

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา
ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

STUDY ON INFLUENCING FACTORS OF EROSION INSIDE 90-DEGREE ELBOW
BY DESIGN OF EXPERIMENTS AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-207

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสึกกร่อนบริเวณข้องอ 90 องศา
ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

STUDY ON INFLUENCING FACTORS OF EROSION INSIDE 90-DEGREE ELBOW
BY DESIGN OF EXPERIMENTS AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



T148731

ธนาธิษณ์ สะกุนา

TANATIS SAKUMA

เลขหมู่
เลขทะเบียน 148731
ในเดือนปี 23 11 2559

00267056

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON INFLUENCING FACTORS OF EROSION INSIDE 90-DEGREE ELBOW
BY DESIGN OF EXPERIMENTS AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-EN-M-220-207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศาด้วยวิธีการ
ออกแบบการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
Thesis Title Study on Influencing Factors of Erosion Inside 90-degree Elbow
by Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics
นักศึกษา นายธนาธิวัฒน์ สะกุนา
รหัสประจำตัว 57601351
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-207

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จินตวัฒน์	ไชยชนวงค์	
รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	
ดร.ณัฐนนท์	ไพบุลย์ศิลป์	
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิสร์	
ผศ.ดร.สันติ	วัฒนานุสรณ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 12.00-14.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสีกร่อนภายในช่องอ 90 องศา ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
นักศึกษา	นายธนาธิษณ์ สะกุนา
รหัสประจำตัว	57601351
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสีกร่อนภายในท่อ เนื่องจากอนุภาคของแข็ง บริเวณช่องอ 90 องศา โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและวิธีการออกแบบการทดลอง ในการทำนายผลการสีกร่อน และวิเคราะห์ผล ในขั้นต้น จำเป็นต้องตรวจสอบแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งผลการจำลองได้อัตราการสีกร่อนสูงสุดเท่ากับ 3.62×10^{-5} เมตรต่อกิโลกรัม เทียบกับผลการทดลองที่มีอัตราการสีกร่อนสูงสุดเท่ากับ 3.85×10^{-5} เมตรต่อกิโลกรัม ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.9% จากนั้นใช้แบบจำลองการสีกร่อนนี้มาศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสีกร่อนโดยใช้โปรแกรม Minitab 17 ซึ่งปัจจัยที่นำมาพิจารณาสำหรับวิธีการของทากูชิจะประกอบไปด้วย 4 ปัจจัย 3 ระดับ คือ ความเร็ว (17.05 34.1 และ 51.15 เมตร/วินาที) ขนาดอนุภาค (90 180 และ 270 ไมครอน) รัศมีความโค้งของท่อ (1D 1.5D และ 2D) เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และวัสดุพื้นผิว (อลูมิเนียม ไทเทเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม) และสำหรับวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ 2 ระดับ จะศึกษาเพียง 2 ระดับ คือค่าต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละปัจจัย โดยทำการจำลองตามแบบแผนของออร์ทोगอนอล อาร์เรย์ (Orthogonal Array) สำหรับวิธีการของทากูชิ และแผนการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^4 สำหรับวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ 2 ระดับ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการสีกร่อน นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้ ความเร็ว 17.05 เมตร/วินาที ขนาดอนุภาค 90 ไมครอน รัศมีความโค้งของท่อ 2D และวัสดุพื้นผิว ไทเทเนียม ซึ่งได้อัตราการสีกร่อนสูงสุดเท่ากับ 2.32×10^{-6} เมตรต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study on influencing factors of erosion inside 90-degree elbow by design of experiments and computational fluid dynamics
Student	Mr. Tanatis Sakuma
Student ID.	57601351
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

