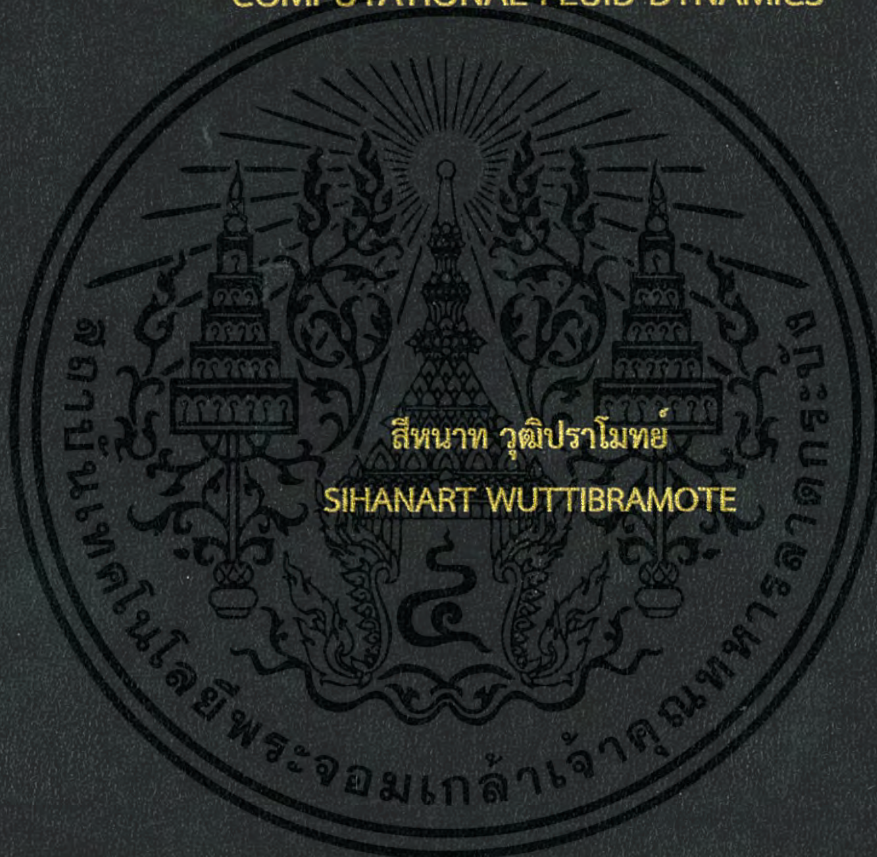


การศึกษาการลดการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศาด้วยการตัดแปลง
ท่อขยาย-ท่อดัดโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

STUDY OF MITIGATING EROSION INSIDE 90-DEGREE ELBOW WITH
A MODIFIED EXPANSION-CONTRACTION PIPE BY
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-208

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการลดการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศาด้วยการดัดแปลง
ท่อขยาย-ท่อลดโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

STUDY OF MITIGATING EROSION INSIDE 90-DEGREE ELBOW WITH
A MODIFIED EXPANSION-CONTRACTION PIPE BY
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



T148732

สีหนาท วุฒิปราโมทย์

SIHANART WUTTIBRAMOTE

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **148732**
ในเดือนปี **23 11 2560**

b. **00269054**
f.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF MITIGATING EROSION INSIDE 90-DEGREE ELBOW WITH
A MODIFIED EXPANSION-CONTRACTION PIPE BY
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMUTL-2016-EN-M-220-208 มอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

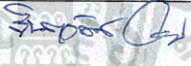

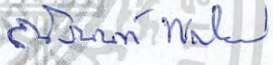


FACULTY OF ENGINEERING

เอก KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการลดการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศาด้วยการดัดแปลงท่อขยาย-ทอลด โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
Thesis Title Study of Mitigating Erosion Inside 90-degree Elbow with a Modified Expansion-Contraction Pipe by Computational Fluid Dynamics
นักศึกษา นายสีหนาท วุฒิปราโมทย์
รหัสประจำตัว 57601354
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-208

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จันทวัฒน์	ไชยชนะวงศ์	
รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	
ดร.ณัฐนนท์	ไพบุลย์ศิลป์	
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิสร์	
ผศ.ดร.สันติ	วัฒนานุสรณ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ

ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่มีการนำไปใช้

วันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการลดการสึกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาด้วยการ ดัดแปลงท่อขยาย-ท่อลดโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
นักศึกษา	นายสีหนาท วุฒิปราโมทย์
รหัสประจำตัว	57601354
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

การสึกกร่อนเนื่องจากการชนถ่ายโอนโมเมนตัมของแข็งที่กระทบกับผนังท่อทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณท่อช่องอ จึงได้มีการศึกษาการสึกกร่อนในท่อช่องอ 90 องศาที่มีรัศมีความโค้งของท่อ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม FLUENT มาประยุกต์ใช้ในการทำนายเทียบกับผลการทดลองโดยผลการจำลองสามารถทำนายผลเทียบกับผลการทดลองได้เป็นอย่างดี โดยปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนคือโมเมนตัมของอนุภาคมีค่ามากดังนั้นถ้าลดปัจจัยนี้ได้การสึกกร่อนก็จะลดลงตามเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการลดการสึกกร่อนโดยการติดตั้งท่อขยาย-ท่อลด (แซมเบอร์) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า ($D^*=2$ และ $D^*=5$) ก่อนถึงช่องอ 90 องศา พบว่าความดันที่เพิ่มขึ้นภายในแซมเบอร์ทั้ง 2 แบบไม่เพียงพอที่จะช่วยลดโมเมนตัมของอนุภาคลงได้ซึ่งความดันลดของแซมเบอร์ขนาด $D^*=5$ มีค่าน้อยกว่า จึงนำไปศึกษาเพิ่มเติมโดยติดตั้งแผ่นกั้นภายในแซมเบอร์ 2 แบบได้แก่แผ่นทรงกระบอกและแผ่นสี่เหลี่ยม โดยศึกษาควบคู่ไปกับการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของแซมเบอร์ 2 แบบได้แก่ แบบเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันกับแบบเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ พบว่าการสึกกร่อนที่ช่องอ 90 องศาลดลงแต่แซมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันอนุภาคยังคงค้างอยู่ใน แซมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกไปได้หมดและมีความดันลดน้อยกว่าเพราะว่ามีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการหมุนวนน้อยกว่าโดยแผ่นกั้นทรงกระบอกให้ความดันลดน้อยที่สุดจึงนำไปศึกษาเปรียบเทียบผลการจำลองของ $D^*=2, 3, 4, 5$ และ 6 พบว่ารูปแบบของแซมเบอร์ขนาดที่ศึกษาทั้งหมดนี้สามารถลดการสึกกร่อนได้เกือบ 10 เท่ายกเว้น $D^*=2$ เนื่องจากมุมภายในของผนังแซมเบอร์ไม่มีความเหมาะสมกับลักษณะการชนของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในแซมเบอร์ทำให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ออกไปจากแซมเบอร์ได้สะดวกและเมื่อพิจารณาที่ D^* อื่นๆพบว่า $D^*=3$ ลดการสึกกร่อนได้น้อยกว่า D^* อื่นๆแต่เกิดความดันลดต่ำสุดเนื่องจากการหมุนวนภายในแซมเบอร์น้อยกว่ากรณีของ $D^*=4$ ขึ้นไปและค่าการสึกกร่อนอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับ D^* อื่นๆ ดังนั้นรูปแบบของแซมเบอร์ขนาด $D^*=3$ ภายในติดตั้งแผ่นกั้นทรงกระบอกที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆ จึงแนะนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อช่วยลดการสึกกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study of mitigating erosion inside 90-degree elbow with a modified expansion-contraction pipe by computational fluid dynamics
Student	Mr.Sihanart Wuttibramote
Student ID.	57601354
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

ABSTRACT

Erosion due to solid particle transportation that impacts on the pipe wall leads to damaged equipments in industry especially at elbow. Therefore 90 degrees elbow is studied for erosion which has the curvature radius 1.5 times the diameter of the pipe by using Computational Fluid Dynamics technique (FLUENT) to predict the results of simulation then compare with the experimental data. The results are in good agreement with experiment. The main factor of erosion is high momentum of particles. If this factor is reduced, erosion will be reduced as well. Therefore this research aims to reduce erosion by installing expansion-contraction pipe(chamber) which has diameter 2 and 5 times the inlet pipe diameter ($D^*=2$ and $D^*=5$) the simulation results show the increased pressure in chamber is insufficient to reduce the momentum of particles but the pressure drop of chamber ($D^*=5$) is less than chamber ($D^*=2$). Therefore chamber ($D^*=5$) is modified by adding cylindrical and rectangular plate along with sudden and gradual change in cross-sectional area of chamber. The simulation results show the particles remain within the sudden change in cross-sectional area of chamber but all particles can move out of gradual change in cross-sectional area and minimal pressure drop because energy loss caused by a swirl flow in this chamber less than the another type and cylindrical plate with gradual change in cross-sectional area is the lowest pressure drop of studied types. Then each of chamber diameters ($D^*=2, 3, 4, 5$ and 6) are studied and all of these sizes can reduce erosion nearly 10 times except $D^*=2$ as the inner wall of chamber is not for particle motion causing the particles cannot easily move out of the chamber. Although $D^*=3$ reduces erosion less than the others but pressure drop is minimum due to swirl flow within the chamber less than the case of $D^*=4$ or higher and same erosion level. So gradual change in cross-sectional area of chamber ($D^*=3$) with cylindrical plate is suitable recommended for erosion reduction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ให้ความรู้ในด้านของทฤษฎีเกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กลศาสตร์ของไหลและอื่นๆอีกมากมาย รวมถึงให้คำชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา การออกแบบและร่วมวิเคราะห์ผลการจำลอง ในวิจัยนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายนิวัฒน์ ภูเจริญ ที่ให้ความรู้ในด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การสอนการใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและให้คำแนะนำดีๆในการใช้ชีวิต

ขอขอบพระคุณ นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ให้ความรู้ในด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อาจารย์ ขอขอบคุณพี่เฒ่า พี่น้า ร็อบ น้องพินและเพื่อนร่วมภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดมา รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำงานวิจัยนี้ ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้ามีข้อผิดพลาดประการใดในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้

สีหนาท วุฒิปราโมทย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์.....	IX

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	4
2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	5
2.2.1 สมการควบคุม.....	5
2.2.1.1 สมการการอนุรักษ์มวล.....	5
2.2.1.2 สมการโมเมนตัม.....	6
2.2.1.3 สมการพลังงาน.....	6
2.2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์.....	7
2.3 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน.....	8
2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์.....	9
2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$	11
2.3.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$	11
2.3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	13
2.3.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k - \epsilon$	15
2.4 แบบจำลองเฟสแยก (Discrete Phase Model).....	17
2.5 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE และ SIMPLEC.....	18
2.6 การสึกกร่อนบนผิววัสดุ (Erosion).....	22
2.6.1 การสึกกร่อนบนผิววัสดุเนื่องจากหยดของเหลว.....	23
2.6.2 การสึกกร่อนบนผิววัสดุเนื่องจากฟองแก๊ส.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 การสีกกร่อนบนผิววัสดุเนื่องจากของเหลวและของแข็ง.....	24
2.6.4 การสีกกร่อนบนผิววัสดุเนื่องจากของแข็ง.....	25
2.7 การไหลผ่านวัตถุจม (Flow over immersed bodies).....	27
2.7.1 การโตขึ้นของชั้นขอบเขต (Boundary-layer growth).....	27
2.7.2 การแยกไหล (Separation).....	30
2.7.3 การต้านทานการเคลื่อนที่บนวัตถุในระบบ 2 มิติ.....	31
2.8 ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser).....	34
2.9 การขยายอย่างฉับพลัน (Sudden expansion).....	35
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง.....	45
4.1 การศึกษาหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง.....	45
4.2 การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีผลต่อการสีกกร่อนบริเวณช่อง 90 องศาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่อ้างอิง.....	45
4.3 การศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ที่เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่าง ฉับพลันต่อการสีกกร่อนบริเวณช่อง 90 องศา.....	50
4.4 การศึกษาอิทธิพลของลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของแชมเบอร์และลักษณะ ของแผ่นกั้นภายในแชมเบอร์ต่อการสีกกร่อนบริเวณช่อง 90 องศา.....	53
4.5 การศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด อย่างช้าๆต่อการสีกกร่อนบริเวณช่อง 90 องศา.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง.....	68
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน.....	20
3.1 ขนาดของท่อที่ใช้ในการจำลอง.....	41
3.2 สมบัติของของไหลและอนุภาคของแข็ง.....	41
3.3 รูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขของการหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง.....	42
3.4 รูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขของการหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม.....	42
4.1 เปรียบเทียบผลการสีกร่อนกับผลการทดลองเมื่อใช้การทำนายการสีกร่อนของ Oka และคณะกับ FLUENT ของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน.....	50
4.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ที่มีอิทธิพลต่อความดันลด.....	52
4.3 เปรียบเทียบค่าการสีกร่อนหลังติดแผ่นกันแต่ละชนิดภายในแต่ละประเภทของแชมเบอร์ขนาด $D^*=5$	57
4.4 คอนทิวร์ความดันที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวแกน z ของท่อ.....	64
4.5 เปรียบเทียบค่าการสีกร่อนสูงสุดและความดันลดของแต่ละแชมเบอร์ขนาด D^* ต่างๆ.....	67
5.1 สรุปผลการศึกษาของแต่ละแชมเบอร์ขนาด D^* ต่างๆ.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะของผนังท่อภายในที่เกิดจากการชนของอนุภาคของแข็ง.....	3
2.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน.....	8
2.2 ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE.....	21
2.3 ทิศทางการกระจายตัวของแรงบนผิววัสดุ.....	23
2.4 ลักษณะการสีกกร่อนวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ.....	23
2.5 การสีกกร่อนบนใบพัดของปั๊ม.....	24
2.6 การสีกกร่อนบนเกลียวหมุนของเครื่องอัดรีด.....	24
2.7 การสีกกร่อนบนข้อต่อที่มีการชนส่งเม็ดทราย.....	25
2.8 ความเร็วอนุภาคก่อนและหลังชนกับผนัง.....	26
2.9 การโตขึ้นของชั้นขอบเขตตามแนวแผ่นเรียบ.....	27
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่กับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลบน แผ่นเรียบ.....	30
2.11 ลักษณะการไหลบนผิวโค้ง.....	31
2.12 การไหลแบบสม่ำเสมอผ่านทรงกระบอกยาว.....	32
2.13 การวัดค่าความดันบนผิวทรงกระบอก.....	32
2.14 การกระจายตัวของความดันบนพื้นผิวของทรงกระบอกที่จมอยู่ในการไหลแบบสม่ำเสมอ.....	32
2.15 การไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์.....	34
2.16 การไหลผ่าน Sudden expansion.....	35
2.17 บริเวณช่องอที่ศึกษา.....	37
3.1 สัดส่วนของท่อและบริเวณที่ศึกษา.....	40
3.2 แคมเบอร์เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน.....	43
3.3 ลักษณะของแคมเบอร์และแผ่นกั้นที่ศึกษา.....	44
4.1 แบบจำลองท่อข้องอ 90 องศาที่จำนวนกริดต่างๆ.....	46
4.2 ความเร็วกึ่งกลางท่อตามแนวแกน z ตลอดความยาวของท่อตรงของจำนวนกริดต่างๆ.....	47
4.3 คอนทัวร์การสีกกร่อนของแบบจำลองความปั่นป่วนต่างๆ.....	48
4.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	48
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสีกกร่อนกับองศาข้องอ.....	49
4.6 คอนทัวร์ความเร็วบนระนาบ $y=0$ ของแคมเบอร์ (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=5$	51
4.7 คอนทัวร์ความดันบนระนาบ $y=0$ ของแคมเบอร์ (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=5$	52
4.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านขนาดแคมเบอร์ที่แตกต่างกัน (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=5$	52
4.9 คอนทัวร์การสีกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศาของแคมเบอร์ขนาด D^* ที่ต่างกัน ($\times 10^{-5}$) (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=5$	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 เส้นทางเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในแชมเบอร์ขนาด $D^*=5$	54
4.11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศภายในแชมเบอร์ขนาด $D^*=5$	55
4.12 รูปทรงของแชมเบอร์ขนาด D^* ต่างๆ (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=3$ (ค) $D^*=4$ (ง) $D^*=5$ (จ) $D^*=6$	58
4.13 คอนทัวร์การสีกกร่อนบนแผ่นกั้นภายในแชมเบอร์ขนาด $D^*=2$	59
4.14 เส้นทางเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านแผ่นกั้นภายในแชมเบอร์ขนาด $D^*=2$	59
4.15 คอนทัวร์การสีกกร่อนบนแผ่นกั้นภายในแชมเบอร์ ($\times 10^{-5}$ m/kg) (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=3$ (ค) $D^*=4$ (ง) $D^*=5$ (จ) $D^*=6$	60
4.16 เส้นทางเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในแชมเบอร์ (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=3$ (ค) $D^*=4$ (ง) $D^*=5$ (จ) $D^*=6$	62
4.17 เปรียบเทียบอัตราการสีกกร่อนสูงสุดบริเวณช่องอ 90 องศา ก่อนและหลังมีแผ่นกั้นภายใน แชมเบอร์ขนาด D^* ต่างๆ	63
4.18 เปรียบเทียบความดันลดของท่อ ก่อนและหลังมีแผ่นกั้นภายในแชมเบอร์ขนาด D^* ต่างๆ	63
4.19 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศในท่อตรงก่อนติดแชมเบอร์ที่ระยะ -304.8 ถึง -101.6 มม. ตามแนวแกน z (ก) $D^*=3$ (ข) $D^*=4$ (ค) $D^*=5$ (ง) $D^*=6$	65
4.20 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศในท่อตรงก่อนติดแชมเบอร์ที่ระยะ -304.8 ถึง -101.6 มม. ตามแนวแกน z	66
4.21 ระยะตัดขวางตามแนวแกน z (ก) แชมเบอร์ขนาด $D^*=4$ (ข) ท่อก่อนติดแชมเบอร์ ($D^*=1$)	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

a	ความเร็วเสียงอากาศ (เมตรต่อวินาที)
A_{face}	พื้นที่ของผิวเซลล์ที่ผนัง
$b(v)$	ฟังก์ชันความเร็วอนุภาค
$C(d_p)$	ฟังก์ชันของอนุภาค
D_1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า (มิลลิเมตร)
D_2	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อขยาย (มิลลิเมตร)
D^*	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดแชมเบอร์ (D_2/D_1)
D_f	แรงต้านการเคลื่อนที่ (นิวตัน)
E	พลังงานจำเพาะของของไหล
e_n	อัตราส่วนความเร็วสะท้อนต่อความเร็วกระทบกับผนังในแนวตั้งฉากกับผนัง
e_n	อัตราส่วนความเร็วสะท้อนต่อความเร็วกระทบกับผนังในแนวสัมผัสกับผนัง
$f(\alpha)$	ฟังก์ชันของมุมกระทบ
G_b	การเกิดขึ้นของพลังจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
G_k	การเกิดขึ้นของพลังจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนของความเร็วเฉลี่ย
H_v	ความแข็งของวัสดุ (GPa)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน)
p	ความดัน (ปาสคาล)
p^*	ความดันคาดเดา (ปาสคาล)
p'	ความดันปรับแก้ (ปาสคาล)
$R_{erosion}$	อัตราการสึกกร่อน (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (ต่อ)

S_E	แหล่งพลังงานอื่นๆ
S_M	เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ
S_k และ S_ε	เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นของ k และ ε
T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
t	เวลา (วินาที)
U	ความเร็วเฉลี่ยที่ทางออกเจ็ต (เมตรต่อวินาที)
U_{ref}	ความเร็วอ้างอิงในการไหลเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)
u	ความเร็วในแนวแกน x (เมตรต่อวินาที)
\bar{u}	เวกเตอร์ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
\bar{u}_p	ความเร็วอนุภาค (เมตรต่อวินาที)
u^*	ความเร็วคาดเดาในแนวแกน x (เมตรต่อวินาที)
u'	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน x (เมตรต่อวินาที)
v	ความเร็วในแนวแกน y (เมตรต่อวินาที)
v^*	ความเร็วคาดเดาในแนวแกน y (เมตรต่อวินาที)
v'	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน y (เมตรต่อวินาที)
\bar{v}	ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)
w	ความเร็วในแนวแกน z (เมตรต่อวินาที)
x	ระยะทางตามแนวแกน x (เมตรต่อวินาที)
Y_i	สัดส่วนโดยมวลของสาร i (-)
Y_M	บทบาทของการขยายตัวที่กว้างในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษากรีก

α	มุมกระทบของอนุภาคกับพื้นผิวผนัง
α_k	ปริมาณส่วนกลับของตัวเลขพรีนด์เทิลประสิทธิภาพสำหรับ k (-)
α_ε	ปริมาณส่วนกลับของตัวเลขพรีนด์เทิลประสิทธิภาพสำหรับ ε (-)
α_p	ตัวประกอบใต้การผ่อนปรนของความดัน (-)
α_s	ค่าคงที่ของการหมุนวน (-)
δ	ความหนาชั้นขอบเขต (เมตร)
ε	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ตารางเมตรต่อวินาที ³)
λ	สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
μ	สัมประสิทธิ์ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
μ_{eff}	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
μ_t	ความหนืดปั่นป่วน (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
μ_{t0}	ค่าของความหนืดปั่นป่วนที่ถูกคำนวณโดยปราศจากปรากฏการณ์การหมุนวน (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
ν	ความหนืดเชิงจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที)
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ρ	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
σ_k	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ k (-)
σ_ε	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ ε (-)
τ	ความเค้นเฉือน (ปาสคาล)
ϕ	คุณสมบัติการไหลฉบับพลัน
$\bar{\phi}$	คุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษากรีก (ต่อ)

φ	เวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล (วินาที)
φ'	เวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง (วินาที)
Ω	ตัวเลขคุณลักษณะของการหมุนวน (-)
$\bar{\Omega}_{ij}$	เทนเซอร์เฉลี่ยของการหมุนที่ถูกมองในกรอบอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_k



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการขนส่งอนุภาคผ่านทางท่อขนส่งโดยการใช้ของไหลเป็นรูปแบบหนึ่งของการไหลแบบหลายเฟสที่มักพบเจอในโรงงานอุตสาหกรรมเช่นอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความพยายามในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานลักษณะนี้ จึงมีการให้ความสำคัญในการศึกษาถึงลักษณะการไหลแบบหลายเฟสเป็นเวลากว่า 10 ปีแล้วและด้วยความเข้าใจในกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของรูปแบบการไหลแบบหลายเฟสนี้จึงได้นำมาใช้ในการปรับปรุงแก้ไขและเพิ่มความปลอดภัยระหว่างการดำเนินงานในอุตสาหกรรมมากขึ้น

ในสมัยก่อนได้มีการคิดค้นทฤษฎีใหม่ๆมากมายและได้นำมาพัฒนาร่วมกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยมุ่งหวังที่จะจำลองการไหลผ่านวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อเป็นตัวแทนของปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นจริง ต่อมาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเริ่มมีการยอมรับมากขึ้นในการนำมาปรับใช้กับงานในภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงการที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการบิน ปัจจุบันนี้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้กลายมาเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการศึกษาปัญหาการไหลซึ่งจะช่วยเรื่องการออกแบบการไหลแบบเฟสเดียวและแบบหลายเฟสให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยรูปแบบของการสีกกร่อนนั้นก็มีหลายประเภทด้วยกันแต่ที่น่าสนใจและพบเห็นได้บ่อยคือการสีกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่มากกระทบบนพื้นผิวซึ่งหลายกระบวนการในอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีการขนส่งอนุภาคแข็งด้วยอากาศมักพบเจอปัญหานี้ทำให้ความหนาของผนังท่อขนส่งบางลงจนอาจเกิดการทะลุได้ส่งผลให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่รูปแบบการสีกกร่อนนี้ยังคงเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ถึงแม้จะมีวิธีการศึกษาหาความสัมพันธ์ต่อการสีกกร่อนแล้วก็ตาม สำหรับปัญหาการไหลแบบหลายเฟสที่ทำให้เกิดการสีกกร่อนในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ นั้นมีสมการทำนายที่ซับซ้อนจึงได้มีการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาช่วยทำนายการสีกกร่อนและเป็นการเตือนล่วงหน้าถึงภาวะที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้

นอกจากนี้หลายบริษัทที่มีการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งอนุภาคของแข็งได้ให้ความสำคัญกับเวลาที่ใช้ในการบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายการดำเนินงานด้วยซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การตัดสินใจเลือกลงทุนกับอุปกรณ์ที่สามารถบำรุงรักษาได้ง่ายและมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น สำหรับท่อขนส่งในโรงงานนั้นโดยพื้นฐานของกระบวนการขนส่งและระบบภายในท่อขนส่งจะเกิดการสีกกร่อนเนื่องจากต้องใช้ความเร็วของอากาศมีค่าสูงในการพาอนุภาคเพื่อป้องกันการสะสมอนุภาคที่ขนส่งไปกีดขวางในท่อขนส่ง เนื่องด้วยข้อจำกัดในการออกแบบท่อขนส่งเพื่อลดการสีกกร่อนนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการลดการสีกกร่อนบริเวณท่อข้อต่อ 90 องศาซึ่งเป็นลักษณะของท่อที่มีโอกาสเกิดการสีกกร่อนมากที่สุดเนื่องจากอนุภาคกระทบกับผนังท่อโดยตรงด้วยยึดหลักการของการบำรุงรักษาที่ง่ายและกระทบต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานให้น้อยที่สุดจึงได้มีการออกแบบท่อก่อนถึงท่อข้องอ 90 องศาโดยใช้ท่อขยาย-ท่อลด (แชมเบอร์) ที่ได้รับการดัดแปลงให้มีตัวกั้นภายในนั้นแชมเบอร์มาช่วยชะลอการไหลของของไหล และช่วยลดโมเมนตัมของอนุภาคก่อนจะเข้าชนกับผนังท่อข้องอ 90 องศา เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการออกแบบจึงนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการออกแบบแชมเบอร์โดยใช้โปรแกรม FLUENT เพื่อจำลองการสึกกร่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำนายการสึกกร่อนในท่อข้องอ 90 องศาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเทียบกับผลการทดลองและงานวิจัยก่อนหน้า

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันของท่อขยาย-ท่อลด (แชมเบอร์) ที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา

1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆและแบบฉับพลันของแชมเบอร์ที่ภายในมีตัวกั้นที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา

1.2.4 ศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆของแชมเบอร์ที่ภายในมีตัวกั้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Gambit และคำนวณการไหลโดยใช้โปรแกรม FLUENT จากนั้นตรวจสอบผลการทำนายการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศาให้ตรงกับงานวิจัยที่อ้างอิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนได้แก่ แบบจำลอง Standard k-epsilon แบบจำลอง RNG k-epsilon และแบบจำลอง Realizable k-epsilon ที่เหมาะสมกับการทำนายการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ขนาด 2 เท่าและ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขาเข้าที่ส่งผลต่อความดันลดในท่อและการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศาโดยพื้นที่หน้าตัดของแชมเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ขนาด 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขาเข้าโดยพื้นที่หน้าตัดของแชมเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆและแบบฉับพลันโดยภายในมีตัวกั้น 2 แบบได้แก่ ตัวกั้นแผ่นสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก ที่ส่งผลต่อความดันลดในท่อและการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา

1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ขนาด 3, 4, 5 และ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขาเข้าโดยพื้นที่หน้าตัดของแชมเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆและตัวกั้นเป็นแบบทรงกระบอกที่ส่งผลต่อความดันลดในท่อและการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.4.2 ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการสีกกร่อนภายในห้องอ 90 องศาไปสู่การพัฒนาให้ภายในห้องอ 90 องศาที่มีการสีกกร่อนลดลง



รูปที่ 1.1 ลักษณะของผนังท่อภายในที่เกิดจากการชนของอนุภาคของแข็ง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้เข้ามามีบทบาทในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลสำหรับใช้ในการออกแบบงานด้านวิศวกรรมหรืองานด้านวิทยาศาสตร์โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแก้สมการอนุพันธ์ย่อยที่เป็นสมการอธิบายการไหลแล้วแสดงผลลัพธ์ด้วยคอนทัวร์หรือเวกเตอร์ เป็นต้นทำให้สามารถเข้าใจปรากฏการณ์ของการไหลได้เป็นอย่างดีและสามารถปรับปรุงหรือดัดแปลงรูปแบบของการออกแบบจนผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจก่อนนำไปสร้างจริงซึ่งช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมากในการออกแบบ อีกทั้งยังช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาในกรณีที่ไม่สามารถทำการทดลองได้ยกตัวอย่างเช่น

- งานด้านการบินและอวกาศ : การออกแบบปีกเครื่องบิน
- งานด้านวิศวกรรมยานยนต์ : การออกแบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน
- งานด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ : การศึกษาการไหลภายในหลอดเลือด
- งานด้านวิศวกรรมเคมี : การออกแบบไซโคลน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- งานด้านวิศวกรรมโยธา : การศึกษาการถ่ายเทอากาศภายในตัวอาคาร

โดยทั่วไปแล้วการทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor) กระบวนการคำนวณ (Solver) และกระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor) แสดงรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

เป็นกระบวนการที่ประกอบด้วยข้อกำหนดข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณปัญหาการไหลให้กับโปรแกรมคำนวณมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การสร้างโดเมนของการคำนวณ (Computational domain)
- การสร้างเมช (Mesh) หรือกริด (Grid) เป็นกระบวนการแบ่งโดเมนของการคำนวณให้เป็นส่วนเล็กๆจำนวนมาก
- เลือกสมการหรือแบบจำลองที่จำเป็นต่อการคำนวณปรากฏการณ์ที่สนใจ
- กำหนดคุณสมบัติของของไหล (Fluid properties)
- กำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary conditions)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solver)

