

การศึกษาการถือกรรมสิทธิ์บริเวณท่อของจอ 90 องศา ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาการสีกร่อนบริเวณท่อข้องอ 90 องศา ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ศศิรินทร์ บุญช่วยเหลือ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study Erosion in 90 Degree Elbow by Computational Fluid Dynamics



**A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Bachelor of Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2016**

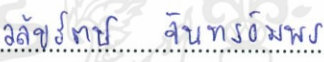
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษาการศึกษาก่อนนบรีเวณต่อข้ออ 90 องศา ด้วยพลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณ
โดย นายศศิรินทร์ บุญช่วยเหลือ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร


.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)


.....กรรมการ
(ผศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทรัมย์พร)


.....กรรมการ
(ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาการสีกกร่อนบริเวณท่อข้องอ 90 องศา ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
โดย	นายศศิรินทร์ บุญช่วยเหลือ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

การสีกกร่อนเนื่องจากอนุภาคเป็นปัญหาสำคัญของการไหลภายในท่อในอุตสาหกรรมเคมี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม (Standard k-epsilon (SKE) Renormalization group k-epsilon (RNGKE) และ Realizable k-epsilon (RKE)) ต่อการทำนายการสีกกร่อน และศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (15 45 135 405 1,215 1,800 และ 3,645 ไมครอน) และชนิดของอนุภาค (ซีเมนต์ ทราย ผงซักฟอก และยิปซัม) ต่อการสีกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา ผลการจำลองเบื้องต้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับ การทดลองและงานวิจัยก่อนหน้าเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง จากผลการจำลองพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการสีกกร่อน นอกจากนี้พบว่าค่าการสีกกร่อนของอนุภาคขนาดใหญ่มีค่าสูงกว่าอนุภาคขนาดเล็กเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีโมเมนตัมสูงกว่า และอนุภาคขนาดใหญ่มีมุมการเกิดการสีกกร่อนสูงสุดต่ำกว่าอนุภาคขนาดเล็กเนื่องจากความเฉื่อยของวัตถุที่พยายามรักษาสภาพการเคลื่อนที่ อีกทั้งยังพบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากัน ค่าการสีกกร่อนของอนุภาคต่างชนิดกันจะมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

Report Title	Study erosion in 90 degree elbow by computational fluid dynamics
By	Mr. Sasirin Boonchuayluer
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

ABSTRACT

Erosion due to particles is an important problem for pipe flow in the chemical industries. So, in this research, the computational fluid dynamics (CFD) technique was employed to investigate the appropriate turbulence model (Standard k-epsilon (SKE), Renormalization group k-epsilon (RNGKE), and Realizable k-epsilon (RKE)) for erosion prediction and to study the influences of particle diameter (15, 45, 135, 405, and 1,215 micron) and particle type (cement, sand, detergent powder, and gypsum) for erosion in 90 degree elbow. The preliminary simulated results were compared with the experiment and previous research to validate the present model. The simulated results found that the RNGKE model was a suitable model for erosion prediction. Further, the erosion rate of the large particle was higher than the small particle because the large particle provided the higher momentum. The large particle exhibited the lower impact angle in the maximum erosion rate as comparing with the small particle because the inertia of the particle attempts to retain its state of motion. In addition, at the same Reynolds number, the erosion rates for different particle types were different because of the differences in particle diameter and density.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ ที่ให้ความรู้ในด้านของทฤษฎี ไม่ว่าจะเป็นเรื่อง พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กลศาสตร์ของไหล หลักการทำนาย การสีกกร่อนและอื่นๆอีกมากมาย รวมถึงให้คำชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา การออกแบบและร่วมวิเคราะห์ผลการจำลอง ในวิจัยนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ให้ความรู้ในด้านทฤษฎีและการปฏิบัติ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและคำแนะนำสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคขั้นสูงในการจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT และ FLUENT กับการสีกกร่อนในท่อข้องอ 90 องศา รวมถึงให้คำชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา การออกแบบและร่วมวิเคราะห์ผลการจำลอง ในวิจัยนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อาจารย์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ขอขอบคุณเพื่อนและน้องๆร่วมภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดมา รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำงานวิจัยนี้ ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้ามีข้อผิดพลาดประการใดในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ศศิรินทร์ บุญช่วยเหลือ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	3
2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	4
2.2.1 สมการควบคุม.....	4
2.2.1.1 สมการการอนุรักษ์มวล.....	4
2.2.1.2 สมการโมเมนตัม.....	5
2.2.1.3 สมการพลังงาน.....	5
2.2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์.....	6
2.3 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน.....	7
2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์.....	8
2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$	10
2.3.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$	11
2.3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	12
2.3.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k - \epsilon$	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 แบบจำลองเฟสแยก (Discrete Phase Model).....	16
2.5 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE.....	17
2.6 การสึกกร่อนบนผิววัสดุ (Erosion).....	20
2.6.1 การสึกกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็ง (Solid particle erosion).....	21
2.7 การไหลผ่านวัตถุจม (Flow over immersed bodies).....	23
2.7.1 การโตขึ้นของชั้นขอบเขต (Boundary-layer growth).....	23
2.7.2 การแยกไหล (Separation).....	26
2.7.3 การต้านทานการเคลื่อนที่บนวัตถุในระบบ 2 มิติ.....	27
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 การสร้างแบบจำลองของท่อข้องอ 90 องศา.....	33
3.2 การทำนายการสึกกร่อนของท่อบริเวณข้องอ 90 องศา.....	34
3.2.1 กำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นในการคำนวณเชิงตัวเลข.....	34
3.2.2 การศึกษาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง.....	34
3.2.3 การศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อเปรียบเทียบผลการสึกกร่อนกับงานวิจัย อ้างอิง.....	35
3.3 การทำนายการสึกกร่อนของท่อบริเวณข้องอ 90 องศาหลังการเปลี่ยนแปลงประเภทและ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหล.....	36
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง.....	38
4.1 การศึกษาหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง.....	38
4.2 การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีผลต่อการสึกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอ้างอิง.....	39
4.3 การศึกษาอิทธิพลของประเภทของอนุภาคของของไหลที่มีผลต่อการสึกกร่อนบริเวณ ข้องอ 90 องศา.....	43
4.4 การศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลที่มีผลต่อ การสึกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา.....	45

บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง.....	48
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	52



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน.....	19
3.1 ขนาดของท่อที่ใช้ในการจำลอง.....	33
3.2 สมบัติของของไหลและอนุภาคของแข็ง.....	34
3.3 รูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขของการหาจำนวนกริดที่ทำให้การจำลองไม่เปลี่ยนแปลง.....	35
3.4 รูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขของการหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม.....	35
3.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของอนุภาคของของไหล.....	36
4.1 เปรียบเทียบผลการสีกกร่อนกับผลการทดลองเมื่อใช้การทำนายการสีกกร่อนของ Oka และคณะ[11] กับ FLUENT ของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน.....	43
4.2 เปรียบเทียบผลการสีกกร่อนเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดของอนุภาคของของไหลที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกัน.....	44
4.3 เปรียบเทียบผลการสีกกร่อนเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลของอนุภาคชนิดเดียวกัน.....	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน.....	7
2.2 ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE.....	20
2.3 การสีกกร่อนบนข้อต่อที่มีการขนส่งเม็ดทราย.....	21
2.4 การโตขึ้นของชั้นขอบเขตตามแนวแผ่นเรียบ.....	23
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่กับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลบนแผ่นเรียบ.....	26
2.6 ลักษณะการไหลผ่านพื้นผิวโค้ง.....	27
2.7 การไหลแบบสมำเสมอผ่านทรงกระบอกยาว.....	28
2.8 การวัดค่าความดันบนผิวทรงกระบอก (ก) ตำแหน่งการวัดความดันบนผิวของทรงกระบอกที่จมอยู่ในการไหลแบบสมำเสมอ (ข) ค่าความดันบนพื้นผิวทรงกระบอกที่ตำแหน่งองศาต่างๆ.....	28
2.9 การกระจายตัวของความดันบนพื้นผิวของทรงกระบอกที่จมอยู่ในการไหลแบบสมำเสมอ.....	29
2.10 บริเวณข้ออที่ศึกษา.....	31
3.1 สัดส่วนของท่อและบริเวณที่ศึกษา (รูปนี้ไม่ได้อ้างอิงมาจากสัดส่วนที่แท้จริง).....	33
4.1 แบบจำลองท่อข้ออ 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.....	38
4.2 ความเร็วกึ่งกลางท่อตามแนวแกน z ตลอดความยาวของท่อตรงของจำนวนกริดต่างๆ.....	40
4.3 คอนทัวร์การสีกกร่อนของแบบจำลองความปั่นป่วน (ก) Standard k-epsilon (ข) RNG k-epsilon และ (ค) Realizable k-epsilon.....	41
4.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	41
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสีกกร่อนกับองศาข้ออ.....	42
4.6 ค่าอัตราการสีกกร่อนในรูปแบบคอนทัวร์ของอนุภาคของของไหลแต่ละชนิด.....	44
4.7 ค่าอัตราการสีกกร่อนในรูปแบบคอนทัวร์ของอนุภาคของของไหลชนิดเดียวกันที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคแตกต่างกัน.....	46
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่ (C_D) กับตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re).....	47

สัญลักษณ์

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

a	ความเร็วเสียงอากาศ (m/s)
A_{face}	พื้นที่ของผิวเซลล์ที่ผนัง
$b(v)$	ฟังก์ชันความเร็วอนุภาค
$C(d_p)$	ฟังก์ชันของอนุภาค
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm)
D_f	แรงต้านการเคลื่อนที่ (N)
E	พลังงานจำเพาะของของไหล (J)
e_n	อัตราส่วนความเร็วสะท้อนต่อความเร็วกระทบผนังในแนวตั้งฉากกับผนัง
e_t	อัตราส่วนความเร็วสะท้อนต่อความเร็วกระทบผนังในแนวสัมผัสกับผนัง
$f(\alpha)$	ฟังก์ชันของมุมกระทบ
G_b	การเกิดขึ้นของพลังจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
G_k	การเกิดขึ้นของพลังจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย
H_v	ความแข็งของวัสดุ (GPa)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m ² ·K)
p	ความดัน (Pa)
p^*	ความดันคาตเดา (Pa)
p'	ความดันปรับแก้ (Pa)
$R_{erosion}$	อัตราสุทธิต่อผลผลิตผลิตภัณฑ์สาร i โดยปฏิกิริยาเคมี (mol/m ³ ·s)
S_E	แหล่งพลังงานอื่นๆ

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (ต่อ)

S_i	เทอมของแหล่งกำเนิดของสาร i
S_M	เทอมของแหล่งโมเมนต์อื่นๆ
S_k และ S_ε	เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นของ k และ ε
T	อุณหภูมิ (K)
t	เวลา (s)
U	ความเร็วเฉลี่ยที่ทางออกเจ็ต (m/s)
U_{ref}	ความเร็วอ้างอิงในการไหลเฉลี่ย (m/s)
u	ความเร็วในแนวแกน x (m/s)
\bar{u}	เวกเตอร์ความเร็ว (m/s)
u^*	ความเร็วคาดเดาในแนวแกน x (m/s)
u'	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน x (m/s)
v	ความเร็วในแนวแกน y (m/s)
v^*	ความเร็วคาดเดาในแนวแกน y (m/s)
v'	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน y (m/s)
\bar{v}	ความเร็วเฉลี่ย (m/s)
w	ความเร็วในแนวแกน z (m/s)
x	ระยะทางตามแนวแกน x (m/s)
Y_i	สัดส่วนโดยมวลของสาร i (-)
Y_M	บทบาทของการขยายตัวที่กว้างในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษากรีก

α	มุมกระทบของอนุภาคกับพื้นผิวผนัง
α_k	ปริมาณส่วนกลับของตัวเลขพรีนด์เทิลประสิทธิภาพสำหรับ k (-)
α_ε	ปริมาณส่วนกลับของตัวเลขพรีนด์เทิลประสิทธิภาพสำหรับ ε (-)
α_p	ตัวประกอบใต้การผ่อนปรนของความดัน (-)
α_s	ค่าคงที่ของการหมุนวน (-)
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)
ε	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (m^2/s^3)
λ	สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
μ	สัมประสิทธิ์ความหนืด ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
μ_{eff}	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
μ_t	ความหนืดปั่นป่วน ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
μ_0	ค่าของความหนืดปั่นป่วนที่ถูกคำนวณโดยปราศจากปรากฏการณ์การหมุนวน ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
ν	ความหนืดเชิงจลน์ (m^2/s)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)
σ_k	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ k (-)
σ_ε	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ ε (-)
τ	ความเค้นเฉือน (Pa)
ϕ	คุณสมบัติการไหลฉับพลัน
$\bar{\phi}$	คุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตามเวลา

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษากรีก (ต่อ)

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



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการขนส่งอนุภาคผ่านทางท่อขนส่งโดยใช้ของไหลหลายเฟสเป็นวิธีการหนึ่งที่มีพบเจอในโรงงานอุตสาหกรรม อาทิ ระบบลำเลียงแก๊ส และระบบลำเลียงผงวัสดุในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีการขนส่งอนุภาคของแข็งด้วยอากาศผ่านทางท่อขนส่งซึ่งต้องใช้ความเร็วของอากาศมีค่าสูงในการพาอนุภาคเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคเกิดการสะสมภายในท่อขนส่งด้วยเหตุนี้จึงเกิดการสึกกร่อนที่บริเวณผนังท่อทำให้ความหนาของผนังท่อบางลงจนเกิดการทะลุได้และอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดหรือความไม่ปลอดภัยในการดำเนินงาน โดยรูปแบบของการสึกกร่อนประเภทที่พบเห็นได้บ่อยคือการสึกกร่อนของผิววัสดุ ซึ่งกระบวนการที่ผิวของวัสดุสัมผัสกับของไหลเคลื่อนที่ทำให้วัสดุของแข็งที่ถูกสัมผัสนั้นเกิดความเสียหายหรือสูญเสียพื้นผิว โดยปัญหาการไหลแบบหลายเฟสที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนนั้นมีสมการทำนายที่ซับซ้อนจึงนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาช่วยในการทำนายการสึกกร่อนและช่วยเตือนล่วงหน้าถึงความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นต่ออุปกรณ์ได้ ปัจจุบันพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการแก้ไขปัญหาคาร์บอนของไหล ซึ่งจะช่วยในเรื่องการออกแบบของไหลแบบเฟสเดียวและแบบหลายเฟสให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราการสึกกร่อนบริเวณท่อข้ออ 90 องศาซึ่งเป็นลักษณะของท่อที่มีโอกาสเกิดการสึกกร่อนมากที่สุด เนื่องจากอนุภาคกระทบผนังท่อโดยตรง ด้วยยึดหลักความปลอดภัยและต้องการลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นให้น้อยที่สุดจึงนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการทำนายการสึกกร่อนโดยใช้โปรแกรม FLUENT เพื่อทำนายการสึกกร่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายการสึกกร่อนในท่อข้ออ 90 องศาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเทียบกับผลการทดลองและงานวิจัยก่อนหน้า
2. ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงชนิดของอนุภาคของของไหลที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนบริเวณข้ออ 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศาและองศาการสึกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT และคำนวณการไหลโดยใช้โปรแกรม FLUENT จากนั้นตรวจสอบผลการทำนายการสึกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศาให้ตรงกับงานวิจัยที่อ้างอิง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

2. ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน ได้แก่ แบบจำลอง Standard k-epsilon แบบจำลอง RNG k-epsilon และแบบจำลอง Realizable k-epsilon ที่เหมาะสมกับการทำนายการสึกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา

3. ศึกษาอิทธิพลของชนิดของอนุภาคของของไหลที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วยซีเมนต์ทราย ผงซักฟอก และยิปซัม ที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา

4. ศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วยขนาด 15, 45, 135, 405, 1,215, 1,800 และ 3,645 ไมโครเมตร ที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการสึกกร่อน ซึ่งนำไปสู่การทำนายการสึกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นสาขาหนึ่งของกลศาสตร์ของไหลที่ใช้วิเคราะห์และแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อแก้สมการทางพลศาสตร์ของไหลที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณการไหลบนโดเมนที่เราสนใจ จากนั้นสามารถแสดงผลออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น คอนทัวร์หรือเวกเตอร์ เป็นต้น เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์และแก้ปัญหาการไหลในรูปแบบต่างๆ อย่างมีประสิทธิภาพและค่อนข้างแม่นยำ ปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เป็นอย่างมาก ดังนั้นการวิจัยและศึกษารวมถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงมีความนิยมมากยิ่งขึ้นยกตัวอย่างเช่น การออกแบบรถยนต์หรือยานพาหนะ การกระจายตัวของมลพิษในอากาศ การออกแบบลูกฟุตบอล การออกแบบหมวกของนักปั่นจักรยาน การออกแบบกระบวนการผสมและการแยกสาร

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

2.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

เป็นกระบวนการที่ประกอบด้วยข้อกำหนดข้อมูลที่เป็นในการคำนวณปัญหาการไหลให้กับโปรแกรมคำนวณมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

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)

เป็นกระบวนการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยผลลัพธ์เหล่านี้สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น เวกเตอร์ คอนทัวร์ รูปทรงโดเมนและการแสดงกริด พื้นผิว 2 มิติ และ 3 มิติ

2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

2.2.1 สมการควบคุม (Governing equation)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีหลักการมาจากสมการควบคุมของกลศาสตร์ของไหลโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เป็นตัวแทนของกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ซึ่งได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) และกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (First law of thermodynamics) [1]

2.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation)

จากคำกล่าวที่ว่า “มวลไม่สามารถสร้างหรือทำลายได้” มีความหมายว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชั้นของไหลจะเท่ากับอัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชั้นของไหล” ซึ่งสามารถเขียนสมการอนุรักษ์มวลหรือที่เรียกว่าสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้ดังสมการที่ (2.1) [1]

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

โดย ρ คือ ความหนาแน่น

t คือ เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\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) [1]

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

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

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

โดย p คือ ความดัน

τ คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress)

S_M คือ เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ (Momentum source terms)

2.2.1.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถสรุปได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหลจะเท่ากับอัตราการเพิ่มความร้อนสุทธิไปยังอนุภาคของไหลรวมกับอัตราของงานสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคของไหล” สามารถเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังสมการที่ (2.5) [1]

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

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-สโตกส์เป็นสมการควบคุมพื้นฐานสำหรับของไหลหนืดได้นำกฎข้อที่สองของนิวตันมาประยุกต์ใช้ซึ่งรูปแบบการไหลสำหรับของไหลต่าง ๆ นั้น ความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stress) เป็นฟังก์ชันของอัตราการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) หรืออัตราความเครียด (Strain rate) สำหรับกรณีของไหลประเภทนิวโตเนียน (Newtonian fluids) ความเค้นเนื่องจากความหนืดจะแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยสโตกส์ได้เสนอความเค้นเนื่องจากความหนืดดังต่อไปนี้ [2]

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการความเค้นเนื่องจากความหนืด (2.6) ถึง (2.11) นำไปแทนในสมการอนุรักษ์กโมเมนตัมจะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ในระบบสามมิติดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง :

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

สมการโมเมนตัม :

แกน x :

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

แกน y :

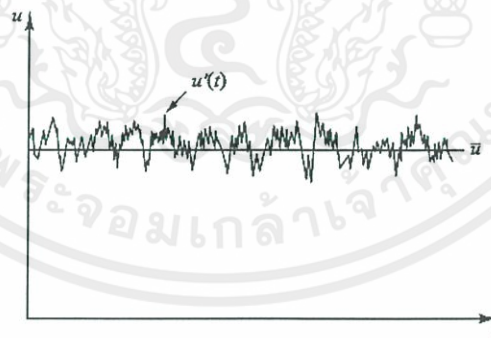
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla \cdot \vec{v}) + S_{My} \quad (2.14)$$

แกน z :

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

2.3 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the turbulent flow)

1. การไหลแบบปั่นป่วนมีความไม่คงตัวสูง (Highly Unsteady) โดยคุณสมบัติการไหลเป็นฟังก์ชันของเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน [2]

2. การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะไม่ปกติ (Irregularity) จะใช้วิธีทางสถิติ (Statistical) ในการช่วยหาผลเฉลยแบบแม่นยำเนื่องจากมีความไม่สม่ำเสมอของการไหล

3. การแพร่กระจาย (Diffusivity) การไหลแบบปั่นป่วนต้องแสดงลักษณะการแพร่กระจาย และลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัม 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) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้ทรัพยากรในการคำนวณมากซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาสมการเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณเฉพาะการหมุนวนขนาดใหญ่ส่วนการหมุนวนขนาดเล็กจะทำการจำลองขึ้นมาวิธีนี้เรียกว่าการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation: LES) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณก็ยังสิ้นเปลืองทรัพยากรอยู่ดี

จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการพัฒนาสมการในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนโดยวิธีทางสถิติซึ่งเป็นการเพิ่มระดับการจำลองให้มากขึ้นแต่วิธีนี้จะมองค้ประกอบความเร็วแกว่งที่อยู่ในทอมความเค้น-เรย์โรลด์ (Reynolds Stress) เรียกสมการนี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS) [3]

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) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่

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

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

สำหรับการแยกเรย์โนลด์ของความดัน เวกเตอร์ความเร็วและองค์ประกอบความเร็วของแกน x y และ z เป็นดังสมการต่อไปนี้

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

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

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

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

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

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

สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้คือ :

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

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้ที่ความหนืดคงที่คือ :

แกน x :

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกน y :

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

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)

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

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

เป็นแบบจำลองปั่นป่วนที่มีประสิทธิภาพและมีความซับซ้อนในการคำนวณไม่มาก จนเกินไปจึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ภาคอุตสาหกรรมและในงานวิจัยซึ่งแบบจำลองนี้ได้มีการพัฒนาและปรับแก้ให้มีการทำนายที่มีความแม่นยำและหลากหลายมากขึ้นในปัจจุบันนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลองได้แก่ Standard k-epsilon RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon [4]

2.3.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ขึ้นอยู่กับสมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) ได้มาจากสมการแม่นยำ (Exact equation) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ได้มาจากเหตุผลทางฟิสิกส์ โดยแบบจำลองความปั่นป่วนนี้มีสมมติฐานคือเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบ (Fully turbulent) และทำให้ผลกระทบที่เกิดจากความหนืดของโมเลกุลสามารถละทิ้งได้ [1,4]

- 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)

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.35)$$

- 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)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ M_t คือตัวเลขความปั่นป่วนเป็นดั่งสมการ (2.38)

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

โดยที่ a คือความเร็วเสียง

- แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน

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

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

- ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

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

2.3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ได้มีการพิสูจน์ด้วยเทคนิคทางสถิติโดยมีความคล้ายกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon แต่มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นดังต่อไปนี้ [1,4]

- มีการเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณของระบบการไหลที่มีความเครียดอย่างรวดเร็วในสมการการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε)

- มีการปรับปรุงการคำนวณระบบการไหลที่มีลักษณะหมุนวนให้มีความถูกต้องมากขึ้น

- แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon เหมาะสมกับระบบที่มีตัวเลขเรย์โนลด์สูงแต่แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon มีการเพิ่มความสามารถในการคำนวณความหนืดปั่นป่วนประสิทธิภาพของระบบที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำด้วย

- สมการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon

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

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

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

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

- แบบจำลองความหนืดประสิทธิภาพ

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

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

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

โดย $C_\mu = 0.0845$

- การปรับปรุงการหมุนวน

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

โดย μ_{t0} สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.42) หรือ (2.43) ในกรณีที่ไม่มี การหมุนวน

- ตัวเลขพรีนซ์ทาลประสิทธิภาพย้อนกลับ

α_k และ α_ε คือตัวเลขพรีนซ์ทาลประสิทธิภาพย้อนกลับของสมการ k และ ε ตามลำดับมีสมการคำนวณดังสมการ (2.45)

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

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

- สมการคำนวณ R_ε ในสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน

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

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

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

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 จึงมีประสิทธิภาพในการทำนายการไหลที่มีความเครียดสูงและมีความโค้งของสายการไหลมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน 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 นั้นมีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นโดยมีความสามารถในการทำนายลักษณะกระแสการไหลที่มีความโค้งมากและการหมุนวน อีกทั้งยังสามารถทำนายการไหลที่มีการแยกไหล (Separated flow) การไหลแบบเจ็ต (Jet flow) และรูปแบบการไหลทุติยภูมิ (Secondary flow) ที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย [1,4]

- สมการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu} \varepsilon} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.50)$$

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

- แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน

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

โดย C_μ คำนวณได้จากสมการ (2.52)

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

โดยที่

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

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 ซึ่งมีค่า $A_0 = 4.04$ และ $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$

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

จากสมการ (2.52) จะเห็นได้ว่า C_μ เป็นฟังก์ชันของ 1. อัตราการหมุนและความเครียดเฉื่อย 2. ความเร็วเชิงมุมของระบบที่มีการหมุน 3. สนามความปั่นป่วน (k และ ε) โดยที่ $C_\mu = 0.09$ สำหรับชั้นย่อยเฉื่อยในชั้นขอบเขตสมดุกล

- ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

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

2.4 แบบจำลองเฟสแยก (Discrete Phase Model)

แบบจำลอง Lagrangian discrete phase ในโปรแกรม ANSYS FLUENT [4] มีการคำนวณตามวิธีของ Euler-Lagrangian ซึ่งเฟสของไหล (Continuous phase) สามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีการทำให้มีความต่อเนื่องโดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ ในขณะที่เฟสกระจายตัว (Dispersed phase) มีการคำนวณโดยการติดตามอนุภาคผ่านสนามการไหลที่ได้มีการคำนวณแล้ว ซึ่งเฟสกระจายตัวสามารถแลกเปลี่ยนมวล โมเมนตัมและพลังงานกับเฟสของไหลได้ แบบจำลอง Discrete Phase Model นี้มีความเหมาะสมกับการไหลที่มีสัดส่วนของเฟสกระจายตัวต่อเฟสของไหลต่ำๆ จึงทำให้ไม่คิดผลของการกระทำกันระหว่างอนุภาค

ในการทำนายเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะใช้วิธีผลรวมของการคูณแรงที่กระทำต่ออนุภาคซึ่งถูกเขียนให้อยู่ในกรอบอ้างอิง Lagrangian โดยมีสมการคำนวณดังนี้

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

โดยที่

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (2.55)$$

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

โดยที่

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (2.56)$$

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

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p |\bar{u}_p - \bar{u}|}{\mu} \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองจะกำหนดให้อนุภาคเป็นทรงกลมดั่งนั้นสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) ในโปรแกรม ANSYS FLUENT ใช้สมการคำนวณของ Morsi และ Alexander [5] 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 [4]

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

2.5 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE

ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) เป็นระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อใช้สำหรับกระบวนการคาดเดาและปรับแก้การคำนวณความดันบนกริดที่เหลื่อมกันเนื่องจากไม่มีสมการโดยตรงที่ใช้หาค่าความดันโดยตรงจึงต้องอาศัยการหาค่าความดันผ่านสมการโมเมนตัมแทน ซึ่งระเบียบวิธีนี้ถูกนำเสนอโดย Patankar และ Spalding ในปี ค.ศ. 1972 [3] 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) จะได้ตั้งสมการ (2.62) และ (2.63)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.63)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

เทอม b' แทนความไม่สมดุลเนื่องจากสนามความเร็วคาดเดาไม่เหมาะสม คำนวณสมการที่ (2.78) จะได้สนามการปรับแก้ความดันทั้งสนามการไหล เมื่อทราบสนามการปรับแก้ความดันแล้วจึงหาความดันจริงได้จากสมการที่ (2.63) และองค์ประกอบความเร็วจากสมการที่ (2.73) ถึง (2.76) การตัดเทอม