ABSTRACT

This research studies the influencing factors of the solid particle erosion wear and behavior in a 90-degree elbow by using computational fluid dynamics simulation (CFD) together with design of experiment method (DOE) which are effective research tool. At first, erosion simulation model was developed and validated by comparing with experimental data. The simulated and experimental maximum erosion rates were 3.62×10^{-5} m/kg and 3.85×10^{-5} m/kg, respectively. The error between simulation and experiment was 5.9%. After that, this simulation model was studied by Taguchi's method and 2^4 full factorial design, which were analyzed by using Minitab 17. For Taguchi's method, 4 factors with 3 levels which affect erosion rate e.g. velocity (17.05, 34.10, and 51.15 m/s), particle size (90, 180, and 270 micron), curvature radius (1D, 1.5D, and 2D) and surface materials (aluminum, titanium, and stainless steel) were studied. For 2^4 factorial design, the high and low level of each factors (2 level) were investigated. The Taguchi's orthogonal arrays and 2^4 factorial design were used to design the simulations. Further, the simulated results showed that the optimal maximum erosion rate of 2.32×10^{-6} m/kg was achieved by the velocity of 17.05 m/s, 90 micron particle size, 2D curvature radius, and titanium surface material.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า พร้อมทั้งให้ความรู้ในด้านของทฤษฎี ไม่ว่าจะเป็นเรื่อง พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กลศาสตร์ของไหล หลักการทำนาย การสีกกร่อนและอื่นๆ อีกมากมาย รวมถึงให้คำชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา รูปแบบการนำเสนอ งานวิจัย และร่วมวิเคราะห์ผลการจำลองในงานวิจัยนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ให้ความรู้ในด้านทฤษฎี และการปฏิบัติ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือคำแนะนำสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคขั้นสูงในการจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT และ FLUENT กับการศึกษาการสีกกร่อนของท่อช่องอ 90 องศา รวมถึงให้คำชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา การดำเนินงานวิจัยและร่วมวิเคราะห์ผลการจำลอง ในงานวิจัยนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายนิวัฒน์ ภูเจริญ ที่ช่วยให้ความรู้ในด้านโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเป็นผู้ที่ทำให้งานวิจัยนี้เกิดขึ้นมาได้ พร้อมทั้งคอยช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในด้านการจัดกระบวนการคิด และการนำเสนอผลงานวิจัยให้มีความโดดเด่น