เป็นการหาคำตอบด้วยวิธีการเชิงตัวเลขซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method: FVM) ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การอินทิเกรตการสมการควบคุมของการไหลของของไหลตลอดปริมาตรควบคุมทั้งโดเมน

- การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equations) ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equations) ด้วยวิธีเชิงตัวเลข

- หาคำตอบของสมการพีชคณิตด้วยวิธีการกระทำซ้ำ

2.1.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor)

เป็นกระบวนการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณประกอบไปด้วยรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

- รูปทรงโดเมนและการแสดงกริด
- เวกเตอร์
- เส้นและคอนทัวร์
- พื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ
- การติดตามอนุภาค

2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

2.2.1 สมการควบคุม (Governing equation)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีหลักการมาจากสมการควบคุมของกลศาสตร์ของไหล โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เป็นตัวแทนของกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ซึ่งได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) และกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (First law of thermodynamics) [2]

2.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation)

จากคำกล่าวที่ว่า “มวลไม่สามารถสร้างหรือทำลายได้” มีความหมายว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นของไหลจะเท่ากับอัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นของไหล” ซึ่งสามารถเขียนสมการอนุรักษ์มวลหรือที่เรียกว่าสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้ดังสมการที่ (2.1) [2]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	ρ	คือ	ความหนาแน่น
	t	คือ	เวลา
	\vec{u}	คือ	เวกเตอร์ความเร็ว โดย $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$
	u	คือ	ความเร็วในแกน x
	v	คือ	ความเร็วในแกน y
	w	คือ	ความเร็วในแกน z

2.2.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันสามารถสรุปได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล” โดยสามารถแบ่งประเภทของแรงออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ 1. แรงที่กระทำต่อพื้นผิวของไหล (Surface force) ได้แก่ แรงดัน (Pressure force) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) 2. แรงกระทำต่อปริมาตรของไหล (Body force) ได้แก่ แรงโน้มถ่วง (Gravity force) แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ฯลฯ ซึ่งสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation) เป็นดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.4) [2]

$$\text{แกน } x : \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.2)$$

$$\text{แกน } y : \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.3)$$

$$\text{แกน } z : \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.4)$$

โดย	p	คือ	ความดัน
	τ	คือ	ความเค้นเฉือน (Shear stress)
	S_M	คือ	เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ (Momentum source terms)

2.2.1.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถสรุปได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหลจะเท่ากับอัตราการเพิ่มความร้อนสุทธิไปยังอนุภาคของไหล รวมกับอัตราของงานสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคของไหล” สามารถเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังสมการที่ (2.5) [2]

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (p\vec{u}) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E \quad (2.5)$$

โดย E คือ พลังงานจำเพาะของของไหล
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 T คือ อุณหภูมิ
 S_E คือ แหล่งพลังงานอื่นๆ (Energy source terms)

2.2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations)

สมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการควบคุมพื้นฐานสำหรับของไหลหนืดได้น่าทึ่งข้อที่สองของนิวตันมาประยุกต์ใช้ซึ่งรูปแบบการไหลสำหรับของไหลต่าง ๆ นั้น ความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stress) เป็นฟังก์ชันของอัตราการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) หรืออัตราความเครียด (Strain rate) สำหรับกรณีของไหลประเภทนิวตันเนียน (Newtonian fluids) ความเค้นเนื่องจากความหนืดจะแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยสโตกส์ได้เสนอความเค้นเนื่องจากความหนืดดังต่อไปนี้ [3]

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.6)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.7)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.8)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.9)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.10)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.11)$$

โดย μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity Coefficient)
 λ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second Viscosity Coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสโตกส์กำหนดให้ $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$

จากสมการความเค้นเนื่องจากความหนืด (2.6) ถึง (2.11) นำไปแทนในสมการอนุรักษ์โมเมนตัมจะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ในระบบสามมิติดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.12)$$

สมการโมเมนตัม :

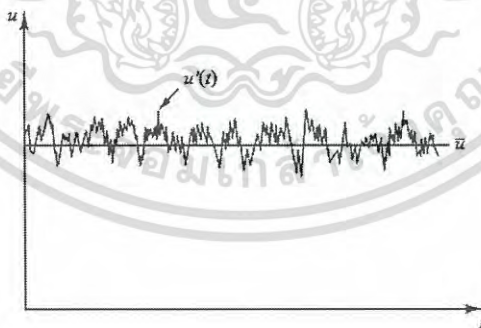
$$\text{แกน } x : \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot u) + S_{Mx} \quad (2.13)$$

$$\text{แกน } y : \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot v) + S_{My} \quad (2.14)$$

$$\text{แกน } z : \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot w) + S_{Mz} \quad (2.15)$$

2.3 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the turbulent flow)

1. การไหลแบบปั่นป่วนมีความไม่คงตัวสูง (Highly Unsteady) โดยคุณสมบัติการไหลเป็นฟังก์ชันของเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน [3]

2. การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะไม่ปกติ (Irregularity) จะใช้วิธีทางสถิติ (Statistical) ในการช่วยหาผลเฉลยแบบแม่นยำเนื่องจากมีความไม่สม่ำเสมอของการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การแพร่กระจาย (Diffusivity) การไหลแบบปั่นป่วนต้องแสดงลักษณะการแพร่กระจายและลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัม ความร้อนและมวล

4. ตัวเลขเรย์โนลด์สูง (Higher Reynolds Number) การไหลแบบปั่นป่วนส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อมีเลขเรย์โนลด์สูงซึ่งสาเหตุเกิดจากปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนกันระหว่างแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) กับแรงเฉื่อย (Inertia force) แต่ไม่จำเป็นเสมอไปที่ เลขเรย์โนลด์ต่ำก็สามารถเกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้

5. การสลายตัว (Dissipative) พลังงานจลน์สามารถเปลี่ยนเป็นความร้อนได้เนื่องจากความเค้นเฉือนของความหนืดและการไหลแบบปั่นป่วนจะสลายไปอย่างรวดเร็วเมื่อไม่มีพลังงานมาเพิ่มเติม

6. การไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นในสามมิติ (Three Dimensional) การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบ 3 มิติและของไหลมีการหมุนวน (Rotational)

เนื่องด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนจึงยากมาก ทำให้มีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยเพื่อหาคำตอบโดยการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct Numerical Simulation: DNS) ซึ่งจะให้ความสำคัญกับการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large-scale eddies) ไปจนถึงการหมุนวนขนาดเล็ก (Small-scale eddies) ซึ่งวิธีนี้เป็นการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้ทรัพยากรในการคำนวณมากซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาสมการเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณเฉพาะการหมุนวนขนาดใหญ่ส่วนการหมุนวนขนาดเล็กจะใช้การจำลองขึ้นมาวิธีนี้เรียกว่าการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation: LES) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณก็ยังสิ้นเปลืองทรัพยากรอยู่ดี

จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการพัฒนาสมการในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนโดยวิธีทางสถิติซึ่งเป็นการเพิ่มระดับการจำลองให้มากขึ้นแต่วิธีนี้จะมืองค์ประกอบความเร็วแกว่งที่อยู่ในทอมความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds Stress) เรียกสมการนี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS) [4]

2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation: RANS)

จากการไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณด้วยวิธีทางสถิติโดยมีนำเสนอการแยกเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition) ได้กำหนดให้คุณสมบัติการไหลฉับพลัน (Instantaneous flow property, ϕ) เป็นผลรวมระหว่างคุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตามเวลา (Time-averaged flow property, $\bar{\phi}$) และคุณสมบัติของของไหลแกว่ง (Fluctuating flow property, ϕ') สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.16) [4]

$$\phi(t) = \bar{\phi} + \phi'(t) \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (2.17)$$

$$\bar{\varphi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0 \quad (2.18)$$

สำหรับการแยกเรย์โนลด์ของความดัน เวกเตอร์ความเร็วและองค์ประกอบความเร็วของแกน x y และ z เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2.19)$$

$$\vec{u}(t) = \vec{\bar{u}} + \vec{u}'(t) \quad (2.20)$$

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.21)$$

$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (2.22)$$

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (2.23)$$

แทนสมการ (2.19) ถึง (2.23) ในสมการควบคุมและใช้นิยามเวลาเฉลี่ยของสมการ (2.17) และ (2.18) ทำให้ได้สมการทำการไหลที่รับรู้อิทธิพลของการแกว่งที่มีต่อการไหลเฉลี่ยดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้คือ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial z} = 0 \text{ หรือ } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{\bar{u}}) = 0 \quad (2.24)$$

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้ที่ความหนืดคงที่คือ :

แกน x :

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{\bar{u}} \vec{\bar{u}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \cdot \vec{\bar{u}} + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{(u')^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx} \quad (2.25)$$

แกน y :

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{\bar{v}} \vec{\bar{u}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \cdot \vec{\bar{v}} + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{(v')^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] + S_{My} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกน z :

$$\frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{w}\bar{u}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu\nabla^2 \cdot \bar{w} + \left[-\frac{\partial(\rho\overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\overline{(w')^2})}{\partial z} \right] + S_{Mz} \quad (2.27)$$

และ Boussinesq ได้เสนอความเค้นเรย์โนลด์ให้มีการคำนวณง่ายขึ้นเป็นดังสมการ (2.28)

$$-\rho\overline{u'_j u'_i} = \mu_t \left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial\bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.28)$$

โดย μ_t คือความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity) หรือความหนืดหมุนวน (Eddy viscosity) จากสมการ (2.28) นำไปแทนในสมการ (2.25) ถึง (2.27) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\text{แกน } x : \quad \frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{u}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \cdot \bar{u} + S_{Mx} \quad (2.29)$$

$$\text{แกน } y : \quad \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{u}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \cdot \bar{v} + S_{My} \quad (2.30)$$

$$\text{แกน } z : \quad \frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{w}\bar{u}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \cdot \bar{w} + S_{Mz} \quad (2.31)$$

$$\text{โดยที่} \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.32)$$

โดย μ_{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (Effective viscosity)

2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon

เป็นแบบจำลองปั่นป่วนที่มีประสิทธิภาพและมีความซับซ้อนในการคำนวณไม่มากนักเกินไปจึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ภาคอุตสาหกรรมและในงานวิจัยซึ่งแบบจำลองนี้ได้มีการพัฒนาและปรับแก้ให้มีการทำนายที่มีความแม่นยำและหลากหลายมากขึ้นในปัจจุบันนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลองได้แก่ Standard k-epsilon, RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon [5]

2.3.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ขึ้นอยู่กับสมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) ได้มาจากสมการแม่นยำตรง (Exact equation) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) ได้มาจากเหตุผลทางฟิสิกส์ โดยแบบจำลองความปั่นป่วนนี้มีสมมติฐานคือเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบ (Fully turbulent) และทำให้ผลกระทบที่เกิดจากความหนืดของโมเลกุลสามารถละทิ้งได้ [2,5]

- สมการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) หาได้จากสมการถ่ายโอนที่ (2.33) และ (2.34) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.34)$$

- การเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ปั่นป่วน

G_k คือการเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ยที่ได้มาจากสมการแม่นยำสำหรับการถ่ายโอนพลังงานจลน์เป็นดังสมการ (2.35)

$$G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.35)$$

- การเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

G_b คือการเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัวเป็นดังสมการ (2.36)

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.36)$$

- การขยายตัวแบบแกว่งในความปั่นป่วนที่สามารถอัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด

Y_M คือการขยายตัวแบบแกว่งในความปั่นป่วนที่สามารถอัดตัวได้มีผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมดเป็นดังสมการ (2.37)

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (2.37)$$

โดยที่ M_t คือตัวเลขมัคความปั่นป่วนเป็นดังสมการ (2.38)

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ a คือความเร็วเสียง

- แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน

ความหนืดปั่นป่วน (μ_t) เป็นความสัมพันธ์ของ k และ ε สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.39)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.39)$$

- ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{y}{u}\right|, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

2.3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ได้มีการพิสูจน์ด้วยเทคนิคทางสถิติโดยมีความคล้ายกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon แต่มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นดังต่อไปนี้ [2,5]

- มีการเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณของระบบการไหลที่มีความเครียดอย่างรวดเร็วในสมการการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε)

- มีการปรับปรุงการคำนวณระบบการไหลที่มีลักษณะหมุนวนให้มีความถูกต้องมากขึ้น
- แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon เหมาะสมกับระบบที่มีตัวเลขเรย์

โนลด์สูงแต่แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon มีการเพิ่มความสามารถในการคำนวณความหนืดปั่นป่วนประสิทธิภาพของระบบที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำด้วย

- สมการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon

พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) หาได้จากสมการถ่ายโอนที่ (2.40) และ (2.41) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่พจน์ G_k, G_b และ Y_M มีสมการคำนวณเหมือนกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ซึ่งค่าคงที่ $C_{1\epsilon} = 1.42$ และ $C_{2\epsilon} = 1.68$

- แบบจำลองความหนืดประสิทธิภาพ

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon\mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}-1+C_v}} d\hat{v} \quad (2.42)$$

โดยที่ $\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$ และ $C_v = 100$ ซึ่งสมการ (2.42) เหมาะกับระบบที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำและการไหลที่ใกล้ผนังแต่ในกรณีระบบที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงจะใช้สมการ (2.43) ในการคำนวณความหนืดปั่นป่วน

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.43)$$

โดย $C_\mu = 0.0845$

- การปรับปรุงการหมุนวน

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\epsilon}\right) \quad (2.44)$$

โดย μ_{t0} สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.42) หรือ (2.43) ในกรณีที่ไม่มีกรหมุนวน

- ตัวเลขพรีน็ดทิลประสิทธิภาพย้อนกลับ

α_k และ α_ϵ คือตัวเลขพรีน็ดทิลประสิทธิภาพย้อนกลับของสมการ k และ ϵ ตามลำดับมีสมการคำนวณดังสมการ (2.45)

$$\frac{|\alpha - 1.3929|^{0.6321}}{|\alpha_0 - 1.3929|} \frac{|\alpha - 2.3929|^{0.3679}}{|\alpha_0 - 2.3929|} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (2.45)$$

โดยที่ $\alpha_0 = 1.0$ และในกรณีตัวเลขเรย์โนลด์สูง $\alpha_k = \alpha_\epsilon \approx 1.393$

- สมการคำนวณ R_ϵ ในสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (2.46)$$

โดยที่ $\eta \equiv Sk/\epsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$ จากสมการ (2.46) สามารถจัดสมการ (2.41) ได้ใหม่ดังสมการ (2.47)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.47)$$

โดยที่

$$C_{2\varepsilon}^* \equiv C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (2.48)$$

ในกรณี $\eta < \eta_0$ ทำให้ R_ε มีค่าเป็นบวกเนื่องจากรูปแบบการไหลที่มีความเครียดต่ำจนถึงปานกลางทำให้ผลการทำนายของแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และ Standard k-epsilon ส่วนใหญ่ให้ผลที่ใกล้เคียงกันเนื่องจาก $C_{2\varepsilon}^*$ ของแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon กับ $C_{2\varepsilon}$ ของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และในกรณี $\eta > \eta_0$ ทำให้ R_ε มีค่าเป็นลบเนื่องจากรูปแบบการไหลที่มีความเครียดสูงทำให้ความหนืดปั่นป่วนของแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ต่ำกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ดังนั้นแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon จึงมีประสิทธิภาพในการทำนายการไหลที่มีความเครียดสูงและความโค้งงอของสายการไหลมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

2.3.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ได้มีการแก้ไขจุดอ่อนในสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ที่ขึ้นอยู่กับสมการจลศาสตร์ของค่าเฉลี่ยของการหมุนวนผันผวนยกกำลังสองและมีการแก้ไขสูตรการคำนวณตัวแปร C_μ ซึ่งส่งผลต่อสมการที่คำนวณความหนืดปั่นป่วน ทำให้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon นั้นมีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นโดยมีความสามารถในการทำนายลักษณะกระแสการไหลที่มีความโค้งงอมากและการหมุนวน อีกทั้งยังสามารถทำนายการไหลที่มีการแยกไหล (Separated flow) การไหลแบบเจ็ต (Jet flow) และรูปแบบการไหลทุติยภูมิ (Secondary flow) ที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย [2,5]

- สมการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) หาได้จากสมการถ่ายโอนที่ (2.49) และ (2.50) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ และพจน์ G_k, G_b และ Y_M มีสมการ
 คำนวณเหมือนกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

- แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.51)$$

โดย C_μ คำนวณได้จากสมการ (2.52)

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.52)$$

โดยที่

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (2.53)$$

กำหนดให้ $\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$ และ $\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$

โดย $\bar{\Omega}_{ij}$ คือ เทนเซอร์ของอัตราการหมุนเฉลี่ยที่มองในกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม ω_k ซึ่งมี
 ค่า $A_0 = 4.04$ และ $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$

โดยกำหนดให้ $\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W)$, $W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}$, $\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$

จากสมการ (2.52) จะเห็นได้ว่า C_μ เป็นฟังก์ชันของ 1. อัตราการหมุนและความเครียดเฉื่อย 2. ความเร็ว
 เชิงมุมของระบบที่มีการหมุน 3. สนามความปั่นป่วน (k และ ε) โดยที่ $C_\mu = 0.09$ สำหรับชั้นย่อยเฉื่อย
 ในชั้นขอบเขตสมดุ

- ค่าคงที่ของแบบจำลอง

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบบจำลองเฟสแยก (Discrete Phase Model)

แบบจำลอง Lagrangian discrete phase ในโปรแกรม ANSYS FLUENT [5] มีการคำนวณตามวิธีของ Euler-Lagrangian ซึ่งเฟสของไหล (Continuous phase) สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีการทำให้มีความต่อเนื่องโดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ ในขณะที่เฟสกระจายตัว (Dispersed phase) มีการคำนวณโดยการติดตามอนุภาคผ่านสนามการไหลที่ได้มีการคำนวณแล้ว ซึ่งเฟสกระจายตัวสามารถแลกเปลี่ยนมวล โมเมนตัมและพลังงานกับเฟสของไหลได้ แบบจำลอง Discrete Phase Model นี้มีความเหมาะสมกับการไหลที่มีสัดส่วนของเฟสกระจายตัวต่อเฟสของไหลต่ำๆ จึงทำให้ไม่คิดผลของการกระทำกันระหว่างอนุภาค

ในการทำนายเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะใช้วิธีผลรวมของการตุลแรงที่กระทำต่ออนุภาคซึ่งถูกเขียนให้อยู่ในกรอบอ้างอิง Lagrangian โดยมีสมการคำนวณดังนี้

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (\bar{u} - \bar{u}_p) + \frac{\bar{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \bar{F} \tag{2.54}$$

โดยที่

$$\frac{dx}{dt} = u_p \tag{2.55}$$

โดย \bar{F} คือพจน์ของแรงอื่นๆที่กระทำบนอนุภาคมีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วยมวลของอนุภาคและ $F_D(\bar{u} - \bar{u}_p)$ คือพจน์ของแรงต้าน (Drag force) ต่อหน่วยมวลของอนุภาค

โดยที่

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \tag{2.56}$$

ในที่นี้ \bar{u} คือความเร็วเฟสของไหล \bar{u}_p คือความเร็วอนุภาค μ คือความหนืดของไหล ρ คือความหนาแน่นของไหล ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค Re คือตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์มีสมการคำนวณดังนี้

$$Re = \frac{\rho d_p |\bar{u}_p - \bar{u}|}{\mu} \tag{2.57}$$

ในการจำลองจะกำหนดให้อนุภาคเป็นทรงกลมดังนั้นสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) ในโปรแกรม ANSYS FLUENT ใช้สมการคำนวณของ Morsi และ Alexander [6] มีสมการคำนวณดังต่อไปนี้

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2} \quad (2.58)$$

โดยที่ a_1 , a_2 และ a_3 เป็นค่าคงที่

- การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม

การถ่ายโอนโมเมนตัมจากเฟสของไหล (Continuous phase) ไปยังเฟสแยก (Discrete phase) ซึ่งเป็นอนุภาคได้คำนวณใน ANSYS FLUENT โดยการตรวจสอบการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคที่ผ่านไปยังแต่ละปริมาตรควบคุมมีสมการคำนวณดังนี้ [5]

$$F = \Sigma \left(\frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{\text{other}} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (2.59)$$

2.5 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE และ SIMPLEC

ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) เป็นระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อใช้สำหรับกระบวนการคาดเดาและปรับแก้การคำนวณความดันบนกริดที่เหลื่อมกันเนื่องจากไม่มีสมการโดยตรงที่ใช้หาค่าความดันโดยตรงจึงต้องอาศัยการหาค่าความดันผ่านสมการโมเมนตัมแทน ซึ่งระเบียบวิธีนี้ถูกนำเสนอโดย Patankar และ Spalding ในปี ค.ศ. 1972 [4] โดยการพิจารณาสมการการไหลราบเรียบแบบคงตัวใน 2 มิติสำหรับระบบพิกัดฉาก ซึ่งสมการโมเมนตัมแยกสามารถแสดงได้ดังนี้

$$a_{i,j} u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{i-1,j} - p_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.60)$$

$$a_{i,j} v_{i,j} = \sum a_{nb} v_{nb} + (p_{i,j-1} - p_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.61)$$

ในขั้นตอนแรกของระเบียบวิธีนี้จะทำการคาดเดาค่าสนามความดัน p^* u^* และ v^* แล้วแทนค่าในสมการโมเมนตัมแยกที่ (2.60) และ (2.61) จะได้ดังสมการ (2.62) และ (2.63)

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.62)$$

$$a_{i,j} v_{i,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้นิยามความดันจริง (Correct pressure: p) เท่ากับผลรวมของความดันปรับแก้ (Pressure correction: p') และความดันคาดเดา (Guessed pressure: p^*) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของความดันปรับแก้ได้ดังสมการ (2.64)

$$p' = p - p^* \quad (2.64)$$

ในทำนองเดียวกันองค์ประกอบของการปรับแก้ความเร็วตามแนวแกน x และแนวแกน y แสดงได้ดังนี้

$$u' = u - u^* \quad (2.65)$$

$$v' = v - v^* \quad (2.66)$$

แทนค่าสนามความดันจริง p ในสมการโมเมนตัมแยกจะได้ผลลัพธ์เป็นสนามความเร็วจริง (u, v) สมการโมเมนตัมแยกเชื่อมโยงกับสนามความเร็วจริงด้วยสนามความดันจริงลบสมการที่ (2.60) และ (2.61) ด้วยสมการที่ (2.62) และ (2.63) ตามลำดับ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p'_{i-1,j} - p_{i-1,j}^*) - (p'_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.67)$$

$$a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p'_{i,j-1} - p_{i,j-1}^*) - (p'_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.68)$$

จากนิยามในสมการ (2.64) ถึง (2.66) เมื่อแทนค่าในสมการ (2.67) และ (2.68) จะได้เป็น

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.69)$$

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.70)$$

สมการที่ (2.69) และ (2.70) ถูกทำให้เป็นสมการอย่างง่ายโดยการตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ เพื่อให้ได้การปรับแก้ความเร็ว การลดรูปนี้เป็นแนวคิดหลักในการประมาณด้วยระเบียบวิธีแบบ SIMPLE ซึ่งสมการอย่างง่ายสามารถแสดงได้ใหม่ดังนี้

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.71)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.72)$$

โดยที่ $d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}}$ และ $d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}}$

แทนสมการที่ (2.71) และ (2.72) ในสมการที่ (2.65) และ (2.66) ได้ผลลัพธ์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.73)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.74)$$

ในทำนองเดียวกัน $u_{i+1,j}$ และ $v_{i,j+1}$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j}(p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (2.75)$$

$$v_{i,j+1} = v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1}(p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (2.76)$$

โดยที่ $d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}}$ และ $d_{i,j+1} = \frac{A_{i,j+1}}{a_{i,j+1}}$

สนามความเร็วต้องสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องซึ่งสมการความต่อเนื่องแยกคือ

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{i,j+1} - (\rho v A)_{i,j}] = 0 \quad (2.77)$$

แทนสมการที่ (2.73) ถึง (2.76) ในสมการความต่อเนื่องแยกได้เป็นสมการปรับแก้ความดัน (Pressure Correction Equation) ดังนี้

$$a_{i,j} p'_{i,j} = a_{i+1,j} p'_{i+1,j} + a_{i-1,j} p'_{i-1,j} + a_{i,j+1} p'_{i,j+1} + a_{i,j-1} p'_{i,j-1} + b'_{i,j} \quad (2.78)$$

โดยที่ $a_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1}$ และสัมประสิทธิ์อื่นสำหรับสมการปรับแก้ความดันแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน

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

เทอม b' แทนความไม่สมดุลเนื่องจากสนามความเร็วคาดเดาไม่เหมาะสม คำนวณสมการที่ (2.78) จะได้สนามการปรับแก้ความดันทั้งสนามการไหล เมื่อทราบสนามการปรับแก้ความดันแล้วจึงหาความดันจริงได้จากสมการที่ (2.63) และองค์ประกอบความเร็วจากสมการที่ (2.73) ถึง (2.76) การตัดเทอม $\sum a_{nb} u_{nb}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $\sum a_{nb} v'_{nb}$ จะไม่ส่งผลต่อผลเฉลยสุดท้าย (ผลเฉลยลู่ออก) เนื่องจากการปรับแก้ความดันและการปรับแก้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ($p^* = p$ $u^* = u$ และ $v^* = v$) อย่างไรก็ตามสมการปรับแก้ความดันอาจเกิดการลู่ออกของผลเฉลย ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วย Underrelaxation ระหว่างกระบวนการคำนวณซ้ำ ซึ่งหาความดันใหม่ได้จาก

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (2.79)$$

โดยที่ α_p คือ ตัวประกอบได้การผ่อนปรนของความดัน

การตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนที่ถูกต้องจะช่วยประหยัดต้นทุนในการจำลอง การตั้งค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออก แต่ถ้าตั้งค่าต่ำเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออกอย่างช้าๆ ซึ่งการตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนจะมีค่าต่างกันขึ้นกับกรณีของการไหล

ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนระเบียบวิธีแบบ SIMPLE [4]

สำหรับระเบียบวิธี SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) ได้ถูกคิดค้นขึ้นในปีค.ศ. 1984 โดย Van Doormal และ Raithby [7] ระเบียบวิธีนี้มีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกับระเบียบวิธี SIMPLE แต่มีการปรับแก้บางพจน์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการคำนวณโดยพจน์ทางด้านซ้ายและขวาของสมการ (2.69) จะถูกลบด้วย $\sum a_{nb} u'_{n,j}$ และสมการ (2.70) จะถูกลบด้วย $\sum a_{nb} v'_{n,j}$ ได้เป็นดังสมการใหม่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(a_{i,j} - \sum a_{nb})u'_{i,j} = \sum a_{nb}(u'_{nb} - u'_{i,j}) + (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.80)$$

$$(a_{i,j} - \sum a_{nb})v'_{i,j} = \sum a_{nb}(v'_{nb} - v'_{i,j}) + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.81)$$

กรณีของระเบียบวิธี SIMPLEX สมการ (2.80) และ (2.81) ถูกทำให้เป็นสมการอย่างง่ายโดยการตัดเทอม $\sum a_{nb}(u'_{nb} - u'_{i,j})$ และ $\sum a_{nb}(v'_{nb} - v'_{i,j})$ ซึ่งสมการอย่างง่ายสามารถแสดงได้ใหม่ดังนี้

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.82)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.83)$$

โดยที่ $d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j} - \sum a_{nb}}$ และ $d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j} - \sum a_{nb}}$

แทนสมการที่ (2.82) และ (2.83) ในสมการที่ (2.65) และ (2.66) ได้ผลลัพธ์เป็น

$$u_{i,j} = u^*_{i,j} + d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.84)$$

$$v_{i,j} = v^*_{i,j} + d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.85)$$

ในทำนองเดียวกัน $u_{i+1,j}$ และ $v_{i,j+1}$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$u_{i+1,j} = u^*_{i+1,j} + d_{i+1,j}(p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (2.86)$$

$$v_{i,j+1} = v^*_{i,j+1} + d_{i,j+1}(p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (2.87)$$

โดยที่ $d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j} - \sum a_{nb}}$ และ $d_{i,j+1} = \frac{A_{i,j+1}}{a_{i,j+1} - \sum a_{nb}}$

2.6 การสึกกร่อนบนผิววัสดุ (Erosion)

การสึกกร่อนที่เกิดจากการสัมผัสกับของไหลเคลื่อนที่โดยประเภทของของไหลสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบเฟสเดียวและแบบหลายเฟสซึ่งทำให้วัสดุของแข็งที่ถูกสัมผัสนั้นเกิดความเสียหายหรือสูญเสียพื้นผิวไปและสามารถเกิดการกัดกร่อนตามมาได้เนื่องจากพื้นผิวน้ำของแข็งที่มีสารเคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อนนั้นหลุดออกไปเนื่องจากการชน โดยการสึกกร่อนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท [8] ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 การสึกกร่อนบนผิววัสดุเนื่องจากหยดของเหลว (Liquid droplet erosion)