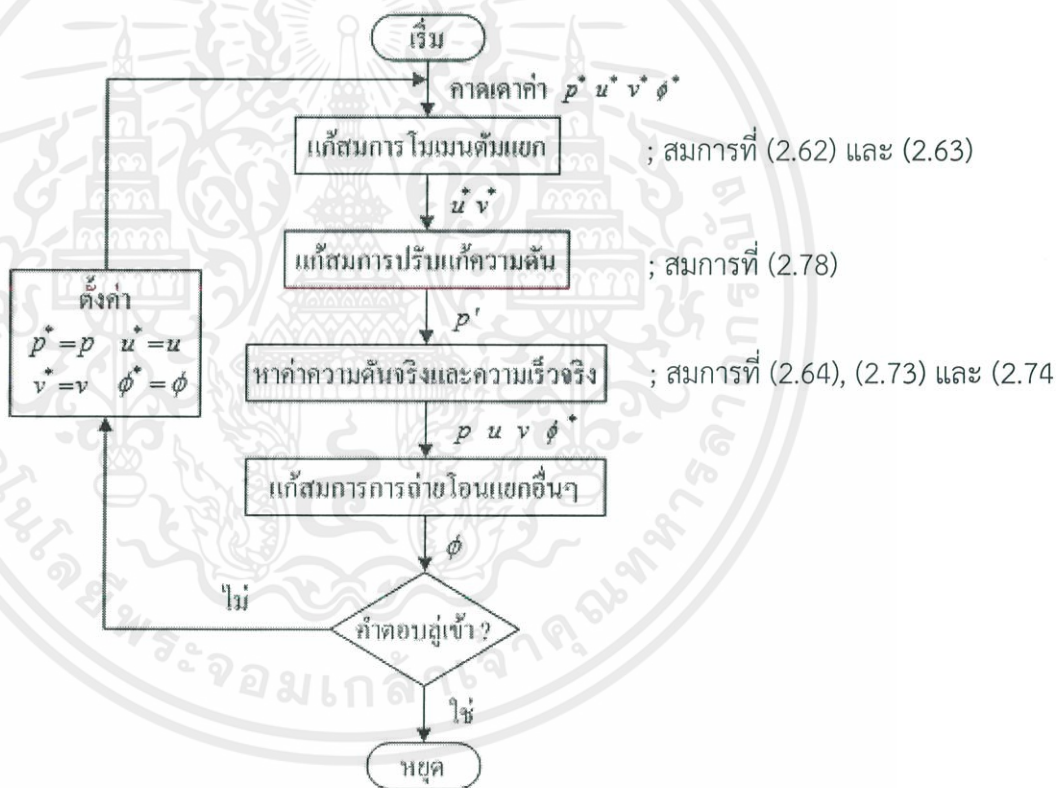
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \tag{2.79}$$

โดยที่ α_p คือ ตัวประกอบใต้การผ่อนปรนของความดัน

การตั้งค่าตัวประกอบใต้การผ่อนปรนที่ถูกต้องจะช่วยประหยัดต้นทุนในการจำลอง การตั้งค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออก แต่ถ้าตั้งค่าต่ำเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออกอย่างช้าๆ ซึ่งการตั้งค่าตัวประกอบใต้การผ่อนปรนจะมีค่าต่างกันขึ้นกับกรณีของการไหล โดยขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนระเบียบวิธีแบบ SIMPLE [3]

2.6 การสึกกร่อนบนผิววัสดุ (Erosion)

การสึกกร่อนที่เกิดจากการสัมผัสกับของไหลเคลื่อนที่โดยประเภทของของไหลสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบเฟสเดียวและแบบหลายเฟสซึ่งทำให้วัสดุของแข็งที่ถูกสัมผัสนั้นเกิดความเสียหายหรือสูญเสียพื้นผิวไปและสามารถเกิดการกัดกร่อนตามมาได้เนื่องจากพื้นผิวหน้าของแข็งที่มีสารเคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อนนั้นหลุดออกไปเนื่องจากการชน โดยการสึกกร่อนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท [6] ได้แก่ การสึกกร่อนบนวัสดุเนื่องจากหยดของเหลว การสึกกร่อนบนวัสดุเนื่องจากฟองแก๊ส การสึกกร่อนบนวัสดุเนื่องจากของเหลวและของแข็ง และการสึกกร่อนบนวัสดุเนื่องจากของแข็ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสึกกร่อนบนผิววัสดุเนื่องจากของแข็งเพื่อนำความรู้ที่ได้มาวิเคราะห์ปัญหาการสึกกร่อนในท่อข้ออ 90 องศา

2.6.1 การสึกกร่อนบนวัสดุเนื่องจากอนุภาคของแข็ง (Solid particle erosion)

เป็นกระบวนการที่เนื้อวัสดุเกิดสูญเสียเนื่องจากการชนของอนุภาคของแข็งโดยเกิดการชนกันซ้ำๆ ซึ่งประสิทธิภาพการสึกกร่อนจะมากหรือน้อยนั้นมีปัจจัยหลักคือพลังงานในการเข้าชนที่ขึ้นกับมวลและความเร็ว ซึ่งสองปัจจัยนี้เป็นความสัมพันธ์ของโมเมนตัม ถ้ายิ่งมีค่ามากก็ยิ่งมีการถ่ายโอนโมเมนตัมไปยังวัตถุที่ถูกชนมากเช่นกันดังตัวอย่างในรูปภาพที่ 2.3 ซึ่งการสึกกร่อนประเภทนี้มักจะเกิดอยู่ในระบบที่อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ไปพร้อมกับแก๊สตัวอย่าง เช่น การชนส่งอนุภาคของแข็งผ่านท่อซึ่งมักจะเกิดการสึกกร่อนบริเวณข้ออ จึงทำให้มีการคิดค้นสมการทำนายการสึกกร่อนเพื่อจะศึกษาพฤติกรรมที่เกิดภายในท่อข้ออซึ่งในงานวิจัยได้มีสมการทำนายการสึกกร่อนดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 การสึกกร่อนบนข้อต่อที่มีการชนส่งเม็ดทราย [6]
อัตราการสึกกร่อนเนื่องจากอนุภาคสามารถวัดได้ที่ผนังมีสมการคำนวณดังนี้

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C(d_p)$ คือ ฟังก์ชันของขนาดอนุภาค α คือ มุมกระทบของอนุภาคกับพื้นผิวผนัง $f(\alpha)$ คือ ฟังก์ชันของมุมกระทบ v คือความเร็วกระทบของอนุภาค $b(v)$ คือ ฟังก์ชันของความเร็วอนุภาค A_{face} คือพื้นที่ของผิวเซลล์ที่ผนัง ค่าของฟังก์ชันเหล่านี้ถูกเสนอโดย Edward และคณะ [7] ซึ่งเป็นสมการคำนวณการสึกกร่อนของโปรแกรม FLUENT โดยอัตราการสึกกร่อนมีหน่วยคือ $kg_{material} / m^2s$ สามารถแปลงเป็นหน่วย $mm/year$ โดยหารด้วยความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เป็นผนัง

ในการทำนายเชิงตัวเลขเทียบกับผลการทดลองจะทำให้อยู่ในหน่วยของ m / kg โดยหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราการสึกกร่อน} = \frac{R_{erosion}}{\dot{m}_p \cdot \rho_w} \quad (2.64)$$

\dot{m}_p คืออัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาค และ ρ_w คือความหนาแน่นผนังท่อ ในการคำนวณหา $f(\alpha)$ จะใช้สมการของ Oka และคณะ [8] ซึ่งได้นำเสนอผลของความแข็งของวัสดุที่ผนังเป็นดังสมการนี้

$$f(\alpha) = (\sin(\alpha))^{n_1} (1 + H_v (1 - \sin(\alpha)))^{n_2} \quad (2.65)$$

โดยที่ $n_1 = 0.71(H_v)^{0.14}$ และ $n_2 = 2.4(H_v)^{-0.94}$

H_v คือ ความแข็งของวัสดุ (GPa)

- สัมประสิทธิ์การคืนสู่สภาพเดิม (Coefficient of restitution)

เมื่ออนุภาคกระทบกับผนังจะเกิดการสูญเสียพลังงานสัมประสิทธิ์การคืนสู่สภาพเดิม (Coefficient of restitution) ซึ่งถูกนำมาใช้อธิบายการสูญเสียพลังงาน แสดงเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบความเร็วของอนุภาคหลังการเข้าชนต่อนองการเข้าชนกับผนัง โดย e_n และ e_t แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ของอนุภาคตลอดการกระทบในทิศทางตั้งฉากและแนวเส้นสัมผัสกับผนัง

$$e_n = \frac{V_{pn2}}{V_{pn1}} \quad (2.66)$$

$$e_t = \frac{V_{pt2}}{V_{pt1}} \quad (2.67)$$

V_{pn} และ V_{pt} เป็นความเร็วอนุภาคในแนวตั้งฉากและแนวสัมผัสตามลำดับ ซึ่งสัญลักษณ์เลข 1 คือ ก่อนเข้าชนและเลข 2 คือหลังชนกับผนัง ซึ่งสัมประสิทธิ์นี้ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าไม่มีการสูญเสียโมเมนตัมระหว่างที่ปะทะและถ้ามีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงอนุภาคสูญเสียโมเมนตัมทั้งหมดหลังจากมีการเข้าชน โมเดลการสะท้อนระหว่างอนุภาคกับผนังมีความสำคัญมากใน

การจำลองการสึกกร่อน [9] จึงมีผู้ที่เสนอความสัมพันธ์สำหรับสัมประสิทธิ์ของการคืบสู่สภาพเดิมโดยมีพื้นฐานจากคุณลักษณะของอนุภาคและภาวะการเข้าชน โดย Grant และ Tabakoff [10] เป็นหนึ่งในผู้ที่คิดค้นสัมประสิทธิ์เหล่านี้ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีสมการดังต่อไปนี้

$$e_n = 0.993 - 1.76\alpha + 1.56\alpha^2 - 0.49\alpha^3 \quad (2.68)$$

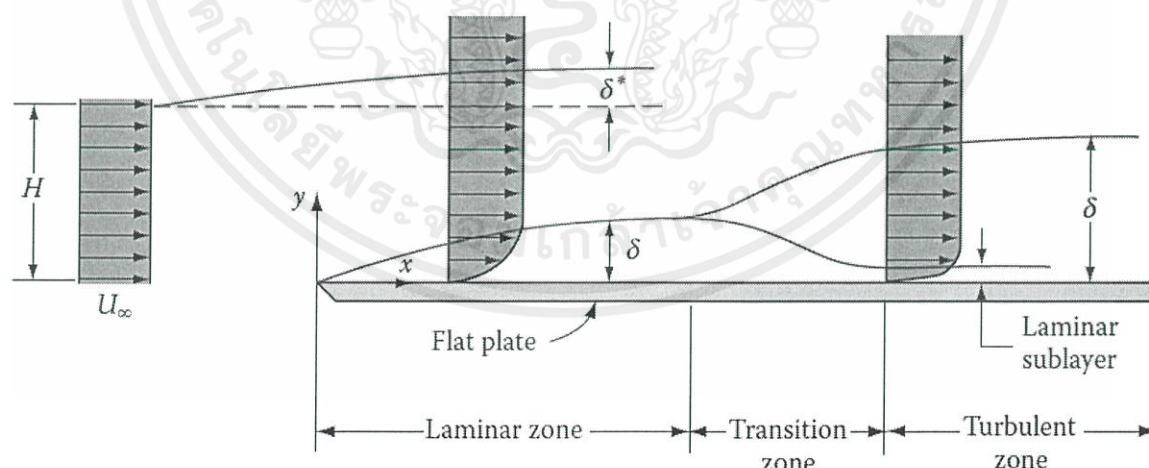
$$e_t = 0.998 - 1.66\alpha + 2.11\alpha^2 - 0.67\alpha^3 \quad (2.69)$$

2.7 การไหลผ่านวัตถุจม (Flow over immersed bodies)

ในงานวิจัยนี้ของไหลจะไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกซึ่งทำให้เกิดชั้นขอบเขตผิวทรงกระบอกและส่งผลต่อความดันที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการไหลลักษณะดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับข้อกังขาหลักการดังต่อไปนี้

2.7.1 การโตขึ้นของชั้นขอบเขต(Boundary-layer growth)[11]

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



รูปที่ 2.4 การโตขึ้นของชั้นขอบเขตตามแนวแผ่นเรียบ [11]

จากรูปที่ 2.4 ความหนาของชั้นขอบเขตเพิ่มขึ้นตามระยะทางของแผ่นเรียบและสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณด้วยกันได้แก่บริเวณราบเรียบ (Laminar zone) ที่ด้านหน้าของแผ่นเรียบต่อมาเป็นบริเวณผสม (Transition zone) และสุดท้ายเป็นบริเวณปั่นป่วน (Turbulent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

zone) ซึ่งยังคงปรากฏชั้นย่อยหนืด (Laminar sublayer) อยู่เนื่องจากความเร็วตามผนังมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาที่ความหนาแทนที่ (Displacement thickness, δ^*) ซึ่งกล่าวถึงการแทนที่ของการไหลภายนอกมีสาเหตุมาจากการโตขึ้นของชั้นขอบเขตหรืออีกนัยหนึ่งคือการไหลต้องถูกแทนที่ที่เป็นปริมาณ δ^* เพื่อเป็นการชดเชยเนื่องด้วยเหตุผลของสมการอนุกรมมวล (Continuity equation) ซึ่งกำหนดให้ U_∞ คือความเร็วต้นทางและพื้นที่การไหลสำหรับความสูงที่ไม่ได้ถูกรบกวนมีค่าเท่ากับ H และมีความกว้างในแนวแกนพุ่งเข้ากระดาดเท่ากับ 1 หน่วย และนำสมการอนุกรมมวลมาประยุกต์ใช้กับการไหลได้เป็นดังนี้คือ

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

สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$U_\infty H = U_\infty \delta^* + U_\infty (H - \delta) + \int_0^\delta V_x dy \quad (2.70)$$

บนแผ่นเรียบนี้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเสียดทานของผนังกับของไหล ในส่วนของบริเวณราบเรียบความเค้นเฉือนผนังลดลงตามระยะทางและในส่วนของบริเวณปั่นป่วนความเค้นเฉือนผนังจะมากกว่าในบริเวณราบเรียบและก็จะลดลงตามระยะทางเช่นกันแต่จะลดลงช้ากว่าในบริเวณราบเรียบมากๆ ในกรณีของการไหลบนแผ่นเรียบสามารถหาความหนาชั้นขอบเขตของบริเวณราบเรียบได้ดังสมการ

$$\delta = \frac{5.0}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (2.71)$$

โดยที่ $\text{Re}_x = \rho U_\infty x / \mu$ และ x คือระยะทางตามแผ่นเรียบ

นอกจากนี้ความหนาแทนที่ของบริเวณราบเรียบหาได้จากสมการ

$$\delta^* = \frac{1.73x}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (2.72)$$

และแรงต้านทานการเคลื่อนที่กระทำบนแผ่นเรียบในทิศทางของการไหลของการไหลแบบราบเรียบหาได้จากสมการ

$$D_f = \frac{0.664b\rho U_\infty^2 x}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ b คือความกว้างของแผ่นเรียบ

