกษางานวิจัยของ Armaly และคณะ ศึกษาการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง โดยวัดความเร็วและระยะแรกที่ของไหลกระทบผนังที่ด้านล่าง (Reattachment) ของชั้นบันไดกลับหลัง (เดี่ยว) ด้วยการใช้ Laser-Doppler งานวิจัยนี้จะศึกษาช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วงระหว่าง $70 < Re < 8000$ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นคุณลักษณะของความยาวของการแยกที่ตัวเลขเรย์โนลด์ แตกต่างกัน เครื่องมือ Laser-Doppler ไม่เพียงแค่วัดได้แต่ผลที่ได้ของการไหลหมุนวนย้อนกลับ (Recirculating flow) ในช่วงแรกของการไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังแต่ยังสามารถแสดงบริเวณของการไหลแบบแยกไหลและนอกจากนั้นบริเวณที่เกิดการแยกนั้นยังไม่มีผู้ใดได้ทำการวิจัย

จากวิจัยในข้างต้น ทำให้เกิดการพิสูจน์ทราบขึ้นโดยใช้ข้อมูลของการวิจัยนี้มาอ้างอิง โดยตัวเลขเรย์โนลด์ที่นำมาใช้อ้างอิง เท่ากับ 389 ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 0.5933 m/s และท่อทางเข้ามีความสูง 5.2 mm มีความยาว 200 mm และความสูงของชั้นบันได 4.9 mm มีความยาว 500 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การจำลอง

ในบทนี้จะอธิบายขั้นตอนของการจำลองการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อหาสถานะที่ดีที่สุดที่จะสามารถแยกอนุภาคได้ ซึ่งในการจำลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1.) การจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง 2.) ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อการแยกอนุภาค 3.) ศึกษาอิทธิพลของความสูงของชั้นบันไดที่มีผลต่อการแยกอนุภาค 4.) ศึกษาอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์์ที่มีผลต่อการแยกอนุภาค

3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง

3.1.1 แบบจำลองของชั้นบันไดกลับหลัง (Backward facing-step)

แบบจำลองสร้างขึ้นโดยอ้างอิงจากงานวิจัย [1] โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นถูกกำหนดเป็นแบบจำลองสองมิติ ซึ่งท่อทางเข้ามีความสูง 5.2 mm และมีความยาว 200 mm ความสูงของชั้นบันได 4.9 mm และท่อทั้งหมดยาว 700 mm แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม GAMBIT ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 กริดของแบบจำลองที่สร้างโดยใช้โปรแกรม GAMBIT

3.1.2 สภาวะขอบเขต

สภาวะขอบเขตทั้งหมดอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัย [1] ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะขอบเขต

รายละเอียด	ค่า
ความเร็วของอากาศขาเข้า	0.5933 m/s
ความดันเกจของอากาศขาออก	0 atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 สมมติฐานของแบบจำลอง

3.1.3.1 แบบจำลองที่สร้างขึ้นกำหนดให้เป็นสองมิติ

3.1.3.2 ของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้

3.1.3.3 การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ

3.1.3.4 ความเร็วของอากาศเข้ามีค่าคงที่

3.1.3.5 อนุภาคกระจายตัวอยู่ในของไหลอย่างเบาบางซึ่งไม่ส่งผลต่อสนามการไหล

3.1.4 สมการควบคุม

เนื่องด้วยการจำลองเป็นการไหลแบบราบเรียบ ดังนั้นการตั้งสมมติฐานประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1.4.1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (52)$$

3.1.4.2 สมการโมเมนตัม

$$\text{X component : } \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (53)$$

$$\text{Y component : } \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \rho g \quad (54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รายละเอียด	รูปแบบ
Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind

3.2 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

ผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม FLUENT จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยกระบวนการในขั้นตอนนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

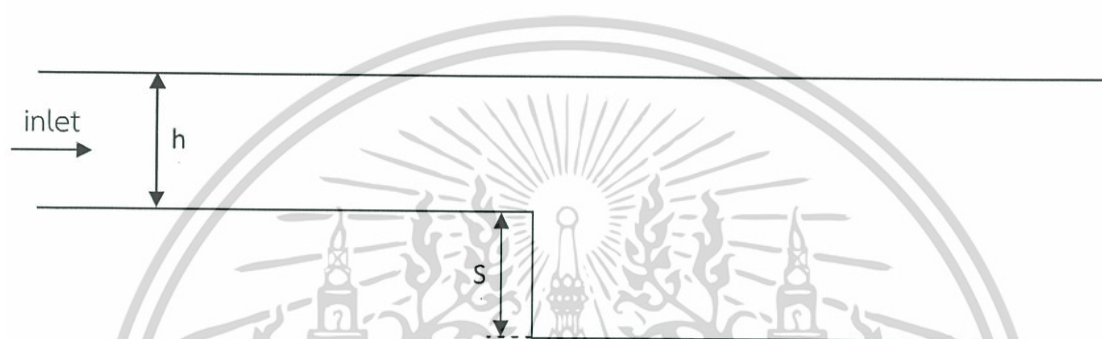


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ศึกษาอิทธิพลของความสูงชั้นบันได

เป็นการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความสูงชั้นบันไดที่มีผลต่อระยะเวลาการตกของอนุภาคที่ขนาดต่างกันโดยกำหนดให้มีความหนาแน่นที่เท่ากัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของความสูงท่อทางเข้ากับความสูงของชั้นบันได ซึ่งในที่นี้ความสูงของท่อทางเข้าจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่คือ 5.2 mm และเปลี่ยนความสูงของชั้นบันไดดังตารางที่ 3.3 ซึ่งแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ขอบเขตของแบบจำลอง

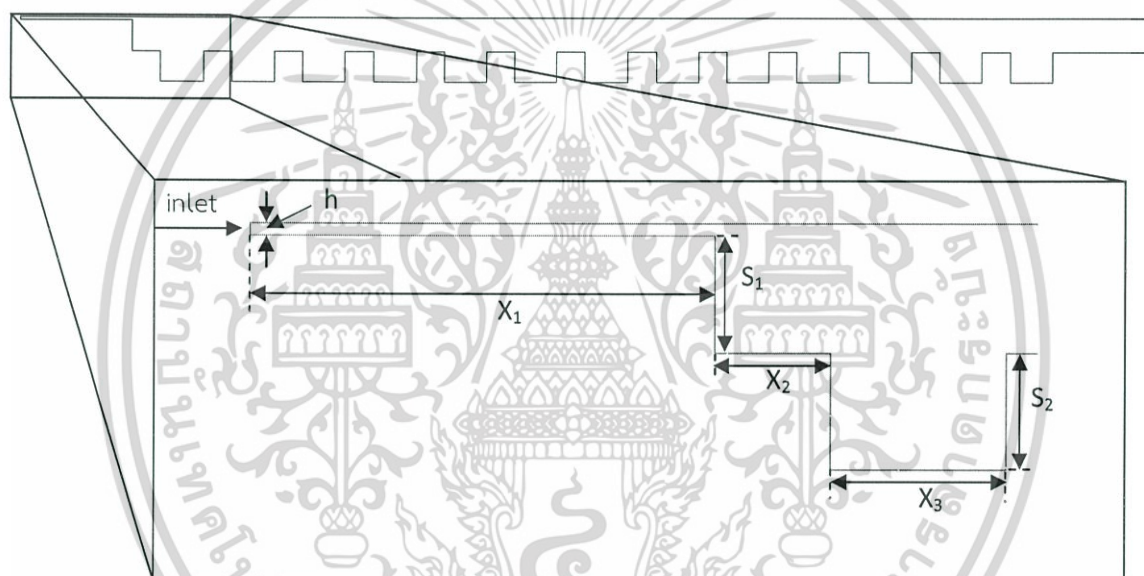
ตารางที่ 3.3 ความสูงของชั้นบันได

	การทดลอง		การจำลอง	
S (mm)	4.9	4.9	20	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ศึกษาอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์

เป็นการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการไหลโดยเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ซึ่งอยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบที่มีผลต่อระยะตกของอนุภาคที่ขนาดต่างกัน โดยมีตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 389 (ความเร็ว=0.5933 m/s) แต่เมื่อได้ทำการจำลองในโปรแกรม พบว่าอนุภาคออกจากท่อทางออกทั้งหมด ดังนั้นจึงลดตัวเลขเรย์โนลด์เป็น 38.9 (ความเร็ว=0.05933 m/s) ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่เหมาะสมกับการจำลอง จากนั้นทำการเพิ่มความเร็วเป็น 2, 3, 4 และ 5 เท่าของความเร็วที่ใช้ในการจำลองและทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจำลองดังรูปที่ 3.5 โดยที่มีรายละเอียดของแบบจำลองดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขอบเขตของแบบจำลอง

หมายเหตุ : รูปดังกล่าวนี้เป็นแบบจำลองที่มีการปรับเปลี่ยนเพื่อให้อนุภาคสามารถถูกดักจับได้ในโปรแกรม เนื่องจากแบบจำลองเดิมไม่สามารถดักจับอนุภาคได้

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของแบบจำลอง

	h (mm)	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	X ₃ (mm)	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)
การจำลอง	5.2	200	50	75	50	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การหากริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบ (Grid independent)

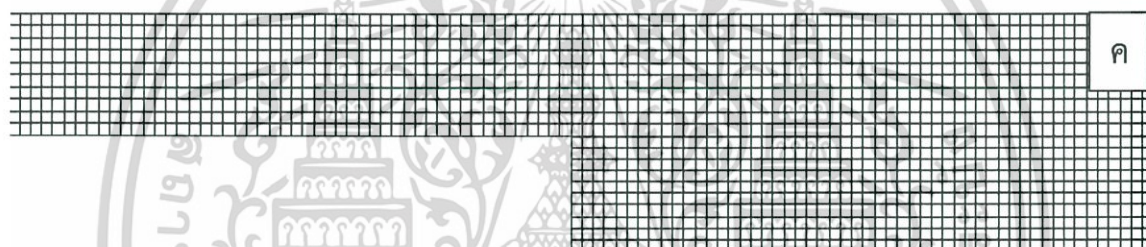
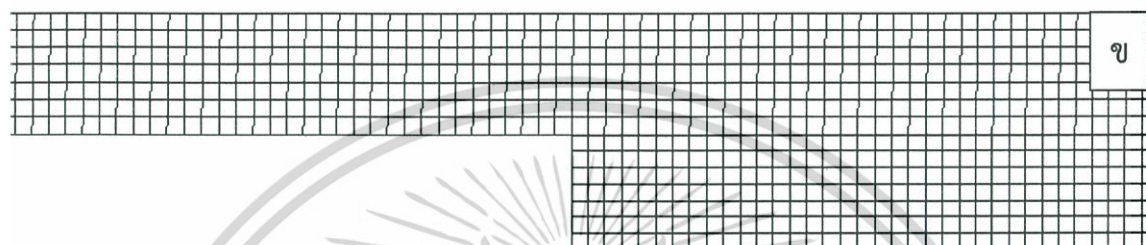
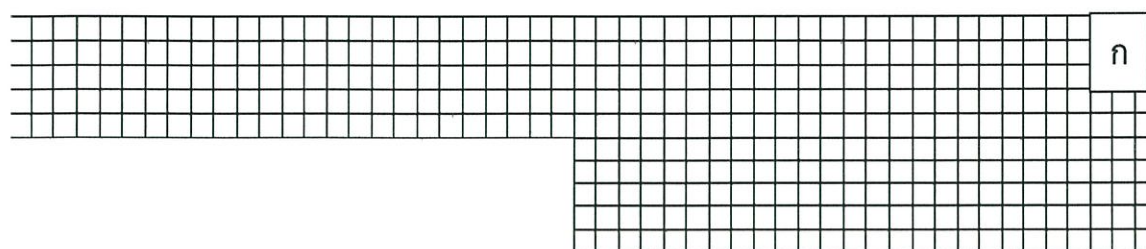
ในส่วนนี้เป็นการหากริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบโดยการหาจำนวนกริดที่น้อยที่สุด ที่ทำให้ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง ซึ่งเมื่อเพิ่มจำนวนกริดแล้วจะส่งผลต่อผลการจำลองน้อยมาก ซึ่งไม่คุ้มค่ากับทรัพยากรที่ต้องใช้ โดยแบบจำลองนี้ถูกสร้างในโปรแกรม GAMBIT มีรูปร่างลักษณะดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย ส่วนของท่อทางเข้า ส่วนของการหมุนวนและส่วนของท่อทางออก สำหรับความเร็วในงานวิจัยที่นำมาอ้างอิงนั้นเท่ากับ 0.5933 m/s และความสูงของชั้นบันไดเท่ากับ 4.9 mm โดยที่นี้ กำหนดลักษณะกริดเป็นแบบสี่เหลี่ยม (Quad)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของชั้นบันไดกลับหลัง