เป็นกระบวนการที่สูญเสียเนื้อวัสดุบนพื้นผิวของแข็งเนื่องจากหยดของเหลวไปกระทบกับผนังของแข็งด้วยความเร็วสูงซึ่งในขณะที่หยดของเหลวเริ่มชนผนังจะเกิดความดันที่จุดเข้าชนมีค่าสูงต่อมวลหยดของเหลวได้กระจายตัวออกทางด้านข้างด้วยความเร็วสูงทำให้เกิดการกระจายตัวของแรง ดังรูปที่ 2.3 โดยแรงที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับมวลและความเร็วของหยดของเหลวด้วย ซึ่งหยดของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกิน 50 ไมโครเมตรและความเร็วของหยดของเหลวมากกว่า 100 เมตรต่อวินาทีสามารถทำให้เกิดความเสียหายบนผิววัสดุซึ่งรูปแบบของความเสียหายที่เกิดจากหยดของเหลวนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุด้วยตัวอย่างเช่น วัสดุเหนียว (Ductile material) จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) และวัสดุเปราะ (Brittle material) จะเกิดรอยแตก (Cracking) ดังรูปที่ 2.4 ลักษณะการสึกกร่อนเนื่องจากหยดของเหลวมักจะมีในระบบกังหันไอน้ำ (Steam turbine) หรือเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วสูงขณะฝนตก เป็นต้น [8]

รูปที่ 2.3 ทิศทางการกระจายตัวของแรงบนผิววัสดุ [8]



รูปที่ 2.4 ลักษณะการสึกกร่อนวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ
(ก) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (ข) การเกิดรอยแตก [8]

2.6.2 การสึกกร่อนบนผิววัสดุเนื่องจากฟองแก๊ส (Cavitation erosion)

เป็นกระบวนการที่พื้นผิวของวัสดุเกิดความเสียหายเนื่องจากฟองแก๊ส (Bubble) เข้าชนกับผนังโดยฟองแก๊สนี้เกิดจากการของเหลวมีความเร็วของการไหลสูงมากจนทำให้ความดันของเหลวต่ำกว่าความดันไอของเหลวและเมื่อฟองแก๊สเคลื่อนที่ไปกับของเหลวจากจุดที่มีความดันต่ำไปยังจุดที่มีความดันสูงทำให้ฟองแก๊สสามารถเข้าชนกับผนังเกิดเป็นรู (Pits) ส่งผลให้เกิดการแตกหักของวัสดุที่ถูกเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดซึ่งรูปแบบของการสึกกร่อนนี้สามารถเกิดได้กับอุปกรณ์เช่น ใบพัดของปั๊ม ข้องอและวาล์ว เป็นต้น ตัวอย่างของการสึกกร่อนเป็นดังรูปที่ 2.5 [8]



รูปที่ 2.5 การสึกกร่อนบนใบพัดของปั๊ม [9]

2.6.3 การสึกกร่อนบนผิววัสดุเนื่องจากของเหลวและของแข็ง (Slurry erosion)

เป็นกระบวนการที่สูญเสียเนื้อวัสดุบนพื้นผิวของแข็งเนื่องจากของผสมระหว่างของเหลวและของแข็งได้รับแรงเชิงกลและถ้าของเหลวเป็นสารเคมีที่สามารถก่อให้เกิดการสึกกร่อนได้จะยิ่งทำให้เกิดการสึกกร่อนมากยิ่งขึ้นและถึงแม้จะมีสัดส่วนเชิงมวลของแข็งในของผสมเพียงแค่ 0.2 - 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยมวลก็ตามแต่สามารถทำให้เกิดการสึกกร่อนได้ นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคของแข็งถึงแม้จะมีขนาดเล็กในระดับหน่วยนาโนเมตรก็สามารถสร้างความเสียหายให้กับพื้นผิวได้ด้วยเช่นกัน แต่ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการสึกกร่อนอย่างมากคือแรงที่กระทำต่อของผสมซึ่งส่งผลให้อนุภาคที่ได้รับแรงกระทำมากก็ยิ่งทำให้เกิดการสึกกร่อนมากขึ้นด้วยตัวอย่างเช่น กรณีของการขนส่งน้ำมันที่มีทรายปนอยู่ผ่านท่อขนส่งมักจะเกิดการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา เนื่องจากเป็นจุดเปลี่ยนของทิศทางการไหลทำให้ทรายปะทะกับผนังท่อโดยตรงและกรณีของเกลียวหมุนของเครื่องอัดรีด (Extruder screw) ที่ใช้กับงานพอลิเมอร์ที่ผสมเขม่าดำ (Carbon black) ขนาดอนุภาคต่ำกว่าระดับไมครอนก็สามารถทำให้เกิดการสึกกร่อนเป็นทางยาวที่เกลียวหมุนได้ภายในเวลาไม่กี่เดือนซึ่งเกิดจากการได้รับแรงบิดที่เกิดจากเกลียวหมุนทำให้อนุภาคเกิดการไถลและเสียดสีกับเกลียวหมุนโดยลักษณะการสึกกร่อนเป็นดังรูปที่ 2.6 [8]



รูปที่ 2.6 การสึกกร่อนบนเกลียวหมุนของเครื่องอัดรีด [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 Solid particle erosion

เป็นกระบวนการที่เนื้อวัสดุเกิดสูญเสียเนื่องจากการชนของอนุภาคของแข็งโดยมีเกิดการชนกันซ้ำๆซึ่งประสิทธิภาพการสึกกร่อนจะมากหรือน้อยนั้นมีปัจจัยหลักคือพลังงานในการเข้าชนซึ่งขึ้นอยู่กับมวลและความเร็วซึ่งสองปัจจัยนี้เป็นความสัมพันธ์ของโมเมนตัม ซึ่งถ้ายังมีค่ามากก็ยิ่งมีการถ่ายโอนโมเมนตัมไปยังวัตถุที่ถูกชนมากเช่นกันดังตัวอย่างในรูปภาพที่ 2.7 ซึ่งกรณีของการเกิดการสึกกร่อนที่ทำให้เกิดการแตกร้าวจะไม่มีผลการกัดกร่อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยซึ่งการสึกกร่อนประเภทนี้มักจะเกิดอยู่ในระบบที่อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ไปพร้อมกับแก๊สตัวอย่างเช่น การขนส่งอนุภาคของแข็งผ่านท่อซึ่งมักจะเกิดการสึกกร่อนบริเวณข้ออ จึงทำให้มีการคิดค้นสมการทำนายการสึกกร่อนเพื่อจะศึกษาพฤติกรรมการเกิดภายในท่อข้ออซึ่งในงานวิจัยได้มีสมการทำนายการสึกกร่อนดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 การสึกกร่อนบนข้อต่อที่มีการขนส่งเม็ดทราย [8]

อัตราการสึกกร่อนเนื่องจากอนุภาคสามารถวัดได้ที่ผนังมีสมการคำนวณดังนี้

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particles}}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{face}}} \quad (2.88)$$

$C(d_p)$ คือ ฟังก์ชันของขนาดอนุภาค α คือ มุมกระทบของอนุภาคกับพื้นผิวผนัง $f(\alpha)$ คือ ฟังก์ชันของมุมกระทบ v คือ ความเร็วกระทบของอนุภาค $b(v)$ คือ ฟังก์ชันของความเร็วอนุภาค A_{face} คือ พื้นที่ของผิวเซลล์ที่ผนัง ค่าของฟังก์ชันเหล่านี้ถูกเสนอโดย Edward และคณะ [10] ซึ่งเป็นสมการคำนวณการสึกกร่อนของโปรแกรม FLUENT โดยอัตราการสึกกร่อนมีหน่วยคือ $\text{kg material}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ สามารถแปลงเป็นหน่วย mm/year โดยหารด้วยความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เป็นผนัง

ในกาทำนายเชิงตัวเลขเทียบกับผลการทดลองจะทำให้อยู่ในหน่วยของ m/kg โดยหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{อัตราการสึกกร่อน} = \frac{R_{\text{erosion}}}{m_p \cdot \rho_w} \quad (2.89)$$

m_p คืออัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาค และ ρ_w คือความหนาแน่นผนังท่อ ในการคำนวณหา $f(\alpha)$ จะใช้สมการของ Oka และคณะ [11] ซึ่งได้นำเสนอผลของความแข็งของวัสดุที่ทำเป็นผนังเป็นดังสมการนี้

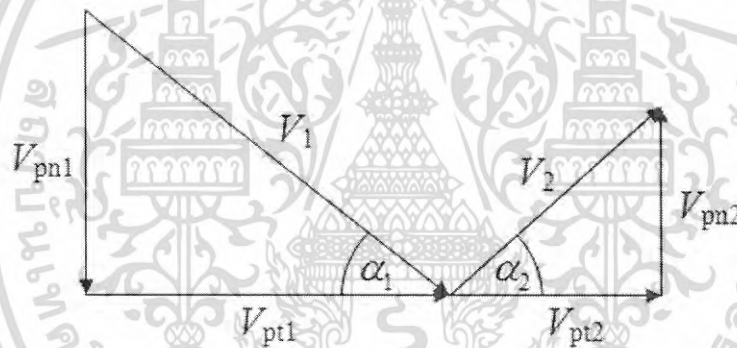
$$f(\alpha) = (\sin(\alpha))^n (1 + H_v (1 - \sin(\alpha)))^{n_2} \quad (2.90)$$

โดยที่

$$n_1 = 0.71(H_v)^{0.14} \quad (2.91)$$

$$n_2 = 2.4(H_v)^{-0.94} \quad (2.92)$$

- สัมประสิทธิ์การคืนสู่สภาพเดิม (Coefficient of restitution)



รูปที่ 2.8 ความเร็วของอนุภาคก่อนและหลังชนกับผนัง

เมื่ออนุภาคกระทบกับผนังจะเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นโดยสัมประสิทธิ์การคืนสู่สภาพเดิม (Coefficient of restitution) ถูกนำมาใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของอนุภาคซึ่งแสดงเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบความเร็วของอนุภาคหลังจากเข้าชนกับผนัง (V_2) ต่อความเร็วของอนุภาคก่อนเข้าชนกับผนัง (V_1) ด้วยมุมการเข้าชน α_1 และมุมสะท้อนออกจากผนัง α_2 ดังในรูปที่ 2.8 โดย e_n และ e_t แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคตลอดการกระทบในทิศทางตั้งฉากและแนวเส้นสัมผัสกับผนัง

$$e_n = \frac{V_{pn2}}{V_{pn1}} \quad (2.93)$$

$$e_t = \frac{V_{pt2}}{V_{pt1}} \quad (2.94)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{pn} และ V_{pi} เป็นความเร็วอนุภาคในแนวตั้งฉากและแนวสัมผัสตามลำดับ ซึ่งสัญลักษณ์เลข 1 คือก่อนเข้าชนและเลข 2 คือหลังชนกับผนัง ซึ่งสัมประสิทธิ์นี้ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าไม่มีการสูญเสียโมเมนตัมของอนุภาคหลังจากชนกับผนังและถ้ามีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงอนุภาคสูญเสียโมเมนตัมทั้งหมดหลังเข้าชนกับผนัง โมเดลการสะท้อนระหว่างอนุภาคกับผนังมีความสำคัญมากในการจำลองการสึกกร่อน [12] จึงมีผู้ที่เสนอความสัมพันธ์สำหรับสัมประสิทธิ์ของการคืนสู่สภาพเดิมโดยมีพื้นฐานจากคุณลักษณะของอนุภาคและภาวะการเข้าชน โดย Grant และ Tabakoff [13] เป็นหนึ่งในผู้ที่คิดค้นสัมประสิทธิ์เหล่านี้ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีสมการดังต่อไปนี้

$$e_n = 0.993 - 1.76\alpha_1 + 1.56\alpha_1^2 - 0.49\alpha_1^3 \quad (2.95)$$

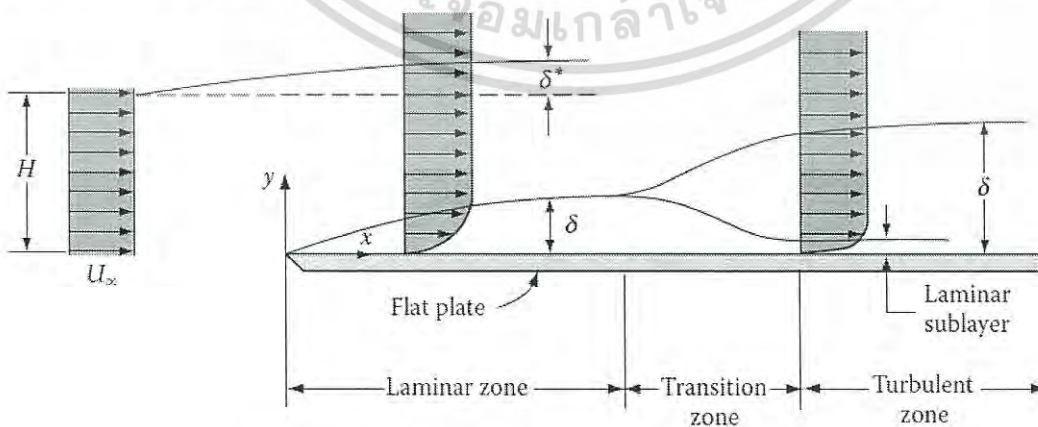
$$e_t = 0.998 - 1.66\alpha_1 + 2.11\alpha_1^2 - 0.67\alpha_1^3 \quad (2.96)$$

2.7 การไหลผ่านวัตถุจม (Flow over immersed bodies)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาของไหลที่ไหลผ่านวัตถุซึ่งทำให้เกิดชั้นขอบเขตการไหลบนผิวของวัตถุ และส่งผลต่อความดันของไหลที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการไหลลักษณะดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับหลักการดังต่อไปนี้

2.7.1 การโตขึ้นของชั้นขอบเขต (Boundary-layer growth) [14]

เมื่อพิจารณาการไหลผ่านแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) บนแผ่นเรียบที่วางในแนวขนานกับการไหล ในส่วนของบริเวณต้นทางของแผ่นเรียบมีความเร็วเท่ากับ U_∞ อย่างไรก็ตามบนพื้นผิวแผ่นเรียบความเร็วมีค่าเป็นศูนย์และในส่วนของบริเวณใกล้กับผนังแผ่นเรียบความเร็วมีค่าไม่คงที่แต่จะเพิ่มขึ้นจากศูนย์ที่ผนังไปยังกระแสการไหลอิสระโดยมีค่าเกือบเท่ากับกระแสการไหลอิสระในระยะแนวตั้งจากแผ่นเรียบเรียกระยะนี้ว่าความหนาชั้นขอบเขต (Boundary-layer thickness, δ)



รูปที่ 2.9 การโตขึ้นของชั้นขอบเขตตามแนวแผ่นเรียบ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.9 ความหนาของชั้นขอบเขตเพิ่มขึ้นตามระยะทางของแผ่นเรียบและสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณด้วยกันได้แก่บริเวณราบเรียบ (Laminar zone) ที่ด้านหน้าของแผ่นเรียบต่อมาเป็นบริเวณผสม (Transition zone) และสุดท้ายเป็นบริเวณปั่นป่วน (Turbulent zone) ซึ่งยังคงปรากฏชั้นย่อยหนืด (Laminar sublayer) อยู่เนื่องจากความเร็วตามผนังมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาที่ความหนาแทนที่ (Displacement thickness, δ^*) ซึ่งกล่าวถึงการแทนที่ของการไหลภายนอกมีสาเหตุมาจากการโตขึ้นของชั้นขอบเขตหรืออีกนัยหนึ่งคือการไหลต้องถูกแทนที่ที่เป็นปริมาณ δ^* เพื่อเป็นการชดเชยเนื่องด้วยเหตุผลของสมการอนุรักษ์มวล (Continuity equation) ซึ่งกำหนดให้ U_∞ คือความเร็วต้นทางและพื้นที่การไหลสำหรับความสูงที่ไม่ได้ถูกรบกวนมีค่าเท่ากับ H และมีความกว้างในแนวแกนพุ่งเข้ากระดาษเท่ากับ 1 หน่วย และนำสมการอนุรักษ์มวลมาประยุกต์ใช้กับการไหลได้เป็นดังนี้คือ

$$\text{พื้นที่} \times \text{ความเร็วต้นทาง} = \text{พื้นที่} \times \text{ความเร็วใดๆตามแนวแผ่นเรียบ}$$

สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$U_\infty H = U_\infty \delta^* + U_\infty (H - \delta) + \int_0^\delta V_x dy \quad (2.97)$$

บนแผ่นเรียบนี้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเสียดทานของผนังกับของไหล ในส่วนของบริเวณราบเรียบความเค้นเฉือนผนังลดลงตามระยะทางและในส่วนของบริเวณปั่นป่วนความเค้นเฉือนผนังจะมากกว่าในบริเวณราบเรียบและก็จะลดลงตามระยะทางเช่นกันแต่จะลดลงช้ากว่าในบริเวณราบเรียบมากๆ ในกรณีของการไหลบนแผ่นเรียบสามารถหาความหนาชั้นขอบเขตของบริเวณราบเรียบได้ดังสมการ

$$\delta = \frac{5.0}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.98)$$

โดยที่ $Re_x = \rho U_\infty x / \mu$ และ x คือระยะทางตามแผ่นเรียบ

นอกจากนี้ความหนาแทนที่ของบริเวณราบเรียบหาได้จากสมการ

$$\delta^* = \frac{1.73x}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.99)$$

และแรงต้านทานการเคลื่อนที่กระทำบนแผ่นเรียบในทิศทางของการไหลของการไหลแบบราบเรียบหาได้จากสมการ

$$D_f = \frac{0.664b\rho U_\infty^2 x}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (2.100)$$

โดยที่ b คือความกว้างของแผ่นเรียบ

ในกรณีของการไหลบนแผ่นเรียบสามารถหาความหนาชั้นขอบเขตของบริเวณปั่นป่วนได้ดังสมการ

$$\delta = \frac{0.37x}{(\text{Re}_x)^{1/5}} \quad (2.101)$$

นอกจากนี้ความหนาแทนที่ของบริเวณปั่นป่วนหาได้จากสมการ

$$\delta^* = \frac{0.046x}{(\text{Re}_x)^{1/5}} \quad (2.102)$$

และแรงต้านทานการเคลื่อนที่กระทำบนแผ่นเรียบในทิศทางของการไหลของการไหลแบบปั่นป่วนหาได้จากสมการ

$$D_f = \frac{0.036b\rho U_\infty^2 x}{(\text{Re}_x)^{1/5}} \quad (2.103)$$

สมการเหล่านี้จะถูกต้องเมื่อสมมติให้ชั้นขอบเขตปั่นป่วนเริ่มที่ขอบด้านหน้าของแผ่นราบเรียบ

ในการแสดงข้อมูลการต้านทานการเคลื่อนที่ที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ (Drag coefficient, C_D) กับตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ซึ่งทั้งสองหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_D = \frac{D_f}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (2.104)$$

และ

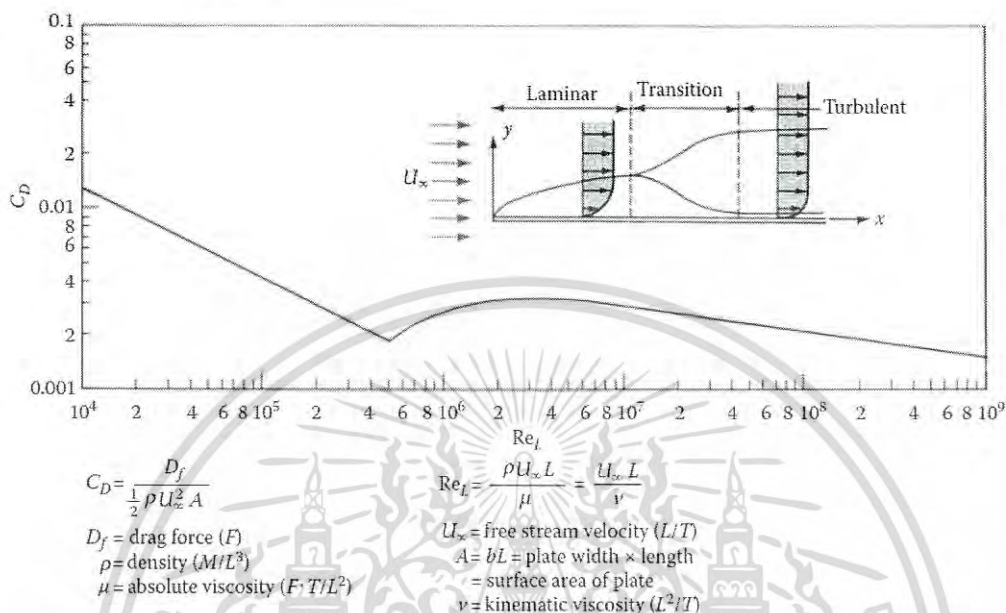
$$\text{Re} = \frac{\rho U_\infty D}{\mu} \quad (2.105)$$

โดยที่ D_f คือแรงต้านทานการเคลื่อนที่ ρ คือความหนาแน่นของไหล μ คือความหนืดของไหล

U_∞ คือความเร็วกระแสอิสระ A คือพื้นที่ด้านหน้าที่ถูกสัมผัส D คือขนาดลักษณะเฉพาะของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่กับตัวเลขเรย์โนลด์เนื่องจากการไหลบนแผ่นเรียบเป็นดังรูปที่ 2.10

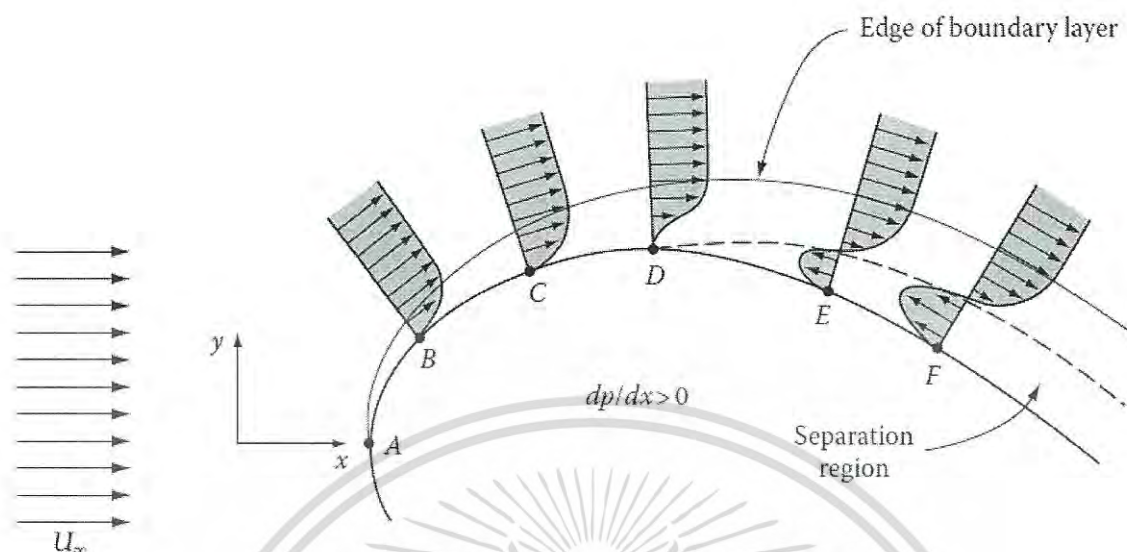


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่กับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลบนแผ่นเรียบ [14]

2.7.2 การแยกไหล (Separation) [14]

พฤติกรรมของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวโค้งดังรูปที่ 2.11 กำหนดให้พื้นผิวอยู่นิ่งและความเร็วกระแสอิสระ (Free-stream velocity) มีค่าเท่ากับ U_∞ เมื่อพิจารณาจุด A ความเร็วที่ตั้งฉากกับพื้นผิวมีค่าเท่ากับศูนย์ จุดนี้เรียกว่าจุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) และความดันที่วัดได้อยู่ในรูปของความดันหยุดนิ่ง (Stagnation pressure) จากนั้นชั้นขอบเขตเริ่มมีการโตขึ้นจากจุดนี้ เมื่อพิจารณาที่จุด B และ C ชั้นขอบเขตจุดนี้ยังคงโตอย่างต่อเนื่องเมื่อพิจารณาในส่วนด้านท้ายของจุด D เป็นต้นไปความดันจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางการเคลื่อนที่ซึ่งอนุภาคของไหลจะเคลื่อนที่ช้าลงผลของการชะลอนี้เนื่องจากเกรเดียนต์ความดันย้อนกลับ (Adverse pressure gradient) หรือเกรเดียนต์ความดันเป็นบวก (Positive pressure gradient) เกิดการพัฒนาขึ้น เมื่อมีการลดลงของพลังงานจลน์มากบริเวณการไหลย้อนกลับอาจจะก่อตัวขึ้นได้ทำให้การกระจายตัวของความเร็วเกิดขึ้นดังจุด E และ F โดยความเร็วที่ผนังมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากความหนืด เมื่อพิจารณาที่จุด D เริ่มเกิดการแยกไหลทำให้เกิด $dV_x / dy = 0$ ที่พื้นผิวของผนัง ซึ่งบริเวณของการไหลย้อนกลับนี้ถูกเรียกว่าบริเวณการแยกไหล (Separation region) เพราะว่าการไหลไปข้างหน้าจะถูกแยกออกจากขอบเขตนี้ด้วยเกรเดียนต์ความดันย้อนกลับ $dp/dx = 0$ ทำให้เกิดกระแสการไหลแบบการหมุนวน (Swirl) และอนุภาคของไหลเกิดการหมุนวน (Vortice) ขึ้นในบริเวณนี้ นอกจากนี้ความดันบริเวณการแยกไหลมีค่าเกือบเท่ากับความดันที่จุด D ซึ่งตำแหน่งของจุด D นี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อแรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag force) และแรงยก (Lift force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

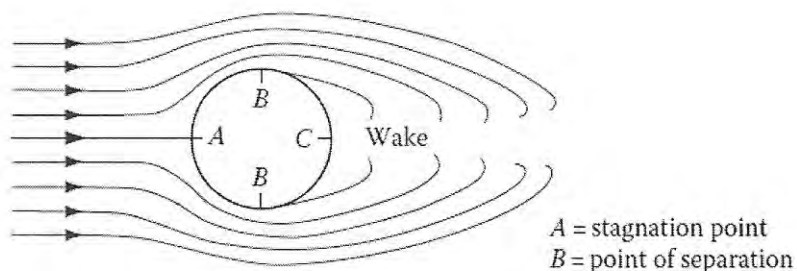


รูปที่ 2.11 ลักษณะการไหลผ่านพื้นผิวโค้ง [14]

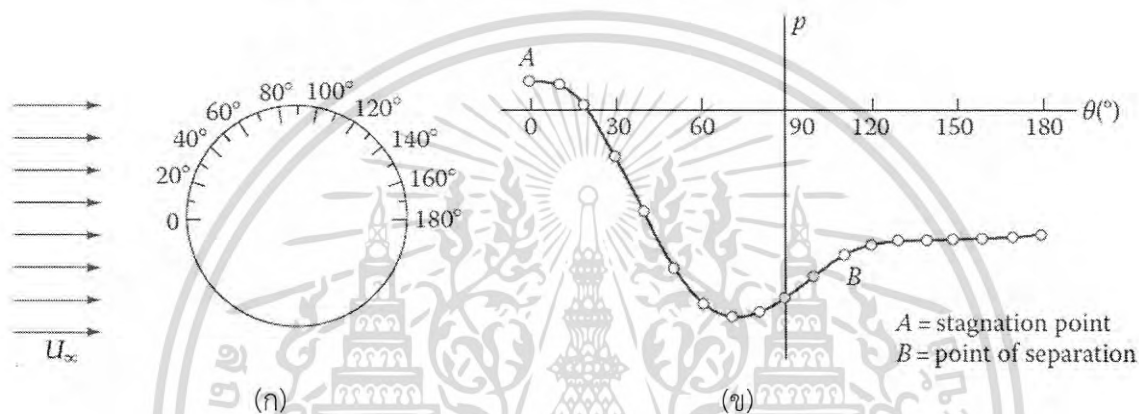
2.7.3 การต้านทานการเคลื่อนที่บนวัตถุในระบบ 2 มิติ [14]

การต้านทานการเคลื่อนที่ที่เป็นองค์ประกอบของแรงที่กระทำบนวัตถุโดยมีทิศทางขนานไปกับทิศทางของการเคลื่อนที่ ในที่นี้จะกล่าวถึงทรงกระบอกยาวที่จมอยู่ในการไหลแบบสม่ำเสมอด้วยความเร็ว U_∞ เมื่อพิจารณาการไหลรอบผ่านทรงกระบอกจะเกิดกระแสการไหลดังรูปที่ 2.12 จุด A เป็นจุดหยุดนิ่ง และจุด B เป็นจุดของการแยกไหล เมื่อเลยจุด B ไปที่ปลายทางด้านหลังของทรงกระบอกจะเป็นบริเวณของการแยกไหลซึ่งเกิดการหมุนวน (Wake) ขึ้น การแยกไหลที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุจากการเกิดเกรเดียนต์ความดันย้อนกลับที่ก่อตัวขึ้น เนื่องจากการไหลในธรรมชาติที่มีความซับซ้อนทำให้การกระจายตัวของความเร็วบนทุกจุดของพื้นผิวทรงกระบอกไม่สามารถหาได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ได้ เพื่อที่จะหาการกระจายตัวของความดันบนพื้นผิวทรงกระบอกนี้ ดังนั้นการทดลองจึงมีความจำเป็นที่จะนำมาใช้เพื่อศึกษาการกระจายตัวดังกล่าว ซึ่งการทดลองได้ทำการติดตั้งตัววัดความสถิต (Static pressure) ไว้บนผิวทรงกระบอกโดยทำการวัดทุกๆ 10 องศาโดยให้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.13 พบว่าจุด A เป็นจุดหยุดนิ่งเนื่องจากความดันที่จุดนี้มากกว่าความดันอ้างอิงหรือความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) และความเร็วที่จุดนี้เป็นศูนย์เมื่อวัดความดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามองศาที่เพิ่มขึ้นความดันจะต่ำลงเรื่อยๆจนถึงตำแหน่งองศาที่ 70 องศาเกิดความดันต่ำสุดและความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งนี้ เมื่อพิจารณาตำแหน่งองศาที่ 120 องศาการแยกไหลจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้เนื่องจากการสูญเสียโมเมนตัมมากเกินไปใกล้เคียงผนังในชั้นขอบเขตความพยายามที่จะเคลื่อนที่ไปยังปลายทางจึงถูกต้านด้วยความดันที่เพิ่มขึ้นหรือที่เรียกว่าเกรเดียนต์ความดันย้อนกลับ ซึ่งบริเวณการแยกไหลนี้ความดันมีค่าเกือบจะเท่ากับตำแหน่งองศาที่ 120 องศาซึ่งรูปที่ 2.14 เป็นลักษณะของการกระจายตัวของความดันโดยความยาวของลูกศรคือขนาดของความดันบนพื้นผิวของวัตถุและทิศทางชี้เข้าหาวัตถุบ่งบอกถึงความดันที่บนผิวมากกว่าความดันที่ต้นทาง (p_∞)