ในกรณีของการไหลบนแผ่นเรียบสามารถหาความหนาชั้นขอบเขตของบริเวณปั่นป่วนได้ดังสมการ

$$\delta = \frac{0.37x}{(\text{Re}_x)^{1/5}} \quad (2.74)$$

นอกจากนี้ความหนาแทนที่ของบริเวณปั่นป่วนหาได้จากสมการ

$$\delta^* = \frac{0.046x}{(\text{Re}_x)^{1/5}} \quad (2.75)$$

และแรงต้านทานการเคลื่อนที่กระทำบนแผ่นเรียบในทิศทางของการไหลของการไหลแบบปั่นป่วนหาได้จากสมการ

$$D_f = \frac{0.036b\rho U_\infty^2 x}{(\text{Re}_x)^{1/5}} \quad (2.76)$$

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

$$C_D = \frac{D_f}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (2.77)$$

และ

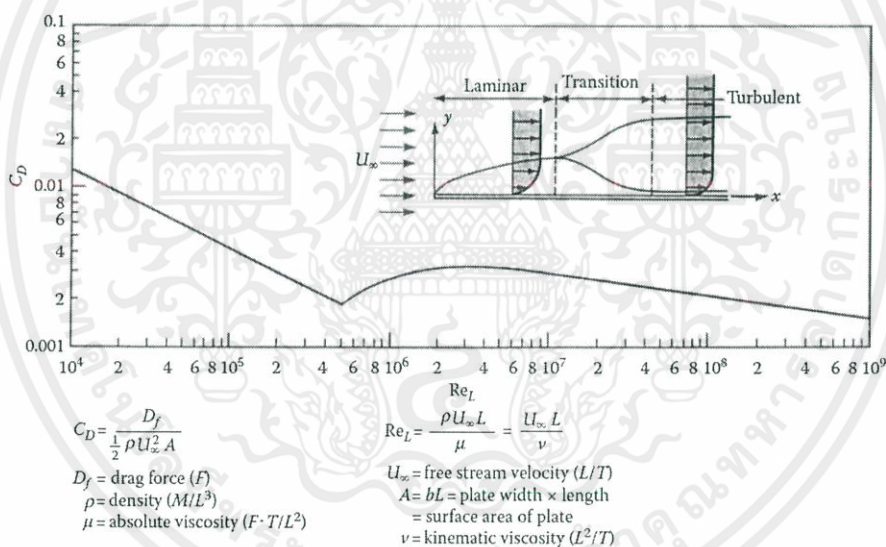
$$\text{Re} = \frac{\rho U_\infty D}{\mu} \quad (2.78)$$

โดยที่ D_f คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ ρ คือ ความหนาแน่นของไหล μ คือ ความหนืดของไหล U_∞ คือ ความเร็วกระแสอิสระ A คือ พื้นที่ด้านหน้าที่ถูกสัมผัส D คือ ขนาดลักษณะเฉพาะของวัตถุ

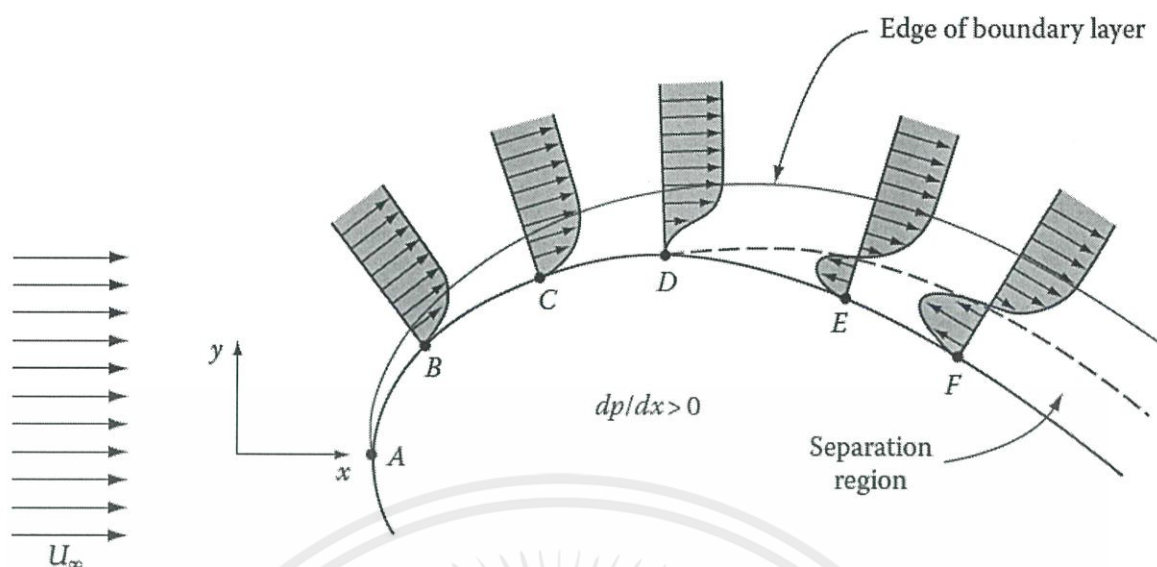
โดยตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่กับตัวเลขเรย์โนลด์เนื่องจากการไหลบนแผ่นเรียบเป็นดังรูปที่ 2.5

2.7.2 การแยกไหล(Separation) [11]

พฤติกรรมของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวโค้งดังรูปที่ 2.6 กำหนดให้พื้นผิวอยู่นิ่งและความเร็วกระแสอิสระ (Free-stream velocity) มีค่าเท่ากับ U_∞ เมื่อพิจารณาจุด A ความเร็วที่ตั้งฉากกับพื้นผิวมีค่าเท่ากับศูนย์ จุดนี้เรียกว่าจุดหยุดนิ่ง(Stagnation point) และความดันที่วัดได้อยู่ในรูปของความดันหยุดนิ่ง(Stagnation pressure) จากนั้นชั้นขอบเขตเริ่มมีการโตขึ้นจากจุดนี้ เมื่อพิจารณาที่จุด B และ C ชั้นขอบเขตจุดนี้ยังคงโตอย่างต่อเนื่องเมื่อพิจารณาในส่วนด้านท้ายของจุด D เป็นต้นไปความดันจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางการเคลื่อนที่ซึ่งอนุภาคของไหลจะเคลื่อนที่เข้าสู่ผลของการชะลอนี้เนื่องจากเกรเดียนท์ ความดันย้อนกลับ(Adverse pressure gradient)หรือเกรเดียนท์ความดันเป็นบวก(Positive pressure gradient) เกิดการพัฒนาขึ้น เมื่อมีการลดลงของพลังงานจลน์มาก บริเวณการไหลย้อนกลับ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่กับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลบนแผ่นเรียบ [11]



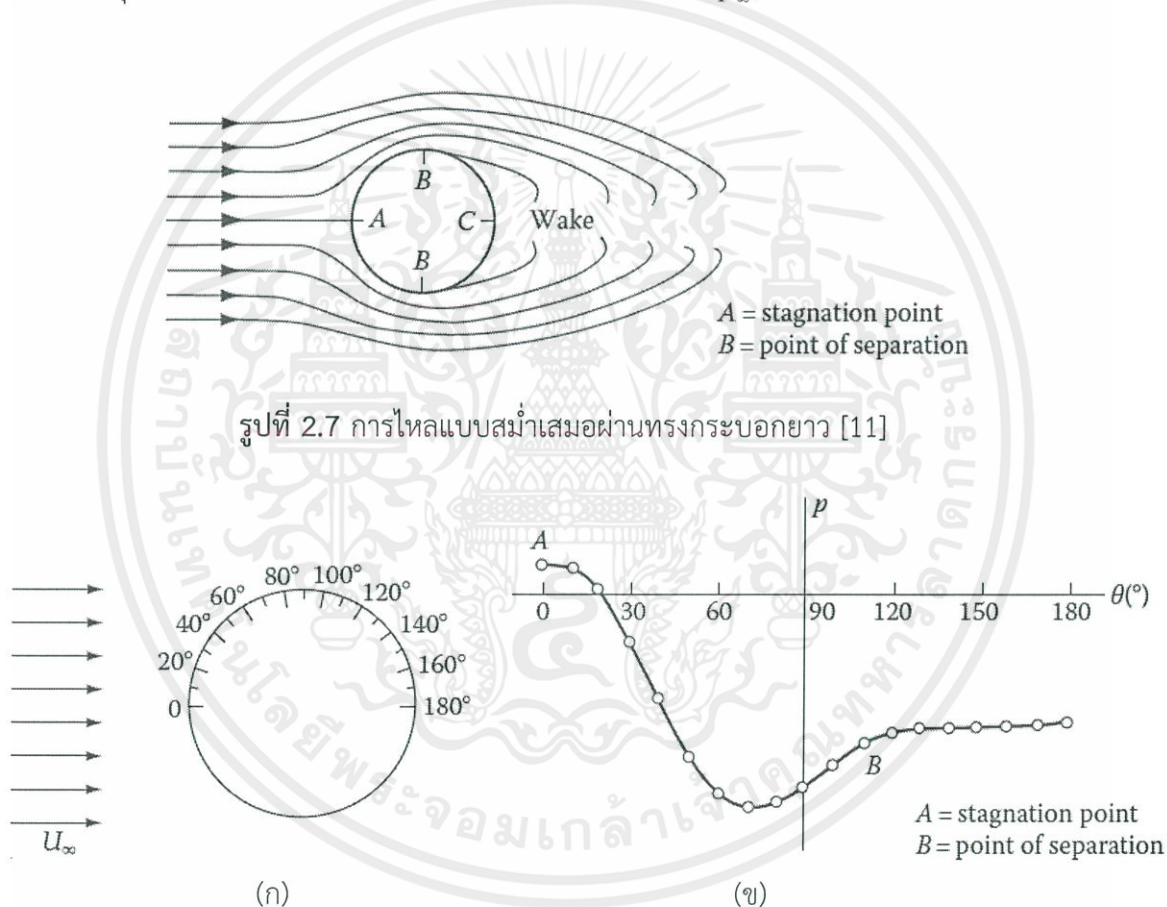
รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลผ่านพื้นผิวโค้ง [11]

อาจจะก่อตัวขึ้นได้ทำให้การกระจายตัวของความเร็วเกิดขึ้นดังจุด 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)

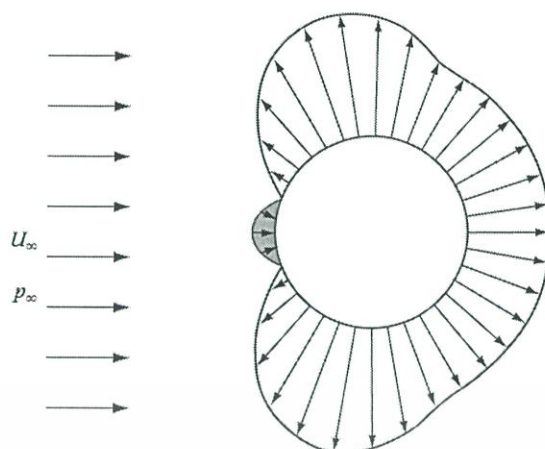
2.7.3 การต้านทานการเคลื่อนที่บนวัตถุในระบบ 2 มิติ [11]

การต้านทานการเคลื่อนที่เป็นองค์ประกอบของแรงที่กระทำบนวัตถุโดยมีทิศทางขนานไปกับทิศทางของการเคลื่อนที่ ในที่นี้จะกล่าวถึงทรงกระบอกยาวที่จมอยู่ในการไหลแบบสม่ำเสมอด้วยความเร็ว U_∞ เมื่อพิจารณาการไหลรอบผ่านทรงกระบอกจะเกิดกระแสการไหลดังรูปที่ 2.6 จุด A เป็นจุดหยุดนิ่งและจุด B เป็นจุดของการแยกไหล เมื่อเลยจุด B ไปที่ปลายทางด้านหลังของทรงกระบอกจะเป็นบริเวณของการแยกไหลซึ่งเกิดการหมุนวน (Wake) ขึ้น การแยกไหลที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุจากการเกิดเกรเดียนต์ความดันย้อนกลับที่ก่อตัวขึ้น เนื่องจากการไหลในธรรมชาตินั้นมีความซับซ้อนทำให้การกระจายตัวของความเร็วบนทุกจุดของพื้นผิวทรงกระบอกไม่สามารถหาได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ได้ เพื่อที่จะหาการกระจายตัวของความดันบนพื้นผิวทรงกระบอกนี้ ดังนั้นการทดลองจึงมีความจำเป็นที่จะนำมาใช้เพื่อศึกษาการกระจายตัวดังกล่าว ซึ่งการทดลองได้ทำการติดตั้งตัววัดความสถิต (Static pressure) ไว้บนผิวทรงกระบอกโดยทำการวัดทุกๆ 10 องศาโดยให้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.12 พบว่าจุด A เป็นจุดหยุดนิ่งเนื่องจากความดันที่จุดนี้มากกว่าความดันอ้างอิงหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) และความเร็วที่จุดนี้เป็นศูนย์เมื่อวัดความดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามองศาที่เพิ่มขึ้น ความดันจะต่ำลงเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่งองศาที่ 70° เกิดความดันต่ำสุดและความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งนี้ เมื่อพิจารณาตำแหน่งองศาที่ 120° การแยกไหลจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้ เนื่องจากการสูญเสียโมเมนตัมมากเกินไปที่ใกล้กับผนังในชั้นขอบเขตความพยายามที่จะเคลื่อนที่ไปยังปลายทางจึงถูกต้านด้วยความดันที่เพิ่มขึ้นหรือที่เรียกว่าเกรเดียนต์ความดันย้อนกลับ ซึ่งบริเวณการแยกไหลนี้ความดันมีค่าเกือบจะเท่ากับตำแหน่งองศาที่ 120° ซึ่งรูปที่ 2.13 เป็นลักษณะของการกระจายตัวของความดันโดยความยาวของลูกศรคือขนาดของความดันบนพื้นผิวของวัตถุและทิศทางชี้เข้าหาวัตถุบ่งบอกถึงความดันที่บนผิวมากกว่าความดันที่ต้นทาง (p_∞)



รูปที่ 2.8 การวัดค่าความดันบนผิวทรงกระบอก (ก) ตำแหน่งการวัดความดันบนผิวของทรงกระบอกที่จมอยู่ในการไหลแบบสมำเสมอ (ข) ค่าความดันบนพื้นผิวทรงกระบอกที่ตำแหน่งองศาต่างๆ [11]



รูปที่ 2.9 การกระจายตัวของความดันบนพื้นผิวของทรงกระบอกที่จมอยู่ในการไหลแบบสม่ำเสมอ [11]