ขนาดของกริดที่ทำการปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 1 ถึง 0.25 mm เพื่อทำการหากริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบดังรูปที่ 4.2 สำหรับข้อมูลของคุณภาพกริดและปริมาณกริดแสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การหากริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบของแบบจำลองที่ความสูงของชั้นบันไดเท่ากับ 4.9 mm และขนาดของกริดที่ทำการหากริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบคือ (ก) 1 mm (ข) 0.75 mm (ค) 0.5 mm (ง) 0.25 mm

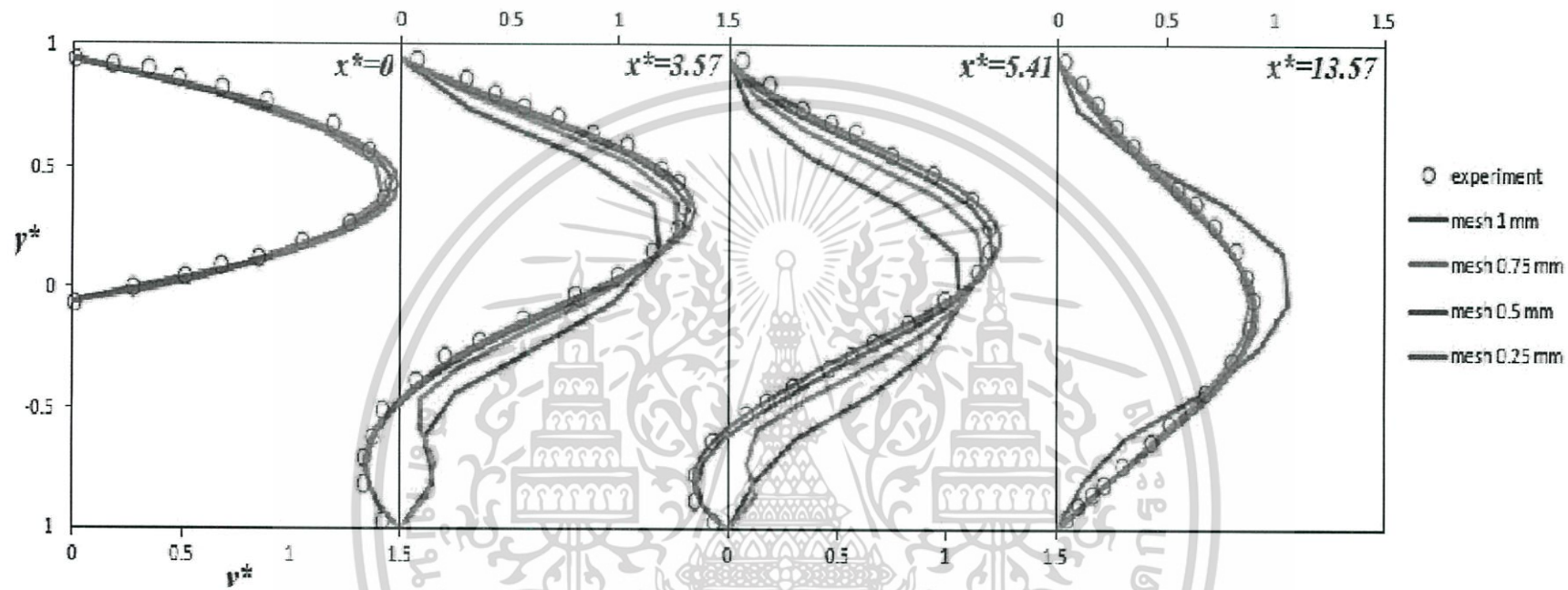
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบคุณภาพและปริมาณของกริดที่มีขนาดแตกต่างกัน

ขนาด (mm)	คุณภาพกริด		ปริมาณกริด	
	Minimum Orthogonal	Maximum Aspect Ratio	เซลล์	โหนด
1	1	1.44298	6000	6711
0.75	9.998×10^{-1}	1.46540	11207	12156
0.5	1	1.44298	24000	25421
0.25	1	1.42875	98800	101642



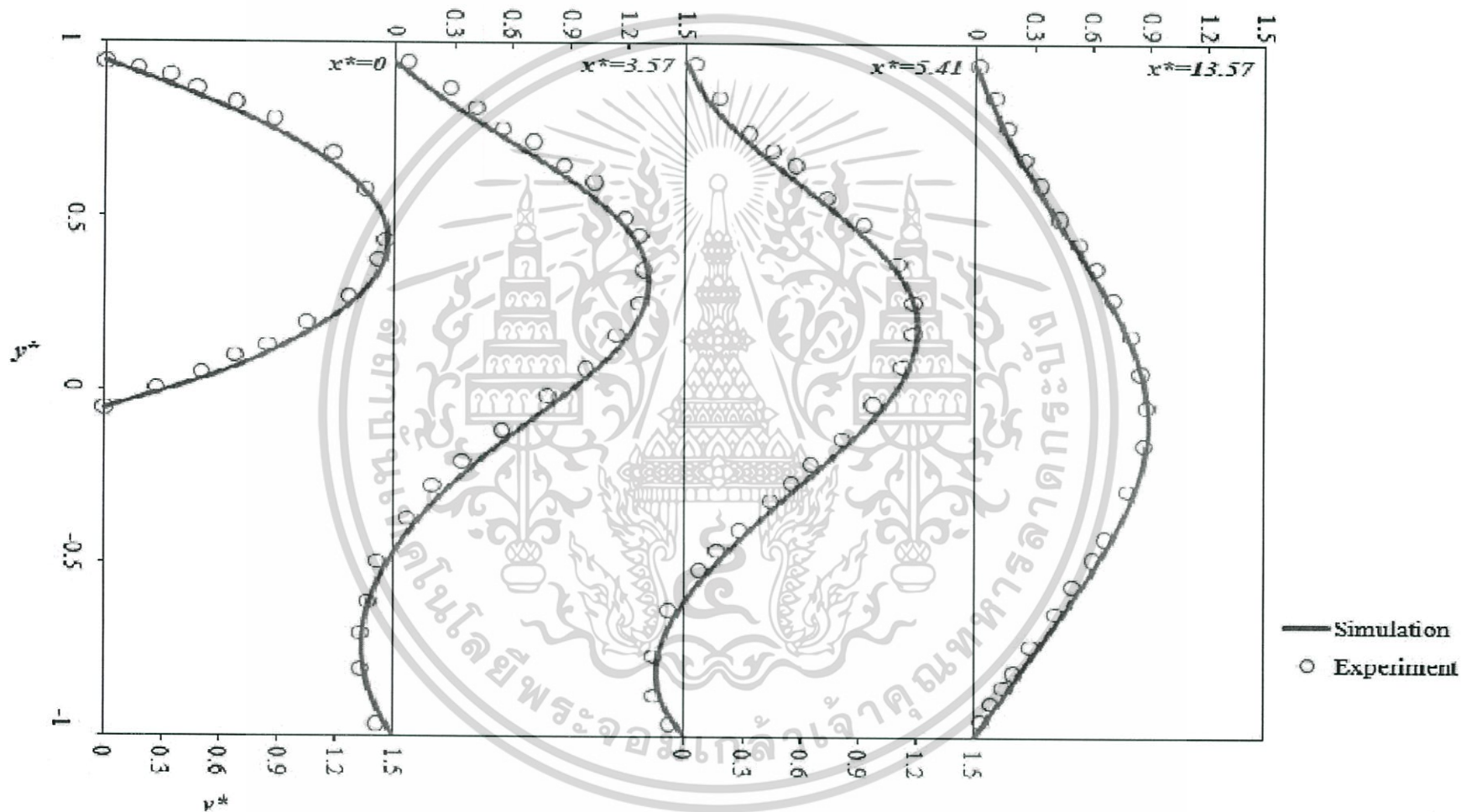
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนกริดที่ใช้ในการจำลองที่มีขนาดของกริดที่แตกต่างกัน

จากผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าที่กริดขนาด 0.5 mm และ 0.25 mm มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของงานวิจัยที่อ้างอิง ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาในการจำลองจึงใช้กริดขนาด 0.5 mm ก็เพียงพอที่จะใช้ในการจำลองแล้ว

4.2 การเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการจำลองกับการทดลองของการไหลแบบราบเรียบที่ตำแหน่ง x^* ต่างๆกัน



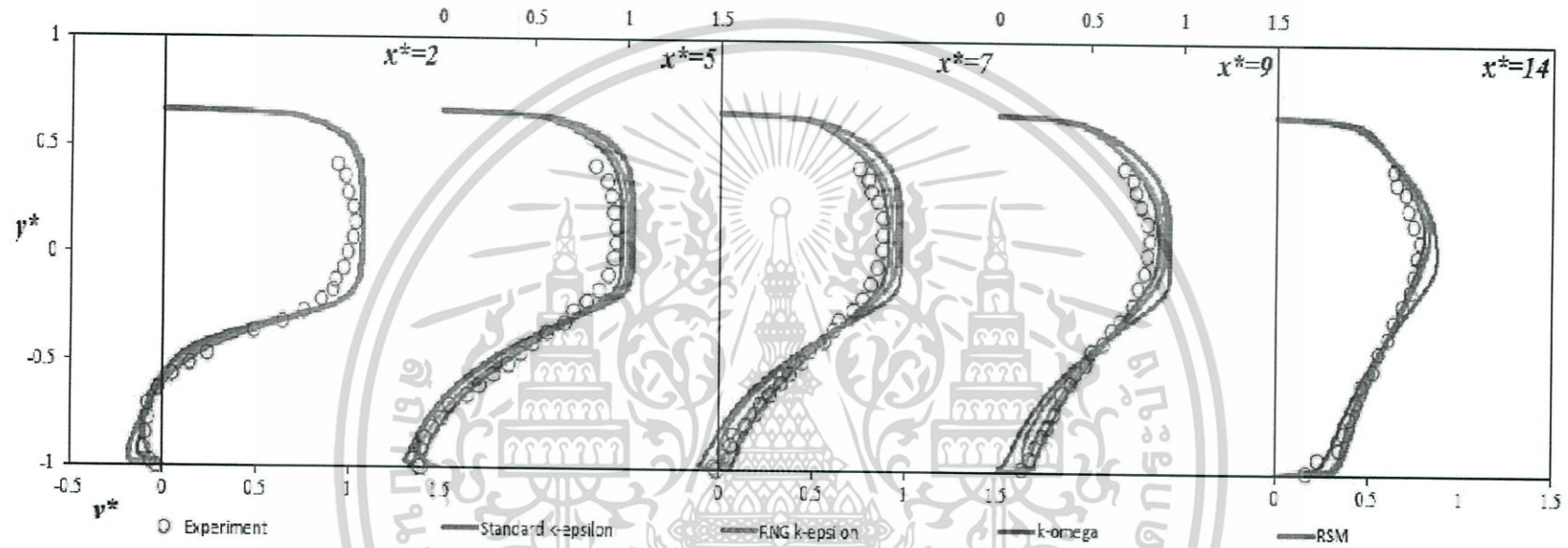
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการจำลองกับการทดลองของการไหลแบบราบเรียบ

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองเทียบกับการทดลองของการไหลแบบราบเรียบนั้น จะพบว่า ผลการจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังนั้นแบบจำลองและการตั้งค่าสภาวะขอบเขตสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการจำลองของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังที่มีรูปแบบอื่นได้ที่มีการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งหากนำการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังนั้นมาใช้ในการแยกอนุภาค จำเป็นจะต้องเจาะรูทางด้านล่างของท่อเพื่อให้อนุภาคสามารถถูกแยกออกจากกันได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองของการไหลแบบปั่นป่วนที่ตำแหน่ง x^* แตกต่างกัน