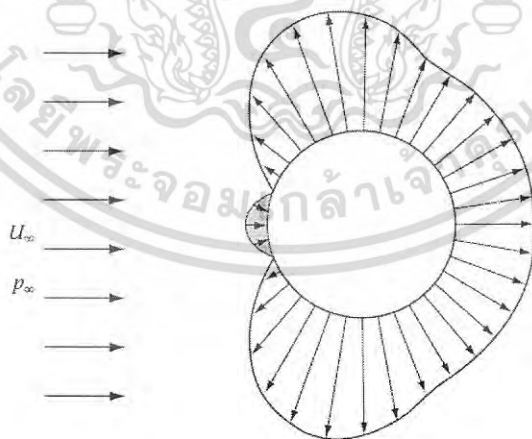
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การไหลแบบสมำเสมอผ่านทรงกระบอกยาว [14]



รูปที่ 2.13 การวัดค่าความดันบนผิวทรงกระบอก (ก) ตำแหน่งการวัดความดันบนผิวของทรงกระบอกที่จมอยู่ในการไหลแบบสมำเสมอ (ข) ค่าความดันบนพื้นผิวทรงกระบอกที่ตำแหน่งองศาต่างๆ [14]



รูปที่ 2.14 การกระจายตัวของความดันบนพื้นผิวของทรงกระบอกที่จมอยู่ในการไหลแบบสมำเสมอ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากพฤติกรรมการไหลผ่านวัตถุดังกล่าวสามารถแบ่งประเภทของแรงต้านการเคลื่อนที่ได้เป็น 2 ลักษณะ [15] ได้แก่ 1. เนื่องจากความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress, τ_w) ถูกเรียกว่าการต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเสียดทานบนพื้นผิว (Skin friction drag) 2. เนื่องจากความดันเรียกว่าการต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความดัน (Pressure drag) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Form drag เนื่องจากขึ้นอยู่กับรูปแบบหรือรูปร่างของวัตถุ เมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านวัตถุแล้วเกิดการต้านการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 2 ลักษณะสามารถเขียนสมรวมข้อสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่รวม (Total drag coefficient) และแรงต้านการเคลื่อนที่รวม (Total drag force) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (2.106) และ (2.109) ตามลำดับ

$$C_D = C_{D,friction} + C_{D,pressure} \quad (2.106)$$

โดย

$$C_{D,friction} = \frac{D_{f,friction}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (2.107)$$

และ

$$C_{D,pressure} = \frac{D_{f,pressure}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (2.108)$$

กำหนดให้ A มีพื้นที่เท่ากัน

$$D_f = D_{f,friction} + D_{f,pressure} \quad (2.109)$$

เมื่อพิจารณา Friction drag พื้นผิวองค์ประกอบของแรงเฉือนที่ผนังในทิศทางการไหลขึ้นอยู่กับแนวการวางของวัตถุและขนาดของความเค้นเฉือนที่ผนังด้วย โดย Friction drag เป็นศูนย์เมื่อแผ่นเรียบตั้งฉากกับการไหลแต่เกิด Pressure drag สูง ในทางกลับกันเมื่อแผ่นเรียบวางขนานไปกับการไหล Friction drag มีค่าสูงแต่เกิด Pressure drag ต่ำ นอกจากนี้ถ้าความหนืดของของไหลเพิ่มขึ้น Friction drag ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและเมื่อพิจารณาในส่วนของตัวเลขเรย์โนลด์ที่แปรผกผันกับความหนืดของไหลส่งผลให้อิทธิพลของ Friction drag ใน Total drag มีกระตบน้อยสำหรับตัวเลขเรย์โนลด์สูงๆสำหรับที่มีลักษณะทู่ (Blunt bodies) ซึ่งในกรณีของตัวเลขเรย์โนลด์สูงๆ Pressure drag มีบทบาทสำคัญมากกว่า

เมื่อพิจารณา Pressure drag ซึ่งแปรผันตรงกับพื้นที่ด้านหน้าของวัตถุและแปรผันตรงกับผลต่างระหว่างความดันด้านหน้าและด้านหลังของวัตถุจุม ซึ่ง Pressure drag จะมีค่ามากสำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีลักษณะทู่ (Blunt bodies) และมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีสำหรับการไหลผ่านแผ่นเรียบที่วางขนาน อีกทั้ง Pressure drag มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งเมื่อความเร็วของของไหลมีค่าสูงเกินกว่าที่ของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสามารถเกาะตามขอบของวัตถุได้ดังนั้นของไหลจึงเกิดการแยกไหลจากวัตถุและสร้างบริเวณความดันต่ำมากๆไว้ด้านหลังวัตถุซึ่งกรณีนี้ทำให้เกิดผลต่างของความดันอย่างมากระหว่างด้านหลังและด้านหน้าของวัตถุ

2.8 ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)

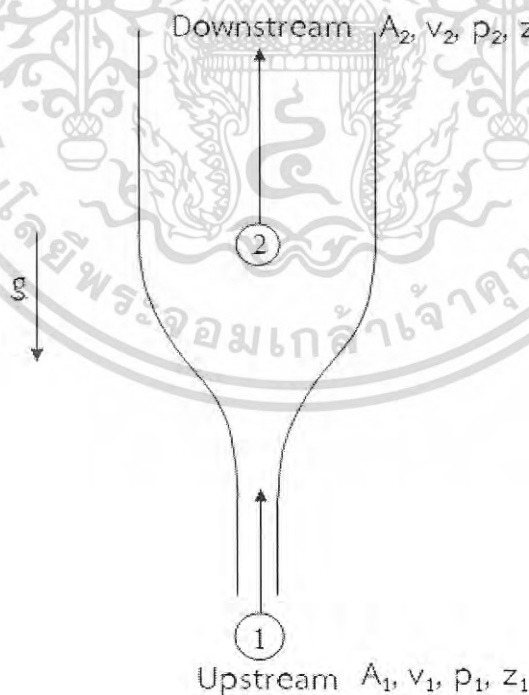
ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) คือ ส่วนของท่อที่พื้นที่หน้าตัดการไหลทางด้านขาเข้า (Upstream: A_1) เพิ่มขึ้นช้าๆอย่างต่อเนื่องจนถึงด้านขาออก (Downstream: A_2) ดังรูปที่ 2.15

ถ้าของไหลเป็นชนิดอัดตัวไม่ได้ และ ทราบค่าความเร็วและความดันขาเข้า (v_1, p_1) สามารถหาค่าความเร็วและความดันขาออก (v_2, p_2) ได้จากสมการ continuity และ Bernoulli ตามลำดับสมการ

continuity:
$$(\rho v A)_1 = (\rho v A)_2 \rightarrow v_2 = \left(\frac{A_1}{A_2}\right) v_1$$

สมการ Bernoulli:
$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g z_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + p e_f + p w$$

Diffuser อาจจะเป็นท่อกลมหรือท่อรูปสี่เหลี่ยมก็ได้



รูปที่ 2.15 การไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

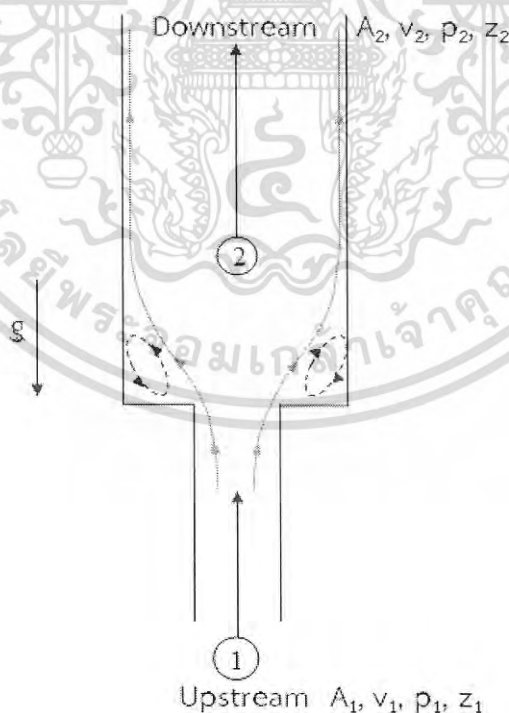
1. ไม่มีงานมากกระทำที่ทางเข้าและทางออก ($w = 0$)
2. การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าน้อยมาก ($e_f \approx 0$)

$$p_2 = p_1 + \rho \left(g(z_1 - z_2) + \frac{v_1^2}{2} \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right) \right)$$

เนื่องจาก $A_1 < A_2$ จึงทำให้ $p_2 > p_1$ นั่นคือ ความดันจะเพิ่มขึ้นที่ด้านขาออก (Downstream) เป็นเพราะการลดลงของพลังงานจลน์ ($v \downarrow$) ถูกเปลี่ยนไปเป็นการเพิ่มขึ้นของพลังงาน “ความดัน” ($p \uparrow$) ดังนั้น Diffuser จึงถูกเรียกว่าเป็น “High pressure recovery”

2.9 การขยายอย่างฉับพลัน (Sudden expansion)

Sudden expansion คือ ส่วนของท่อที่พื้นที่หน้าตัดการไหลทางด้านขาเข้า (Upstream: A_1) เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน กลายเป็นพื้นที่ทางด้านขาออก (Downstream: A_2) หรือมีอีกชื่อหนึ่งว่า Carnot diffuser ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การไหลผ่าน Sudden expansion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเช่นเดียวกันกับกรณีของ Diffuser คือ หาค่า v_2 และ p_2 จากข้อมูลที่มีได้แก่ A_1 , A_2 , v_1 และ p_1

สมการ Continuity :

$$(\rho v A)_1 = (\rho v A)_2 \rightarrow v_2 = \left(\frac{A_1}{A_2} \right) v_1$$

ซึ่งได้ผลเหมือนกันกับตัวอย่างที่แล้ว แต่จุดสำคัญที่ต่างกันมาก คือ การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน จะมีค่ามากในกรณีของ Sudden expansion ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ด้วย ความเฉื่อย (Inertia) ของของไหลที่ไม่สามารถไหลตามผนัง 90° ได้อย่างฉับพลัน ทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) ขึ้นหลังจากของไหลหลุดออกจากท่อ A_1 และก่อนที่จะขยายการไหลจนเต็มท่อ A_2 ต่อไป ซึ่งทำให้

$$e_{f, \text{Sudden Expansion}} \gg e_{f, \text{Diffuser}}$$

จากสมการ Bernoulli จะให้ค่า p_2 เท่ากับ

$$p_2 = p_1 + \rho \left(g(z_1 - z_2) + \frac{v_1^2}{2} \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right) - e_f \right)$$

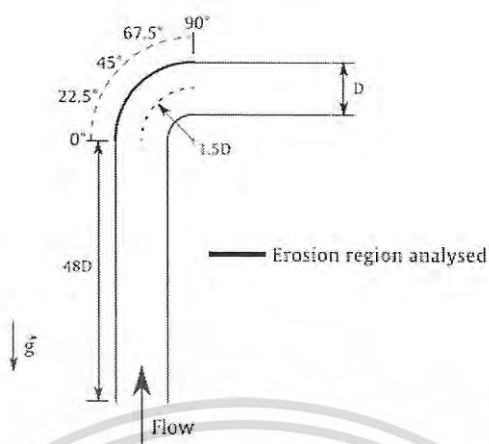
จะเห็นว่า ความดันทางด้านขาออก (Downstream) จะถูกลดลงโดย Friction loss ดังนั้น Sudden expansion จะถูกเรียกว่าเป็น “Low pressure recovery”

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การศึกษาเชิงตัวเลขของอัตราส่วนมวลที่มีผลกระทบต่อการศึกษาการสั่นของช่อง

งานวิจัยของ Carlos และคณะ [16] ได้มีการศึกษาการไหล 2 เฟสคือเฟสแก๊สและเฟสของแข็งที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการสั่นบริเวณท่อข้องอ 90° องศาที่อัตราส่วนเชิงมวลของอนุภาคของแข็งต่อมวลของแก๊ส (ϕ) เท่ากับ 0.013, 0.25, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในที่นี้กำหนดให้เฟสแก๊สเป็นอากาศและเฟสของแข็งคือเม็ดทราย จากอัตราส่วนเชิงมวลนี้ได้นำมาศึกษาผลของการกระทำกันระหว่างเฟสแก๊สและของแข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ 1. อัตราการไหลควบคู่ 1 ทาง (One-way coupling) โดยกำหนดให้ $\phi \ll 1$ ความหมายคือเฟสแก๊สมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่อนุภาคไม่ส่งผลต่อเฟสแก๊สด้วยแรงดูด (Drag force) หรือแรงกระทำอื่นๆ 2. อัตราการไหลควบคู่ 2 ทาง (Two-way coupling) โดยกำหนดให้ $\phi \approx 1$ ความหมายคือเฟสแก๊สส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทางกลับกันเฟสของแข็งก็ส่งผลต่อเฟสแก๊สด้วยวิธีการการลดหรือเพิ่มโมเมนตัมและความปั่นป่วน 3. อัตราการไหลควบคู่ 4 ทาง (Four-way coupling) โดยกำหนดให้ $\phi \gg 1$ ความหมายคือ นอกจากเฟสแก๊สและเฟสของแข็งมีอิทธิพลต่อกันแล้วแต่ยังมีผลของการกระทำกันระหว่างเฟสของแข็งกันเองอีกด้วย โดยมีการศึกษาตำแหน่งการสั่นดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 บริเวณช่องอที่ศึกษา [16]

จากงานวิจัยสรุปได้ว่า

1. ที่ $\theta = 0.013$ ผลของอัตราความควบคู่ทั้ง 3 แบบที่ตำแหน่ง 0-90 องศาให้ผลการสึกกร่อนเหมือนกัน
2. ที่ $\theta = 0.25$ ผลของอัตราความควบคู่ 1 ทางและ 2 ทางให้ผลการสึกกร่อนที่ใกล้เคียงกันมากแต่อัตราการสึกกร่อน 4 ทางให้พีคการสึกกร่อนที่ลดลงอย่างชัดเจนแสดงว่าผลของการกระทำกันระหว่างอนุภาคของแข็งส่งผลต่อการสึกกร่อน
3. ที่ $\theta = 0.25$ และ $\theta = 1.0$ ผลของอัตราความควบคู่ 2 ทางให้ผลที่เหมือนกันแสดงว่าอนุภาคนั้นไม่ได้มีความสำคัญที่จะส่งผลต่อการไหลของแก๊สเพียงพอที่จะเป็นสาเหตุให้มีการสึกกร่อนเปลี่ยนแปลงไปแต่ผลของอัตราความควบคู่ 4 ทางสามารถทำให้พีคการสึกกร่อนสูงสุดสามารถลดลงได้
4. ผลของอัตราความควบคู่ 4 ทางที่ $\theta = 0.013, 0.25, 0.5, 1.0$ และ 1.5 พบว่าเมื่อ θ เพิ่มขึ้นแสดงอย่างเห็นได้ชัดว่าให้พีคการสึกกร่อนสูงสุดมีค่าลดลงเนื่องจากผลของการกระทำกันระหว่างอนุภาคของแข็งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันและทำให้อนุภาคของแข็งไม่ชนกับผนังท่อโดยตรงตรงตำแหน่งองศาการสึกกร่อนสูงสุดทำให้ช่วยลดการสึกกร่อนได้แต่ก็ทำให้อนุภาคหลังการชนเคลื่อนที่ไปในทิศทางออกของท่อมากขึ้นจึงส่งผลให้ช่วง 60-90 องศาการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม θ

2. การศึกษาผลการทดลองของตำแหน่งการสึกกร่อนสูงสุดที่ทำให้เกิดความเสียหายในท่อข้องอ

Mazumder และคณะ [17] ได้ศึกษาการสึกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งบริเวณผนังท่อข้องอซึ่งท่อเป็นอะลูมิเนียมโดยมีของไหลเฟสเดียวคือแก๊สเป็นตัวพาอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ภายในท่อแนวตั้งโดยมีความเร็วของของไหลเท่ากับ 34.1 เมตรต่อวินาที และในกรณีของการไหลแบบหลายเฟสภายในท่อแนวนอนและแนวตั้งที่ความเร็วของแก๊สเท่ากับ 34.1, 27.4, 18.9 และ 9.8 เมตรต่อวินาทีและความเร็วของของเหลวเท่ากับ 0.3 และ 0.03 เมตรต่อวินาที โดยทำการวัดความหนาของผนังท่อที่หายไปและตำแหน่งองศาที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนสูงสุดโดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ในกรณีของการสีกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งโดยที่เป็นของไหลเฟสเดียวเป็นตัวพา ให้ผลการทดลองโดยสูญเสียความหนาของผนังที่มากที่สุดเท่ากับ 42.5 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาการสีกกร่อนเท่ากับ 55 องศา

2. ในกรณีของการสีกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งโดยที่เป็นของไหลแบบหลายเฟสเป็นตัวพาให้ผลการทดลองดังนี้

2.1 ในกรณีความเร็วของเหลวเท่ากับ 0.03 เมตรต่อวินาทีเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้นยิ่งทำให้มีการสีกกร่อนมากขึ้นโดยความเร็วของแก๊สที่ทำให้สูญเสียความหนาของท่อมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 34.1 เมตรต่อวินาที โดยการไหลในท่อแวนอนมีการสูญเสียความหนาของท่อมากที่สุดเท่ากับ 14.3 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาเท่ากับ 45 องศา แต่การไหลในท่อแนวตั้งเมื่อเทียบกับท่อในแวนอนแล้วให้ผลการสูญเสียความหนาของท่อมากกว่าซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.8 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาเท่ากับ 55 องศา

2.2 ในกรณีความเร็วของเหลวเท่ากับ 0.30 เมตรต่อวินาทีที่ความเร็วของแก๊สเท่ากับ 34.1 เมตรต่อวินาทีที่ทำให้สูญเสียความหนาของท่อมากที่สุดเช่นเดียวกันโดยการไหลในท่อแวนอนมีการสูญเสียความหนาของท่อมากที่สุดเท่ากับ 22.3 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาเท่ากับ 45 องศา แต่การไหลในท่อแนวตั้งเมื่อเทียบกับท่อในแวนอนแล้วให้ผลการสูญเสียความหนาของท่อมากกว่าซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.5 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาเท่ากับ 55 องศา

จากผลการทดลองของการไหลแบบหลายเฟสพบว่าอิทธิพลของการไหลในท่อแวนอนและแนวตั้งนั้นส่งผลต่อการสีกกร่อนที่แตกต่างกันออกไปซึ่งเมื่อเทียบที่ความเร็วของของเหลวที่เท่ากันแล้วการไหลในท่อแนวตั้งให้ผลการสีกกร่อนที่สูงกว่าและเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้การสีกกร่อนยิ่งเพิ่มสูงขึ้นด้วยเนื่องจากการไหลร่วมกันระหว่างเฟสแก๊สและของเหลวเป็นมีรูปแบบเป็นวงแหวน (Annular flow) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ (Entrainment) ของเหลวที่ผิวท่อเข้ามาในส่วนของเฟสแก๊สซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคทรายจำนวนมากถูกเหนี่ยวนำเข้ามาในเฟสแก๊สด้วยจึงเป็นเหตุให้อนุภาคที่อยู่ใจกลางของเฟสแก๊สมีความเร็วสูงจึงทำให้เกิดการสีกกร่อนที่ผนังท่อช่องมากขึ้น

3. ผลกระทบที่เกิดควบคู่กันระหว่างอนุภาคของแข็งและความเร็วแก๊สต่อการสีกกร่อนของช่องในท่อขนส่งแก๊สธรรมชาติ

ในตอนเริ่มต้นงานวิจัยของ N.Lin และคณะ [18] ได้ศึกษาแบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนโดยใช้คุณสมบัติท่อขนส่งแก๊สของบริษัท Daqing Oilfield ด้วยวิธีเชิงตัวเลขเทียบกับผลที่ได้จากการวัดการสีกกร่อนจริงในท่อขนส่งแก๊สผลปรากฏว่าแบบจำลองที่นำมาทำนายการสีกกร่อนสามารถทำนายการสีกกร่อนสูงสุดได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัดการสีกกร่อนที่เกิดขึ้นจริงในท่อขนส่งแก๊ส หลังจากนั้นจึงได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดควบคู่กันระหว่างคุณสมบัติของอนุภาคและความเร็วของแก๊สที่มีผลต่อการสีกกร่อนในท่อช่องโดยสมบัติของอนุภาคที่ศึกษาคือ 1. เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค 2. รูปร่างของอนุภาค 3. ปริมาณของอนุภาค 4. มุมที่ส่งผลต่ออนุภาค โดยผลการศึกษาศาสามารถสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นโดยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคงที่การสึกกร่อนสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนแต่เมื่อความเร็วของแก๊สคงที่โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้นการสึกกร่อนสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่ทำให้มีโอกาสเกิดการชนกันระหว่างอนุภาคมากขึ้น

2. เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นโดยสัมประสิทธิ์รูปร่าง (Shape coefficient) ของอนุภาคคงที่การสึกกร่อนสูงสุดจะเพิ่มขึ้นและยังสัมประสิทธิ์รูปร่างของอนุภาคมีค่าน้อยเท่าไรอนุภาคยังมีความเป็นเหลี่ยมและมีมุมมากขึ้นจึงทำให้เกิดการสึกกร่อนสูงสุดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3. เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคต่ำๆการสึกกร่อนสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคเพิ่มขึ้นการสึกกร่อนสูงสุดก็เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากอนุภาคมีโอกาสชนกับผนังท่อมากขึ้นแต่เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลมากกว่า 0.012 กิโลกรัมต่อวินาที จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคมากขึ้นการสึกกร่อนสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงคงที่

4. เมื่อทิศทางการวางตัวของท่ออยู่ในแนวองศาติดลบการสึกกร่อนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผนังท่อด้านนอกของข้อต่อแต่ในกรณีที่มีการวางท่อในแนวองศาที่เป็นบวกทำให้เกิดการสึกกร่อนเนื่องจากอนุภาคกระดอนไปใกล้กับผนังท่อทางเข้าด้านในและเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นการวางตัวของท่อในแนวองศาติดลบจะยังทำให้มีการสึกกร่อนมากขึ้นในทางกลับกันเมื่อความเร็วของแก๊สในท่อเพิ่มขึ้นพร้อมกับการวางท่อในองศาที่เป็นบวกจะยังทำให้การสึกกร่อนลดลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบเพื่อลดการสักร้อนภายในห้องอ 90 องศาโดยใช้ท่อขยาย-ท่อลดได้นิยามชื่อเรียกใหม่ว่าแชมเบอร์ (Chamber) ประกอบด้วยขั้นตอนการศึกษาดังนี้คือ

3.1 การสร้างแบบจำลองของท่อห้องอ 90 องศา

การสร้างแบบจำลองของท่อห้องอ 90 องศาในรูปแบบสามมิติโดยใช้โปรแกรม GAMBIT ได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Carlos และคณะ [16] ซึ่งแบบจำลองเป็นลักษณะท่อทรงกระบอกพื้นที่หน้าตัดวงกลม โดยมีบริเวณศึกษาการสักร้อนแนวช่วงโค้งห้องอตำแหน่ง 0 ถึง 90 องศาและทิศทางการไหลเป็นดังรูปที่ 3.1 และมีขนาดของแบบจำลองดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สัดส่วนของท่อและบริเวณที่ศึกษา

จากนั้นแบ่งโดเมนของท่อห้องอหรือที่เรียกว่าการตกริดเพื่อนำไปคำนวณการไหลในท่อและทำนายการสักร้อนภายในห้องอ 90 องศาจากนั้นหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Grid independent) ในการวิจัยนี้จะศึกษาจำนวนกริด 6 ขนาดได้แก่ 112,455 321,930 485,100 661,500 970,200 และ 1,660,365 เซลล์

ตารางที่ 3.1 ขนาดของท่อที่ใช้ในการจำลอง

ขนาดของท่อ	มม.
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D_1)	25.4
ความยาวท่อทางเข้า ($48D_1$)	1,220
ความยาวท่อทางออก (L)	100
รัศมีความโค้งของข้องอ ($1.5D_1$)	38.1

3.2 การทำนายการสีกกร่อนของท่อภายในข้องอ 90 องศา ก่อนติดตั้งแคมเบอร์

3.2.1 กำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นในการคำนวณเชิงตัวเลข

3.2.1.2 ในงานวิจัยนี้เป็นการไหลแบบสองเฟสได้แก่เฟสของไหลและเฟสของแข็งซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2 โดยผนังท่อกำหนดให้เป็นอะลูมิเนียม 6061-T6 ที่มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness, H_v) เท่ากับ 1.049 GPa และมีความหนาแน่นเท่ากับ 2,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [16]

ตารางที่ 3.2 สมบัติของของไหลและอนุภาคของแข็ง [16]

ประเภทของไหล	อากาศ
ความหนาแน่นของไหล	1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดของไหล	1.7894×10^{-5} ปาสคาลวินาที
ประเภทของอนุภาคของแข็ง	ทราย
ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง	2,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3.2.1.2 เงื่อนไขขอบเขตของท่อกำหนดให้ท่อทางเข้าเป็นความเร็วขาเข้า (Velocity inlet) ท่อทางออกกำหนดเป็นการไหลออก (Outflow) ผนังท่อกำหนดเป็นผนัง (Wall) และความเร็วของของไหลและอนุภาคของแข็งมีค่าเท่ากันคือ 34.1 เมตรต่อวินาที โดยมีอัตราส่วนมวลของอนุภาคของแข็งต่อมวลของอากาศเท่ากับ 0.013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การศึกษาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

ในขั้นตอนนี้จะคำนวณการไหลของของไหลแบบคงตัวด้วยโปรแกรม FLUENT ที่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็น Finite Volume โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ซึ่งในการเปรียบเทียบผลของจำนวนกริดทั้ง 6 ขนาดจะใช้วิธีการเปรียบเทียบความเร็วที่กึ่งกลางท่อตรงตามแนวแกน z ตั้งแต่ทางเข้าท่อจนถึงปลายท่อตรงก่อนถึงท่อข้องอ 90 องศาเพื่อหาจำนวนกริดต่ำสุดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีรูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขของการหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

	Scheme
Pressure-Velocity coupling	SIMPLE
Pressure	Standard
Momentum	Second order upwind
Turbulence quantities	Second order upwind

3.2.3 การศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยอ้างอิง

เป็นการนำแบบจำลองที่มีจำนวนกริดน้อยที่สุดมาศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมในการทำนายการสักร่อนภายในข้องอ 90 องศา ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 3 แบบได้แก่ Standard k-epsilon, RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการสักร่อนภายในข้องอ 90 องศา กับงานวิจัยของ Carlos และคณะ [16] โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตและสมบัติของไหลกับอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม และมีรูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขของการหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม

	Scheme
Pressure-Velocity coupling	SIMPLEC
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second order upwind
Turbulence quantities	Second order upwind

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

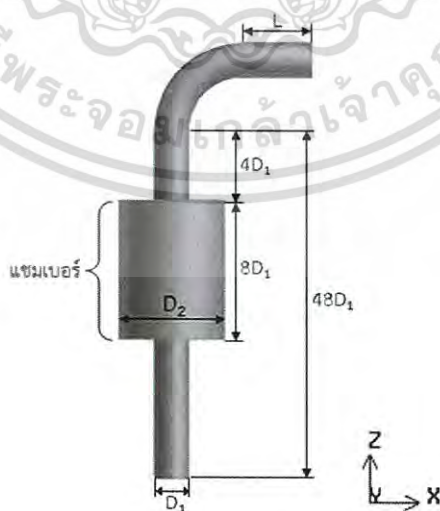
3.3 การทำนายการสีกกร่อนของท่อภายในช่องอ 90 องศาหลังติดตั้งแชมเบอร์

หลังจากที่ได้มีการศึกษาในหัวข้อที่ 3.2 แล้ว จากนั้นเข้าสู่กระบวนการศึกษาหาวิธีการที่ทำให้ภายในช่องอ 90 องศา มีการสีกกร่อนลดลงจึงได้มีการนำแชมเบอร์ (Chamber) มาติดตั้งแทนท่อตรงเดิมก่อนถึงช่องอ 90 องศาโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตและสมบัติของไหลกับอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม มีลำดับขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

3.3.1 ศึกษาแชมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของพื้นที่หน้าตัดโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ (D_2) เท่ากับ 2 และ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า (D_1) เพื่อศึกษาผลการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 กำหนดให้ $D^* = D_2 / D_1$