จากพฤติกรรมการไหลผ่านวัตถุดังกล่าวสามารถแบ่งประเภทของแรงต้านการเคลื่อนที่ได้เป็น 2 ลักษณะ [12] ได้แก่ 1. เนื่องจากความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress, τ_w) ถูกเรียกว่าการต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเสียดทานบนพื้นผิว (Skin friction drag) 2. เนื่องจากความดันเรียกว่าการต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความดัน (Pressure drag) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Form drag เนื่องจากขึ้นอยู่กับรูปแบบหรือรูปร่างของวัตถุ เมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านวัตถุแล้วเกิดการต้านการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 2 ลักษณะสามารถเขียนรวมขอสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่รวม (Total drag coefficient) และแรงต้านการเคลื่อนที่รวม (Total drag force) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (2.79) และ (2.82) ตามลำดับ

$$C_D = C_{D,friction} + C_{D,pressure} \quad (2.79)$$

โดย

$$C_{D,friction} = \frac{D_{f,friction}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (2.80)$$

และ

$$C_{D,pressure} = \frac{D_{f,pressure}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (2.81)$$

กำหนดให้ A มีพื้นที่เท่ากัน

$$D_f = D_{f,friction} + D_{f,pressure} \quad (2.82)$$

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 มีกระทบน้อยสำหรับตัวเลขเรย์โนลด์สูงๆสำหรับที่มีลักษณะทุ่(Blunt bodies) ซึ่งในกรณีของตัวเลขเรย์โนลด์สูงๆ Pressure drag มีบทบาทสำคัญมากกว่า

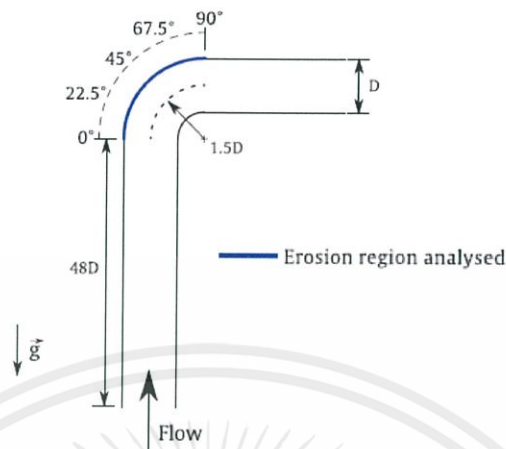
เมื่อพิจารณา Pressure drag ซึ่งแปรผันตรงกับพื้นที่ด้านหน้าของวัตถุและแปรผันตรงกับผลต่างระหว่างความดันด้านหน้าและด้านหลังของวัตถุ จึงมีค่ามากสำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีลักษณะทุ่(Blunt bodies) และมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีสำหรับการไหลผ่านแผ่นเรียบที่วางขนาน อีกทั้ง Pressure drag มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งเมื่อความเร็วของของไหลมีค่าสูงเกินกว่าที่ของไหลจะสามารถเกาะตามขอบของวัตถุได้ ดังนั้นของไหลจึงเกิดการแยกไหลจากวัตถุและสร้างบริเวณความดันต่ำมากๆไว้ด้านหลังวัตถุซึ่งกรณีนี้ทำให้เกิดผลต่างของความดันอย่างมากระหว่างด้านหลังและด้านหน้าของวัตถุ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การศึกษาเชิงตัวเลขของอัตราส่วนมวลที่มีผลกระทบต่อการศึกษากร่อนช่องอ

งานวิจัยของ Carlos และคณะ [13] ได้ศึกษาการไหล 2 เฟสคือเฟสแก๊สและเฟสของแข็งที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษากร่อนบริเวณท่อช่องอ 90 องศาที่อัตราส่วนเชิงมวลของอนุภาคของแข็งต่อมวลของแก๊ส (ϕ) เท่ากับ 0.013, 0.25, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในที่นี้กำหนดให้เฟสแก๊สเป็นอากาศและเฟสของแข็งคือเม็ดทราย 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

$\phi \gg 1$ ความหมายคือนอกจากเฟสแก๊สและเฟสของแข็งมีอิทธิพลต่อกันแล้วแต่ยังมีผลของการกระทำกันระหว่างเฟสของแข็งกันเองอีกด้วย โดยมีการศึกษาตำแหน่งการสึกกร่อนดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.10 บริเวณข้ออที่ศึกษา [13]

จากงานวิจัยสรุปได้ว่า

1. ที่ $\phi = 0.013$ ผลของอัตราความควบคู่ทั้ง 3 แบบที่ตำแหน่ง 0-90 องศาให้ผลการสึกกร่อนเหมือนกัน
2. ที่ $\phi = 0.25$ ผลของอัตราความควบคู่ 1 ทางและ 2 ทางให้ผลการสึกกร่อนที่ใกล้เคียงกันมากแต่อัตราความควบคู่ 4 ทางให้พีคการสึกกร่อนที่ลดลงอย่างชัดเจนแสดงว่าผลของการกระทำกันระหว่างอนุภาคของแข็งส่งผลต่อการสึกกร่อน
3. ที่ $\phi = 0.25$ และ $\phi = 1.0$ ผลของอัตราความควบคู่ 2 ทางให้ผลที่เหมือนกันแสดงว่าอนุภาคนั้นไม่ได้มีความสำคัญที่จะส่งผลต่อการไหลของแก๊สเพียงพอที่จะเป็นสาเหตุให้มีการสึกกร่อนเปลี่ยนแปลงไป แต่ผลของอัตราความควบคู่ 4 ทางสามารถทำให้พีคการสึกกร่อนสูงสุดสามารถลดลงได้
4. ผลของอัตราความควบคู่ 4 ทางที่ $\phi = 0.013, 0.25, 0.5, 1.0$ และ 1.5 พบว่าเมื่อ ϕ เพิ่มขึ้นแสดงอย่างเห็นได้ชัดว่าให้พีคการสึกกร่อนสูงสุดมีค่าลดลงเนื่องจากผลของการกระทำกันระหว่างอนุภาคของแข็งทำให้มีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันและทำให้อนุภาคของแข็งไม่ชนกับผนังท่อโดยตรงตรงตำแหน่งองศาการสึกกร่อนสูงสุดทำให้ช่วยลดการสึกกร่อนได้แต่ก็ทำให้อนุภาคหลังการชนเคลื่อนที่ไปในทิศทางออกของท่อมากขึ้นจึงส่งผลให้ช่วง 60-90 องศาการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม ϕ

2. การศึกษาผลการทดลองของตำแหน่งการสีกกร่อนสูงสุดที่ทำให้เกิดความเสียหายในท่อข้องอ

Mazumder และคณะ [14] ได้ศึกษาการสีกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งบริเวณผนังท่อข้องอซึ่งท่อเป็นอะลูมิเนียมโดยมีของไหลเฟสเดียวคือแก๊สเป็นตัวพาอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ภายในท่อแนวตั้งโดยมีความเร็วของของไหลเท่ากับ 34.1 m/s และในกรณีของการไหลแบบหลายเฟสภายในท่อแนวอนและแนวตั้งที่ความเร็วของแก๊สเท่ากับ 34.1 m/s, 27.4 m/s, 18.9 m/s และ 9.8 m/s และความเร็วของของเหลวเท่ากับ 0.3 m/s และ 0.03 m/s โดยทำการวัดความหนาของผนังท่อที่หายไปและตำแหน่งองศาที่ทำให้เกิดการสีกกร่อนสูงสุดโดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. ในกรณีของการสีกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งโดยที่เป็นของไหลเฟสเดียวเป็นตัวพาให้ผลการทดลองโดยสูญเสียความหนาของผนังท่อมากที่สุดเท่ากับ 42.5 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาการสีกกร่อนเท่ากับ 55 องศา

2. ในกรณีของการสีกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งโดยที่เป็นของไหลแบบหลายเฟสเป็นตัวพาให้ผลการทดลองดังนี้

2.1 ในกรณีความเร็วของเหลวเท่ากับ 0.03 m/s เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้นยิ่งทำให้มีการสีกกร่อนมากขึ้นโดยความเร็วของแก๊สที่ทำให้สูญเสียความหนาของท่อมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 34.1 m/s โดยการไหลในท่อแนวอนมีการสูญเสียความหนาของท่อมากที่สุดเท่ากับ 14.3 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาเท่ากับ 45 องศา แต่การไหลในท่อแนวตั้งเมื่อเทียบกับท่อในแนวอนแล้วให้ผลการสูญเสียความหนาของท่อมากกว่าซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.8 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาเท่ากับ 55 องศา

2.2 ในกรณีความเร็วของเหลวเท่ากับ 0.30 m/s ที่ความเร็วของแก๊สเท่ากับ 34.1 m/s ทำให้สูญเสียความหนาของท่อมากที่สุดเช่นเดียวกันโดยการไหลในท่อแนวอนมีการสูญเสียความหนาของท่อมากที่สุดเท่ากับ 22.3 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาเท่ากับ 45 องศา แต่การไหลในท่อแนวตั้งเมื่อเทียบกับท่อในแนวอนแล้วให้ผลการสูญเสียความหนาของท่อมากกว่าซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.5 ไมโครเมตรที่ตำแหน่งองศาเท่ากับ 55 องศา

จากผลการทดลองของการไหลแบบหลายเฟสพบว่าอิทธิพลของการไหลในท่อแนวอนและแนวตั้งนั้นส่งผลต่อการสีกกร่อนที่แตกต่างกันออกไปซึ่งเมื่อเทียบที่ความเร็วของของเหลวที่เท่ากันแล้ว การไหลในท่อแนวตั้งให้ผลการสีกกร่อนที่สูงกว่าและเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้การสีกกร่อนยิ่งเพิ่มสูงขึ้นด้วยเนื่องจากการไหลร่วมกันระหว่างเฟสแก๊สและของเหลวเป็นมีรูปแบบเป็นวงแหวน (Annular flow) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ (Entrainment) ของเหลวที่ผิวท่อเข้ามาในส่วนองเฟสแก๊สซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคทรายจำนวนมากก็ถูกเหนี่ยวนำเข้ามาในเฟสแก๊สด้วยจึงเป็นเหตุให้อนุภาคที่อยู่ใจกลางของเฟสแก๊สมีความเร็วสูงจึงทำให้เกิดการสีกกร่อนที่ผนังท่อข้องอมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

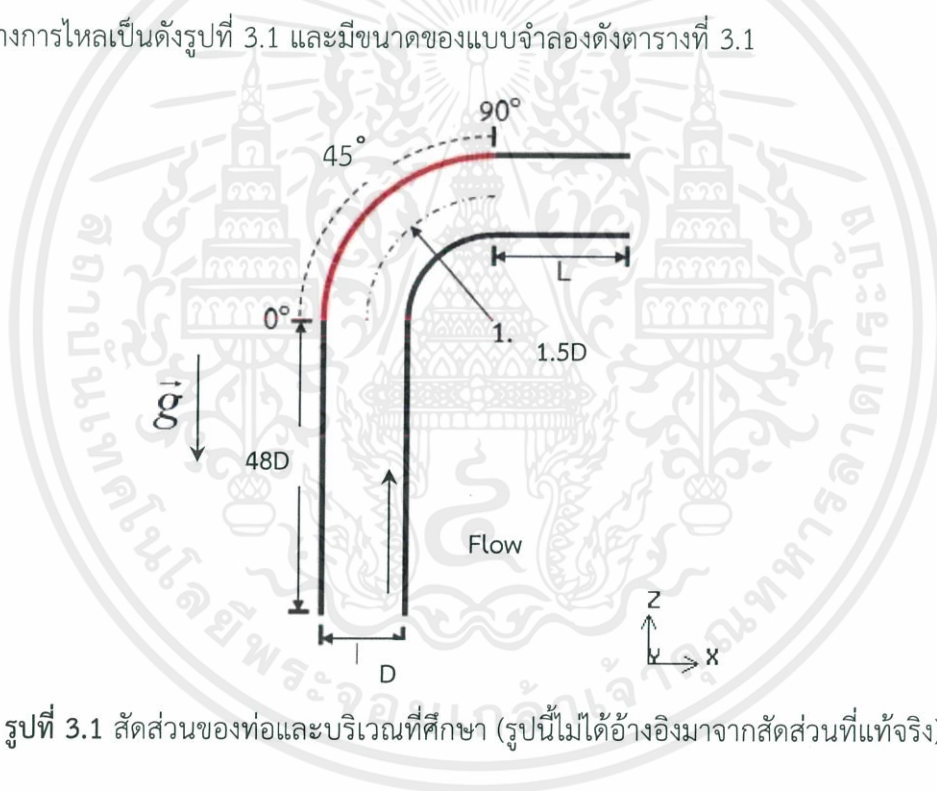
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบเพื่อทำนายการสีกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา ประกอบด้วยขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.1 การสร้างแบบจำลองของท่อข้องอ 90 องศา

การสร้างแบบจำลองของท่อข้องอ 90 องศาในรูปแบบสามมิติโดยใช้โปรแกรม GAMBIT โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Carlos และคณะ [13] ซึ่งแบบจำลองเป็นลักษณะท่อทรงกระบอกพื้นที่หน้าตัดวงกลมโดยมีบริเวณศึกษาการสีกกร่อนแนวช่วงโค้งข้องอ 90 องศา พร้อมทั้งขนาดและมิติศทางการไหลเป็นดังรูปที่ 3.1 และมีขนาดของแบบจำลองดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สัดส่วนของท่อและบริเวณที่ศึกษา (รูปนี้ไม่ได้อ้างอิงมาจากสัดส่วนที่แท้จริง)

ตารางที่ 3.1 ขนาดของท่อที่ใช้ในการจำลอง

ขนาดของท่อ	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D)	25.4
ความยาวท่อทางเข้า (48D)	1,220
ความยาวท่อทางออก (L)	100
รัศมีความโค้งของข้องอ (1.5D)	38.1

จากนั้นทำการแบ่งโดเมนของท่อข้ออ(การตีกริด) เพื่อนำไปคำนวณการไหลภายในท่อและ ทำนายการสีกกร่อนบริเวณข้ออ 90 องศา จากนั้นหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง (Grid independent) ในการวิจัยนี้จะศึกษาจำนวนกริด 6 ขนาดได้แก่ 112,455 321,930 485,100 661,500 970,200 และ 1,660,365 เซลล์

3.2 การทำนายการสีกกร่อนของท่อบริเวณข้ออ 90 องศา

3.2.1 กำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นในการคำนวณเชิงตัวเลข