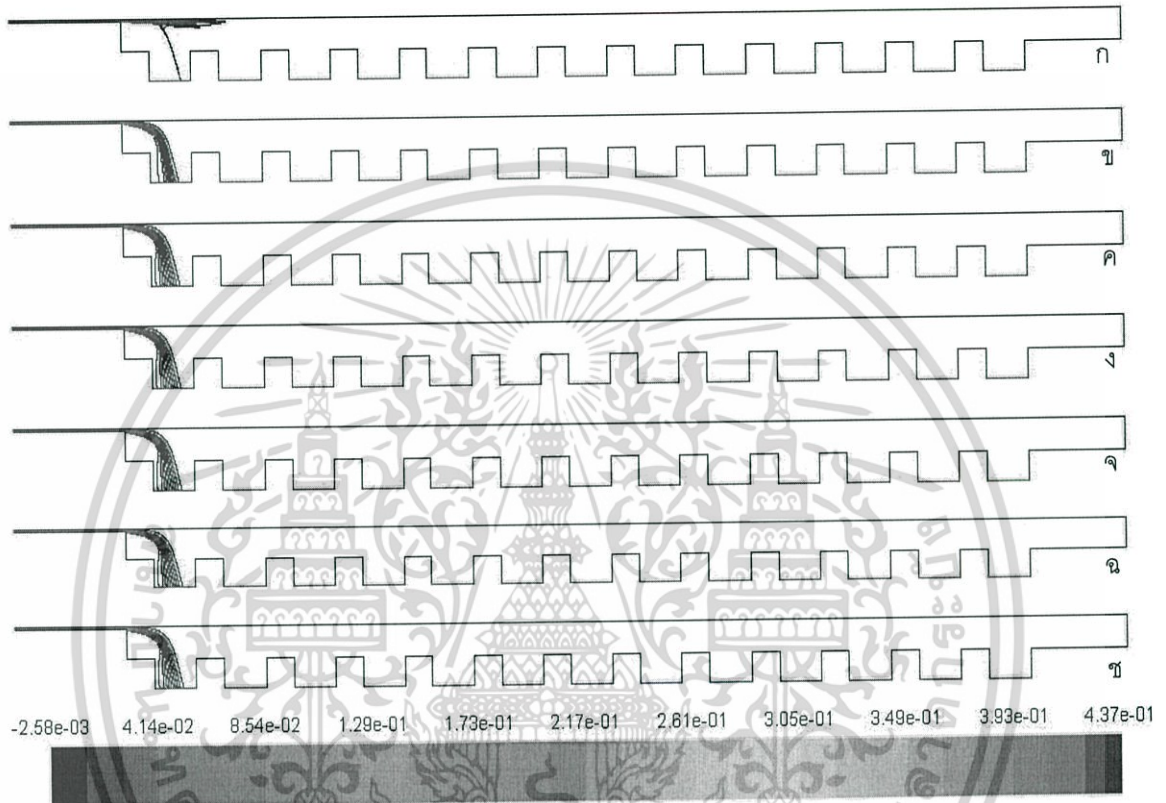


รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองของการไหลแบบปั่นป่วนที่ตำแหน่ง x^* ต่างกัน

จากการเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลองของการไหลแบบปั่นป่วนที่มีแบบจำลองที่แตกต่างกัน เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง จากผลการจำลองพบว่า แบบจำลอง RNG k-epsilon เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังเนื่องจาก แบบจำลอง RNG k-epsilon นั้นมีการเพิ่มพจน์ในส่วนของสมการอัตราการผลิตตัวของพลังงานจลน์ความปั่นป่วน ซึ่งทำให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น อีกทั้งมีการคำนวณผลของการหมุนวนและครอบคลุมตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ ซึ่งการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังนี้มีทั้งการหมุนวนอีกทั้งในการเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลองนี้ยังเกิดขึ้นในตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ

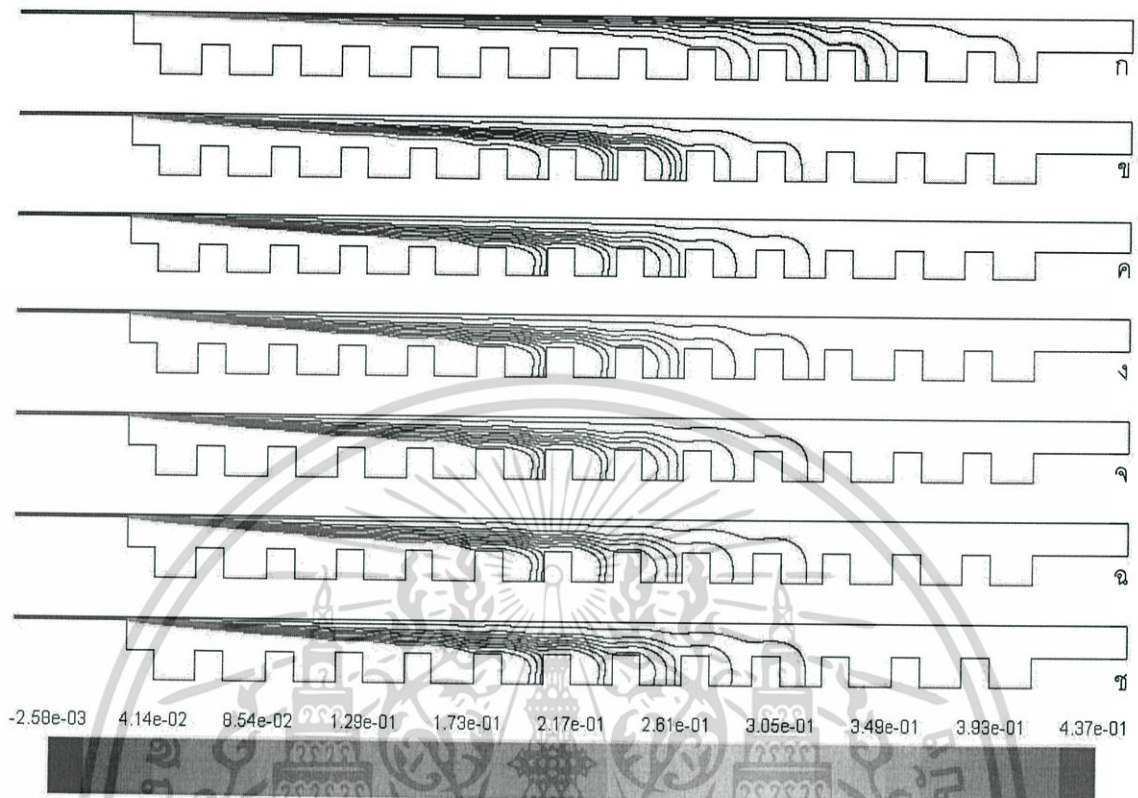
เมื่อทำการเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลองแล้วจึงนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกอนุภาคด้วยการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลัง ซึ่งการนำมาประยุกต์ใช้ในครั้งนี้จะนำการไหลแบบราบเรียบมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากผลการจำลองในเบื้องต้น คือนำรูปแบบท่อที่ใช้เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองนั้น พบว่าเมื่อใส่อนุภาคเข้าไปยังการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังแบบปั่นป่วน จะทำให้อนุภาคนั้นหลุดออกยังทางออกท่อ ซึ่งไม่มีแนวโน้มที่จะตกมายังผนังท่อด้านล่าง หากจะใช้การไหลแบบปั่นป่วนในการแยกอนุภาคจำเป็นจะต้องต่อท่อให้ยาวมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้จำนวนครีมีจำนวนมากส่งผลให้ใช้เวลาในการจำลองที่มาก ดังนั้นจึงทำการจำลองการแยกอนุภาคด้วยการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของท่อให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง คือเจาะรูที่ผนังท่อด้านล่างเพื่อให้อนุภาคสามารถถูกดักจับได้ การจำลองตอนแรกเริ่มจากการจำลองท่อที่มีรูปแบบเหมือนกับการทดลอง แต่มีการทำช่องทางออกของอนุภาคที่ผนังท่อด้านล่าง ซึ่งความกว้างของช่องนั้นมีค่าเท่ากับ 75 mm โดยเว้นระยะห่างระหว่างช่องเท่ากับ 50 mm แต่ผลการจำลองพบว่าไม่สามารถดักจับอนุภาคที่แยกได้และความยาวของท่อไม่เพียงพอ จึงปรับเปลี่ยนรูปแบบท่อโดยให้ความสูงของชั้นบันไดกลับหลังมีความสูง 20 mm และท่อยาว 1000 mm ซึ่งการทำช่องของผนังท่อด้านล่างเหมือนกับการจำลองที่ผ่านมา แต่จากผลการจำลองพบว่ายังไม่สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันได้ จึงปรับเปลี่ยนรูปแบบของท่อ ให้ความสูงของชั้นบันไดกลับหลังที่มีความสูง 50 mm และมีความยาว 2000 mm เนื่องจากการเพิ่มความสูงของชั้นบันไดกลับหลังนี้มีผลต่อระยะเวลาการตก กล่าวคือหากความสูงของชั้นบันไดกลับหลังมากขึ้น จะทำให้อนุภาคตกในระยะที่ไกลขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความยาวของท่อเพื่อให้เพียงพอต่อการแยกอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งในการจำลองนี้เริ่มจากการจำลองที่ช่องไหลมีความเร็วเท่ากับ 0.05933 m/s จากผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดที่แตกต่างกัน

แสดงดังรูปที่ 4.6 จากผลการจำลองพบว่าอนุภาคทุกขนาดจะตกลงในช่องแรก จึงทำการเปลี่ยนความเร็วให้มีความเร็วเป็น 2, 3, 4 และ 5 เท่าของความเร็วในการจำลองตอนแรก ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.10 ตามลำดับ



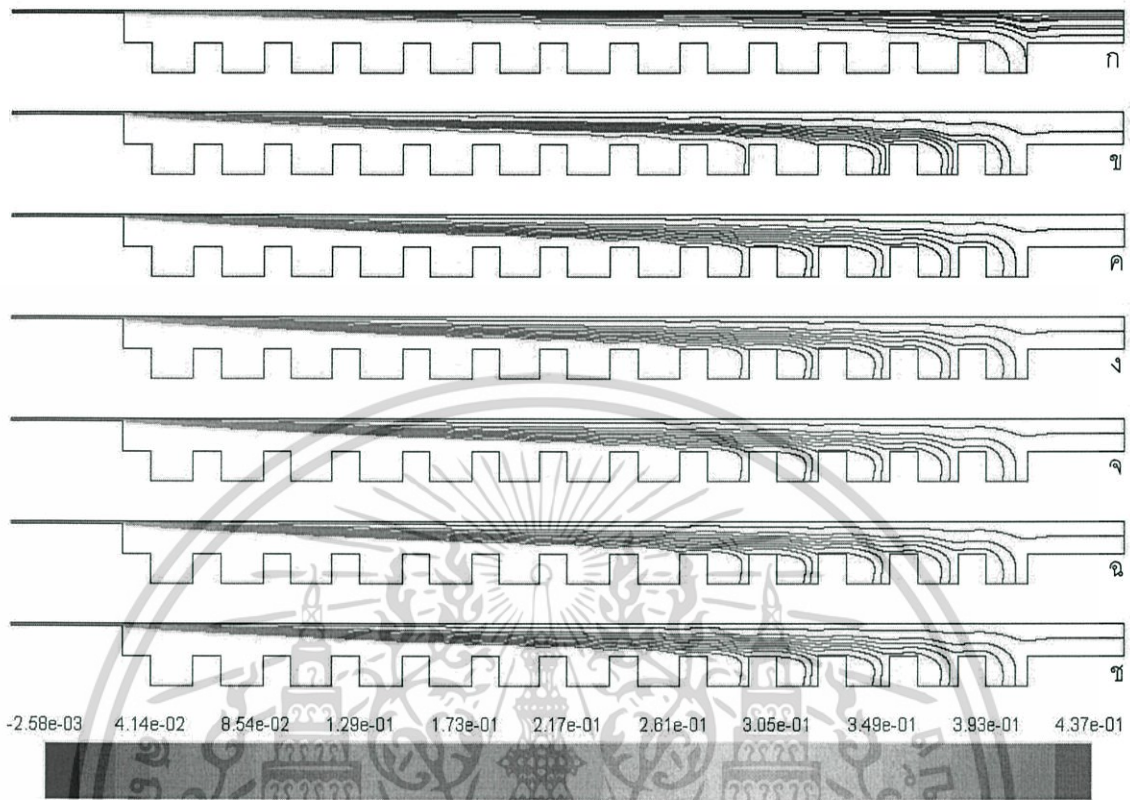
รูปที่ 4.6 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} ม ข.) 10^{-4} ม ค.) 10^{-5} ม ง.) 10^{-6} ม จ.) 10^{-7} ม ฉ.) 10^{-8} ม ช.) 10^{-9} ม ที่ของไหลมีความเร็ว 0.05933 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