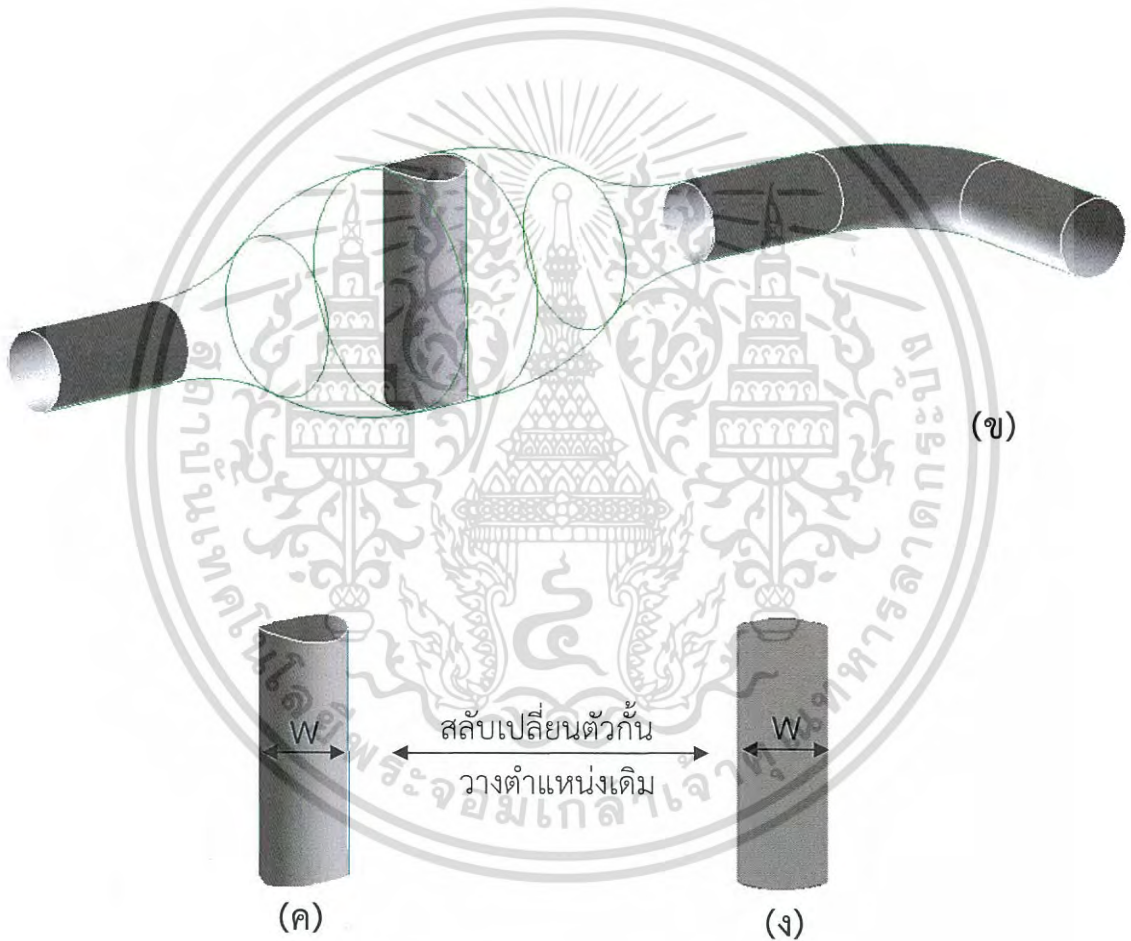
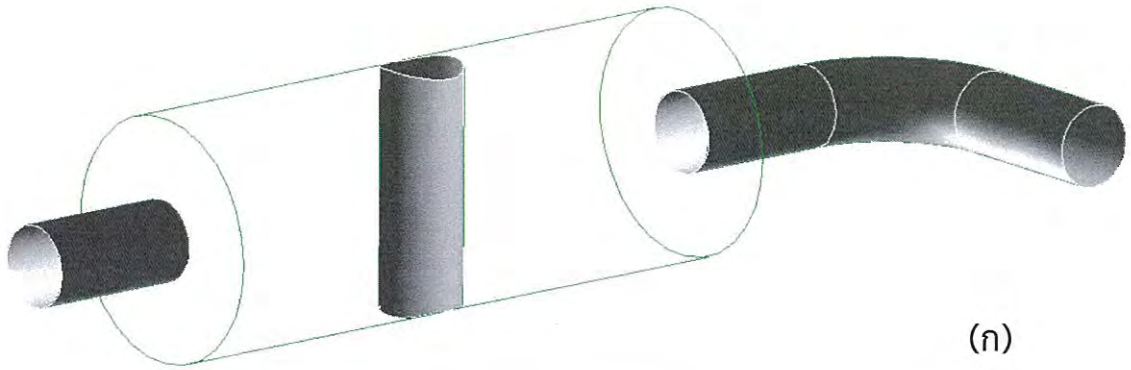
3.3.2 ศึกษาแชมเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^* = 5$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดต่อ 2 แบบดังนี้แบบที่ 1 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน และแบบที่ 2 การค่อยๆเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด โดยทั้ง 2 แบบนี้ได้มีการติดตั้งตัวกั้นอนุภาคซึ่งถูกวางอยู่ตำแหน่งตรงกลางภายในแชมเบอร์ที่เป็นวัสดุเดียวกับผนังท่อโดยมีอัตราส่วนความยาวท่อเท่าเดิมซึ่งลักษณะของตัวกั้นที่ศึกษามี 2 แบบคือแบบที่ 1 ตัวกั้นรูปสี่เหลี่ยมมีความกว้าง (W) เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า (D_1) และแบบที่ 2 ตัวกั้นรูปทรงกระบอกมีความกว้าง (W) เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า (D_1) เช่นกัน เพื่อศึกษาผลการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาของแชมเบอร์ดังกล่าว ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.3

3. ศึกษาแชมเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 2, 3, 4, 5$ และ 6 โดยใช้แชมเบอร์แบบค่อยๆมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดและตัวกั้นอนุภาคภายในแชมเบอร์ติดตั้งเป็นแบบทรงกระบอกโดยมีอัตราส่วนความยาวท่อเท่าเดิมเหมือนในรูปที่ 3.1 เพื่อศึกษาผลการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาของแชมเบอร์ โดยแบบจำลองของแชมเบอร์มีลักษณะดังรูปที่ 3.3ข



รูปที่ 3.2 แชมเบอร์เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะของแชนเบอร์และตัวกันที่ศึกษา (ก) แชนเบอร์เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน (ข) แชนเบอร์ค่อยๆเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด (ค) ตัวกันทรงกระบอก (ง) ตัวกันแผ่นสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1 การศึกษาหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

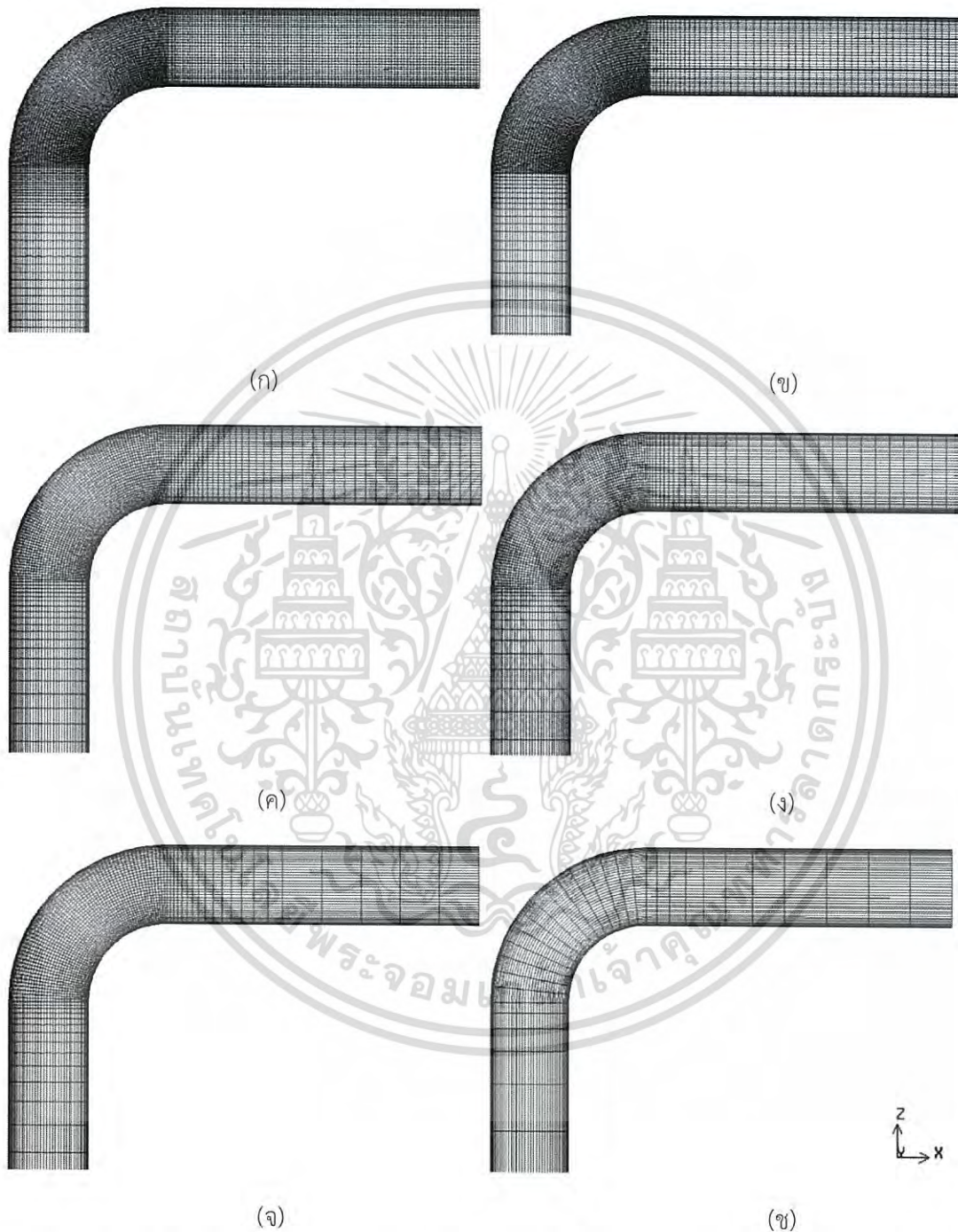
ในการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบคงตัวของท่อจะใช้โปรแกรม FLUENT ในการทำนายผลการจำลองซึ่งขั้นต้นจะต้องหากกริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบก่อน (Grid independent) โดยทำการตีกริดจำนวนต่างๆในท่อ แล้วนำไปจำลองการไหลในโปรแกรมโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณค่าของความดันกับโมเมนต์เป็นแบบ second order upwind และวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณค่าของความปั่นป่วนเป็นแบบ second order upwind เช่นกันโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน standard k-epsilon แบบจำลองอ้างอิงตามงานวิจัยของ Carlos และคณะ [16] โดยใช้จำนวนกริด 6 ขนาดได้แก่ 112,455 321,930 485,100 661,500 970,200 และ 1,660,365 เซลล์ รูปแบบของกริดเป็นดังรูปที่ 4.1

ในการจำลองการไหลได้กำหนดให้ท่อวางตามแนวแกน z ดังนั้นของไหลจึงไหลตามแนวแกน z เช่นกัน โดยรูปแบบการไหลจะมีการกระจายตัวของความเร็วซึ่งความเร็วที่ผนังมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากผนังถูกกำหนดให้เป็นภาวะแบบไม่ลื่นไหล (No-slip condition) และเกิดการถ่ายโอนโมเมนต์ระหว่างชั้นของไหลตลอดทั้งหน้าตัดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการไหลตลอดการเคลื่อนที่ตามแนวแกน z [14] จากหลักการดังกล่าวนี้จึงได้วัดความเร็วที่กึ่งกลางท่อตรงตามแนวแกน z ตั้งแต่ทางเข้าท่อจนถึงปลายท่อตรงก่อนถึงท่อข้องอ 90 องศาเพื่อศึกษาผลของจำนวนกริด พบว่าเมื่อจำนวนกริดตั้งแต่ 321,930 เซลล์ขึ้นไปผลของจำนวนกริดที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามระยะแนวแกน z ดังรูปที่ 4.2 และเมื่อมีปริมาณกริดที่มากขึ้นจะใช้เวลาในการคำนวณผลมากขึ้นด้วย ดังนั้นการเลือกกริดเริ่มต้นที่ 321,930 เซลล์จึงเหมาะสมนำมาจำลองและประยุกต์ใช้กับส่วนอื่นๆในงานวิจัยต่อไป

4.2 การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีผลต่อการสีกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอ้างอิง

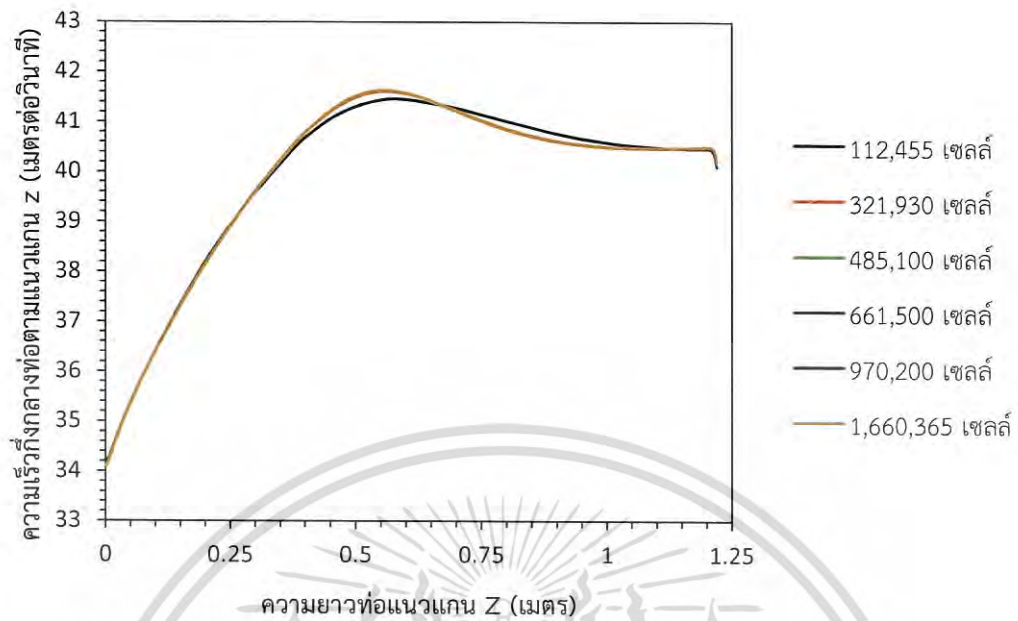
การจำลองการสีกกร่อนโดยอากาศเป็นตัวพาอนุภาคของแข็งนั้นในงานวิจัยนี้มีการดำเนินงานภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ 59,295 ซึ่งจากหลักการของการไหลในท่อตัวเลขเรย์โนลด์นี้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นจึงได้ศึกษาผลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สำหรับคำนวณการไหลเป็นดังต่อไปนี้ 1.แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon 2.แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon 3.แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon เพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมในการทำนายการสีกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศาในการจำลองการสีกกร่อนจะอ้างอิงกับงานวิจัยของ Carlos และคณะ [16] โดยใช้จำนวนกริด 321,930 เซลล์ สำหรับการวิเคราะห์ผลการจำลองจะใช้คอนทัวร์ของ

การสีกร่อนและตำแหน่งการเกิดการสีกร่อนของแต่ละองศามาใช้เพื่อเป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน



รูปที่ 4.1 แบบจำลองท่อข้องอ 90 องศาที่จำนวนกริดต่างๆ (ก) 1,660,365 เซลล์ (ข) 970,200 เซลล์ (ค) 661,500 เซลล์ (ง) 485,100 เซลล์ (จ) 321,930 เซลล์ (ช) 112,455 เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความเร็วกึ่งกลางท่อตามแนวแกน z ตลอดความยาวของท่อตรงของจำนวนกริตต่างๆ

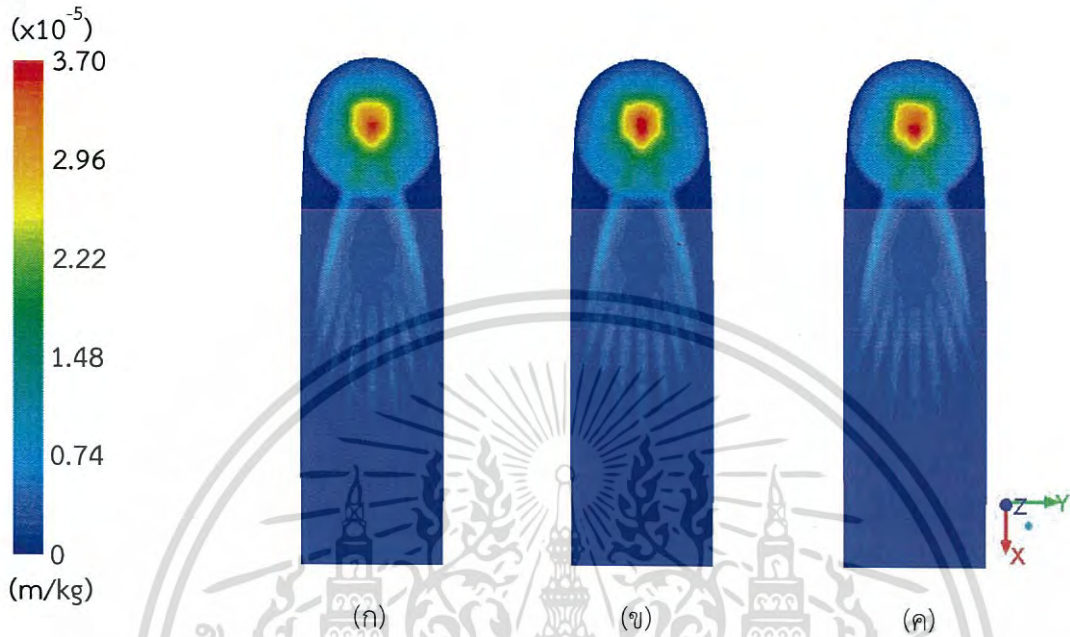
การเปรียบเทียบคอนทอร์ของการสีกกร่อนภายในห้องอ 90 องศาของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วนแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 แบบให้ลักษณะคอนทอร์ที่ใกล้เคียงกันมากโดยในตอนเริ่มต้นอนุภาคเคลื่อนที่พร้อมกับอากาศด้วยความเร็วที่เท่ากันซึ่งระหว่างการเคลื่อนที่นั้นอนุภาคกับอากาศบางส่วนจะมีการแลกเปลี่ยนเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างกันเมื่อเคลื่อนที่มาถึงภายในห้องอ 90 องศาอนุภาคที่ไม่มีเมมตัมสูงจะเข้าชนกับผนังท่อภายในห้องอ 90 องศาด้วยมุมการเข้าชนที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อมุมสะท้อนของอนุภาคด้วยจากเหตุผลนี้ทำให้โมเมนตัมหลังจากการชนของแต่ละอนุภาคมีการสูญเสียไม่เท่ากัน จากคอนทอร์จะเห็นว่าที่กึ่งกลางท่อห้องอ 90 องศาจะเกิดเป็นวงของสีกกร่อน ซึ่งบริเวณที่มีการสีกกร่อนน้อยสุดคือสีน้ำเงินไปจนถึงบริเวณการสีกกร่อนสูงสุดคือสีแดง เมื่อพิจารณาบริเวณที่มีการสีกกร่อนสูงสุดพบว่าสามารถแบ่งการชนของอนุภาคได้เป็น 2 ลักษณะคือ

4.2.1 อนุภาคมีการเคลื่อนที่มาชนกับผนังห้องอที่ตำแหน่งการเกิดการสีกกร่อนสูงสุดโดยตรงด้วยโมเมนตัมที่สูงจากนั้นอนุภาคก็กระดอนออกไปด้วยโมเมนตัมที่ลดลง

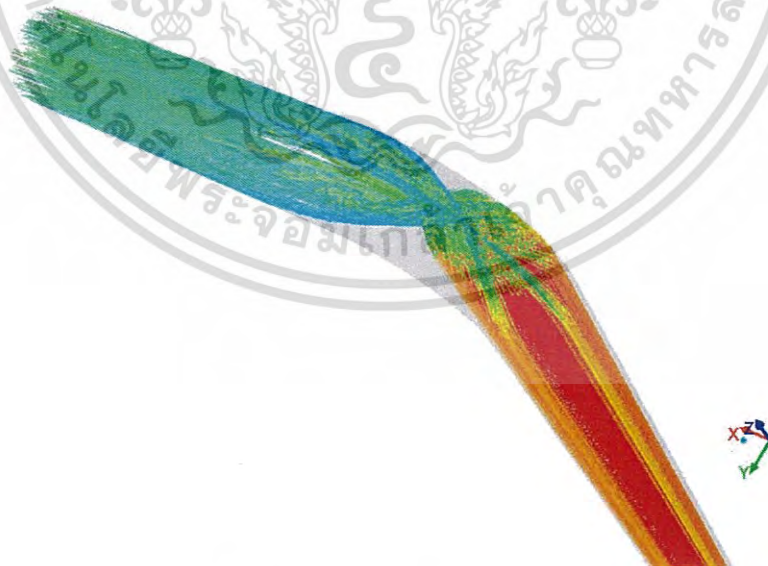
4.2.2 อนุภาคชนกับผนังท่อห้องอตำแหน่งอื่นด้วยมุมการชนที่สามารถทำให้อนุภาคกระดอนไปยังจุดที่เกิดการสีกกร่อนสูงสุดด้วยโมเมนตัมที่ลดลงจากการชนผนังท่อครั้งแรก

ลักษณะการชนของทั้ง 2 กรณีนี้ถ้ายังมีกรชนของอนุภาคซ้ำๆก็ยังมีโอกาสทำให้เกิดการสีกกร่อนมากขึ้นแล้วส่วนใหญ่อนุภาคจะกระดอนไปบริเวณกึ่งกลางท่อทำให้บริเวณกลางท่อห้องอ 90 องศามีโอกาสสีกกร่อนจากอนุภาคมากที่สุดแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังรูปที่ 4.4 จากงานวิจัยที่อ้างอิงซึ่งได้ให้ความสำคัญของการวัดการสีกกร่อนภายในห้องอ 90 องศาตำแหน่งกึ่งกลางท่อของระนาบ $y=0$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของท่อที่เกิดการสีกกร่อนสูงสุดดังนั้นการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการสีกกร่อนโดยใช้

แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 แบบเปรียบเทียบกับผลการทดลองและการจำลองโดยใช้แบบจำลองทำนายการสีกกร้อนของ Oka และคณะ [11] เป็นดังรูปที่ 4.5

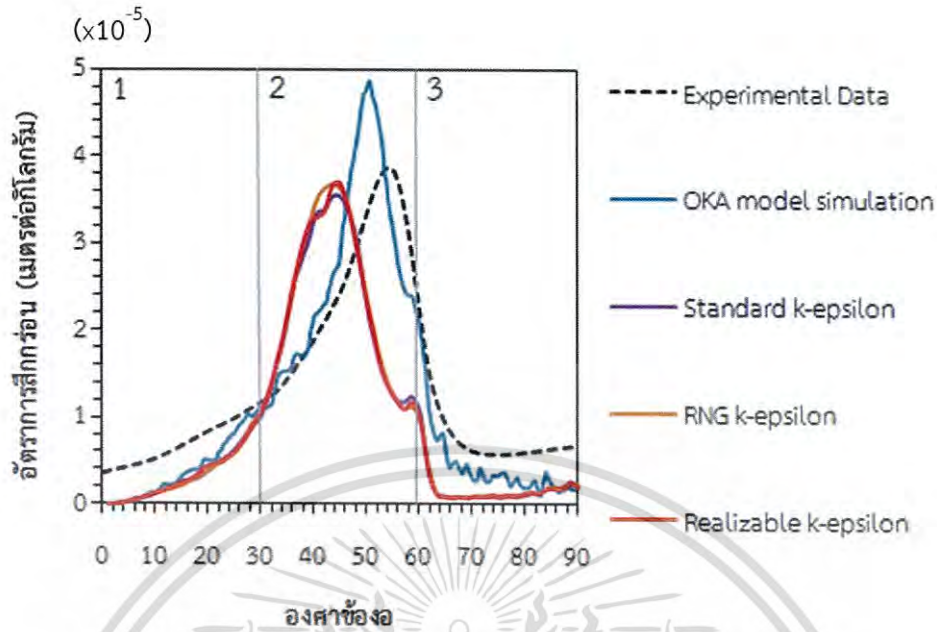


รูปที่ 4.3 คอนทัวร์การสีกกร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วนต่างๆ (ก) Standard k-epsilon (ข) RNG k-epsilon (ค) Realizable k-epsilon



รูปที่ 4.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสีกกร่อนกับองศาช่อง

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ช่วงที่ 1 บริเวณ 0-30 องศา ช่วงที่ 2 บริเวณ 30-60 องศา และช่วงที่ 3 บริเวณ 60-90 องศา ดังรูปที่ 4.5 ในช่วงที่ 1 จะเห็นว่าผลการทดลองมีค่าของการสีกกร่อนเริ่มต้นที่ตำแหน่ง 0 องศา แต่แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ FLUENT กับ Oka และคณะ [11] ไม่มีค่าเริ่มต้นของการสีกกร่อนอันเนื่องมาจากแบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนมีพจน์ของ $\sin(\theta)$ ทำให้การทำนายตอนเริ่มต้นมีค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์จึงทำให้ต่ำกว่าค่าการทดลองแต่ในช่วงนี้แบบจำลองของ FLUENT กับ Oka และคณะ ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับผลการทดลอง ในช่วงที่ 2 แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ FLUENT กับ Oka และคณะ [11] ให้ผลการจำลองที่แตกต่างกันดังตารางที่ 4.1 จากตารางพบว่าแบบจำลอง Realizable k-epsilon มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำนายการเกิดการสีกกร่อนเนื่องจากให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองน้อยที่สุดและในช่วงที่ 2 นี้แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ Oka และคณะ [11] ให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดแต่ทำนายองศาของการเกิดการสีกกร่อนสูงสุดคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองการสีกกร่อนของ FLUENT และในช่วงที่ 3 แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 5 แบบให้แนวโน้มการสีกกร่อนแบบเดียวกับผลการทดลองแต่แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ Oka และคณะ [11] มีความแม่นยำกว่าแต่ก็เป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากสมการทำนายการสีกกร่อนแปรผันตรงกับความเร็วของอนุภาคที่เข้าชนผนัง ดังนั้นรูปแบบการไหลของของไหลจึงมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคซึ่งในบริเวณท่อช่อง 90 องศาจะเห็นแนวโน้มให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและการแยกไหลโดยแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon มีการปรับแก้สมการคำนวณความหนืดปั่นป่วนที่ให้ความสำคัญกับการหมุนวนและการแยกไหลโดยอาศัยสมการถ่ายโอนได้แก่สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) แต่แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon มีการคำนวณในพจน์ของความหนืดปั่นป่วนที่ละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้นจึงส่งผลให้ทำนายการสีกกร่อนได้แม่นยำที่สุดแต่สมการถ่ายโอนของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ไม่มีการปรับแก้ให้เหมาะสมกับลักษณะการไหลดังกล่าวจึงทำให้ผลการทำนายการสีกกร่อนที่บริเวณช่องจิ่งแม่นยำน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการสีกกร่อนกับผลการทดลองเมื่อใช้การทำนายการสีกกร่อนของ Oka และคณะ [11] กับ FLUENT ของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน

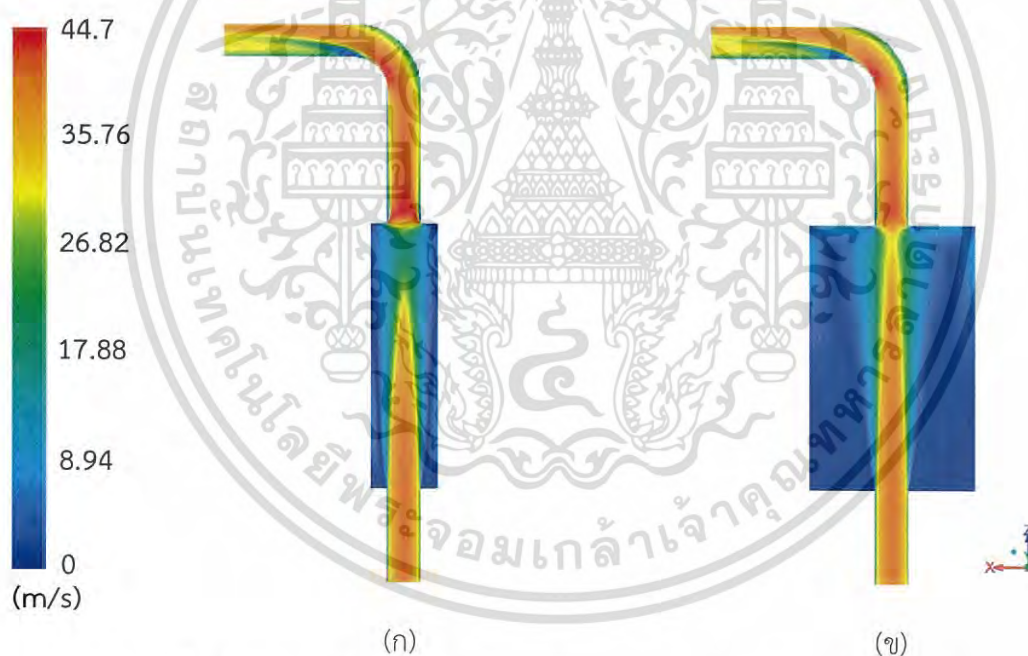
แบบจำลองความปั่นป่วน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่าการสีกกร่อนสูงสุด (%)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนองศาการสีกกร่อนสูงสุด (%)
Standard k-epsilon	8.00	20.83
RNG k-epsilon	4.35	20.83
Realizable k-epsilon	4.00	18.06
Oka และคณะ [11]	26.51	7.95