3.2.1.1 ในงานวิจัยนี้เป็นการไหลแบบสองเฟส ได้แก่ เฟสของไหลและเฟสของแข็ง โดยกำหนดให้ผนังท่อเป็นอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นเท่ากับ $2,700 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีสมบัติของของไหลดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของของไหลและอนุภาคของแข็ง

ประเภทของของไหล	อากาศ
ความหนาแน่นของของไหล	1.225 kg/m^3
ความหนืดของของไหล	$1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
ประเภทของอนุภาคของแข็ง	ทราย
ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง	$2,600 \text{ kg/m}^3$

3.2.1.2 เงื่อนไขขอบเขตของท่อที่กำหนดให้ท่อทางเข้าเป็นความเร็วขาเข้า (Velocity inlet) ท่อทางออกกำหนดเป็นการไหลออก (Outflow) ผนังท่อกำหนดเป็นผนัง (Wall) และความเร็วของอนุภาคของแข็งกับของไหลมีค่าเท่ากับ 34.1 m/s โดยอัตราส่วนมวลของอนุภาคของแข็งต่อมวลของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.013

3.2.2 การศึกษาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

ในขั้นตอนนี้จะคำนวณการไหลของของไหลแบบคงตัวด้วยโปรแกรม FLUENT ที่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon เปรียบเทียบผลการจำลองของจำนวนกริดทั้ง 6 ขนาด โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบความเร็วที่กึ่งกลางท่อตรงตามแนวแกน z ตั้งแต่ทางเข้าท่อจนถึงปลายท่อก่อนถึงท่อข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งอ 90 องศา เพื่อหาจำนวนกริดที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง 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 การศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาร่วมกับงานวิจัยอ้างอิง

จากนั้นนำแบบจำลองที่มีจำนวนกริดที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง มาศึกษาหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมในการทำนายการศึกษาร่วมบริเวณช่องงอ 90 องศา ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 3 แบบได้แก่ Standard k-epsilon RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาร่วมบริเวณช่องงอ 90 องศา กับงานวิจัยของ Carlos และคณะ [13] โดยใช้สมบัติของไหลกับอนุภาคของแข็งและเงื่อนไขขอบเขตเหมือนเดิม โดยมีรูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขของการหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม

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

3.3 การทำนายการสึกกร่อนของท่อบริเวณข้องอ 90 องศาหลังเปลี่ยนแปลงประเภทและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหล

หลังจากที่ได้ศึกษาในหัวข้อที่ 3.2 แล้ว จากนั้นเข้าสู่กระบวนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงประเภทและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตและสมบัติของไหลกับอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม มีลำดับขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงประเภทของอนุภาคของของไหล ซึ่งประกอบไปด้วย ซีเมนต์ ทราย ผงซักฟอก และยิปซั่ม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลการสึกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของอนุภาคของของไหล

อนุภาค	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
ซีเมนต์	15	830
ทราย	182	2,700
ผงซักฟอก	400	700
ยิปซั่ม	720	2,317

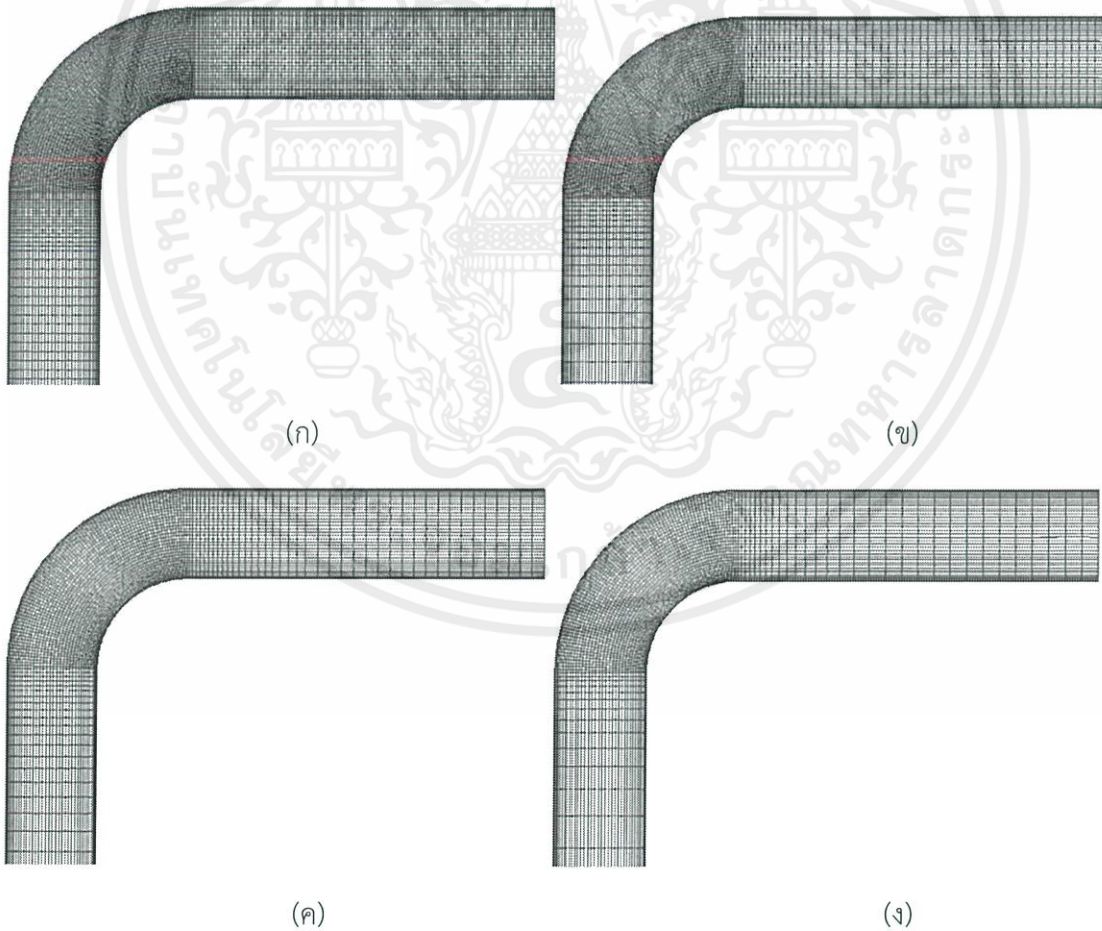
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซีเมนต์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 45 135 405 1,215 1,800 และ 3,645 เพื่อศึกษาผลการสึกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา

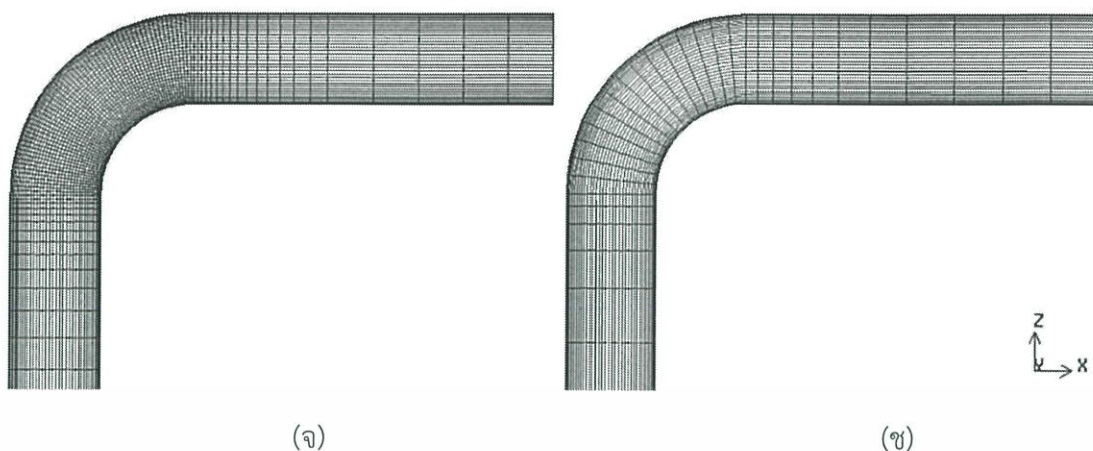
บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1 การศึกษาหาจำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

ในการทำนายผลการจำลองในขั้นต้นจะต้องหาผลเฉลยที่เป็นอิสระต่อกริด (Grid independent) โดยทำการสร้างกริดจำนวนต่างๆ แล้วนำไปใช้ในการจำลองการไหลในโปรแกรมโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณค่าความปั่นป่วนแบบ second order upwind และคำนวณค่าของโมเมนต์กับความดันเป็นแบบ second order upwind โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน standard k-epsilon ในการจำลองการไหล โดยอ้างอิงตามงานวิจัยของ Carlos และคณะ[13] ซึ่งจะใช้จำนวนกริด 6 ขนาด ได้แก่ 112,455 321,930 485,100 661,500 970,200 และ 1,660,365 เซลล์ รูปแบบของกริดเป็นดังรูปที่ 4.1



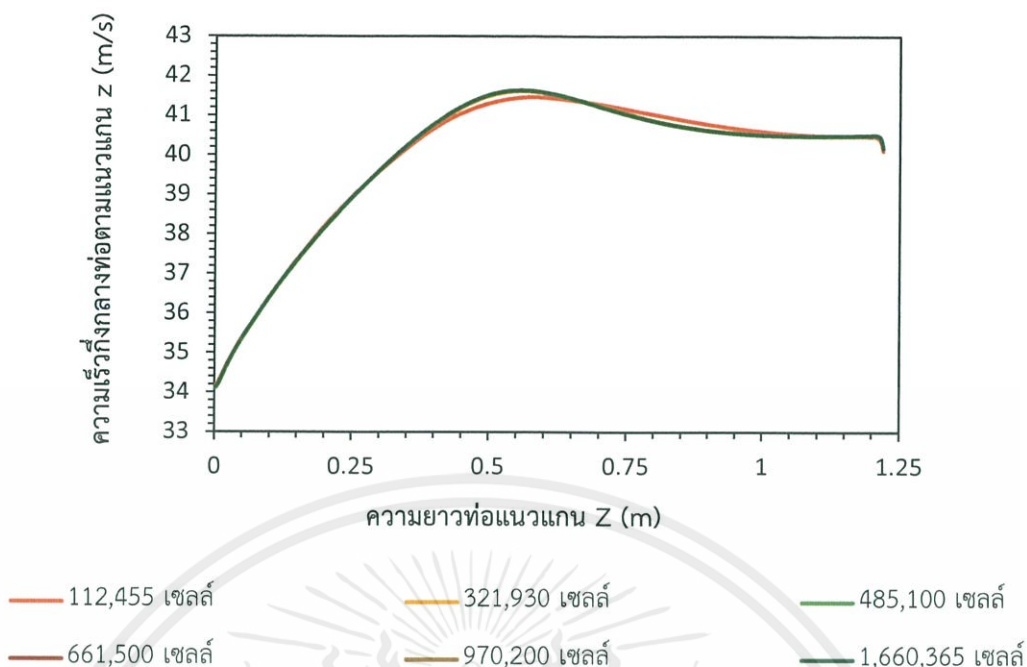


รูปที่ 4.1 แบบจำลองท่อข้องอ 90 องศาที่จำนวนกริดต่างๆ (ก) 1,660,365 เซลล์ (ข) 970,200 เซลล์ (ค) 661,500 เซลล์ (ง) 485,100 เซลล์ (จ) 321,930 เซลล์ (ช) 112,455 เซลล์

จากผลการจำลองของจำนวนกริดทั้ง 6 ขนาดพบว่า เมื่อจำนวนกริดตั้งแต่ 321,930 เซลล์ขึ้นไป ผลของจำนวนกริดที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามระยะแนวแกน z ดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากปริมาณกริดที่เพิ่มขึ้นจะใช้เวลาในการคำนวณผลมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเลือกใช้กริดเริ่มต้นที่ 321,930 เซลล์ จึงเหมาะสมที่จะนำมาจำลองและประยุกต์ใช้กับส่วนอื่นๆในงานวิจัยต่อไป

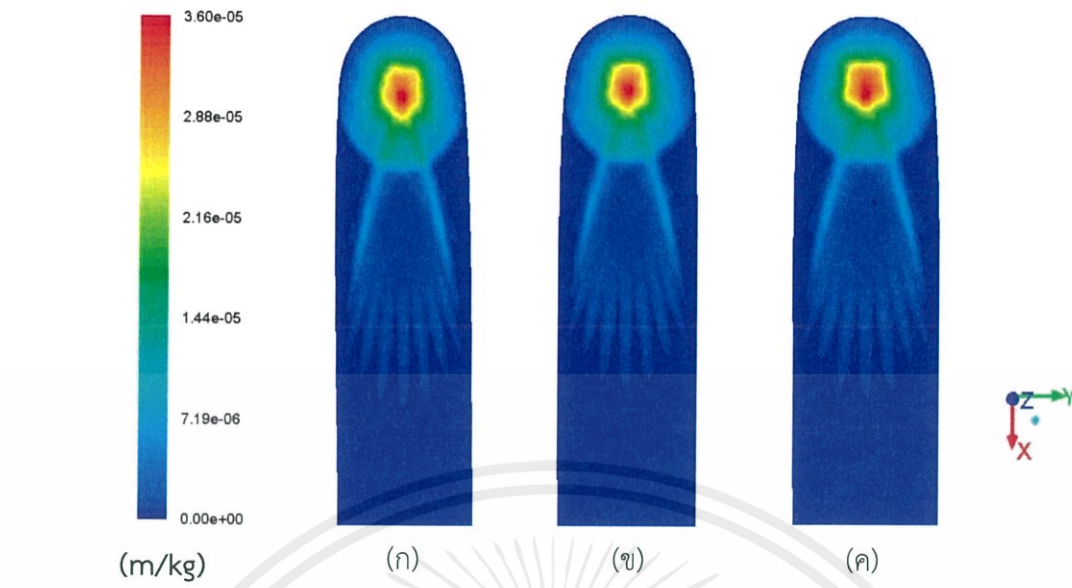
4.2 การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีผลต่อการสีกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอ้างอิง

ในงานวิจัยนี้มีการดำเนินงานภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ 59,295 ซึ่งตัวเลขเรย์โนลด์นี้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ ดังนั้นจึงศึกษาผลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สำหรับคำนวณการไหลดังต่อไปนี้ แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon เพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมในการทำนายการสีกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา ในการจำลองการสีกกร่อนจะอ้างอิงกับงานวิจัยของ Carlos และคณะ [13] โดยใช้จำนวนกริด 321,930 เซลล์ สำหรับการวิเคราะห์ผลการจำลองจะใช้คอนทัวร์ของการสีกกร่อนและองศาของการสีกกร่อน เพื่อเป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน