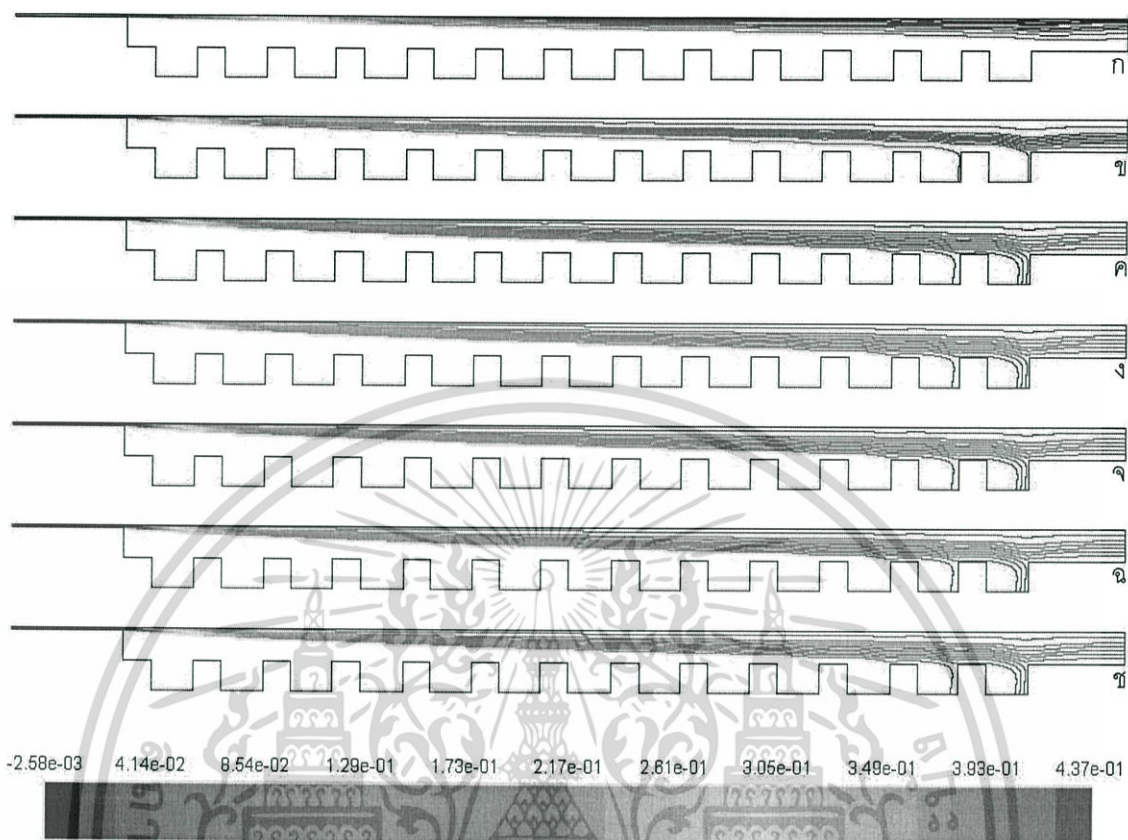
รูปที่ 4.7 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} ม ข.) 10^{-4} ม ค.) 10^{-5} ม ง.) 10^{-6} ม จ.) 10^{-7} ม ฉ.) 10^{-8} ม ซ.) 10^{-9} ม ที่ของไหลมีความเร็ว 0.11866 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



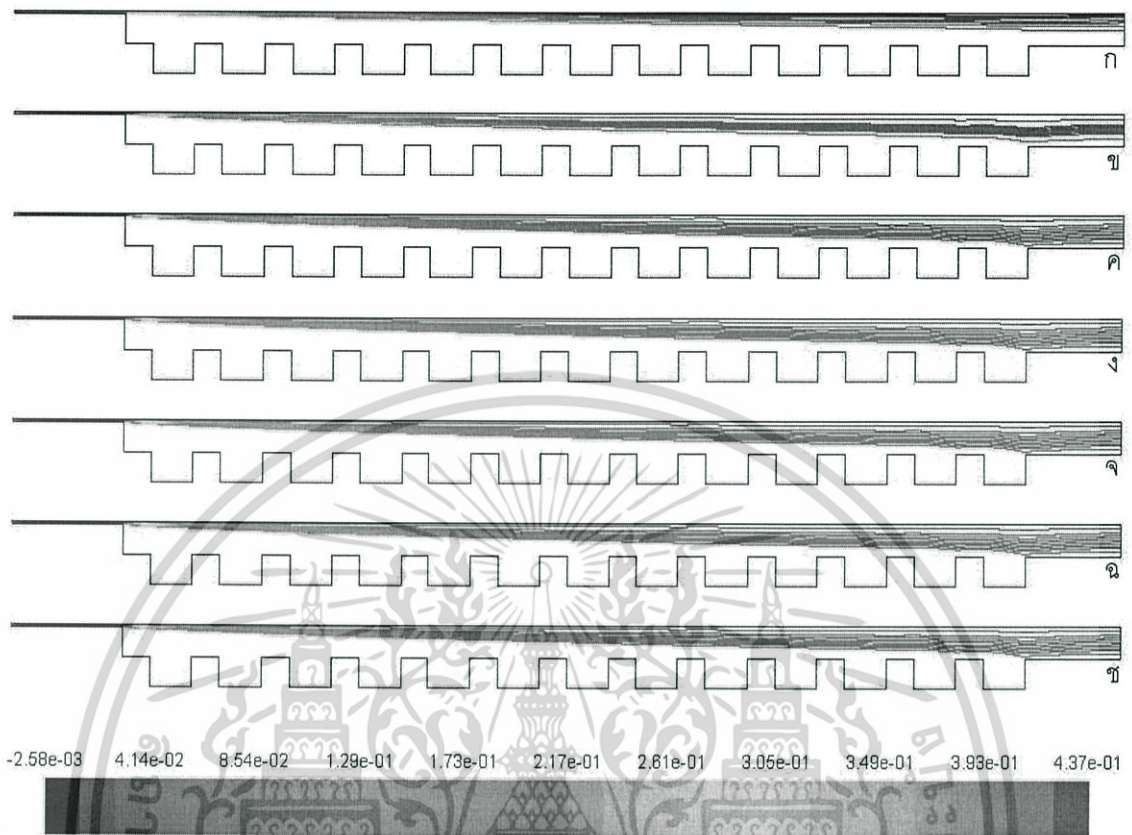
รูปที่ 4.8 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} m ข.) 10^{-4} m ค.) 10^{-5} m ง.) 10^{-6} m จ.) 10^{-7} m ฉ.) 10^{-8} m ช.) 10^{-9} m ที่ของไหลมีความเร็ว 0.17799 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} m ข.) 10^{-4} m ค.) 10^{-5} m ง.) 10^{-6} m จ.) 10^{-7} m ฉ.) 10^{-8} m ช.) 10^{-9} m ที่ของไหลมีความเร็ว 0.23732 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ก.) 10^{-3} m ข.) 10^{-4} m ค.) 10^{-5} m ง.) 10^{-6} m จ.) 10^{-7} m ฉ.) 10^{-8} m ช.) 10^{-9} m ที่ของไหลมีความเร็ว 0.29665 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การจำลองโดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคที่ความสูงชั้นบันไดต่างๆกัน

ที่ความสูงชั้นบันได 50 mm โดยที่ $V = 0.05933$ m/s

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-3} m ที่มีความเร็วแตกต่างกัน

ลำดับที่	ระยะช่องทางออก (mm)	จำนวนอนุภาค				
		V	2V	3V	4V	5V
1	250-325	10				
2	375-450					
3	500-575					
4	625-700					
5	750-825					
6	875-950					
7	1000-1075					
8	1125-1200					
9	1250-1325		2			
10	1375-1450		2			
11	1500-1575		4			
12	1625-1700		1			
13	1750-1825		1	2		

ที่ความเร็ว 0.05933 m/s อนุภาคตกลงช่องแรกทั้งหมด ซึ่งที่ความเร็ว 2 เท่า อนุภาคตกในช่วงช่องทางออกที่ 9 ถึง 13 ทั้งหมด และที่ความเร็ว 3 เท่า อนุภาคตกลงช่องสุดท้ายเพียง 2 อนุภาค ซึ่งอนุภาคที่เหลือออกที่ปลายทางออกของท่อทั้งหมด และที่ความเร็ว 4 และ 5 เท่า ไม่สามารถทำให้อนุภาคตกที่ช่องทางออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-4} m ที่มีความเร็วแตกต่างกัน

ลำดับที่	ระยะช่องทางออก (mm)	จำนวนอนุภาค				
		V	2V	3V	4V	5V
1	250-325	10				
2	375-450					
3	500-575					
4	625-700					
5	750-825					
6	875-950		1			
7	1000-1075		3			
8	1125-1200		4			
9	1250-1325		1	1		
10	1375-1450		1			
11	1500-1575			3		
12	1625-1700			3	1	
13	1750-1825			2	1	

ที่ความเร็ว 0.05933 m/s อนุภาคตกลงช่องแรกทั้งหมด ซึ่งที่ความเร็ว 2 เท่า อนุภาคแต่ละอนุภาคจะมีระยะตกใกล้ขึ้นซึ่งอยู่ช่วงช่องทางออกที่ 6 ถึง 10 ทั้งหมดและที่ความเร็ว 3 เท่า มีเพียง 1 อนุภาคออกที่ปลายทางออกของท่อ ซึ่งอนุภาคที่เหลือตกลงในช่วงช่องทางออกที่ 9 ถึง 13 และที่ความเร็ว 4 เท่า อนุภาคออกที่ช่องทางออกเพียงช่องละ 1 อนุภาคในช่องที่ 12 และ 13 ซึ่งอนุภาคที่เหลือออกที่ปลายทางออกของท่อทั้งหมดและที่ความเร็ว 5 เท่า ไม่สามารถทำให้อนุภาคตกที่ช่องทางออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-5} m ที่มีความเร็วแตกต่างกัน

ลำดับที่	ระยะช่องทางออก (mm)	จำนวนอนุภาค				
		V	2V	3V	4V	5V
1	250-325	10				
2	375-450					
3	500-575					
4	625-700					
5	750-825					
6	875-950		3			
7	1000-1075		2			
8	1125-1200		3			
9	1250-1325		1	1		
10	1375-1450		1	2		
11	1500-1575			2		
12	1625-1700			2	1	
13	1750-1825			2	3	

ที่ความเร็ว 0.05933 m/s อนุภาคตกลงช่องแรกทั้งหมด ซึ่งที่ความเร็ว 2 เท่า อนุภาคทั้งหมดตกในช่วงช่องทางออกที่ 6 ถึง 10 ซึ่งจะเห็นว่ามีการตกเหมือนกับอนุภาคขนาด 10^{-4} m แต่อนุภาคที่ตกในแต่ละช่องมีจำนวนอนุภาคที่ต่างกัน และที่ความเร็ว 3 เท่า อนุภาคตกลงในช่วงช่องทางออกที่ 9 ถึง 13 แต่อนุภาคที่เข้าในแต่ละช่องมีจำนวนอนุภาคที่ต่างกับอนุภาคขนาด 10^{-4} m และที่ความเร็ว 4 เท่า อนุภาคตกลงในช่องที่ 12 เพียง 1 อนุภาคและช่องที่ 13 เพียง 3 อนุภาค ซึ่งอนุภาคที่เหลือออกที่ปลายทางออกของท่อทั้งหมด และที่ความเร็ว 5 เท่า ไม่สามารถทำให้อนุภาคตกที่ช่องทางออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-6} m ที่มีความเร็วแตกต่างกัน

ลำดับที่	ระยะช่องทางออก (mm)	จำนวนอนุภาค				
		V	2V	3V	4V	5V
1	250-325	10				
2	375-450					
3	500-575					
4	625-700					
5	750-825					
6	875-950		3			
7	1000-1075		2			
8	1125-1200		3			
9	1250-1325		1	1		
10	1375-1450		1	2		
11	1500-1575			2		
12	1625-1700			2	1	
13	1750-1825			2	3	