4.3 การศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ที่เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันต่อการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา

ในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันของแชมเบอร์บริเวณก่อนถึงท่อช่องอ 90 องศาสามารถส่งผลต่อการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาอย่างไร โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า รัศมีความโค้งของท่อช่องอและภาวะการดำเนินงานแบบเดียวกับงานวิจัยของ Carlos และคณะ [16] และการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ที่ได้ศึกษาในตอนต้นซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมนำมาใช้ทำนายการสีกกร่อน โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันที่ศึกษานั้นจะมีความยาวเป็น 2 และ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าโดยมีความยาวของท่อแชมเบอร์เท่ากับ 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า สำหรับการทำนายการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาจะวิเคราะห์โดยใช้ค่าความดันของทุกรูปแบบของคอนทัวร์การสีกกร่อนและเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคซึ่งให้ผลดังต่อไปนี้

สำหรับการไหลในท่อความดันลดที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงซึ่งอิทธิพลที่ส่งผลต่อความดันลดของของไหลภายในท่อของแชมเบอร์ทั้ง 2 กรณีได้แก่แรงเสียดทานของผนังท่อและการแยกไหล (Separation) ซึ่งทำให้เกิดบริเวณที่มีการหมุนวนจึงนำไปสู่การสูญเสียพลังงาน จากอิทธิพลดังกล่าวทำให้เกิดความดันลดแตกต่างกันภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน จากรูปที่ 4.6 แชมเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=2$ โดยภายในแชมเบอร์มีบริเวณที่เกิดการหมุนวนของของไหลภายในแชมเบอร์น้อยกว่าแชมเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=5$ แต่จากตารางที่ 4.2 พบว่าแชมเบอร์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=2$ ให้ความดันตกที่มากกว่าแชมเบอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=5$ แสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่อมีอิทธิพลต่อความดันตกมากกว่าการสูญเสียพลังงานที่ทำให้เกิดการหมุนวนของของไหลและเมื่อพิจารณาคอนทอร์ความดันดังรูปที่ 4.7 พบว่าการไหลผ่านแชมเบอร์ของทั้ง 2 แบบมีความดันของของไหลภายในแชมเบอร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากหลักการของการไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดการไหลด้านทางเข้าที่เล็กกว่าไปยังทางออกที่มีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อของดิฟฟิวเซอร์ แต่ความดันที่เพิ่มขึ้นภายในแชมเบอร์นี้มีแรงต้านการเคลื่อนที่ที่ยังไม่เพียงพอที่จะชะลอการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีโมเมนตัมสูงได้ทำให้อนุภาคยังคงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและพุ่งชนไปยังผนังท่อภายในข้องอ 90 องศาเช่นเดิมดังรูปที่ 4.8 และค่าการสึกกร่อนสูงสุดของแชมเบอร์ทั้ง 2 แบบยังคงสึกกร่อนอยู่ในระดับเดียวกับท่อเดิมก่อนติดตั้งแชมเบอร์ซึ่งลักษณะคอนทอร์ของการสึกกร่อนเป็นดังรูปที่ 4.9 ดังนั้นวิธีที่จะทำให้ภายในข้องอ 90 องศาเกิดการสึกกร่อนลดลงคือโมเมนตัมของอนุภาคก่อนเข้าชนผนังท่อภายในข้องอ 90 องศาต้องลดลงซึ่งต้องอาศัยตัวช่วยทำให้อนุภาคสูญเสียโมเมนตัมบางส่วนจึงนำไปสู่การศึกษาในหัวข้อถัดไป

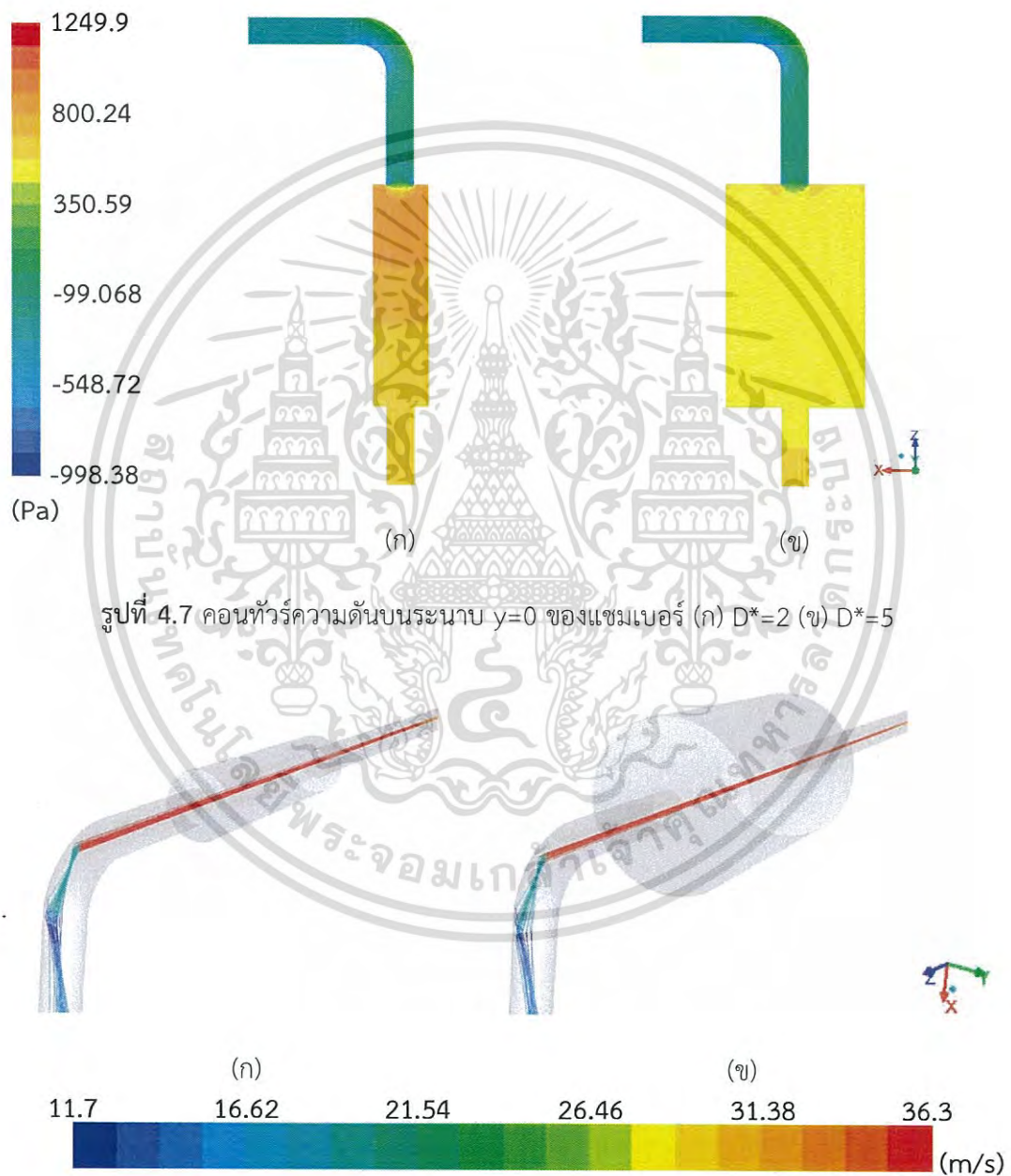


รูปที่ 4.6 คอนทอร์ความเร็วบนระนาบ $y=0$ ของแชมเบอร์ (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

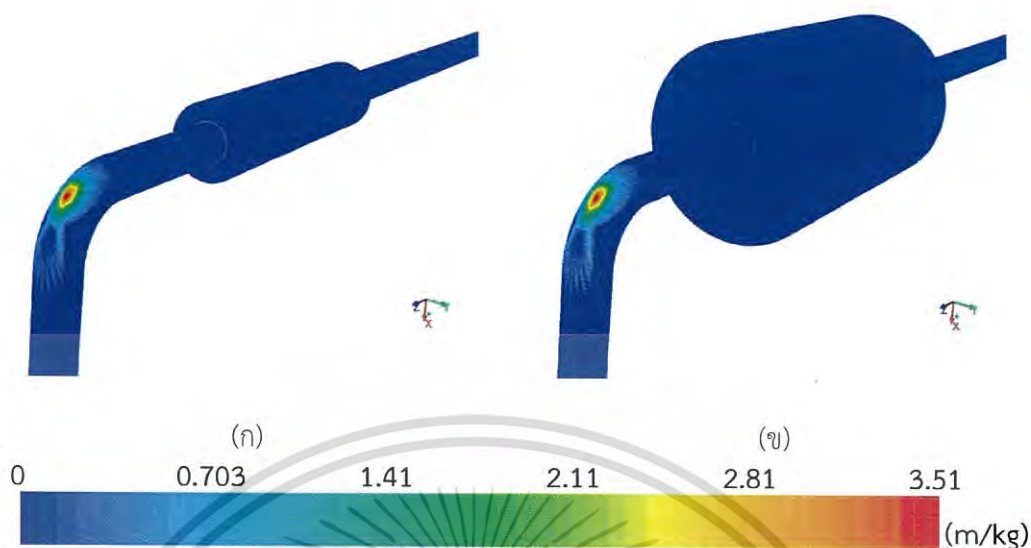
ตารางที่ 4.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ที่มีอิทธิพลต่อความดันลด

จำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า	ความดันลด (ปาสคาล)
2	1,655
5	1,576



รูปที่ 4.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านขนาดแชมเบอร์ที่ต่างกัน (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



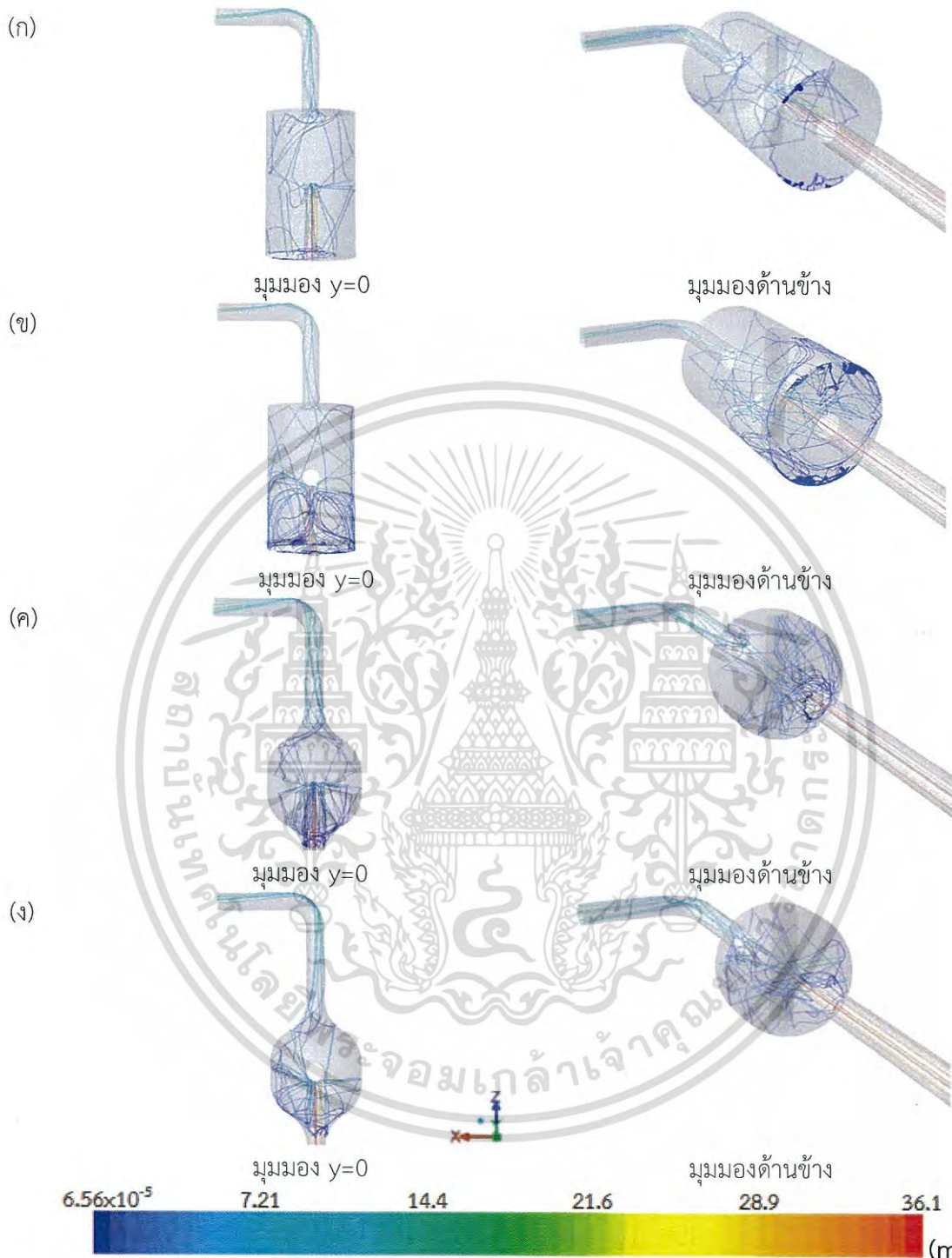
รูปที่ 4.9 คอนทัวร์การสีกกร่อนภายในข้องอ 90 องศาของแชนเบอร์ขนาด D^* ที่ต่างกัน ($\times 10^{-5}$) (ก) $D^*=2$
(ข) $D^*=5$

4.4 การศึกษาอิทธิพลของลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของแชนเบอร์และลักษณะของตัวกั้นภายในแชนเบอร์ต่อการสีกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา

เมื่อคัดเลือกลักษณะของแชนเบอร์ที่ทำให้ความดันสถภายในท่อมี่ค่าน้อยที่สุดคือขนาด $D^*=5$ ดังนั้นจึงนำขนาดของแชนเบอร์นี้มาศึกษาอิทธิพลของพื้นที่หน้าตัด 2 แบบด้วยกันได้แก่ 1.แบบเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน (Sudden expansion) 2.แบบเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ (Gradual expansion) และเพื่อเป็นการลดโมเมนตัมของอนุภาคจึงทำการติดตั้งตัวกั้นซึ่งมี 2 ลักษณะด้วยกันได้แก่ 1.แผ่นสี่เหลี่ยม 2.แผ่นทรงกระบอก ทำให้สามารถแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 4 แบบและเมื่อพิจารณาค่าการสีกกร่อนสูงสุดที่ภายในข้องอ 90 องศาพบว่าการสีกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา มีค่าลดลงต่ำอยู่ในระดับ 10^{-6} ซึ่งน้อยกว่ากรณีของแชนเบอร์ที่ไม่มีการติดตั้งตัวกั้นดังแสดงในตารางที่ 4.3

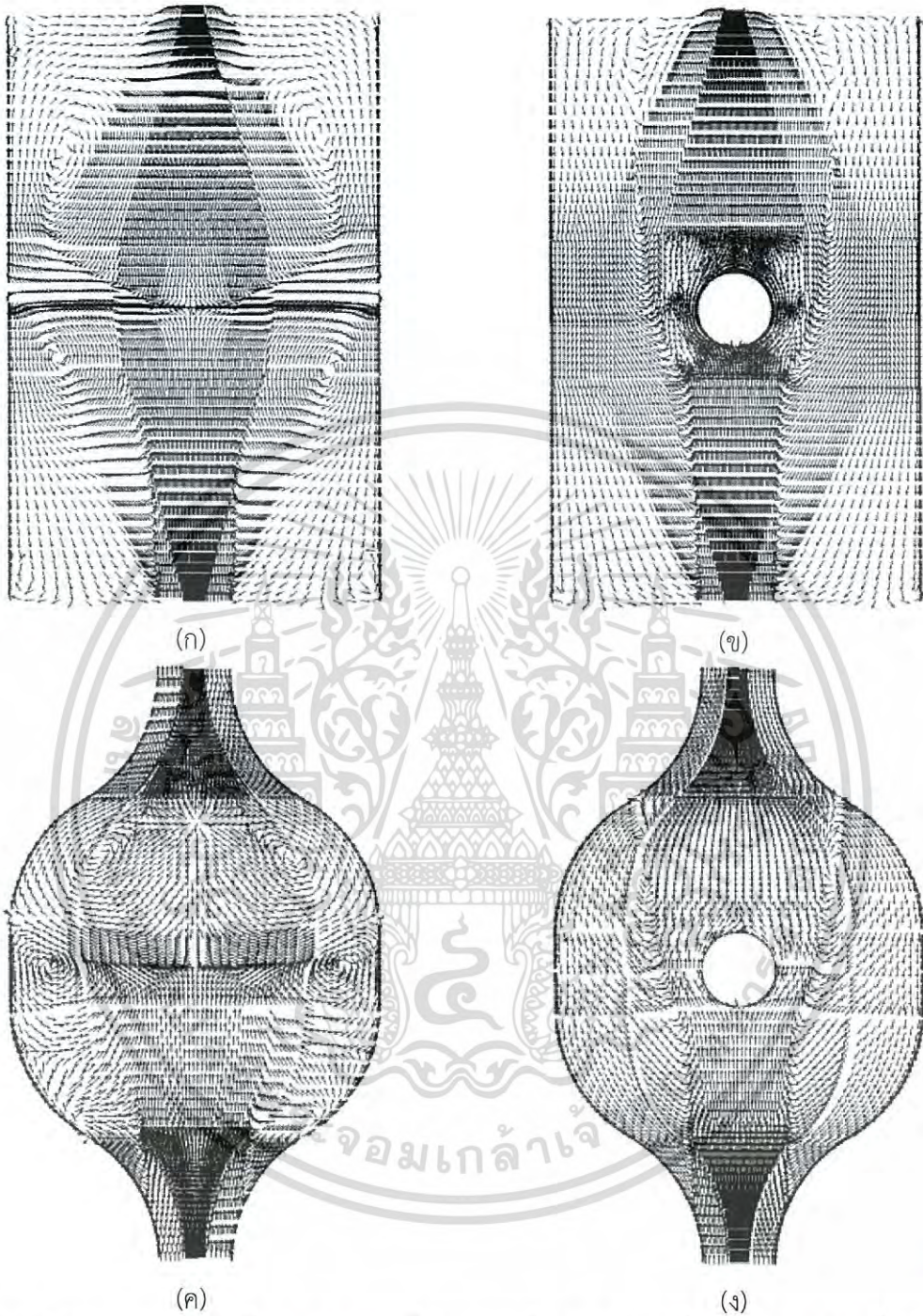
เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในแชนเบอร์จากรูปที่ 4.10 พบว่าในรูปที่ 4.10(ก) และ 4.10(ข) การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในแชนเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันที่มีตัวกั้นทั้ง 2 รูปแบบทำให้อนุภาคเคลื่อนที่วนอยู่ในแชนเบอร์ไม่สามารถออกไปยังปลายทางออกได้เนื่องจากอนุภาคหลังจากชนตัวกั้นและเกิดการสะท้อนไปยังผนังของแชนเบอร์ทำให้ความเร็วของอนุภาคลดลง แต่ลักษณะของผนังแชนเบอร์แบบนี้ไม่มีมุมภายในที่ทำให้อนุภาคเข้ากระทบแล้วเกิดมุมสะท้อนที่สามารถทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปก้ออากาศได้และบริเวณภายในแชนเบอร์นี้เกิดการหมุนวนของอากาศดังเวกเตอร์การไหลของอากาศในรูปที่ 4.11(ก) และ 4.11(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในแชนเนลเบอร์ขนาด $D^*=5$ (ก) พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันชนิดตัวกั้นแผ่นสี่เหลี่ยม (ข) พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันชนิดตัวกั้นทรงกระบอก (ค) พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆชนิดตัวกั้นแผ่นสี่เหลี่ยม (ง) พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆชนิดตัวกั้นทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศภายในแชนเนลเบอร์ขนาด $D^*=5$ ที่ระนาบ $y=0$ (ก) พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันชนิดตัวกันแผ่นสี่เหลี่ยม (ข) พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันชนิดตัวกันทรงกระบอก (ค) พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆชนิดตัวกันแผ่นสี่เหลี่ยม (ง) พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆชนิดตัวกันทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งส่งผลให้อนุภาคนั้นเคลื่อนที่วนไปพร้อมกับการหมุนวนของอากาศด้วยอีกทั้งการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันส่งผลให้เกิดความดันภายในแชนเบอร์มีค่าสูงทำให้อนุภาคยังมีการเคลื่อนที่ภายในแชนเบอร์ลำบากมากขึ้นซึ่งมีเพียงอนุภาคบางส่วนเท่านั้นที่กระทบกับผนังแชนเบอร์ด้วยมุมที่เหมาะสมและสามารถเคลื่อนที่หลุดออกจากการหมุนวนของอากาศที่เกิดขึ้นภายในแชนเบอร์ได้จึงทำให้ผลของการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา มีค่าน้อยกว่าในกรณีของแชนเบอร์แบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆดังในตารางที่ 4.3

ในทางกลับกันแชนเบอร์แบบพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆที่มีตัวกั้นภายในทั้ง 2 แบบ ส่งผลทำให้ความดันภายในแชนเบอร์มีค่าสูงเช่นเดียวกันตามหลักการของ Bernoulli และการไหลผ่านวัตถุจมเมื่ออนุภาคที่เคลื่อนที่เข้ามาภายในแชนเบอร์จึงถูกลดโมเมนตัมหลังการชนกับตัวกั้นและความดันภายในแชนเบอร์ที่สูงยังต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วย แต่อนุภาคก็ยังเคลื่อนที่ไปยังทางออกได้สะดวกกว่าแชนเบอร์แบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันเนื่องจากอนุภาคหลังจากเข้าชนกับตัวกั้นแล้วอนุภาคจะสะท้อนเข้าชนกับผนังแชนเบอร์ซึ่งมีมุมภายในผนังที่เหมาะสมทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่พร้อมกับอากาศไปยังทางออกได้จึงไม่เกิดการตกค้างภายในแชนเบอร์ดังในรูปที่ 4.10(ค)และ 4.10(ง) ถึงแม้จะมีการหมุนวนของอากาศภายในแชนเบอร์ก็ตามดังรูปที่ 4.11(ค) และ 4.11(ง) จึงส่งผลให้การสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา สูงกว่ากรณีของแชนเบอร์แบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาถึงความดันลดของท่อก่อนติดแชนเบอร์ ($D^*=1$) และหลังติดแชนเบอร์ ($D^*=5$) พบว่าความดันลดที่มีการติดแชนเบอร์มีค่ามากกว่าเนื่องจากเกิดการหมุนวนของอากาศภายในแชนเบอร์ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเวกเตอร์การไหลของอากาศภายในแชนเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันในรูปที่ 4.11(ก) และ 4.11(ข) มีการหมุนวนของอากาศภายในแชนเบอร์มากกว่าแชนเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆแสดงในรูปที่ 4.11(ค) และ 4.11(ง) ทำให้มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการหมุนวนของอากาศมากกว่าแชนเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆส่งผลให้เกิดความดันลดมากกว่าและชนิดของตัวกั้นที่ติดตั้งภายในแชนเบอร์ก็มีอิทธิพลต่อความดันลดเช่นเดียวกันโดยตัวกั้นทรงกระบอกนั้นจะให้ความดันลดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวกั้นสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นไปตามหลักการของการไหลผ่านวัตถุจมที่กล่าวไปแล้วในทฤษฎีหัวข้อ 2.7

ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวไปในข้างต้นสามารถพิจารณาความเหมาะสมของแชนเบอร์ทั้ง 4 แบบทำให้ตัดสินใจเลือกรูปแบบแชนเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆที่ภายในมีตัวกั้นทรงกระบอกเนื่องจากให้ความดันลดภายในท่อน้อยที่สุดและอนุภาคเคลื่อนที่ไปยังทางออกได้สะดวก

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการสีกกร่อนหลังติดตัวกันแต่ละชนิดภายในแต่ละประเภทของแชมเบอร์
ขนาด $D^*=5$

D*	ประเภทแชมเบอร์	ชนิดตัวกัน	ความดันลด (ปาสคาล)	ค่าการสีกกร่อน (เมตรต่อกิโลกรัม)	
				บริเวณตัวกัน	ภายในห้องอ 90 องศา
5	gradual	ทรงกระบอก	1,681	6.59×10^{-5}	4.48×10^{-6}
		สี่เหลี่ยม	1,700	6.41×10^{-5}	4.51×10^{-6}
	sudden	ทรงกระบอก	2,354	7.38×10^{-5}	1.96×10^{-6}
		สี่เหลี่ยม	2,373	6.76×10^{-5}	2.75×10^{-6}
1	-	-	1,171	-	3.60×10^{-5}

4.5 การศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆต่อการสีกกร่อนภายในห้องอ 90 องศา

เมื่อคัดเลือกลักษณะของแชมเบอร์และตัวกันที่เหมาะสมแล้วได้รูปแบบดังต่อไปนี้คือ พื้นที่หน้าตัดของแชมเบอร์ที่ทางเข้าและทางออกเป็นแบบค่อยๆเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดและตัวกันอนุภาคเป็นแบบทรงกระบอกจากนั้นนำแชมเบอร์และตัวกันลักษณะดังกล่าวมาศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้แก่ $D^*=2, 3, 4, 5$ และ 6 เพื่อที่จะศึกษาการสีกกร่อนภายในห้องอ 90 องศาแสดงดังรูปที่ 4.12 สำหรับภาวะการดำเนินงานและสมการการคำนวณนั้นจะใช้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.3 และการทำนายการสีกกร่อนจะวิเคราะห์โดยใช้ค่าความดันของท่อ รูปแบบของคอนทัวร์การสีกกร่อน ค่าการสีกกร่อนและเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคซึ่งให้ผลดังต่อไปนี้

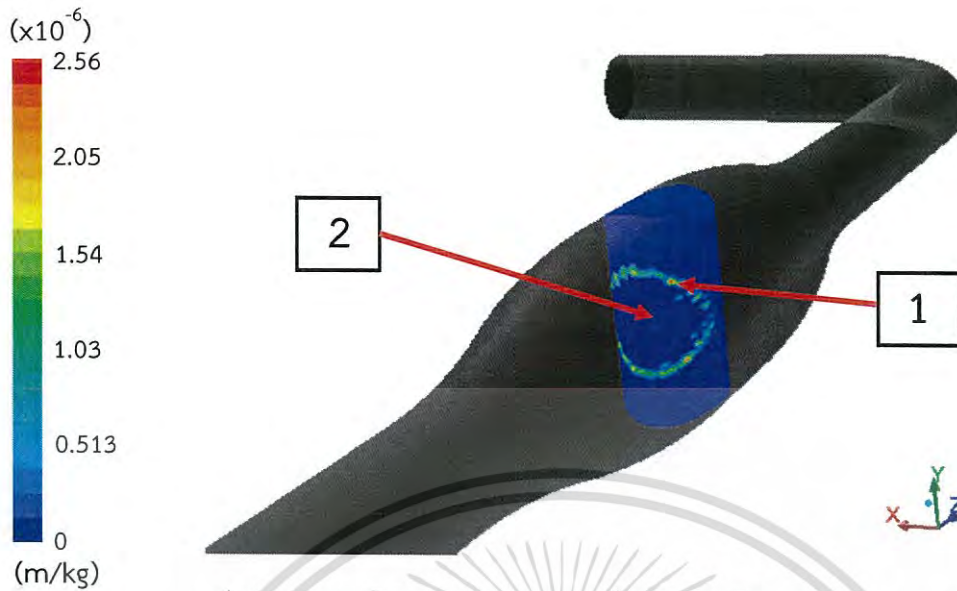
ในขั้นแรกได้ศึกษาแชมเบอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=2$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์การสีกกร่อนของตัวกันดังรูปที่ 4.13 พบว่าลักษณะคอนทัวร์ที่เกิดขึ้นบนตัวกันนี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะได้แก่บริเวณสีฟ้าอ่อนโซนที่ 1 เป็นบริเวณที่มีการสีกกร่อนเนื่องจากการชนของอนุภาคแล้วสะท้อนไปยังผนังท่อซึ่งอนุภาคจะสูญเสียโมเมนตัมทุกครั้งที่มีการชนกับผนังจึงทำให้อากาศสามารถพาอนุภาคเคลื่อนที่ไปยังปลายท่อทางออกได้ตามการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.14 และบริเวณตรงกลางสีน้ำเงินโซนที่ 2 ถึงแม้จะมีการชนของอนุภาคบริเวณนี้ก็ตามแต่ผลคอนทัวร์เป็นสีน้ำเงินซึ่งเป็นผลมาจากโปรแกรมจะแสดงผลการสีกกร่อนก็ต่อเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปยังปลายทางออกของท่อ จากผลการจำลองแสดงว่าเมื่ออนุภาคชนกับตัวกันบริเวณนี้ส่งผลให้อนุภาคสะท้อนออกจากตัวกันไปยังผนังท่อแล้วสะท้อนออกจากผนังท่อด้วยมุมสะท้อนที่ก่อให้เกิดอนุภาคตกค้างในท่อจึงปรากฏลักษณะคอนทัวร์ดังกล่าว จากการจำลองนี้จะเห็นว่ามุมการเข้าชนและมุมสะท้อนบนตัวกันและผนังท่อของแชมเบอร์จะต้องเป็นมุมการเข้าชนที่ทำให้เกิดมุมสะท้อนที่เหมาะสมกัน ดังนั้นแชมเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