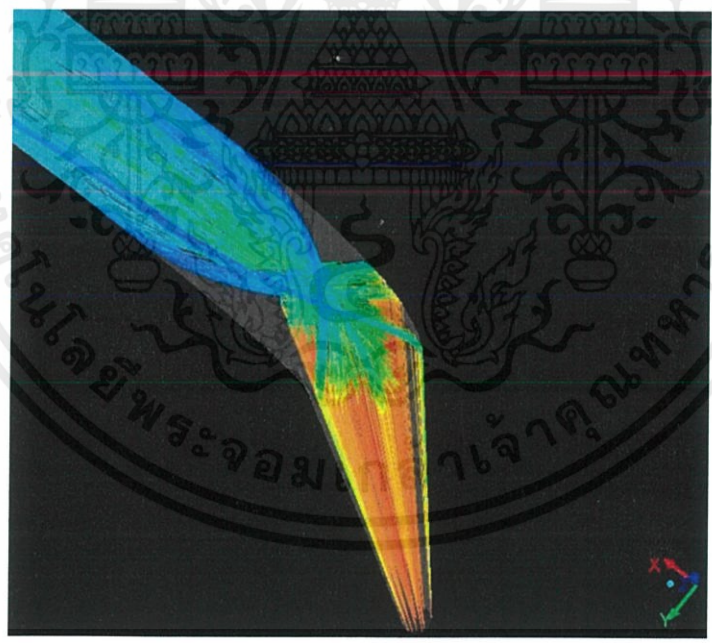


รูปที่ 4.2 ความเร็วกึ่งกลางท่อตามแนวแกน z ตลอดความยาวของท่อตรงของจำนวนกริดต่างๆ

การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการสีกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศาของแต่ละแบบจำลอง ความปั่นป่วนแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 แบบให้ลักษณะคอนทัวร์ที่ใกล้เคียงกันมาก จะเห็นได้ว่าที่กึ่งกลางท่อช่องอ 90 องศาจะเกิดเป็นวงของสีกการสีกกร่อนซึ่งบริเวณที่มีการสีกกร่อนต่ำสุดคือสีน้ำเงินไปจนถึงบริเวณการสีกกร่อนสูงสุดคือสีแดง โดยส่วนมากบริเวณที่กึ่งกลางท่อช่องอ 90 องศา จะมีโอกาสสีกกร่อนจากอนุภาคมาก จากงานวิจัยที่อ้างอิงซึ่งได้ให้ความสำคัญของการวัดการสีกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศาตำแหน่งกึ่งกลางท่อของระนาบ $y=0$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของท่อที่เกิดการสีกกร่อนสูงสุด ดังนั้นการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการสีกกร่อนโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 แบบเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้แบบจำลองทำนายการสีกกร่อนของ Oka และคณะ [8] และผลการทดลอง เป็นดังรูปที่ 4.5

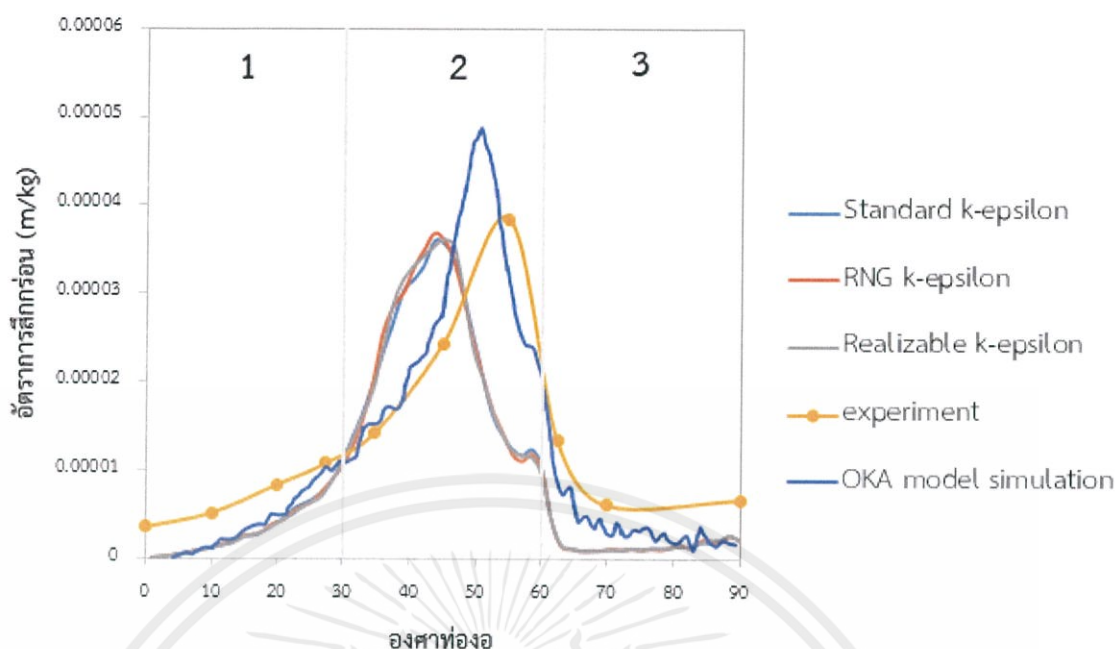


รูปที่ 4.3 คอนทัวร์การสักร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วนต่างๆ (ก) Standard k-epsilon (ข) RNG k-epsilon (ค) Realizable k-epsilon



รูปที่ 4.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้การสีกกร่อนกับองศาห้องอ

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 บริเวณ 0-30 องศา ช่วงที่ 2 บริเวณ 30-60 องศา และช่วงที่ 3 บริเวณ 60-90 องศา จะเห็นว่าในช่วงที่ 1 แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ FLUENT กับ Oka และคณะ[8] ไม่มีค่าเริ่มต้นของการสีกกร่อน แต่ผลการทดลองมีค่าการสีกกร่อนเริ่มต้นที่ตำแหน่ง 0 องศา เนื่องจากแบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนมีพจน์ของ $\sin(\theta)$ ทำให้การทำนายตอนเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าค่าของผลการทดลอง ซึ่งในช่วงที่ 1 แบบจำลองของ FLUENT กับ Oka และคณะ[8] ให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มคล้ายกับผลการทดลอง ในช่วงที่ 2 แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ FLUENT กับ Oka และคณะ[8] ให้ผลการจำลองที่แตกต่างกันดังตารางที่ 4.1 ในช่วงนี้แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ Oka และคณะ[8] ให้ผลการจำลองที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด และในช่วงที่ 3 แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 4 แบบให้แนวโน้มการสีกกร่อนใกล้เคียงกับผลการทดลองแต่แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ Oka และคณะ[8] มีความแม่นยำกว่า โดยแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon มีการปรับแก้สมการคำนวณความหนืดปั่นป่วนกับการหมุนวนและการแยกไหลให้มีความถูกต้องมากขึ้นโดยอาศัยสมการถ่ายโอนได้แก่ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) จึงทำให้ผลการสีกกร่อนมีความแม่นยำสูงกว่า แต่แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ไม่มีการปรับแก้สมการถ่ายโอนให้เหมาะสมกับลักษณะการไหลดังกล่าวจึงทำให้ผลการทำนายการสีกกร่อนที่บริเวณห้องอจึงแม่นยำน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการสีกร่อนกับผลการทดลองเมื่อใช้การทำนายการสีกร่อนของ Oka และคณะ[8] กับ FLUENT ของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน

แบบจำลอง	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	
	ค่าการสีกร่อนสูงสุด	องศาการสีกร่อนสูงสุด
Standard k-epsilon	6.55	20.83
RNG k-epsilon	4.12	20.83
Realizable k-epsilon	6.07	18.06
Oka และคณะ [8]	26.50	7.95

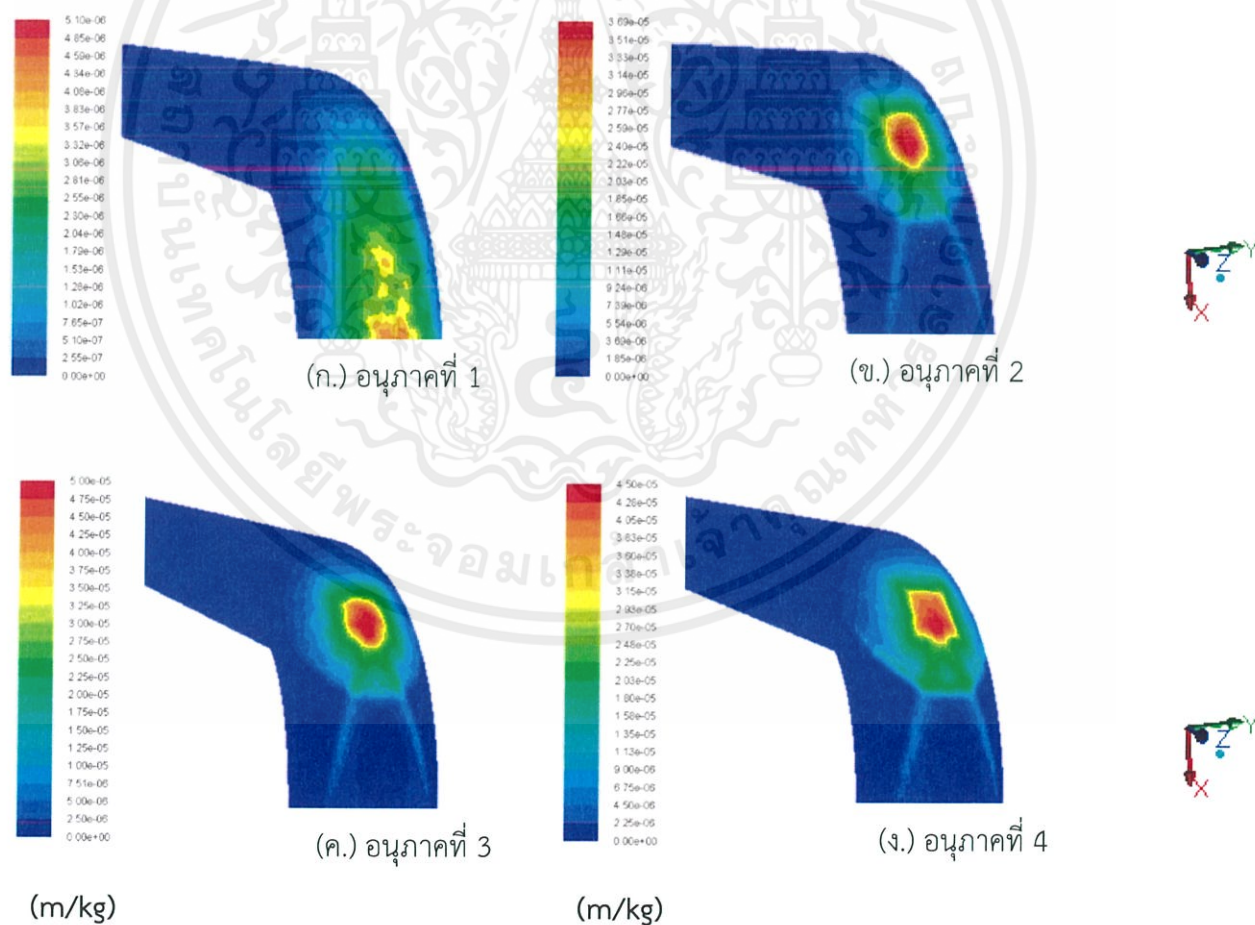
4.3 การศึกษาอิทธิพลของชนิดของอนุภาคที่มีผลต่อการสีกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา

ในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงประเภทของอนุภาคของของไหลสามารถส่งผลต่อการสีกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา โดยใช้นาฬเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า รัศมีความโค้งของท่อช่องอ และภาวะการดำเนินงานแบบเดียวกับงานวิจัยของ Carlos และคณะ [13] และการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ที่ได้ศึกษาในตอนต้นซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมนำมาใช้ทำนายการสีกร่อน โดยประเภทของอนุภาคของของไหลจะประกอบไปด้วย ซีเมนต์ ทราย ผงซักฟอก และยิปซัม ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกัน สำหรับการทำนายการสีกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา จะวิเคราะห์โดยใช้ค่าอัตราการสีกร่อนในรูปแบบของคอนทิวรัลดังต่อไปนี้

จากผลการจำลองพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงประเภทของอนุภาคของของไหลจะส่งผลให้ค่าการสีกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศาเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่าการสีกร่อนของอนุภาคขนาดใหญ่มีค่าสูงกว่าอนุภาคขนาดเล็กดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีโมเมนตัมสูงกว่า และอนุภาคขนาดใหญ่มีมุมการเกิดการสีกร่อนสูงสุดต่ำกว่าอนุภาคขนาดเล็กเนื่องจากความเฉื่อยของวัตถุที่พยายามรักษาสภาพการเคลื่อนที่ ดังนั้นการที่วัตถุมีมวลมากๆ ซึ่งวัตถุนั้นจะมีความเฉื่อยมากทำให้การเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ทำได้ยากกว่าวัตถุที่มีมวลน้อย อีกทั้งยังพบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับค่าการสีกร่อนของอนุภาคต่างชนิดกันจะมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการสีกกร่อนเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดของอนุภาคของของไหลที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกัน

อนุภาคของแข็ง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความเร็ว (m/s)	ตัวเลขเรย์โนลด์	ค่าการสีกกร่อนสูงสุด (m/kg)	องศาการสีกกร่อนสูงสุด ($^\circ$)
1.ซีเมนต์	15	830	34.1	35	4.88×10^{-6}	90
2.ทราย	182	2,700	34.1	415	3.69×10^{-5}	43.49
3. ผงซักฟอก	400	700	34.1	934	3.71×10^{-5}	43.49
4. ยิปซั่ม	720	2,317	34.1	1,681	3.34×10^{-5}	45.01