ที่ความเร็ว 0.05933 m/s อนุภาคตกลงช่องแรกทั้งหมด ซึ่งที่ความเร็ว 2 เท่า อนุภาคทั้งหมดตกในช่วงช่องทางออกที่ 6 ถึง 10 ซึ่งจะเห็นว่ามีระยะการตกเหมือนกับขนาด 10^{-5} m โดยที่อนุภาคที่ตกในแต่ละช่องมีอนุภาคที่เท่ากัน และที่ความเร็ว 3 เท่า อนุภาคตกลงในช่วงช่องทางออกที่ 9 ถึง 13 และอนุภาคที่ตกในแต่ละช่องมีจำนวนอนุภาคที่เท่ากันกับอนุภาคขนาด 10^{-5} m และที่ความเร็ว 4 เท่า จำนวนอนุภาคที่ตกลงในช่องที่ 12 และ 13 เท่ากันกับอนุภาคขนาด 10^{-5} m ซึ่งอนุภาคที่เหลือออกที่ปลายทางออกของท่อทั้งหมด และที่ความเร็ว 5 เท่า ไม่สามารถทำให้อนุภาคตกที่ช่องทางออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-7} m ที่มีความเร็วแตกต่างกัน

ลำดับที่	ระยะช่องทางออก (mm)	จำนวนอนุภาค				
		V	2V	3V	4V	5V
1	250-325	10				
2	375-450					
3	500-575					
4	625-700					
5	750-825					
6	875-950		3			
7	1000-1075		2			
8	1125-1200		3			
9	1250-1325		1	1		
10	1375-1450		1	2		
11	1500-1575			2		
12	1625-1700			2	1	
13	1750-1825			2	3	

ที่ความเร็ว 0.05933 m/s อนุภาคตกลงช่องแรกทั้งหมด ซึ่งที่ความเร็ว 2 เท่า อนุภาคทั้งหมดตกในช่วงช่องทางออกที่ 6 ถึง 10 ซึ่งจะเห็นว่ามีการตกและจำนวนอนุภาคเหมือนกับอนุภาคขนาด 10^{-5} และ 10^{-6} m และที่ความเร็ว 3 เท่า อนุภาคตกลงในช่วงช่องทางออกที่ 9 ถึง 13 และอนุภาคที่ตกในแต่ละช่องมีจำนวนอนุภาคที่เท่ากับกับอนุภาคขนาด 10^{-5} และ 10^{-6} m และที่ความเร็ว 4 เท่า จำนวนอนุภาคที่ตกลงในช่องที่ 12 และ 13 เท่ากันกับอนุภาคขนาด 10^{-5} และ 10^{-6} m ซึ่งอนุภาคที่เหลือออกที่ปลายทางออกของท่อทั้งหมด และที่ความเร็ว 5 เท่า ไม่สามารถทำให้อนุภาคตกที่ช่องทางออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบระยะการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-8} m ที่มีความเร็วแตกต่างกัน

ลำดับที่	ระยะช่องทางออก (mm)	จำนวนอนุภาค				
		V	2V	3V	4V	5V
1	250-325	10				
2	375-450					
3	500-575					
4	625-700					
5	750-825					
6	875-950		3			
7	1000-1075		2			
8	1125-1200		3			
9	1250-1325		1	1		
10	1375-1450		1	2		
11	1500-1575			2		
12	1625-1700			2	1	
13	1750-1825			2	3	

ที่ความเร็ว 0.05933 m/s อนุภาคตกลงช่องแรกทั้งหมด ซึ่งที่ความเร็ว 2 เท่า อนุภาคทั้งหมดตกในช่วงช่องทางออกที่ 6 ถึง 10 ซึ่งจะเห็นว่ามีการตกและจำนวนอนุภาคเหมือนกับอนุภาคขนาด 10^{-5} , 10^{-6} และ 10^{-7} m และที่ความเร็ว 3 เท่า อนุภาคตกลงในช่วงช่องทางออกที่ 9 ถึง 13 และอนุภาคที่ตกในแต่ละช่องมีจำนวนอนุภาคที่เท่ากับอนุภาคขนาด 10^{-5} , 10^{-6} และ 10^{-7} m และที่ความเร็ว 4 เท่า จำนวนอนุภาคที่ตกลงในช่องที่ 12 และ 13 เท่ากับกับอนุภาคขนาด 10^{-5} , 10^{-6} และ 10^{-7} m ซึ่งอนุภาคที่ไหลออกที่ปลายทางออกของท่อทั้งหมดและที่ความเร็ว 5 เท่า ไม่สามารถทำให้อนุภาคตกที่ช่องทางออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการตกของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10^{-9} m ที่มีความเร็วแตกต่างกัน

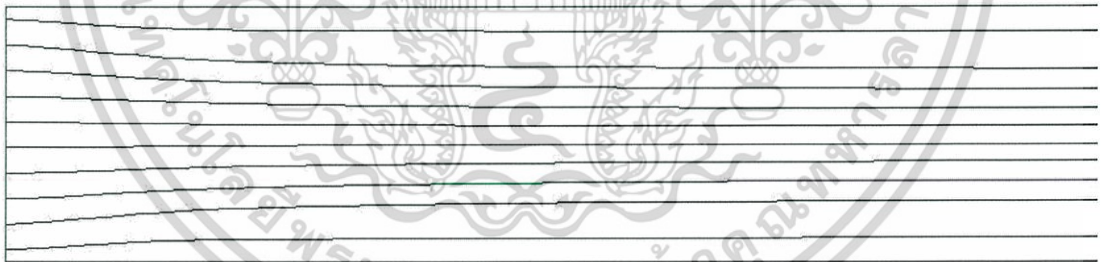
ลำดับที่	ระยะช่องทางออก (mm)	จำนวนอนุภาค				
		V	2V	3V	4V	5V
1	250-325	10				
2	375-450					
3	500-575					
4	625-700					
5	750-825					
6	875-950		3			
7	1000-1075		2			
8	1125-1200		3			
9	1250-1325		1	1		
10	1375-1450		1	2		
11	1500-1575			2		
12	1625-1700			2	1	
13	1750-1825			2	3	

ที่ความเร็ว 0.05933 m/s อนุภาคตกลงช่องแรกทั้งหมด ซึ่งที่ความเร็ว 2 เท่า อนุภาคทั้งหมดตกในช่วงช่องทางออกที่ 6 ถึง 10 ซึ่งจะเห็นว่า มีระยะเวลาตกและจำนวนอนุภาคเหมือนกับอนุภาคขนาด 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} และ 10^{-8} m และที่ความเร็ว 3 เท่า อนุภาคตกลงในช่วงช่องทางออกที่ 9 ถึง 13 และอนุภาคที่ตกในแต่ละช่องมีจำนวนอนุภาคที่เท่ากับกับอนุภาคขนาด 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} และ 10^{-8} m และที่ความเร็ว 4 เท่า จำนวนอนุภาคที่ตกลงในช่องที่ 12 และ 13 เท่ากับกับอนุภาคขนาด 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} และ 10^{-8} m ซึ่งอนุภาคที่เหลื้อออกที่ปลายทางออกของท่อทั้งหมดและที่ความเร็ว 5 เท่า ไม่สามารถทำให้อนุภาคตกที่ช่องทางออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

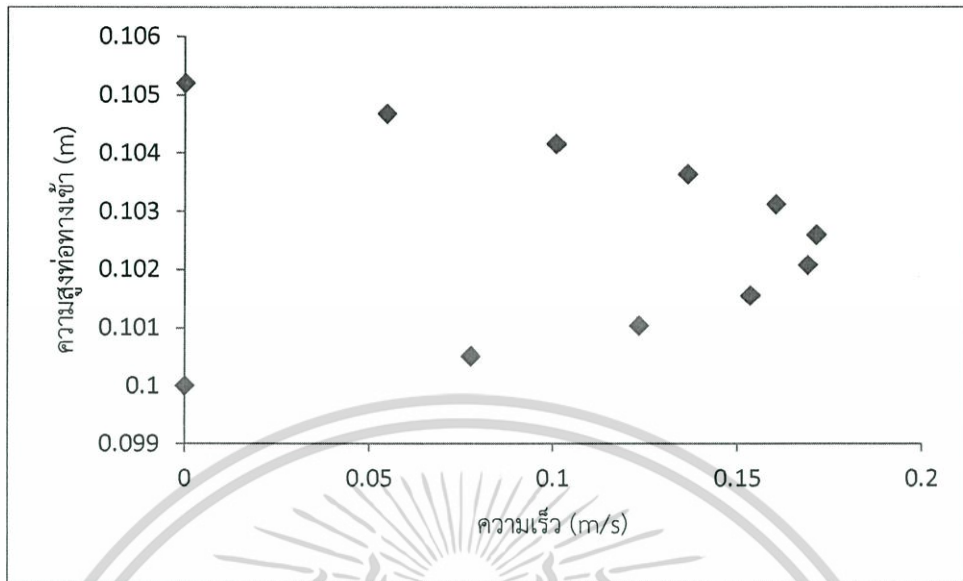
4.5 วิเคราะห์ผลการจำลอง

ในการใส่อนุภาคที่บริเวณปากทางเข้าของแบบจำลองจะอยู่ในแนวระนาบ ซึ่งแต่ละอนุภาคมีระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เท่ากันโดยที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับของไหลแสดงดังรูปที่ 4.11 ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคจึงมีค่าเท่ากับความเร็วของของไหลโดยที่บริเวณผนังของท่อมีค่าความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วที่กึ่งกลาง (Core flow) ของท่อ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในท่อจนถึงจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จะเกิดการแยกไหลของของไหลผ่านด้านหลังของชั้นบันได ซึ่งชั้นบันไดมีความสูงเท่ากับ 50 mm และเมื่อพิจารณาที่บริเวณก่อนการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันดังรูปที่ 4.12 พบว่าอนุภาคที่อยู่บริเวณผนังด้านล่างของท่อทางเข้าซึ่งมีความเร็วที่ต่ำหรือมีพลังงานจลน์ที่ต่ำจะมีระยะที่ตกใกล้กับชั้นบันไดมากกว่าอนุภาคอื่นและเมื่อพิจารณาอนุภาคที่ตำแหน่งสูงชันความเร็วสูงสุดจะอยู่ที่กึ่งกลางของท่อดังนั้นอนุภาคในช่วงนี้จะมีระยะที่ตกไกลกว่าอนุภาคที่อยู่บริเวณผนังท่อด้านล่างเนื่องจากผลของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่มากกว่า แต่อนุภาคที่อยู่สูงเหนืออนุภาคความเร็วสูงสุดนั้นจะมีความเร็วที่ลดลงเนื่องจากอยู่ใกล้กับผนังท่อด้านบนแต่กลับมีระยะตกที่ไกลขึ้นเมื่อเทียบกับอนุภาคที่ความเร็วสูงสุดเนื่องจากพลังงานศักย์ของอนุภาคมีผลกระทบมากกว่าพลังงานจลน์ของอนุภาค



รูปที่ 4.11 การเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าสู่ท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะการไหลของของไหลที่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันแต่ความหนาแน่นมีค่าเท่ากันโดยที่ตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลที่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.10 พบว่าขนาดอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางยิ่งเล็กลงยิ่งมีการเคลื่อนที่ได้ระยะทางลดลงซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎีของแรงฉุด (Drag force) ซึ่งประกอบด้วย แรงเสียดทานผิว กับ แรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความดัน โดยแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความดันจะมีผลกระทบมากกว่า แรงเสียดทานผิว สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ โดยจะเกิดความดันที่ต่างกันระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังของอนุภาค ถ้ายังมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นยิ่งทำให้มีผลต่างของความดันมากจึงทำให้มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปได้ไกล ถ้าขนาดอนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยิ่งเล็กลงผลของแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความดันจะมีผลต่ออนุภาคน้อยลง จนทำให้แรงเสียดทานผิวมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองของแบบจำลองนี้พบว่าขนาดของอนุภาคที่ 10^{-3} m ถูกคัดแยกออกจากอนุภาคขนาดเล็กกว่าได้อย่างเห็นได้ชัด ส่วนอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10^{-4} m มีการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับอนุภาคขนาด 10^{-5} m แต่อนุภาคถูกดักจับได้น้อยกว่า ส่วนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 10^{-6} m ถึง 10^{-9} m มีรูปแบบการไหลที่คล้ายคลึงกันโดยที่อนุภาคนั้นถูกดักจับไว้ที่ตำแหน่งช่องเดียวกัน เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะความเร็วที่ทำให้เกิดแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นบนตัวอนุภาคนั้นไม่เพียงพอต่อการแยกขนาดอนุภาคซึ่งถ้าหากต้องการให้มีแรงเฉื่อยเพิ่มขึ้นจะต้องเพิ่มความเร็วของ