$D^*=2$ จึงไม่เหมาะสมกับตัวกั้นชนิดทรงกระบอกซึ่งทำให้อนุภาคยังคงค้างอยู่ในระบบท่อและส่งผลเสียต่อการขนส่งอนุภาคเนื่องจากจะทำให้ขนส่งอนุภาคไปยังปลายทางลำบากจึงไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งาน

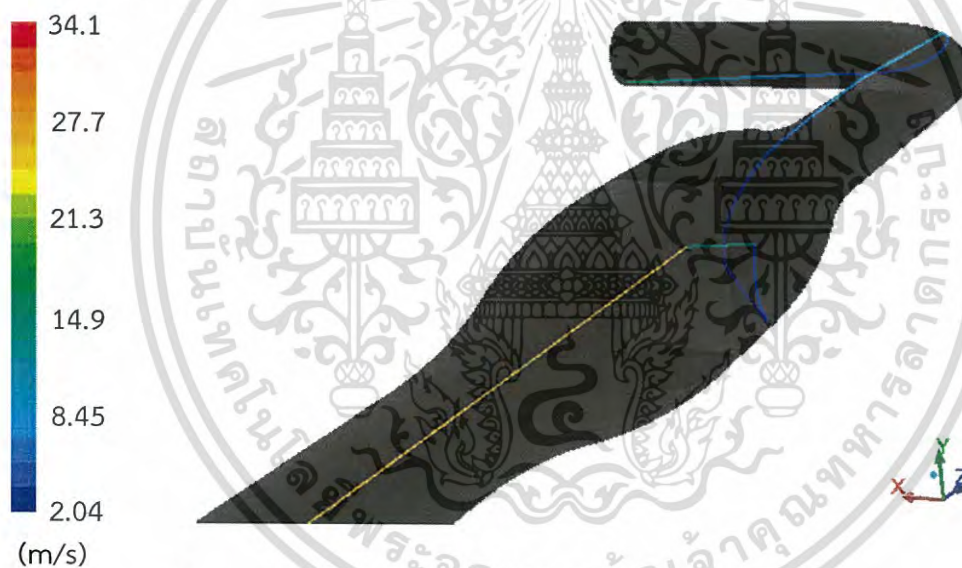


รูปที่ 4.12 รูปทรงของแฉกเบอร์ขนาด D^* ต่างๆ (ก) $D^*=2$ (ข) $D^*=3$ (ค) $D^*=4$ (ง) $D^*=5$ (จ) $D^*=6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



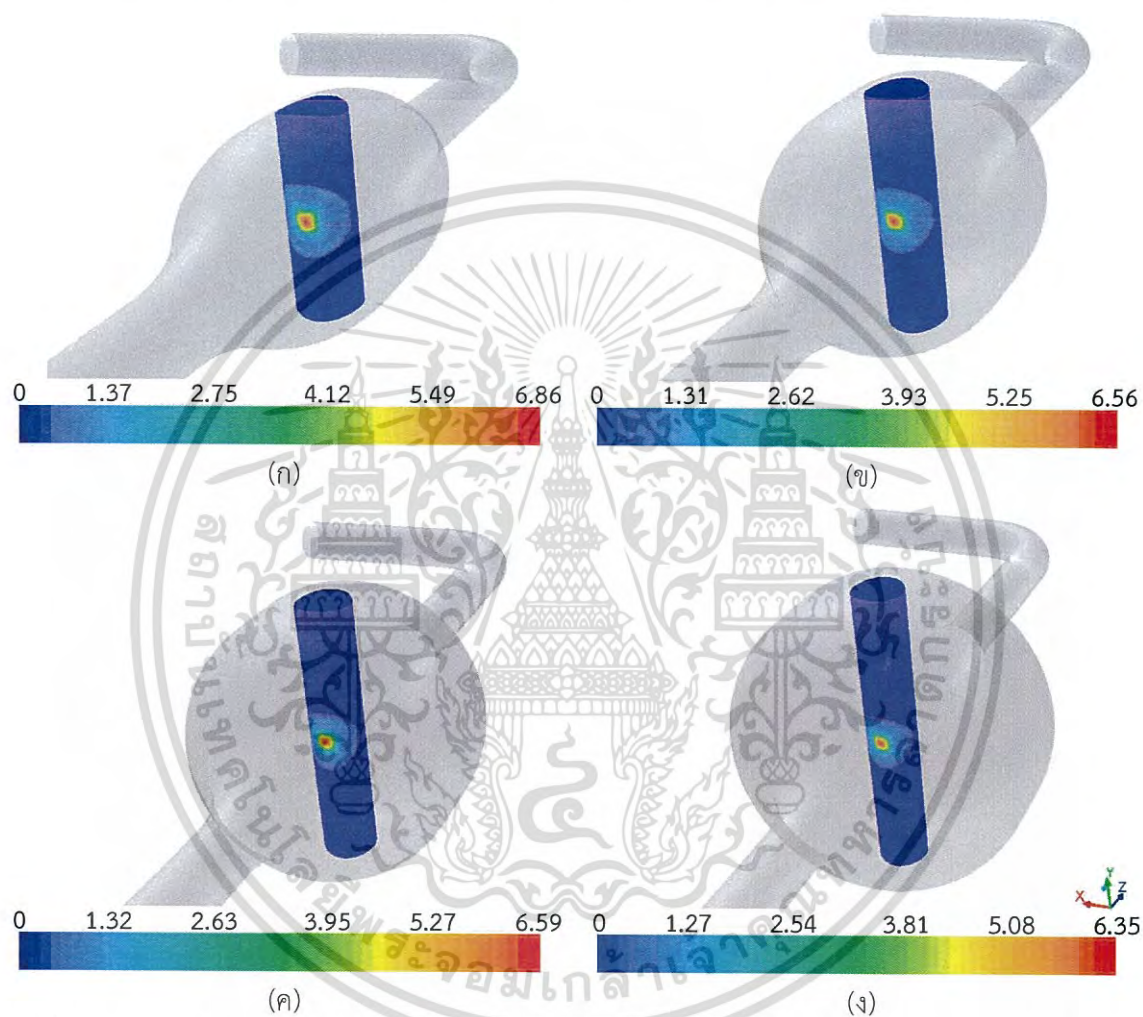
รูปที่ 4.13 คอนทัวร์การสีกกร่อนบนตัวกั้นภายในแชมเบอร์ขนาด $D^*=2$



รูปที่ 4.14 เส้นทางการเคลื่อนของอนุภาคผ่านตัวกั้นภายในแชมเบอร์ขนาด $D^*=2$

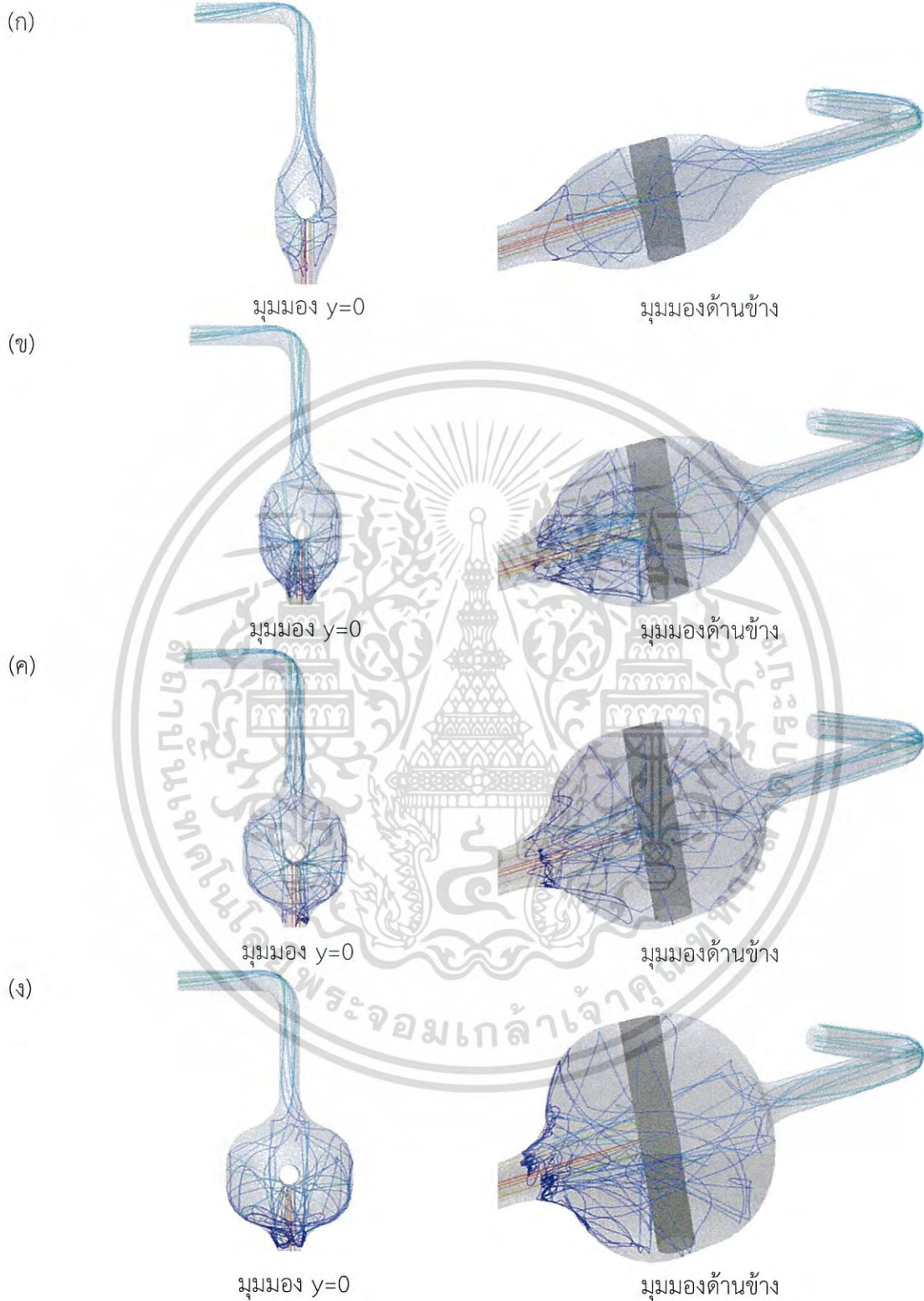
สำหรับกรณีของแชมเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=3, 4, 5$ และ 6 เมื่อเปรียบเทียบคอนทัวร์ของตัวกั้นภายในแชมเบอร์แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าแชมเบอร์ทั้ง 4 แบบมีค่าการสีกกร่อนสูงสุดอยู่ในระดับ 6.35 ถึง 6.86×10^{-5} เมตรต่อกิโลกรัม เกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางของตัวกั้นด้วย ซึ่งแตกต่างจากกรณีของแชมเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=2$ แสดงว่าอนุภาคเคลื่อนที่มาชนกับตัวกั้นแล้วสะท้อนออกไปชนด้วยมุมการเข้าชนที่เหมาะสมกับผนังภายในแชมเบอร์แล้วสามารถเคลื่อนที่ไปยังปลายทางออกด้วยการพาของอากาศเมื่อพิจารณาค่าการสีกกร่อนบนตัวกั้นของแชมเบอร์ทั้ง 4 แบบนี้ พบว่าค่าการสีก

กร่อนภายในช่องอ 90 องศา ก่อนการติดตั้งแฮมเบอร์มีค่าการสึกกร่อนอยู่ในระดับเดียวกับค่าการสึกกร่อนบนตัวกั้นภายในแฮมเบอร์และตัวกั้นนี้จะทำหน้าที่ช่วยลดโมเมนต์ของอนุภาคลงได้ในระดับหนึ่งซึ่งเมื่อพิจารณาความเร็วของอนุภาคภายในแฮมเบอร์ทั้ง 4 แบบนี้ในรูปที่ 4.16(ก)-(ง) พบว่าความเร็วมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบบริเวณเดียวกับท่อที่ไม่มีแฮมเบอร์ ($D^*=1$) แสดงดังรูปที่ 4.16(จ)

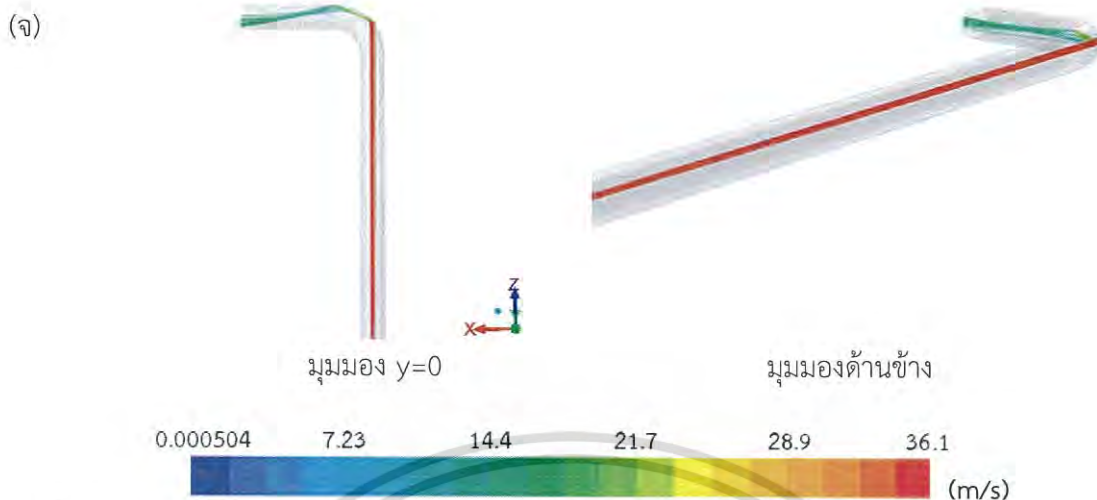


รูปที่ 4.15 คอนทัวร์การสึกกร่อนบนตัวกั้นภายในแฮมเบอร์ ($\times 10^{-5}$ เมตรต่อกิโลกรัม) (ก) $D^*=3$ (ข) $D^*=4$ (ค) $D^*=5$ (ง) $D^*=6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



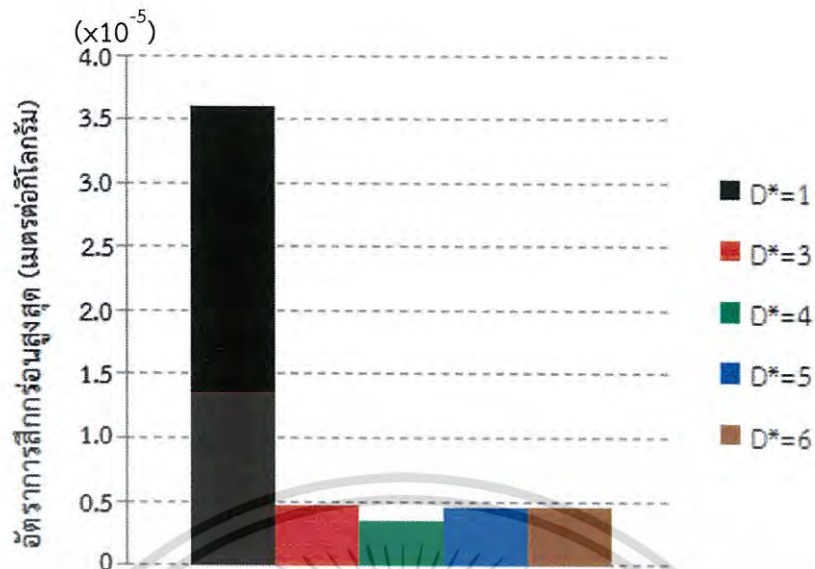
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



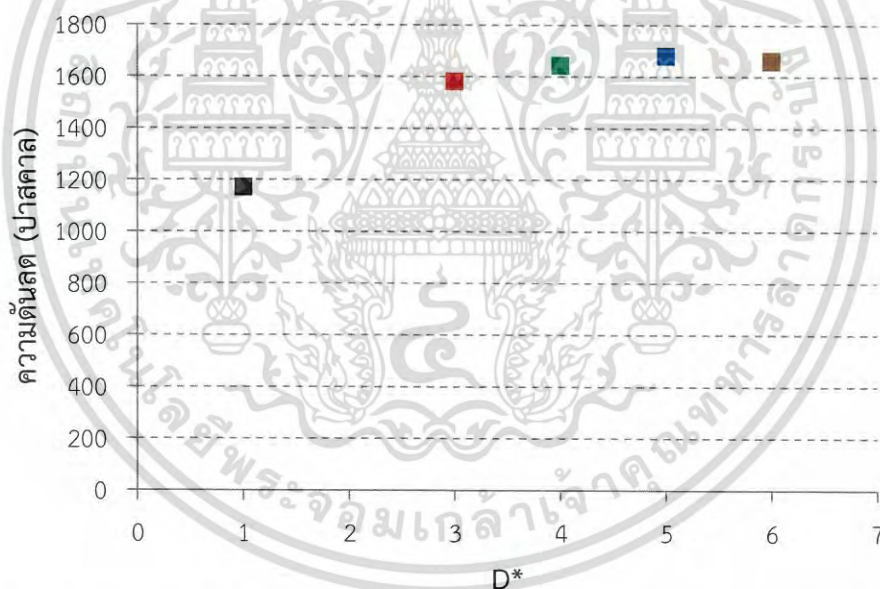
รูปที่ 4.16 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในแชมเบอร์ (ก) $D^*=3$ (ข) $D^*=4$ (ค) $D^*=5$ (ง) $D^*=6$ (จ) $D^*=1$

เมื่อพิจารณาค่าสักร้อนสูงสุดภายในช่อง 90 องศาของท่อเดิม ($D^*=1$) และท่อที่ติดตัวกันภายในแชมเบอร์ จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่าการสักร้อนสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อมีการติดตัวกันทรงกระบอกภายในแชมเบอร์และจากค่าการสักร้อนสูงสุดนี้ของแต่ละขนาดของแชมเบอร์ พบว่าแชมเบอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=4$ สามารถช่วยลดการสักร้อนภายในช่อง 90 องศาได้มากที่สุดถึง 90.17 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ารูปทรงของแชมเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D^*=4$ เหมาะสมกับตัวกันทรงกระบอกมากที่สุด เนื่องจากทำให้อนุภาคเมื่อชนเข้ากับมุมภายในผนังแชมเบอร์แล้วสามารถทำให้อนุภาคเคลื่อนไปยังทางออกได้ทั้งหมดและช่วยลดการสักร้อนภายในช่อง 90 องศาได้มากที่สุดซึ่งเมื่อพิจารณาค่าการสักร้อนสูงสุดของแชมเบอร์ขนาด $D^*=3, 5$ และ 6 สามารถลดการสักร้อนภายในช่อง 90 องศาได้ถึง 87.05, 87.55 และ 87.25 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากเปอร์เซ็นต์ในการลดการสักร้อนภายในช่อง 90 องศาของแชมเบอร์ทั้ง 4 แบบนี้ในทางวิศวกรรมถือว่ามี การลดการสักร้อนอยู่ในระดับเดียวกัน

เมื่อพิจารณาค่าความดันลดของท่อเดิม ($D^*=1$) และท่อที่ติดตัวกันภายในแชมเบอร์จากรูปที่ 4.18 ในส่วนของของไหลแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์และการวางตัวกันทรงกระบอกนั้นมีผลต่อความดันลดภายในท่อ เนื่องจากในตอนแรกของไหลไหลเข้ามาในแชมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเล็กไปสู่พื้นที่หน้าตัดใหญ่โดยมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆทำให้ความดันภายในแชมเบอร์ก่อนถึงตัวกันทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความเร็วของของไหลจะลดลงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ตามหลักการของ Bernoulli และยังมีพื้นที่ตัดใหญ่ขึ้นทำให้ความดันด้านหลังแชมเบอร์มากยิ่งขึ้นไปอีกตามหลักการที่ได้กล่าวไปในทฤษฎีของการไหลผ่านวัตถุ จากนั้นของไหลจะไหลออกจากแชมเบอร์โดยผ่านพื้นที่หน้าตัดใหญ่ไปสู่พื้นที่หน้าตัดเล็กซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆเช่นกันทำให้ความดันของของไหลมีค่าลดลงส่งผลให้ของไหลมีพลังงานจลน์มากขึ้น



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบอัตราการสักร้อนสูงสุดในห้อง 90 องศา ก่อนและหลังมีตัวกั้นภายในแชมเบอร์ขนาด D* ต่างๆ



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความดันลดของท่อ ก่อนและหลังมีตัวกั้นภายในแชมเบอร์ขนาด D* ต่างๆ

เมื่อถึงทางออกของแชมเบอร์และถ้ายังมีการไหลจากพื้นที่หน้าตัดใหญ่มากขึ้นไปสู่พื้นที่หน้าตัดเล็กก็ยิ่งทำให้มีการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นอีกเนื่องจากการหมุนวนภายในแชมเบอร์มากขึ้นดังในรูปที่ 4.19 ดังนั้นจึงทำให้แชมเบอร์ D*=3 มีความดันลดน้อยที่สุดเนื่องจากการหมุนวนภายในแชมเบอร์น้อยที่สุด ซึ่งต่างจากกรณีของท่อเดิมก่อนติดตั้งแชมเบอร์ (D*=1) ที่ให้ความดันลดมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับท่อ

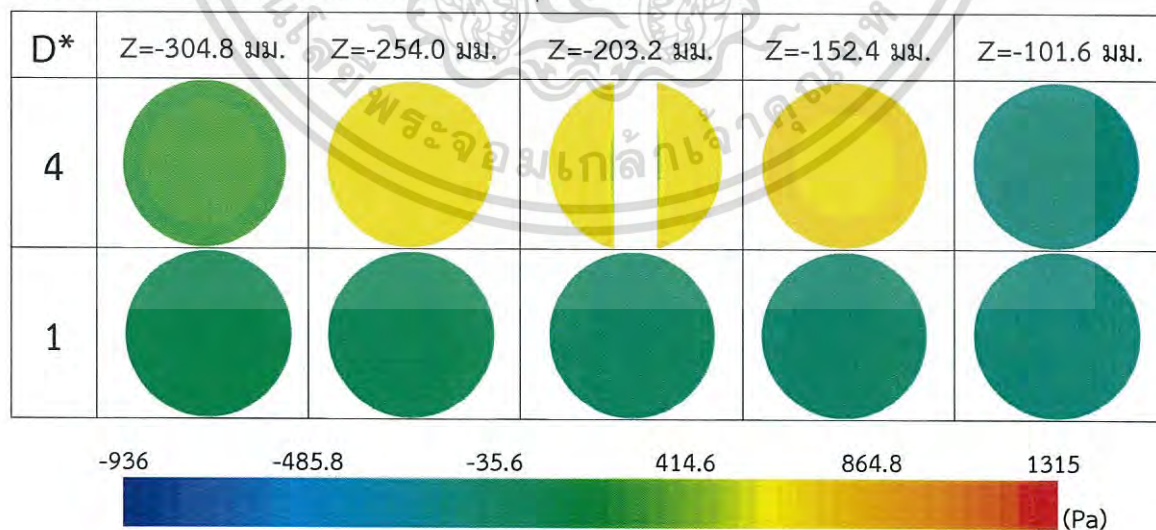
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีการติดตั้งแอมเบอร์เนื่องจากมีเพียงแค่การสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังเท่านั้นซึ่งไม่มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการหมุนวนดังในรูปที่ 4.20

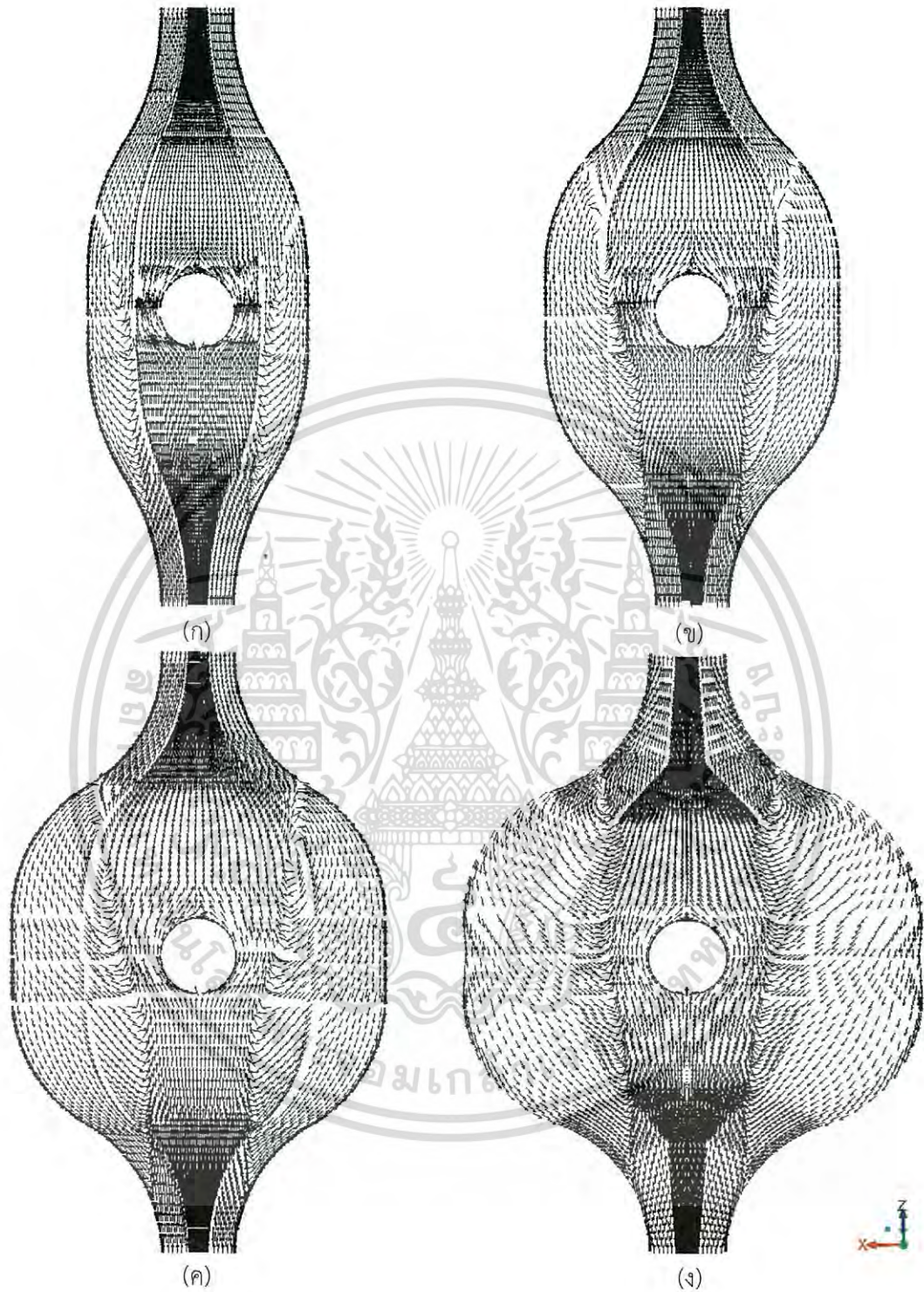
แต่เนื่องจากแอมเบอร์ขนาด $D^*=4$ เป็นแอมเบอร์ที่ทำให้เกิดการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาต่ำสุดจึงนำคอนทัวร์ความดันที่ตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 4.21 มาใช้ร่วมวิเคราะห์เปรียบเทียบกับท่อเดิมก่อนติดตั้งแอมเบอร์จากตารางที่ 4.4 พบว่าของไหลเมื่อเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน z ก่อนถึงช่องอ 90 องศาความดันของของไหลในแต่ละหน้าตัดของท่อที่มีแอมเบอร์ขนาด $D^*=4$ มีความดันของไหลมากกว่าท่อที่ไม่มีแอมเบอร์จึงทำให้อนุภาคซึ่งเคลื่อนที่เข้าสู่แอมเบอร์ที่มีความดันสูงจึงเกิดการเคลื่อนที่ได้ลำบากขึ้นภายในแอมเบอร์ประกอบกับการสูญเสียโมเมนตัมเนื่องจากการชนกับผนังกันด้วยจึงทำให้อนุภาคเกิดการสูญเสียโมเมนตัมมากขึ้นส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกมาจากแอมเบอร์ชนกับผนังท่อช่องอ 90 องศาด้วยโมเมนตัมที่น้อยลงซึ่งต่างจากกรณีของอนุภาคเคลื่อนที่ในท่อที่ไม่ได้ติดตั้งแอมเบอร์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ชนกับผนังท่อช่องอ 90 องศาด้วยโมเมนตัมที่สูงจึงทำให้เกิดการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา

อย่างไรก็ตามถึงแม้การสีกกร่อนของขนาดแอมเบอร์ $D^*=4$ ให้ผลการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาที่น้อยที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบการลดการสีกกร่อนกับแอมเบอร์ขนาดอื่นๆ ค่าการสีกกร่อนยังอยู่ในระดับเดียวกันในช่วง 3.5 ถึง 4.65×10^{-6} เมตรต่อกิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.5 แต่เมื่อคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์แล้วขนาดของแอมเบอร์ $D^*=3$ มีความดันลดน้อยที่สุดนั่นหมายความว่ามีการดำเนินงานเมื่อเทียบกับขนาดแอมเบอร์อื่นๆจึงน้อยกว่าตามไปด้วย อีกทั้งการใช้แอมเบอร์ขนาดเล็กก็ยิ่งทำให้ใช้ปริมาณวัสดุในการสร้างน้อยลงด้วยเช่นกันดังนั้นขนาดแอมเบอร์ $D^*=3$ จึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อลดการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา

ตารางที่ 4.4 คอนทัวร์ความดันที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวแกน z ของท่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