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ อาจารย์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ขอขอบคุณเพื่อนและน้องๆร่วมภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดมา รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำงานวิจัยนี้ ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้ามีข้อผิดพลาดประการใดในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำขออนุมัติและขออภัยมา ณ ที่นี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ธนาธิษณ์ สะกุนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	3
2.1.1 ทำไมต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข.....	4
2.1.2 พลศาสตร์ของไหลทำงานได้อย่างไร.....	4
2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	6
2.2.1 สมการควบคุม.....	6
2.2.1.1 สมการการอนุรักษ์มวล.....	6
2.2.1.2 สมการโมเมนตัม.....	7
2.2.1.3 สมการพลังงาน.....	8
2.2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์.....	9
2.3 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน.....	10
2.3.1 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน.....	11
2.3.2 การคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน.....	11
2.3.2.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์.....	12
2.3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$	15
2.3.2.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$	16
2.3.2.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	17
2.3.2.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k - \epsilon$	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 แบบจำลองเฟสแยก.....	25
2.5 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE.....	26
2.6 การออกแบบการทดลอง.....	30
2.6.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง.....	30
2.6.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	30
2.6.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง.....	31
2.6.4 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง.....	32
2.6.5 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง.....	33
2.6.6 ผลสรุปที่ต้องการจากการออกแบบการทดลอง.....	34
2.7 วิธีการของทากูชิ.....	35
2.7.1 แนวคิดและแบบแผนของวิธีการทากูชิ.....	35
2.7.2 แนวทางปฏิบัติของทฤษฎีทากูชิ.....	35
2.7.3 แผนการทดลองออร์ทโคโนล.....	36
2.7.4 อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน.....	38
2.8 วิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล.....	40
2.9 การสีกร่อน.....	42
2.10 สมการทำนายการสีกร่อน.....	44
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	47
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	49
3.1 วิธีการเชิงตัวเลข.....	49
3.1.1 การสร้างแบบจำลองและการกำหนดสภาวะขอบเขต.....	49
3.1.2 รูปแบบของการจำลองเชิงตัวเลขและภาวะการดำเนินงานสำหรับการทำนายการสีกร่อน.....	50
3.1.3 การศึกษาหาจำนวนเมชที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง.....	51
3.1.4 การตรวจสอบแบบจำลอง.....	52
3.2 การออกแบบการทดลองตามแบบแผนออร์ทโคโนลของทากูชิ.....	52
3.2.1 กำหนดปัจจัยและระดับที่ต้องการศึกษา.....	52
3.2.2 แผนการทดลองออร์ทโคโนล.....	53
3.3 การออกแบบการทดลองตามวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบรูณ์ 2 ระดับ.....	54
3.2.1 กำหนดปัจจัยและระดับที่ต้องการศึกษา.....	54
3.2.2 ตารางการออกแบบการทดลองตามวิธี 2^4 factorial design.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง.....	56
4.1 เมชที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง.....	56
4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองอ้างอิงและการศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ส่งผลต่อการสีกกร่อนภายในห้องอ 90 องศา.....	58
4.2.1 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการสีกกร่อนภายในห้องอ 90 องศา.....	58
4.2.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองและแบบจำลองของ Oka.....	60
4.3 ผลการจำลองการสีกกร่อนโดยวิธีของทากูชิ.....	62
4.3.1 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่ออัตราการสีกกร่อนสูงสุด.....	64
4.3.2 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย.....	66
4.4 ผลการจำลองการสีกกร่อนโดยวิธี 2^4 factorial design.....	67
4.4.1 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่ออัตราการสีกกร่อนสูงสุด.....	70
4.4.2 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง.....	76
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$	17
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน.....	28
2.3 การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์และการ ออกแบบการทดลองตามแนวทางทฤษฎี.....	36
3.1 ขนาดของท่อที่ใช้ศึกษา.....	49
3.2 รูปแบบของการจำลองเชิงตัวเลข.....	51
3.3 ภาวะการดำเนินงานสำหรับการทำนายการสีกกร่อน.....	51
3.4 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาการสีกกร่อน.....	52
3.5 แผนการทดลองออร์ทogonalแบบ L9.....	53
3.6 แผนการทดลองออร์ทogonalแบบ L9 ที่ป้อนค่าปัจจัยต่างๆตามแผนการทดลอง.....	53
3.7 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่นำไปใช้ออกแบบการทดลองโดยวิธี 2^4 factorial design.....	54
3.8 ตารางออกแบบการทดลองแบบ 2^4 factorial design ที่ถูกแทนค่าปัจจัยต่างๆ.....	55
4.1 เปรียบเทียบผลการสีกกร่อนกับผลการทดลองเมื่อใช้แบบจำลองทำนายการสีกกร่อน จากงานวิจัยอ้างอิงของ Carlos และคณะ กับ FLUENT.....	61
4.2 ผลการจำลองตามแผนการออร์ทogonal L9 พร้อมทั้งค่า อัตราส่วน S/N.....	62
4.3 เปรียบเทียบค่าที่เหมาะสมที่สุดกับค่าดั้งเดิม.....	66
4.4 ผลการจำลองตามตารางการออกแบบ 2^4 factorial design.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	5
2.2 แรงกระทำต่อพื้นผิวของของไหล.....	7
2.3 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน.....	11
2.4 วิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน.....	12
2.5 ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE.....	29
2.6 ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ.....	32
2.7 การออกแบบการทดลองชนิด $L_4 (2^3)$	36
2.8 ตารางการออกแบบการทดลองชนิด $L_9 (3^4)$	37
2.9 ตารางการออกแบบการทดลองชนิด $L_{16} (4^5)$	37
2.10 การกีดกร่อนเนื่องจากของผสมระหว่างของเหลวและของแข็ง.....	42
2.11 การกีดกร่อนเนื่องจากหยดของเหลว.....	42
2.12 การกีดกร่อนเนื่องจากฟองแก๊ส.....	43
2.13 การกีดกร่อนเนื่องจากการชนอนุภาคของแข็ง.....	43
2.14 ความเร็วของอนุภาคก่อนและหลังชนกับผนัง.....	45
2.15 แบบการจำลองการสึกกร่อน.....	48
3.1 สัดส่วนของท่อและบริเวณที่ศึกษา.....	49
3.2 เมชที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายการสึกกร่อน.....	50
3.3 ตารางออกแบบการทดลองแบบ 2^4 factorial design.....	54
4.1 ความเร็วกึ่งกลางท่อตามแนวแกน z ตลอดความยาวของท่อตรงของจำนวนกริดต่างๆ.....	56
4.2 แบบจำลองท่อข้อง 90 องศาที่จำนวนกริดต่างๆ (ก) 1,660,365 เซลล์ (ข) 970,200 (ค) 661,500 เซลล์ (ง) 485,100 เซลล์ (จ) 321,930 เซลล์ และ (ช) 112,455 เซลล์.....	57
4.3 คอนทัวร์การสึกกร่อนของแบบจำลองความปั่นป่วนต่างๆ (ก) Standard k-epsilon (ข) RNG k-epsilon (ค) Realizable k-epsilon.....	59
4.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	59
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับองศาข้อง.....	60
4.6 ลักษณะคอนทัวร์ของแต่ละการจำลอง.....	63
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักกับ SN ratio.....	64
4.8 แบบจำลองแบบดั้งเดิมและแบบที่เหมาะสมที่สุด.....	66
4.9 ตาราง ANOVA ที่ไม่สามารถคำนวณค่า F และ P.....	68
4.10 แผนภูมิพาเรโตแบบยังไม่ตัดอันตรายกิริยา.....	69
4.11 แผนภูมิพาเรโต.....	70
4.12 Normal Plot of the Effects.....	70
4.13 Half Normal Plot of the Effects.....	71
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและอัตราการสึกกร่อนสูงสุด.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	72
4.16 ตาราง ANOVA แบบ Full model.....	73
4.17 ตาราง ANOVA แบบ Reduced Model.....	74
4.18 ตารางการทำ Response Optimization.....	75
4.19 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย.....	75