เอกสารของไหลให้มากยิ่งขึ้นจนสามารถคัดแยกอนุภาคได้ซึ่งขนาดอนุภาคมีอนุภาคให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่มีขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันโดยมีความหนาแน่นที่เท่ากันจึงทำให้มีมวลที่ต่างกันจากสมการ $\rho = \frac{m}{V}$ โดยที่ m คือมวลของอนุภาค V คือปริมาตรของอนุภาค และ ρ คือความหนาแน่นของอนุภาค ในการคำนวณหาปริมาตรของทรงกลมจากสมการ $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3$ โดยที่ d คือความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง จากสมการนี้พบว่าถ้าลดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 10 เท่าจะยิ่งทำให้มวลของอนุภาคนั้นลดลงเป็น 1,000 เท่า นั้นหมายความว่า ความเร็วที่ทำให้เกิดความเฉื่อยบนตัวอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะต้องมีความเร็วที่มากเช่นกันเพื่อให้เกิดพลังงานจลน์เพียงพอในการแยก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแยกอนุภาคที่ขนาดแตกต่างกันด้วยการไหลของของไหลผ่านชั้นบันไดกลับหลังด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยมีวัตถุประสงค์ คือการศึกษาอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีผลต่อระยะการตกของอนุภาค ศึกษาอิทธิพลของความสูงของชั้นบันไดกลับหลังที่มีผลต่อระยะการตกของอนุภาค โดยในงานวิจัยอ้างอิงเพื่อใช้เป็นแบบจำลองเริ่มต้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนจะนำมาประยุกต์ใช้ เพราะเนื่องจากในงานวิจัยต่างๆ จะมีทางเข้าเพียงหนึ่งทางและทางออกเพียงหนึ่งทาง แต่หากจะนำมาใช้ทำการแยกอนุภาคจำเป็นจะต้องทำให้ท่อมีทางออกทางด้านล่างของท่อ เพื่อให้อนุภาคสามารถตกลงมาเพื่อคัดแยกขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันได้ สมมติฐานของแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วย แบบจำลองที่สร้างขึ้นกำหนดให้เป็นสองมิติ ของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ ความเร็วของของไหลขาเข้ามีค่าคงที่

แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบถูกใช้คำนวณสนามการไหล จากการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- ผลการจำลองมีความสอดคล้องกับทฤษฎี
- ความสูงของชั้นบันไดกลับหลังมีผลต่อระยะการตก กล่าวคือหากความสูงของชั้นบันไดกลับหลังมากขึ้นก็จะทำให้สามารถแยกอนุภาคที่ขนาดแตกต่างกันได้ดียิ่งขึ้น
- การเพิ่มความเร็วของของไหลจะทำให้เกิดแรงต้านอันเนื่องมาจากความดันมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแยกที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

ดังนั้นหากมีการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมจริงจะต้องมีการทำให้ผนังท่อด้านล่างมีทางออกเพื่อให้อนุภาคสามารถออกได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ทำการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อยืนยันผลการจำลอง
- 5.2.2 สร้างแบบจำลองที่มีความสูงของชั้นบันไดกลับหลังให้มีความสูงมากขึ้น
- 5.2.3 เพิ่มความเร็วของของไหล เพื่อให้สามารถแยกขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันได้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. F. ARMALY, F. DURST, J. C. F. PEREIRA, B. SCHONUNG, “Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, 127, 473-496, 1983.
- [2] K.F. YU, K.S. Lau, C.K. Chan, “Numerical simulation of gas-particle flow in a single-side backward-facing step flow,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 163, 319-331, 2004.
- [3] Versteeg H.K., Malalasekera W., “An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method,” Longman Scientific & Technical, 41-42, 1995.
- [4] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ, “พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ,” ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [5] ANSYS, Inc. “ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide,” 2009.
- [6] WILLIAM S. JANNA., “Introduction to fluid dynamics,” PWS Publishing Company, 298-302, 1993.
- [7] André Bakker, “Discrete Phase Modeling,” *Applied Computational Fluid Dynamics*, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

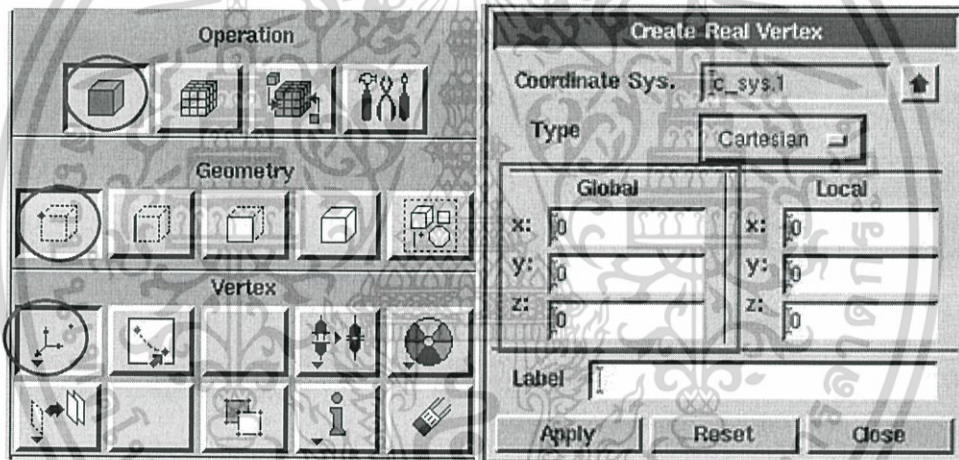
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT

ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองชั้นบันไดกลับหลัง 2 มิติที่ประกอบด้วยทางเข้าของท่อที่มีความสูง 5.1 หน่วย และความสูงของชั้นบันได 4.9 หน่วยด้วยโปรแกรม Gambit

1. สร้างโมเดลโดยเลือก operation → geometry → vertex command button กำหนดพิกัด (x, y, z) ที่ create real vertex ใน global ดังนี้ (0, 10.1, 0), (0, 4.9, 0), (200, 4.9, 0), (200, 0, 0), (700, 0, 0), (700, 10.1, 0) ตามลำดับ ทุกครั้งที่กำหนดให้กด apply จุดที่สร้างขึ้นจะแสดง ดังรูปที่ ก.2



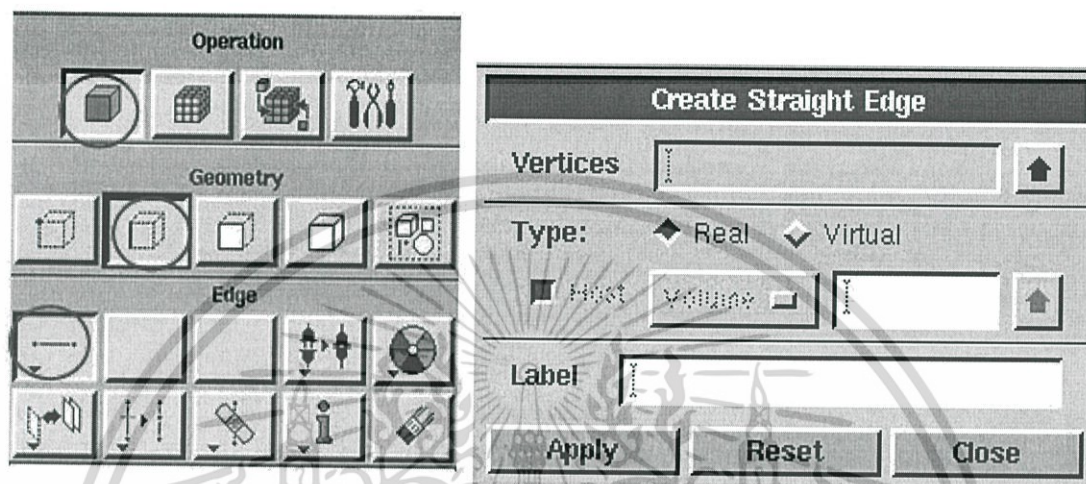
รูปที่ ก.1 วิธีสร้างจุด



รูปที่ ก.2 แสดงจุดที่สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.สร้างเส้นระหว่างจุด 2 จุดโดยใช้คำสั่ง operation → geometry → edge command button create edge ใน create straight edge ให้เลือกจุดที่สร้างลงใน vertices → Apply เส้นที่ถูกสร้างขึ้นจะแสดงดังรูปที่ ก.4



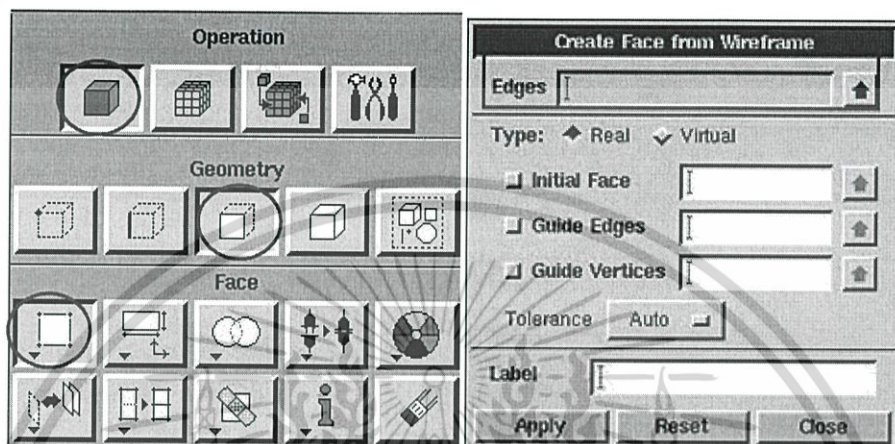
รูปที่ ก.3 วิธีสร้างเส้น



รูปที่ ก.4 แสดงเส้นที่สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.สร้างพื้นผิวโดยใช้คำสั่ง operation → geometry → face command button → form face ใน create face from wireframe ให้เลือกรูปที่สร้างลงใน edge ระนาบที่ถูกสร้างขึ้นจะแสดงดังรูปที่ ก.6



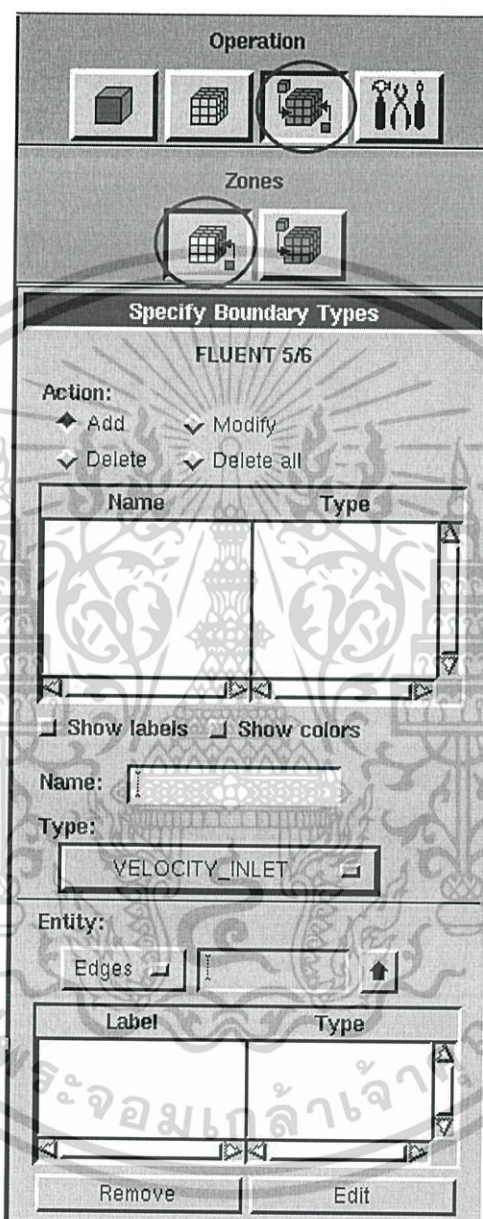
รูปที่ ก.5 วิธีการสร้างระนาบ



รูปที่ ก.6 แสดงระนาบที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.กำหนด boundary condition โดยใช้คำสั่ง Operation → Zones → Specify Boundary Types ตัวอย่างเช่น (Name : inlet / VELOCITY_INLET / edge.1) → Apply