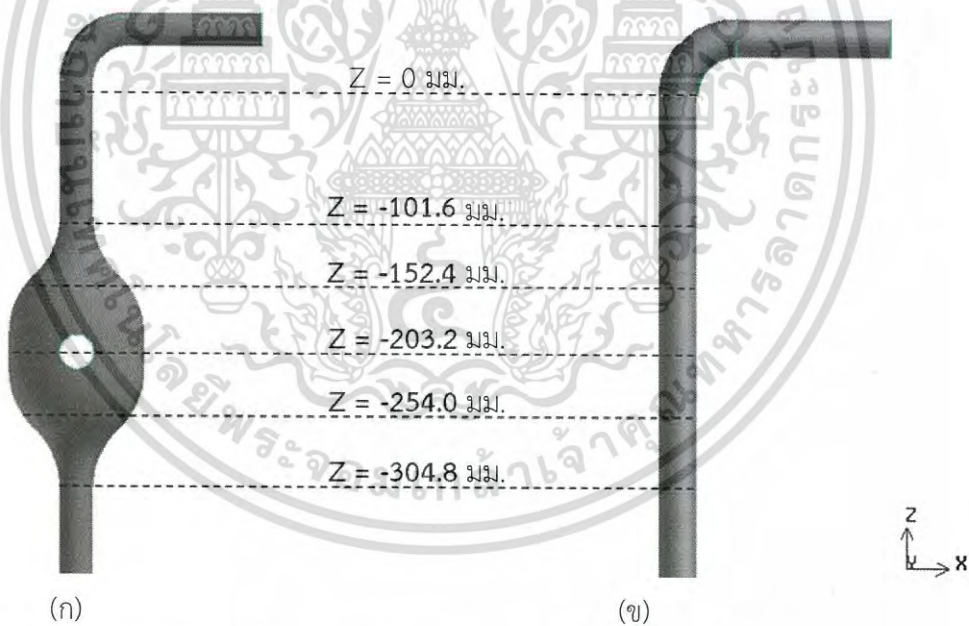


รูปที่ 4.19 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศภายในแชนเนลที่ระยะ -304.8 ถึง -101.6 มม. ตามแกน z
 (ก) $D^*=3$ (ข) $D^*=4$ (ค) $D^*=5$ (ง) $D^*=6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศในท่อตรงก่อนติดแชมเบอร์ที่ระยะ -304.8 ถึง -101.6 มม. ตามแกน z



รูปที่ 4.21 ระยะตัดขวางตามแนวแกน z (ก) แชมเบอร์ขนาด $D^*=4$ (ข) ท่อก่อนติดแชมเบอร์ ($D^*=1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าการสีกกร่อนสูงสุดและความดันลดของแต่ละแซมเบอร์ขนาด D* ต่างๆ

D*	ประเภทแซมเบอร์	ชนิดตัวกัน	ความดันลด (ปาสคาล)	ค่าการสีกกร่อนสูงสุด (เมตรต่อกิโลกรัม)	
				บริเวณตัวกัน	ภายในห้องอ 90 องศา
6	gradual	ทรงกระบอก	1,661	6.35×10^{-5}	4.59×10^{-6}
5			6.59×10^{-5}	4.48×10^{-6}	
4			6.56×10^{-5}	3.54×10^{-6}	
3			6.86×10^{-5}	4.66×10^{-6}	
1	-	-	1,171	-	3.60×10^{-5}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการจำลอง

5.1 สรุปผลการจำลอง

1. ก่อนการศึกษาการสึกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาจะเริ่มจากศึกษาหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงโดยอ้างอิงขนาดท่อและภาวะการดำเนินจากงานวิจัยของ Carlos และคณะ [16] โดยใช้โปรแกรม GAMBIT ในการสร้างท่อช่องอ 90 องศาและใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณการไหลแบบคงตัวในท่อช่องอ 90 องศาของอากาศที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ 59,295 โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon พบว่าจำนวนกริด 321,930 เซลล์ขึ้นไปทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง จึงเลือกกริดจำนวนนี้ในการนำมาศึกษาในขั้นต่อไป

2. จากตัวเลขเรย์โนลด์ดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาที่เกิดจากขนส่งอนุภาคของแข็งด้วยอากาศโดยเปรียบเทียบผลการสึกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาที่งานวิจัยของ Carlos และคณะ [16] โดยศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon ได้แก่ แบบจำลอง Standard k-epsilon แบบจำลอง RNG k-epsilon และแบบจำลอง Realizable k-epsilon พบว่าแบบจำลองความปั่น Realizable k-epsilon ให้ผลการทำนายค่าการสึกกร่อนสูงสุดและตำแหน่งการเกิดการสึกกร่อนสูงสุดมีความคลาดเคลื่อนน้อยสุดตั้งนั้นในการศึกษาการลดการสึกกร่อนในขั้นถัดไปจะใช้แบบจำลองนี้ในการทำนายการสึกกร่อนในท่อช่องอ 90 องศา

3. เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่มีโมเมนต์สูงเข้าชนกับผนังท่อช่องอ 90 องศาตั้งนั้นจึงเกิดแนวคิดโดยการติดตั้งท่อขยาย-ท่อลด (แชมเบอร์) ก่อนถึงช่องอ 90 องศาเพื่อเป็นการเพิ่มความดันภายในแชมเบอร์ซึ่งทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคขึ้นในที่นี้จะศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลางแชมเบอร์ 2 ขนาดได้แก่ 2 และ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า ($D^*=2$ และ 5) ที่มีพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน โดยมีความยาวของแชมเบอร์ 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าผลปรากฏว่าแชมเบอร์ทั้ง 2 ขนาดนี้ไม่สามารถลดการสึกกร่อนในท่อช่องอได้แสดงว่าความดันที่เกิดขึ้นภายในแชมเบอร์ไม่เพียงพอที่จะลดโมเมนต์อนุภาคลงได้และความดันลดภายในท่อที่ติดตั้งแชมเบอร์ขนาด $D^*=2$ มากกว่าเนื่องจากผลของแรงเสียดทานที่เกิดระหว่างของไหลกับผนังท่อมีอิทธิพลมากกว่าพลังงานที่สูญเสียไปกับการหมุนวนภายในแชมเบอร์ที่มีขนาด $D^*=5$ ดังนั้นจึงนำแชมเบอร์ขนาด $D^*=5$ มาใช้ศึกษาในการลดการสึกกร่อนในขั้นตอนถัดไป

4. นำแชมเบอร์ขนาด $D^*=5$ มาติดตั้งตัวกั้น 2 ประเภทได้แก่แผ่นสี่เหลี่ยมกับแผ่นทรงกระบอก โดยมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของแชมเบอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่แบบเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันและเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เพื่อศึกษาการลดการสึกกร่อนภายในช่องอ 90 องศาพบว่าแชมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันอนุภาคจะตกค้างอยู่ภายในแชมเบอร์หลังจากชนตัวกั้นซึ่งมีเพียงบางอนุภาคที่สามารถเคลื่อนที่ออกจากแชมเบอร์พร้อมกับอากาศได้ตั้งนั้น จึงไม่เหมาะที่จะนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้งานแต่ในส่วนของแฮมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆอนุภาคเคลื่อนที่ไปยังทางออกของแฮมเบอร์ได้หมดเนื่องจากมุมภายในผนังแฮมเบอร์สามารถสร้างมุมสะท้อนให้กับอนุภาคเคลื่อนที่ไปยังทางออกของแฮมเบอร์ได้และความดันลดภายในท่อน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแฮมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันเพราะว่าเกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการหมุนวนภายในแฮมเบอร์น้อยกว่าและเมื่อเปรียบเทียบตัวกันทั้ง 2 ประเภทพบว่าตัวกันทรงกระบอกส่งผลให้ความดันลดในท่อน้อยกว่าเนื่องจากตัวกันทรงกระบอกทำให้เกิดการแยกไหลช้ากว่าแบบตัวกันแผ่นสี่เหลี่ยมจึงทำให้ความดันที่เกิดขึ้นด้านหลังวัตถุมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบตัวกันแผ่นสี่เหลี่ยมอีกทั้งยังสามารถลดการสึกกร่อนลงได้ถึง 87.55 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปว่าแฮมเบอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างช้าๆและภายในมีตัวกันทรงกระบอกจึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

5. จากนั้นนำแฮมเบอร์ที่เหมาะสมดังกล่าวมาศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางได้แก่ $D^*=2, 3, 4, 5$ และ 6 โดย $D^*=1$ คือท่อที่ยังไม่ติดตั้งแฮมเบอร์ พบว่าแฮมเบอร์ขนาด $D^*=2$ ทำให้อนุภาคยังคงค้างอยู่ในระบบเนื่องจากมุมภายในแฮมเบอร์ไม่เหมาะสม ส่วนแฮมเบอร์ขนาด $D^*=3, 4, 5$ และ 6 ให้เปอร์เซ็นต์การลดการสึกกร่อนภายในห้องอ 90 องศาใกล้เคียงกันดังตารางที่ 5.1 เนื่องจากตัวกันทำหน้าที่ช่วยลดโมเมนตัมของอนุภาคและความดันภายในแฮมเบอร์ที่เพิ่มขึ้นช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยและตัวกันเกิดค่าการสึกกร่อนอยู่ในระดับเดียวกับก่อนติดตั้งแฮมเบอร์เช่นกัน เมื่อพิจารณาที่ความดันลด $D^*=3$ ให้ความดันลดที่น้อยที่สุดแสดงว่าอิทธิพลของการหมุนวนภายในแฮมเบอร์ส่งผลต่อความดันลดมากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับผนังแม้ว่า $D^*=3$ ให้เปอร์เซ็นต์การลดการสึกกร่อนมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ D^* อื่นๆ

เมื่อพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ซึ่งแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ค. พบว่ากรณีของการติดตั้งแฮมเบอร์ขนาด $D^*=3$ ที่มีแท่งทรงกระบอกอะลูมิเนียมอยู่ในภายในแฮมเบอร์มีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนห้องและแท่งอะลูมิเนียมเท่ากับ 253.85 ดอลลาร์ต่อปี ในทางกลับกันถ้าท่อที่ไม่ได้มีการติดตั้งแฮมเบอร์จะมีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์สำหรับตำแหน่งห้อง 1 จุดที่เกิดการสึกกร่อนได้ถึง 1,218.15 ดอลลาร์ต่อปี ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงขอเลือกใช้แฮมเบอร์ขนาด $D^*=3$ มาช่วยลดการสึกกร่อนภายในห้องอ 90 องศา

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการศึกษาของแต่ละแฮมเบอร์ขนาด D^* ต่างๆ

D^*	ประเภทแฮมเบอร์	ชนิดตัวกัน	ความดันลด (ปาสคาล)	เปอร์เซ็นต์การลดการสึกกร่อนภายในห้องอ 90 องศา
6	gradual	ทรงกระบอก	1,661	87.25
5			1,681	87.55
4			1,644	90.17
3			1,582	87.05
1	-	-	1,171	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาปริมาณอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งต่ออากาศให้มากขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของการชนกันของอนุภาคภายในแชมเบอร์
2. ควรศึกษาตัวกั้นรูปทรงอื่นๆเพิ่มเติมที่สามารถช่วยทำให้ความดันลมนี้อาจลดลงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus and L. S. Leung, *Pneumatic Conveying of Solids a Theoretical and Practical Approach*. Dordrecht : Springer. 2010.
- [2] ณัฐวัตร ใจกลม. "การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของสมรรถนะการผสมแบบเจ็ดในถึงผสมหลายรูปแบบ" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557
- [3] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method*. New York : Longman Scientific & Technical. 1995.
- [4] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. *พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สาขาวิศวกรรมเคมี. 2556.
- [5] ANSYS, Inc.. *ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide*. 2012.
- [6] S. A. Morsi and A. J. Alexander. "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems" *Journal of Fluid Mechanics*. Vol.55(2). 1972. pp. 193–208.
- [7] J. P. Van Doormaal and G. D. Raithby. "Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows" *Numerical Heat Transfer*. Vol.7. 1984. pp. 147-163.
- [8] K. G. Budinski. *FRICITION, WEAR, AND EROSION ATLAS*. Boca Raton : CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. 2014.
- [9] P. Zima, M. Sedlar and M. Muller "Modeling collapse aggressiveness of cavitation bubbles in hydromachinery" *Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation*. August. 2011.
- [10] J. K. Edwards, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi. "Evaluation of Alternative Pipe Bend Fittings in Erosive Service" *In Proceedings of ASME FEDSM'00: ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Boston, MA. June 2000..*
- [11] Y. Oka, K. Okamura, and T. Yoshida, "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: part 1: effects of impact parameters on a predictive equation" *Wear*. Vol.259(1–6). 2005. pp.95–101.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] M. Parsi, K. Najmi, F. Najafifard, S. Hassani, B.S. McLaury and S.A. Shirazi. “A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Vol.21. 2014. pp. 850-873.
- [13] G.Grant and W.Tabakoff. “Erosion prediction in turbo machinery resulting from environmental solid particles” *Aircraft*, Vol.12. 1975. pp.471-478.
- [14] W.S. Janna. **Introduction to Fluid Mechanics**. Boca Raton : CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. 2010.
- [15] Y.A. CENGEL and J.M. CIMBALA. **Fluid mechanics fundamentals and applications**. New York : McGraw-Hill Companies. 2014.
- [16] C. Duarte, F. Souza and V. Santos. “Numerical investigation of mass loading effects on elbow erosion” *Powder Technology*. Vol.283. 2015. pp. 593–606.
- [17] Q.H. Mazumder, S.A. Shirazi, and B. McLaury. “Experimental investigation of the location of maximum erosive wear damage in elbows” *Journal of Pressure Vessel Technology*. Vol.130. 2008. pp.1-7.
- [18] N. Lin, H. Lan, Yugong Xu, S. Dong, and G. Barber. “Effect of the gas-solid two-phase flow velocity on elbow erosion” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Vol.26. 2015. pp. 581-586.
- [19] Dynamic Forge & Fitting (I) P. Limited. “Dimensions, Wall Thickness and Weights of ANSI/ASME Buttweld Fitting to ASTM A403/A815 ASME B16.9.” [Online]. Available : <http://www.dynamicforgefittings.com/dimensions-wall-thickness-and-weights-of-ansi-asme-buttweld-fittings-to-astm-a403-a815-asme-b16-9/>. 2016.
- [20] Ezeflow group. “Aluminum Fittings & Class 150 Flanges .” [Online]. Available : <http://ezeflow.com/wp-content/uploads/2013/11/Flowline-Aluminum-price-list-Feb2005.pdf>. 2005.
- [21] Metals Depot. “6061 Aluminum Round.” [Online]. Available : http://www.metalsdepot.com/catalog_cart_view.php?msg=removed. 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ในการจำลองการสึกกร่อนบริเวณข้ออ 90 องศา มีการกำหนดภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT

General	Mesh	Scale : mm
	Solver	Type : Pressure-Based
		Velocity Formulation : Absolute
		Time : Steady
Gravity	$z : -9.81 \text{ m/s}^2$	
Models	Viscous	Realizable k-e , Non-Eq Wall Fn
	DPM	Interaction with Continuous Phase
		Drag law : Spherical
		Physical Model : Erosion/Accretion
		Injection Type : Surface (Release From Surfaces : inlet)
		Particle Type : Inert
		Diameter Distribution : uniform
		Point Properties
		z-velocity : 34,1 m/s
		Diameter : $182 \times 10^{-6} \text{ m}$
Total Flow Rate : 0.0002752 kg/s		
Turbulent Dispersion : Discrete Random Walk Model		
Materials	Fluid	<u>Air</u> Density : 1.225 kg/m^3 Viscosity : $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
	Solid	<u>Aluminium</u> Density : $2,700 \text{ kg/m}^3$
	Inert Particle	<u>Sand</u> Density : $2,600 \text{ kg/m}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT (ต่อ)

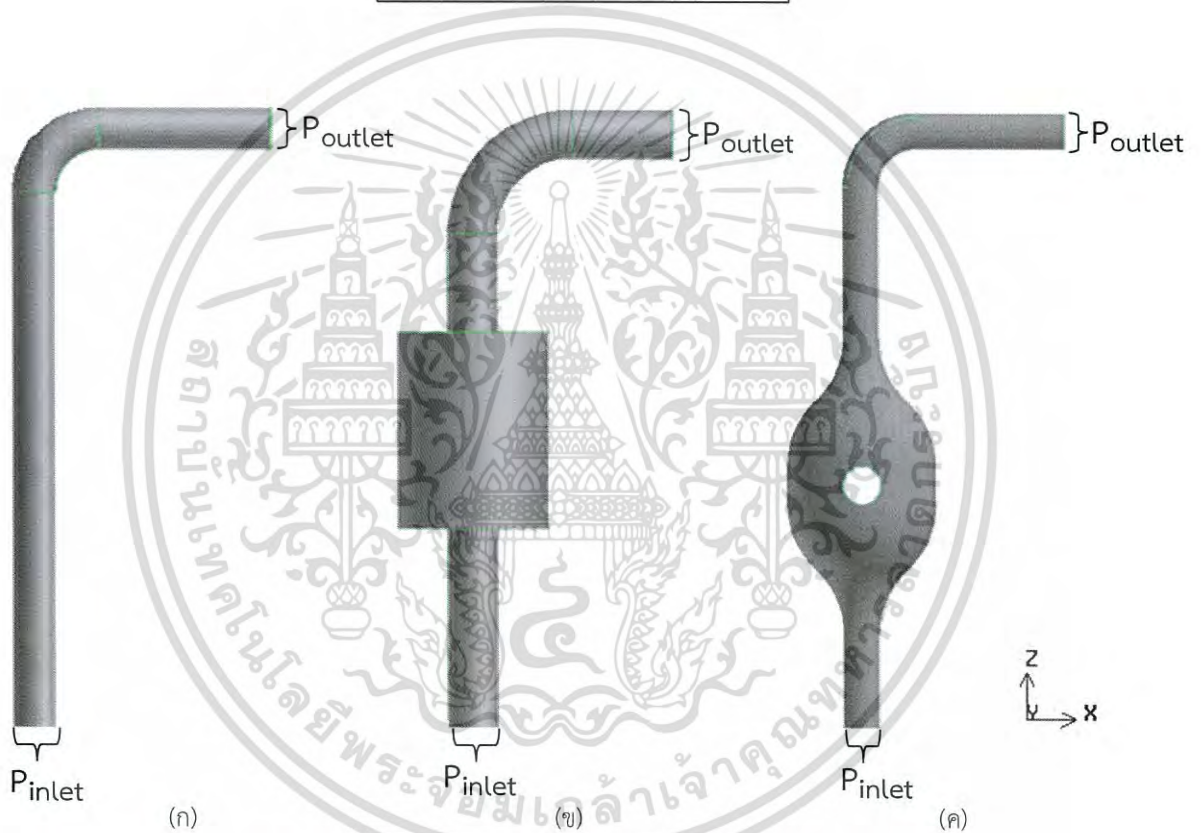
Boundary Conditions	Inlet	Type : Velocity Inlet											
		Velocity Magnitude 34.1 m/s											
		Turbulent intensity : 4%											
		Hydraulic diameter : 0.0254 m											
	Outlet	Type : Outflow											
	Wall	Type : Wall											
		Wall motion : Stationary wall											
		Shear condition : No slip											
		Discrete Phase Reflection Coefficients (Polynomial)											
		Normal : $0.993 - 0.0307 \alpha + 0.000475 \alpha^2 - 2.61 \times 10^{-6} \alpha^3$											
Tangent : $0.988 - 0.029 \alpha + 0.000643 \alpha^2 - 3.56 \times 10^{-6} \alpha^3$													
Erosion Model	Impact Angle Function (Piecewise-linear)												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>องศา</th> <th>$f(\alpha)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>1.55</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>1.6</td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>1.44</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	องศา	$f(\alpha)$	0	0	20	1.55	30	1.6	45	1.44	90	1
องศา	$f(\alpha)$												
0	0												
20	1.55												
30	1.6												
45	1.44												
90	1												
	Diameter Function : 1.8×10^{-9} m												
	Velocity exponent Fn : 2.6												
Solution Method	Pressure-Velocity Coupling	Scheme : SIMPLEC											
	Spatial Discretization	Gradient : Least Squares Cell Based											
		Pressure : PRESTO!											
		Momentum : Second Order Upwind											
		TKE : Second Order Upwind											
		TDR : Second Order Upwind											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การเปรียบเทียบความดันลดของท่อก่อนติดตั้งแฉกเบอร์และหลังติดตั้งแฉกเบอร์มีตำแหน่งการวัดความดันดังรูปที่ ข.1(ก)-(ค) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ความดันลด} = P_{\text{inlet}} - P_{\text{outlet}}$$

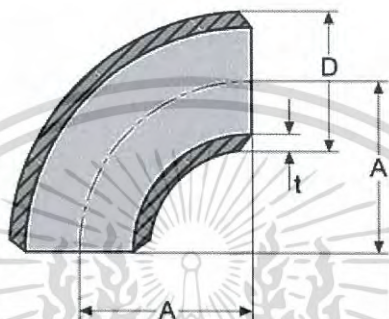


รูปที่ ข.1 (ก) ท่อก่อนติดตั้งแฉกเบอร์ (ข) ท่อที่ติดตั้งแฉกเบอร์แบบพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน (ค) ท่อที่ติดตั้งแฉกเบอร์แบบพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆภายในมีแผ่นกั้นทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

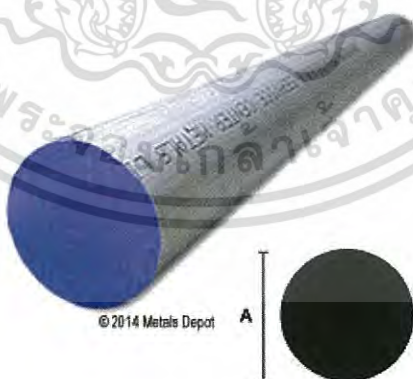
การคำนวณค่าใช้จ่ายของข้องอ 90 องศา ก่อนติดตั้งแชนเบอร์และค่าใช้จ่ายของข้องอ 90 องศา หลังติดตั้งแชนเบอร์พร้อมกับค่าแห่งทรงกระบอกที่เปลี่ยน โดยคุณสมบัติข้องอ 90 องศาที่ใช้ในการอ้างอิง แสดงดังรูปที่ ค.1 และตารางที่ ค.1 และลักษณะแห่งอะลูมิเนียมแสดงดังรูปที่ ค.2 และตารางที่ ค.2



รูปที่ ค.1 ขนาดข้องอ 90 องศา [19]

ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติของท่อข้องอ 90 องศา [19]

ประเภทท่อ	ประเภทอะลูมิเนียม	NPS	Schedule	D (มม.)	t (มม.)	A (มม.)	ราคา [20]
ข้องอ 90 องศา	6061-T6	1	40	33.4	3.38	38.1	16 ดอลลาร์



รูปที่ ค.2 ลักษณะแห่งทรงกระบอกอะลูมิเนียม 6061-T6 [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 คุณสมบัติของทรงกระบอกตัน [21]

ชนิดตัวกั้น	ประเภทอะลูมิเนียม	เส้นผ่านศูนย์กลาง (A) (มม.)	ราคา [21]
ทรงกระบอกตัน	6061-T6	25.4	7.22 ดอลลาร์ต่อฟุต

วิธีการคำนวณ

กรณีที่ 1 คำนวณค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนช่องอ 90 องศาหลังเกิดการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 ของท่อก่อนติดตั้งแซมเบอร์ ($D^*=1$)

1.1 คำนวณค่าการสีกกร่อนเป็นหน่วยเซนติเมตรเมตรต่อปี

$$3.7 \times 10^{-5} \frac{\text{เมตร}}{\text{กิโลกรัม}} \times 0.0002752 \frac{\text{กิโลกรัม}}{\text{วินาที}} \times 31,536,000 \frac{\text{วินาที}}{\text{ปี}} \times 100 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{เมตร}} = 32.1 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{ปี}}$$

1.2 คำนวณอายุการใช้งานของช่องอ 90 องศาจำนวน 1 ชั้น

$$0.338 \text{ เซนติเมตร} \div 32.1 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{ปี}} = 0.011 \text{ ปี}$$

$$0.011 \text{ ปี} \times 365 \frac{\text{วัน}}{\text{ปี}} = 4 \text{ วัน}$$

1.3 คำนวณจำนวนช่องอที่จะต้องเปลี่ยนภายใน 1 ปี

$$365 \text{ วัน} \div 4 \frac{\text{วัน}}{\text{ชั้น}} = 92 \text{ ชั้น}$$

1.4 ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนช่องอภายใน 1 ปี

$$92 \text{ ชั้น} \times 16 \frac{\text{ดอลลาร์}}{\text{ชั้น}} = 1,472 \text{ ดอลลาร์}$$

กรณีที่ 2 คำนวณค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนช่องอ 90 องศาหลังเกิดการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 ของท่อหลังติดตั้งแซมเบอร์ ($D^*=3$) ภายในมีแท่งอะลูมิเนียมทรงกระบอกเป็นตัวกั้น

กรณีช่องอ 90 องศา

2.1.1 คำนวณค่าการสีกกร่อนที่ช่องอ 90 องศาเป็นหน่วยเซนติเมตรเมตรต่อปี

$$4.66 \times 10^{-6} \frac{\text{เมตร}}{\text{กิโลกรัม}} \times 0.0002752 \frac{\text{กิโลกรัม}}{\text{วินาที}} \times 31,536,000 \frac{\text{วินาที}}{\text{ปี}} \times 100 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{เมตร}} = 4 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{ปี}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คำนวณอายุการใช้งานของข้องอ 90 องศาจำนวน 1 ชั้น

$$0.338 \text{ เซนติเมตร} \div 4 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{ปี}} = 0.085 \text{ ปี}$$

$$0.085 \text{ ปี} \times 365 \frac{\text{วัน}}{\text{ปี}} = 30 \text{ วัน}$$

2.1.3 คำนวณจำนวนข้องอที่จะต้องเปลี่ยนภายใน 1 ปี

$$365 \text{ วัน} \div 30 \text{ วัน} = 13 \text{ ชั้น}$$

2.1.4 ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนข้องอภายใน 1 ปี

$$13 \text{ ชั้น} \times 16 \frac{\text{ดอลลาร์}}{\text{ชั้น}} = 208 \text{ ดอลลาร์}$$

กรณีแท่งอะลูมิเนียม

2.2.1 คำนวณค่าการสึกกร่อนที่แท้จริงกระบอกเป็นหน่วยเซนติเมตรเมตรต่อปี

$$6.86 \times 10^{-5} \frac{\text{เมตร}}{\text{กิโลกรัม}} \times 0.0002752 \frac{\text{กิโลกรัม}}{\text{วินาที}} \times 31,536,000 \frac{\text{วินาที}}{\text{ปี}} \times 100 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{เมตร}} = 59.5 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{ปี}}$$

2.2.2 คำนวณอายุการใช้งานของแท่งอะลูมิเนียม

$$2.54 \text{ เซนติเมตร} \div 59.5 \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{ปี}} = 0.043 \text{ ปี}$$

$$0.043 \text{ ปี} \times 365 \frac{\text{วัน}}{\text{ปี}} = 15 \text{ วัน}$$

2.2.3 คำนวณจำนวนแท่งที่จะต้องเปลี่ยนภายใน 1 ปี

$$365 \text{ วัน} \div 15 \frac{\text{วัน}}{\text{แท่ง}} = 25 \text{ แท่ง}$$

2.2.4 คำนวณจำนวนความยาวที่ใช้เป็นแท่งอะลูมิเนียมต่อ 1 ครั้ง

$$3 \times D_1 \times \text{จำนวนแท่ง} \times \frac{1}{30} \frac{\text{ฟุต}}{\text{เซนติเมตร}} = (3 \times 2.54) \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{แท่ง}} \times 25 \text{ แท่ง} \times \frac{1}{30} \frac{\text{ฟุต}}{\text{เซนติเมตร}} = 6.35 \text{ ฟุต}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแท่งอะลูมิเนียมภายใน 1 ปี

$$6.35 \text{ ฟุต} \times 7.22 \frac{\text{ดอลลาร์}}{\text{ฟุต}} = 45.85 \text{ ดอลลาร์}$$

ตารางที่ ค.3 สรุปผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนข้องอ 90 องศาสำหรับตำแหน่งข้องอ 1 จุดที่เกิดการสึกกร่อนทั้งก่อนและหลังติดตั้งแซมเบอร์ขนาด (D*=3) ที่มีแท่งอะลูมิเนียมอยู่ภายในแซมเบอร์

รายละเอียด	D*=3		D*=1
	ทรงกระบอก	ข้องอ 90 องศา	ข้องอ 90 องศา
อัตราการสึกกร่อน (เซนติเมตรต่อปี)	59.5	4.0	32.1
อายุการใช้งาน (วันต่อชิ้น)	15	30	4
จำนวนชิ้นที่เปลี่ยนใน 1 ปี (ชิ้น)	25	13	92
จำนวนความยาวที่ใช้ (ฟุต)	6.35	-	-
ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ต่อปี (ดอลลาร์)	45.85	208	1,472
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดต่อปี (ดอลลาร์)	253.85		1,472

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสีหนาท วุฒิปราโมทย์
 วัน เดือน ปีเกิด 12 กันยายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 99/80 ซ.รามคำแหง 94 ถ.รามคำแหง แขวงสะพานสูง เขตสะพานสูง
 กรุงเทพมหานคร 10240
 โทร 082-706-2648
 อีเมล sihanart110@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2553-2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การออกแบบโดยใช้เทคนิคศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

2.) เชี่ยวชาญโปรแกรม ANSYS (GAMBIT (Solid Modeler)) และ
 ANSYS (FLUENT (CFD Simulator))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้