รูปที่ 4.6 ค่าอัตราการสีกกร่อนในรูปแบบคอนทัวร์ของอนุภาคของของไหลแต่ละชนิด

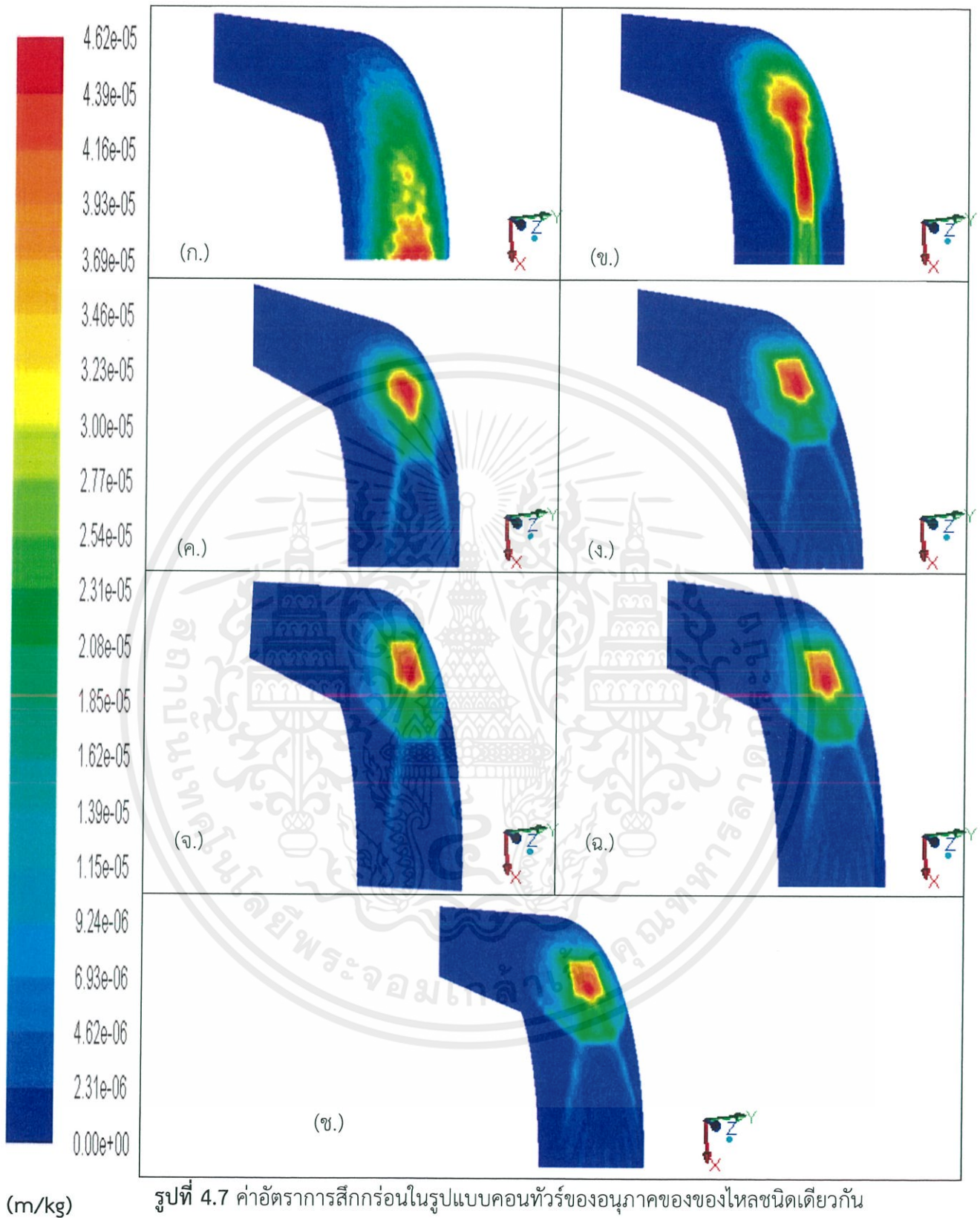
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลที่มีผลต่อการสึกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา

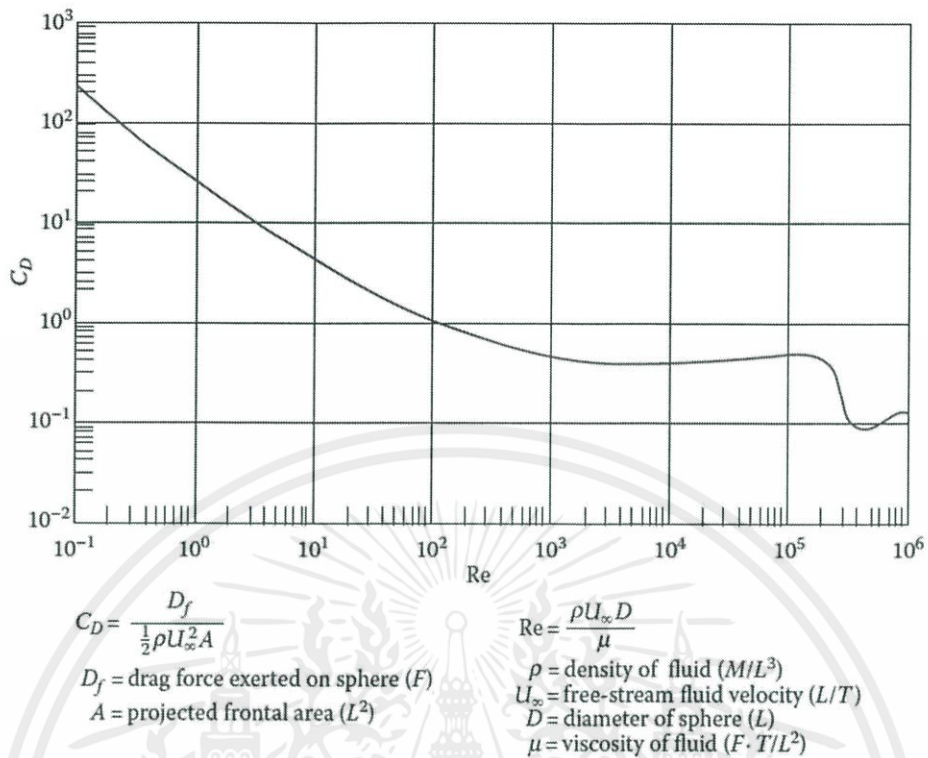
เมื่อพิจารณาค่าการสึกกร่อนในข้องอ 90 องศาจากตารางที่ 4.3 พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจะส่งผลต่อค่าการสึกกร่อน ซึ่งเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการสึกกร่อนเพิ่มมากขึ้นด้วย จากนั้นเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจนถึงจุดๆหนึ่งจะพบว่าค่าการสึกกร่อนมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคไปต่อไปเรื่อยๆจะพบว่าค่าการสึกกร่อนจะเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (D) เป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่กับตัวเลขเรย์โนลด์ดังรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการสึกกร่อนเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลของอนุภาคชนิดเดียวกัน

อนุภาคของแข็ง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	ความเร็ว (m/s)	ค่าการสึกกร่อนสูงสุด (m/kg)	องศาการสึกกร่อนสูงสุด ($^{\circ}$)
ซีเมนต์	15	34.1	4.88×10^{-6}	90
	45	34.1	1.58×10^{-5}	70.72
	135	34.1	3.40×10^{-5}	41.97
	405	34.1	3.42×10^{-5}	45.01
	1,215	34.1	3.40×10^{-5}	45.01
	1,800	34.1	3.34×10^{-5}	45.01
	3,645	34.1	3.38×10^{-5}	45.01



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่ (C_D) กับตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) [11]

บทที่ 5

สรุปผลการจำลอง

5.1 สรุปผลการจำลอง

1. การศึกษาการสีกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศาจะเริ่มจากศึกษาหาจำนวนกริดที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงโดยอ้างอิงภาวะการดำเนินจากงานวิจัยของ Carlos และคณะ [13] โดยใช้โปรแกรม GAMBIT ในการสร้างท่อช่องอ 90 องศา และใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณการไหลแบบคงตัวของอากาศ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon จากผลการจำลองพบว่าจำนวนกริด 321,930 เซลล์ขึ้นไป ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงจึงเลือกใช้กริดจำนวนนี้ในการศึกษาในขั้นต่อไป

2. จากจำนวนกริดดังกล่าวที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง จึงได้ทำการศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนที่ส่งผลต่อการสีกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา โดยเปรียบเทียบผลการสีกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศาที่งานวิจัยของ Carlos และคณะ [13] โดยศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon ทั้ง 3 แบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมต่อการทำนายการสีกกร่อน ได้แก่ แบบจำลอง Standard k-epsilon แบบจำลอง RNG k-epsilon และแบบจำลอง Realizable k-epsilon พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ให้ผลการทำนายค่าการสีกกร่อนสูงสุดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นจะใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษาในขั้นถัดไปในการทำนายการสีกกร่อนในท่อช่องอ 90 องศา

3. เนื่องจากในการขนส่งอนุภาคของแข็งด้วยอากาศภายในท่อมีอนุภาคมากมายหลายประเภท ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดโดยการเปลี่ยนแปลงชนิดของอนุภาคของแข็งเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการสีกกร่อนบริเวณช่องอ 90 องศา ในที่นี้จะศึกษาประเภทของอนุภาคของแข็ง 4 ประเภทได้แก่ ซีเมนต์ ทราย ผงซักฟอก และยิปซัม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นที่แตกต่างกันตามลำดับ พบว่าค่าการสีกกร่อนของอนุภาคขนาดใหญ่มีค่าสูงกว่าอนุภาคขนาดเล็กเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีโมเมนตัมสูงกว่า และอนุภาคขนาดใหญ่มีมุมการเกิดการสีกกร่อนสูงสุดต่ำกว่าอนุภาคขนาดเล็กเนื่องจากความเฉื่อยของวัตถุที่พยายามรักษาสภาพการเคลื่อนที่

4. จากความสัมพันธ์ของมุมที่เกิดการสีกกร่อนสูงสุดระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็กในช่วงต้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจะส่งผลต่อค่าการสีกกร่อน ซึ่งเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการสีกกร่อนเพิ่มมากขึ้นด้วย จากนั้นเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจนถึงจุดๆหนึ่งจะพบว่าค่าการสีกกร่อนมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคไปต่อไปเรื่อยๆจะพบว่าค่าการสีกกร่อนจะเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (D) เป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ตัวเลขเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การต้านการเคลื่อนที่กับตัวเลขเรย์โนลด์

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากสภาวะการดำเนินงานต่างๆที่เลือกใช้อ้างอิงมาจากการทดลอง ไม่สามารถหาสภาวะการดำเนินงานจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ ผลที่ได้จึงไม่สามารถนำไปใช้กับงานจริงได้ แต่สามารถศึกษาปัจจัยและแนวโน้มของแต่ละปัจจัยว่าส่งผลอย่างไรต่ออัตราการสึกกร่อนได้อย่างดี ซึ่งสามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาหรือแก้ไขกระบวนการสึกกร่อนในโรงงานได้อย่างเหมาะสม



เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐวัตร ไจกมล. "การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของสมรรถนะการผสมแบบเจ็ตในถังผสมหลายรูปแบบ" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557
- [2] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method*. New York : Longman Scientific & Technical. 1995.
- [3] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. *พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สาขาวิศวกรรมเคมี. 2556.
- [4] ANSYS, Inc.. *ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide*. 2012.
- [5] S. A. Morsi and A. J. Alexander. "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems" *J. Fluid Mech.*. Vol.55(2). 1972. pp. 193–208.
- [6] K. G. Budinski. *FRICITION, WEAR, AND EROSION ATLAS*. Boca Raton : CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. 2014.
- [7] J. K. Edwards, B. S. McLauray, 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..
- [8] Y. Oka, K. Okamura, 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.
- [9] M. Parsi, K. Najmi, F. Najafifard, S. Hassani, B.S. McLauray 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.
- [10] G.Grant and W.Tabakoff. "Erosion prediction in turbo machinery resulting from environmental solid particles" *Aircraft*, Vol.12. 1975. pp.471-478.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] W.S. Janna. *Introduction to Fluid Mechanics*. Boca Raton : CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. 2010.
- [12] Y.A. CENGEL, J.M. CIMBALA. *Fluid mechanics fundamentals and applications*. New York : McGraw-Hill Companies. 2014.
- [13] C. Duarte, F. Souza and V. Santos. “Numerical investigation of mass loading effects on elbow erosion” *Powder Technology*. Vol.283. 2015. pp.593–606.
- [14] Q.H. Mazumder, S.A. Shirazi, B. McLaury. “Experimental investigation of the location of maximum erosive wear damage in elbows” *J. Press. Vessel. Technol.* Vol.130. 2008. pp.1–7.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การจำลองการสึกกร่อนภายในท่อข้องอ 90 องศา ในรูปแบบสามมิติด้วยโปรแกรม Fluent โดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Carlos และคณะ[13] 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	RNG k-epsilon
		Interaction with Continuous Phase
	DPM	Drag law : Spherical
		Physical Model : Erosion/Accretion
		Injection Type : Surface (Release From Surface : inlet)
		Particle Type : Inert
		Diameter Distribution : uniform
		Point Properties
		z-velocity : 34.1 m/s
		Diameter : 15, 45, 135, 182, 400, 720, 1,215, 1,800, 3,645 micron
Total Flow Rate : 0.0002752 kg/s ($v = 34.1 \text{ m/s}$)		
Turbulent Dispersion : Discrete Random Walk Model		

ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT (ต่อ)

Materials	Fluid	<u>Air</u> Density : 1.225 kg/m ³ Viscosity : 1.7894x10 ⁻⁵ Pa · s
	Solid	<u>Aluminum</u> Density : 2,700 kg/m ³ Vicker Hardness : 1.05 GPa
	Inert Particle	<u>Sand</u> Density : 2,600 kg/m ³
		<u>Cement</u> Density : 830 kg/m ³
		<u>Detergent powder</u> Density : 700 kg/m ³
	<u>Gypsum</u> Density : 2,317 kg/m ³	
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		
	<u>Discrete Phase Reflection</u> <u>Coefficients (Polynomial)</u> Normal : 0.993- 0.0307 α +0.000475 α^2 - 2.61x10 ⁻⁶ α^3 Tangent : 0.988- 0.029 α +0.000643 α^2 - 3.56x10 ⁻⁶ α^3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT (ต่อ)

Boundary Conditions	Wall	Erosion Model : อลูมิเนียม												
		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 Function : 2.6												
Solution Method	Pressure-Velocity Coupling	Scheme : SIMPLE												
	Spatial Discretization	Gradient : Least Squares Cell Based												
		Pressure : Standard												
		Momentum : Second Order Upwind												
		Turbulent Kinetic Energy : Second Order Upwind												
Turbulent Dissipation Rate : Second Order Upwind														

หมายเหตุ : ค่า $f(\alpha)$ จะขึ้นอยู่กับวัสดุพื้นผิวที่เราเลือกใช้