รูปที่ ก.7 วิธีกำหนดสภาวะขอบเขต

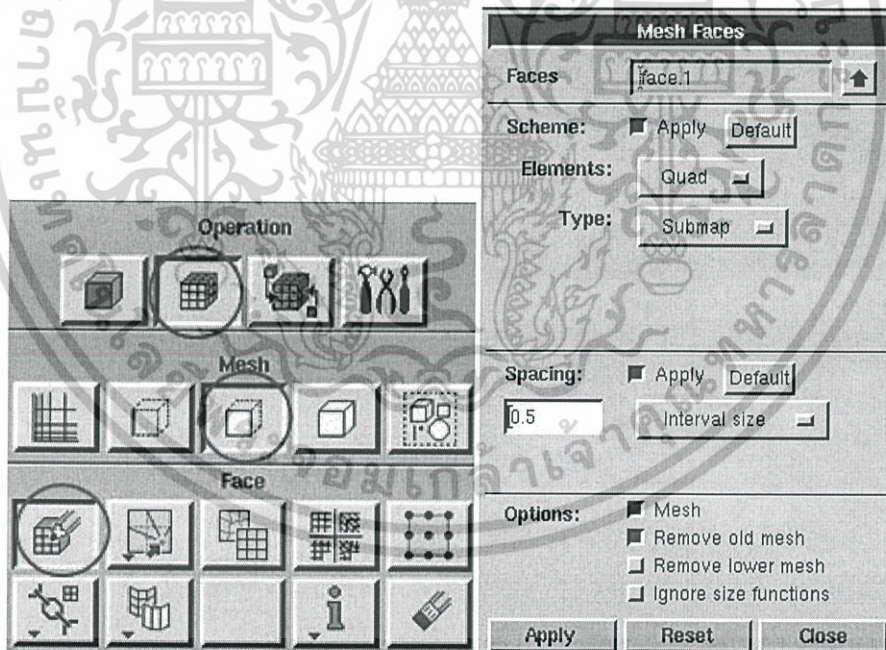
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดสภาวะขอบเขตตามตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การกำหนดBoundary condition

ชื่อ	ชนิดของสภาวะขอบเขต	ขอบ
inlet	VELOCITY_INLET	edge.1
outlet	PRESSURE_OUTLET	edge.5
wall	WALL	edge.2 , edge.3 , edge.4 , edge.6

5.สร้างกริดในพื้นที่ผิวโดยใช้คำสั่ง Operation → Mesh command button → Face command button → Mesh face เลือกรูปที่จะทำการสร้างกริดที่ Mesh face (All face / Element: Quad / Type: Submap / Spacing: interval size = 0.5) → Apply



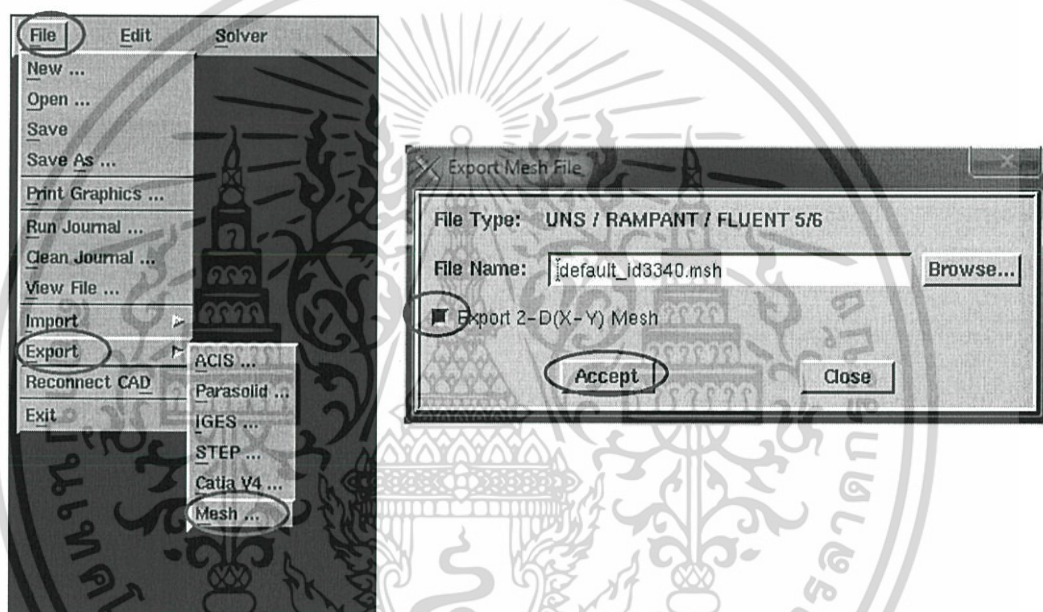
รูปที่ ก.8 วิธีสร้างกริดบนระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 แสดงกริดที่สร้างขึ้นบนระนาบ

6.ส่งออกกริดในรูปแบบไฟล์นามสกุล .msh เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในโปรแกรม FLUENT ต่อไปโดยใช้คำสั่ง File → Export → Mesh → Define name → Apply



รูปที่ ก.10 วิธีการส่งออกกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

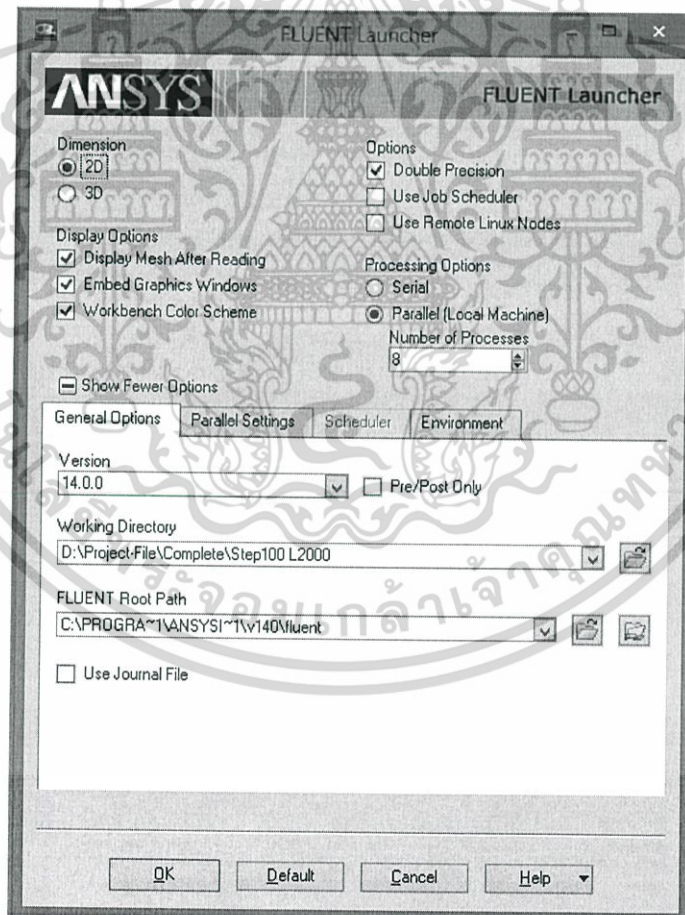
ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการใช้โปรแกรม FLUENT

การกำหนดค่าเพื่อคำนวณการไหลในด้วยโปรแกรม FLUENT

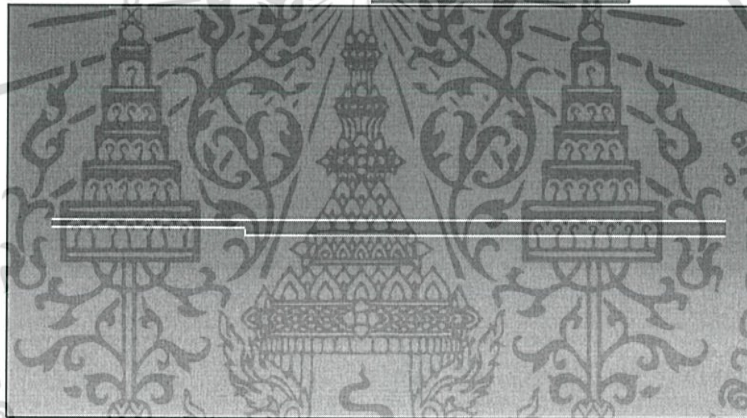
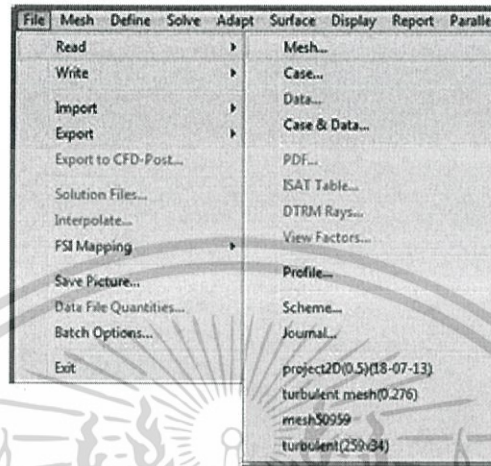
การคำนวณลักษณะการไหลของของไหลภายในโมเดลด้วยโปรแกรม FLUENT เป็นการคำนวณโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม GAMBIT แล้วนำเข้ามาในโปรแกรม FLUENT ซึ่งได้กำหนดวิธีการคำนวณและค่าคุณสมบัติของตัวแปรต่างๆอย่างเหมาะสมเพื่อให้การจำลองความถูกต้องมากที่สุด โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

1. เปิดโปรแกรม FLUENT เลือก Dimension เป็น 2D แล้วกด OK



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ข.1 หน้าต่างของโปรแกรม FLUENT
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

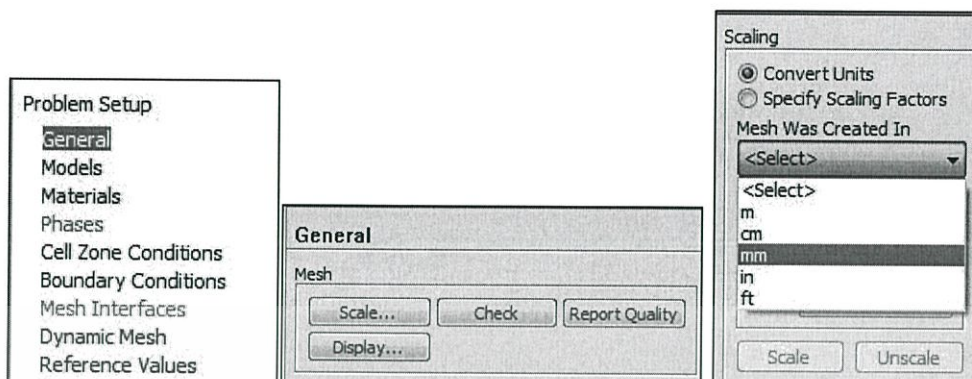
2.อ่านไฟล์นามสกุล .msh ที่ได้สร้างในโปรแกรม GAMBIT โดยไฟล์นี้จะนำมาใช้เพื่อการคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 การเลือก Mesh ที่ใช้ในการคำนวณและหน้าจอแสดงรูปโดเมน

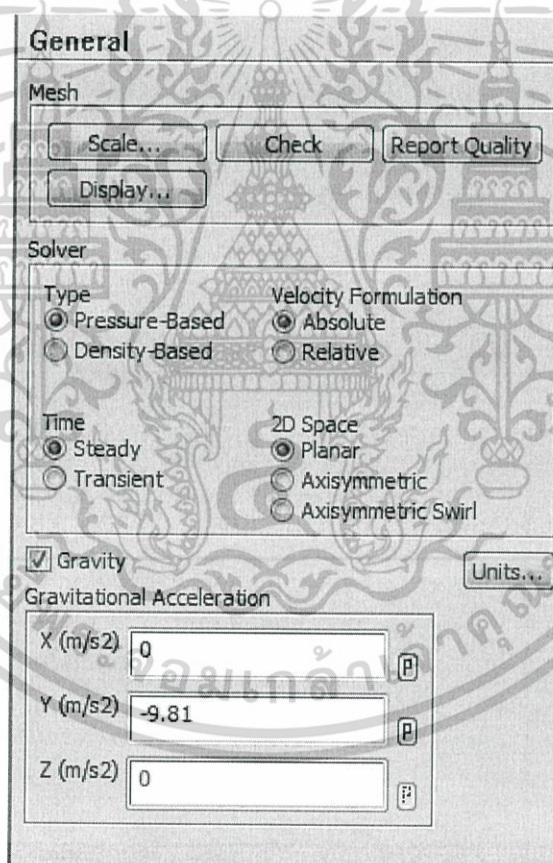
3.กำหนดขนาดแบบจำลองซึ่งในโปรแกรม GAMBIT ไม่ได้กำหนดดั่งนั้นจึงต้องกำหนดขนาดจริงของแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้มีหน่วยเป็น mm โดยเลือก Problem Setup จากนั้นเลือก General Scale ในช่องของ Scaling ที่ Mesh was create in ให้เลือก mm ต่อมากดปุ่ม Scale ทำให้แบบจำลองอยู่ในหน่วย mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 การตั้งค่าหน่วยความยาวอยู่รูปที่ถูกสร้าง

4. จากนั้นใส่ค่า gravity = -9.81 m/s^2 เนื่องจากการจำลองที่คิดผลของแรงโน้มถ่วง



รูปที่ ข.4 การตั้งค่าแรงโน้มถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

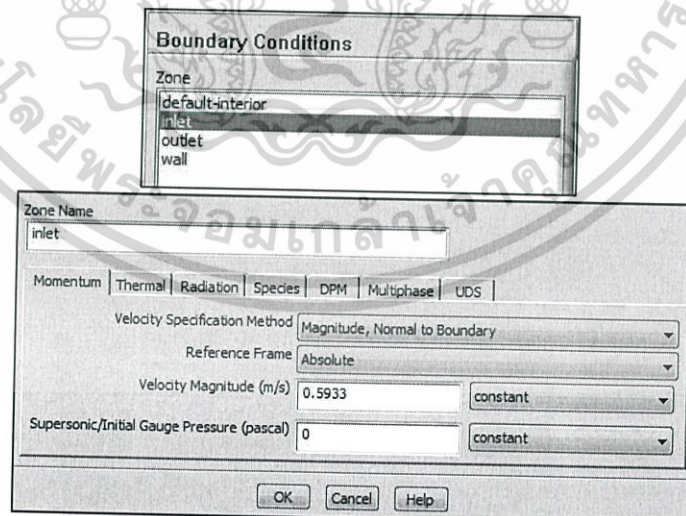


รูปที่ ข.6 การตั้งค่า Materials

7. ตั้งค่าสภาวะขอบเขตในการจำลองโดยเลือก Boundary Conditions โดยตั้งค่าดังนี้

- ปากทางเข้า

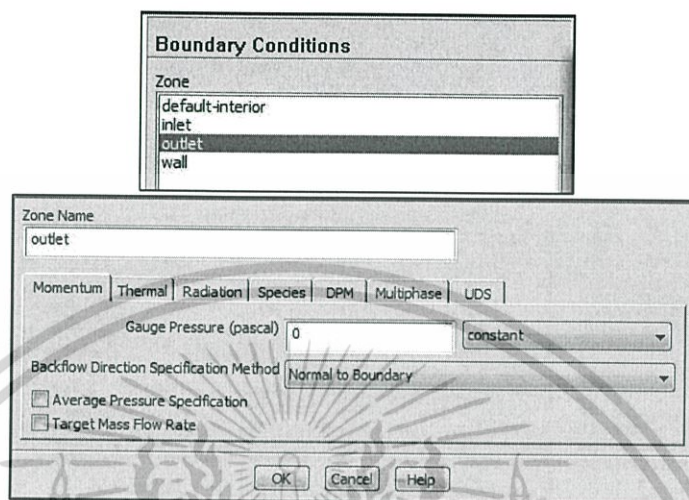
ความเร็วที่ใช้ในการจำลองเท่ากับ 0.5933 m/s ดังรูปที่ ข.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ ข.7 การตั้งค่า Boundary Conditions ของ inlet นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปากทางออก

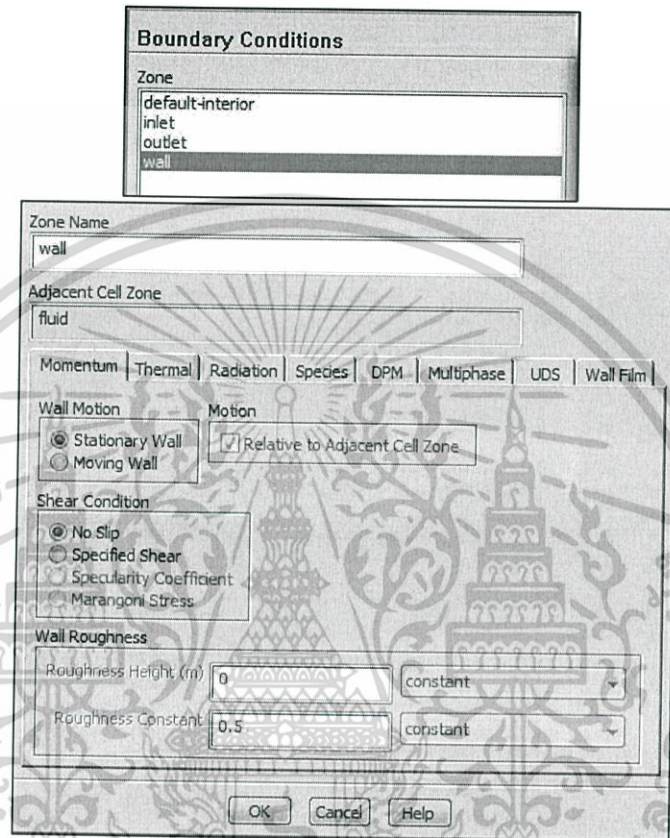
ความดันเกจที่ใช้ในการจำลองเท่ากับ 0 pascal ดังรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 การตั้งค่า Boundary Conditions ของ outlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

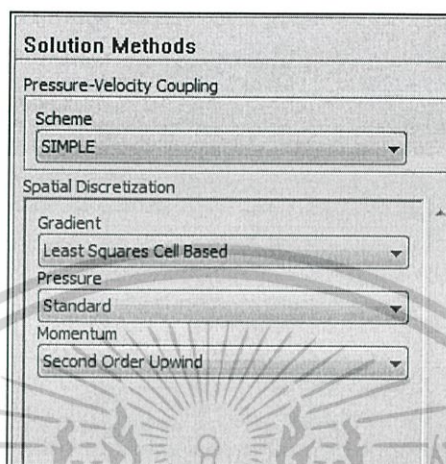
- ผนัง
 - ที่ Wall Motion กำหนดเป็น Stationary Wall ดังรูปที่ ข.9
 - ที่ Shear Condition กำหนดเป็น No Slip ดังรูปที่ ข.9



รูปที่ ข.9 การตั้งค่า Boundary Conditions ของ wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

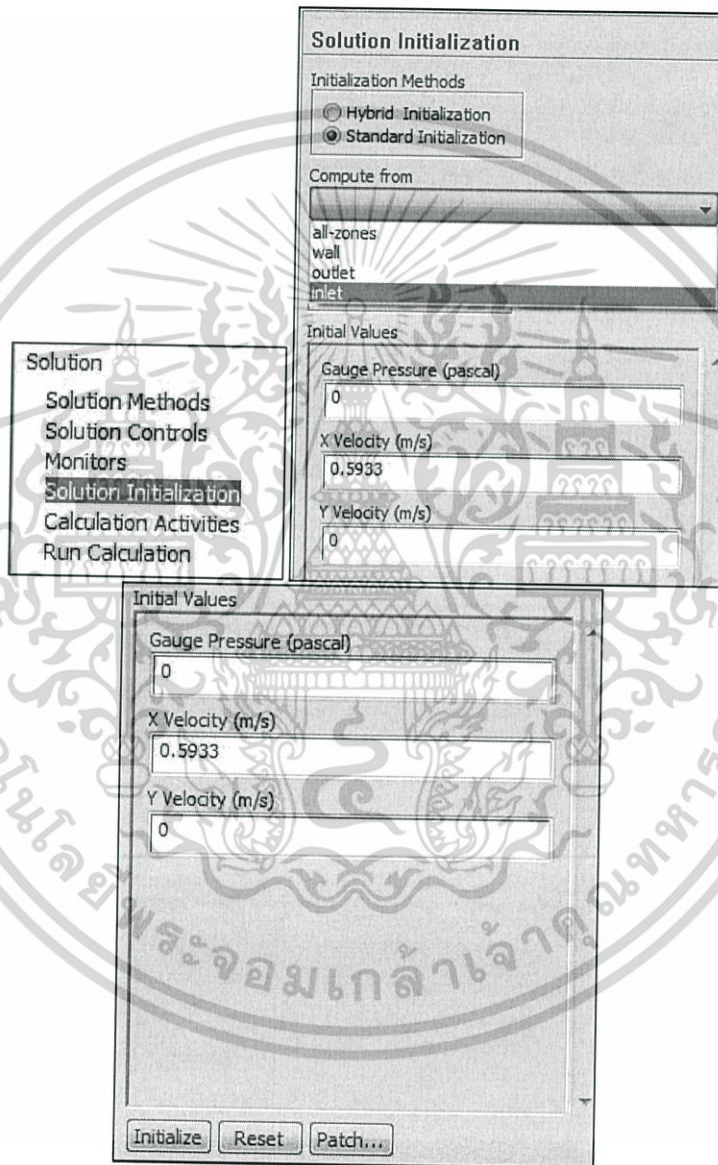
7. จากนั้นเลือกในส่วน Solution Methods เพื่อกำหนดวิธีการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆของการไหลในสมการที่ใช้ในแบบจำลองที่ได้กำหนดในข้างต้นดังรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 การตั้งค่า Solution Methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

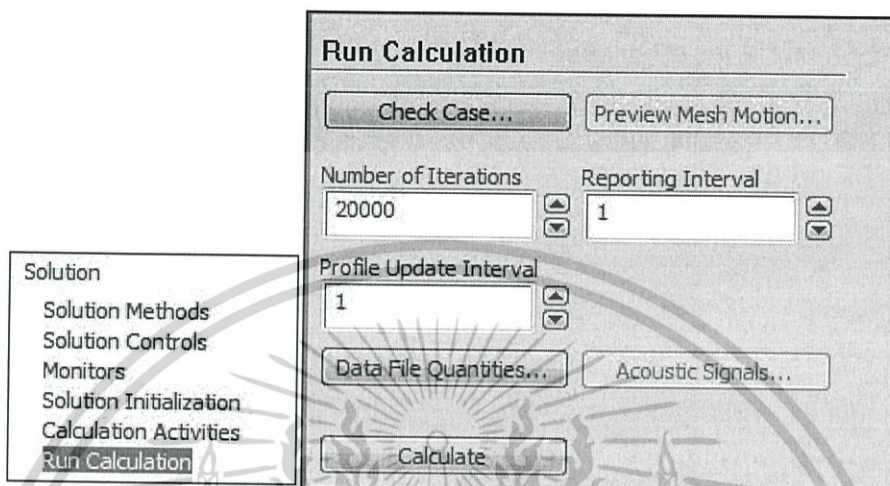
8. กำหนดค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณซึ่งได้จากการระบุค่าต่างๆที่ได้จากปากทางเข้า โดยค่าเริ่มต้นนี้จะนำไปใช้เพื่อคำนวณต่อไปซึ่งแก้ไขการตั้งค่าได้ที่ Solution Initialization จากนั้นกำหนดวิธีการเป็น Standard Initialization เลือกการคำนวณจากปากทางเข้าของแบบจำลอง และกด Initialize ดังรูปที่ ข.11



รูปที่ ข.11 การตั้งค่า Solution Initialization

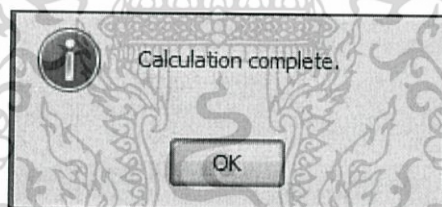
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กำหนดรอบที่ใช้ในการคำนวณใน Run Calculation จนกว่าจะถึงเกณฑ์ที่ตั้งไว้ใน Number of Iterations



รูปที่ ข.12 การตั้งค่า Run Calculation

10. โปรแกรมจะคำนวณจนค่าความแตกต่างของการคำนวณถึงเกณฑ์ที่ตั้งไว้ จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นต่อไป



รูปที่ ข.13 หน้าต่างที่ขึ้นมาเมื่อทำการคำนวณเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้