สัญลักษณ์

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (ต่อ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษากรีก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษากรีก (ต่อ)

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



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาก่อนเนื่องจากการขนถ่ายอนุภาคของแข็งที่กระทบกับผนังท่อทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง และการลำเลียงผลิตภัณฑ์ต่างๆภายในท่อ ที่มีอนุภาคของแข็งอยู่ในสายการไหล ซึ่งมักจะเกิดการศึกษาก่อนตามข้อต่อต่างๆ และจะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะและอายุการใช้งานลดลง และสุดท้ายอาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุได้ ซึ่งเมื่อปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตอย่างแน่นอน อาจถึงขั้นต้องหยุดกระบวนการผลิตเนื่องจากต้องปรับปรุงแก้ไขและซ่อมบำรุง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการจะศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการศึกษาก่อน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทั้งมากและน้อย เพื่อที่จะหาภาวะการใช้งานที่ดีที่สุด

สำหรับการทดลองการศึกษาก่อนที่เน้นการใช้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎี เพื่อออกแบบปรับปรุงประสิทธิภาพ ทำได้ค่อนข้างลำบาก อีกทั้งการทดลองนั้นสิ้นเปลืองทรัพยากรจำนวนมาก จึงเกิดสาขาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อใช้ศึกษาการไหลชนิดต่างๆ ประกอบกับปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทำให้ปัจจุบันเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข เพื่อศึกษาพฤติกรรมการศึกษาก่อน

ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการศึกษาก่อน และเนื่องจากวิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า ซึ่งจะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตัวเอง ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้วิธีการของทฤษฎีและวิธีการออกแบบเชิงแพททอเรียลแบบสมบูร์น 2 ระดับ มาใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการศึกษาก่อน เนื่องจากสามารถลดจำนวนการทดลองได้เหลือน้อย และเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมการศึกษาก่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งภายในท่อทรงกระบอก บริเวณช่องอ 90 องศา โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเทียบกับผลการทดลอง
2. ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ทำนายการศึกษาก่อนภายในท่อช่องอ 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสึกกร่อนภายในท่อข้องอ 90 องศา โดยใช้เทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณควบคู่ไปกับวิธีการออกแบบการทดลอง
4. ทำการจำลองตามแผนการทดลองออร์ทोगอนอลของทากูชิและแผนการทดลองแบบ 2^4 factorial design เพื่อนำผลการจำลองมาวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการสึกกร่อน
5. สามารถหาระดับของแต่ละปัจจัยที่ดีที่สุดได้ แล้วทำการจำลองเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์แต่ละปัจจัยว่าสามารถทำให้อัตราการสึกกร่อนลดลงจากแบบจำลองดั้งเดิมที่ใช้
6. สามารถหาแนวโน้มของแต่ละปัจจัยว่าส่งผลอย่างไรต่ออัตราการสึกกร่อนบ้าง และสามารถจัดอันดับปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการสึกกร่อนทั้งมากและน้อยได้อย่างมีนัยสำคัญ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT และคำนวณการไหลโดยใช้โปรแกรม FLUENT จากนั้นตรวจสอบผลการทำนายการสึกกร่อนภายในข้องอ 90 องศาให้ได้ผลตรงกับการทดลองของงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและใช้เป็นมาตรฐานในการทำนายการสึกกร่อนโดยใช้ตัวแปรต่างๆ
2. ศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน ได้แก่ แบบจำลอง Standard k-epsilon แบบจำลอง RNG k-epsilon และแบบจำลอง Realizable k-epsilon ที่เหมาะสมกับการทำนายการสึกกร่อนภายในท่อข้องอ 90 องศา
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสึกกร่อน โดยวิธีของทากูชิจะประกอบไปด้วย 4 ปัจจัย 3 ระดับ คือ ความเร็ว (17.05, 34.1, 51.15 เมตร/วินาที) ขนาดอนุภาค (90, 180, 270 ไมครอน) ขนาดความโค้งของรัศมีท่อ (1D, 1.5D, 2D) เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และวัสดุพื้นผิว (อลูมิเนียม, โทเทเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม) และสำหรับวิธีการออกแบบเชิงแพททอเรียลแบบสมบูรณ์ 2 ระดับ จะศึกษาเหมือนกันกับวิธีของทากูชิแต่จะศึกษาเพียง 2 ระดับ คือค่าต่ำสุดกับค่าสูงสุดของแต่ละปัจจัย
4. ศึกษาหาปัจจัยที่ดีที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ และจำลองเพื่อยืนยันผล โดยที่สามารถลดอัตราการสึกกร่อนลงได้จากแบบจำลองดั้งเดิมที่ใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองและการทำนายการสึกกร่อนโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พร้อมทั้งมีความรู้ความสามารถในการใช้โปรแกรม ยกตัวอย่างเช่น Gambit, Fluent และ Minitab
2. ได้รับความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการสึกกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็ง และนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาให้อัตราการสึกกร่อนลดต่ำลง
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับวิธีการออกแบบการทดลอง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ควบคู่กับเทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้ ทำให้ประหยัดระยะเวลาในการทดลอง พร้อมทั้งไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรหรือสิ้นเปลืองกับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) เป็นสาขาหนึ่งของกลศาสตร์ของไหลที่ใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) และระเบียบวิธี (Algorithms) มาวิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล ปัจจุบันนี้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือที่สำคัญในงานด้านวิศวกรรม เนื่องจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถแสดงรายละเอียดของปรากฏการณ์การไหลได้ และสามารถแสดงข้อมูลจำนวนมากโดยมีต้นทุนการดำเนินงานต่ำ เทคนิคนี้มีความสำคัญต่องานทางด้านการศึกษา การวิจัย และอุตสาหกรรม โดยตัวอย่างการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในแต่ละด้านมีดังนี้ [1]

- อากาศพลศาสตร์ของอากาศยานและยานพาหนะ: การหาแรงยกและแรงต้าน
- อุทกศาสตร์ (Hydrodynamics) ของเรือ
- วิศวกรรมเคมี: การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปั้นกวน และอุปกรณ์อื่นๆ
- วิศวกรรมไฟฟ้า: การระบายความร้อนสำหรับวงจรไฟฟ้า
- วิศวกรรมเครื่องกล: การไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม: การกระจายตัวของมลพิษในอากาศ
- วิศวกรรมชีวการแพทย์: การไหลภายในหลอดเลือด
- วิทยาศาสตร์การกีฬา: การออกแบบหมวกของนักปั่นจักรยาน ออกแบบลูกฟุตบอล
- อุตุนิยมวิทยา: การทำนายสภาพอากาศ

สำหรับข้อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการจำลองโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นพบว่า ทั้งสองวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน สำหรับข้อดีของการทดลองนั้นคือ สามารถทำได้ด้วยตัวเอง ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ผ่านการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนมากเกินไปและข้อมูลที่ได้อ่อนช้อยน่าเชื่อถือ แต่มีข้อเสียคือการทดลองเพื่อออกแบบอุปกรณ์ จำเป็นต้องใช้งบประมาณ เวลาและทรัพยากรในการทำค่อนข้างสูง ประกอบกับมีข้อจำกัดมากมาย [2] ได้แก่

1. ไม่สามารถทำในสถานะที่เสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สินได้
2. ไม่สามารถทำในระบบที่มีขนาดใหญ่มากๆได้
3. ความจำกัดของข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ต่ำ เป็นต้น

ซึ่งข้อเสียและข้อจำกัดของการทดลองดังที่กล่าวมาถูกแก้ปัญหาลดลงด้วยการจำลองโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถคำนวณได้ปริมาณข้อมูลที่ละเอียดมาก มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลากหลาย มีข้อจำกัดค่าและประหยัดทั้งทรัพยากรและเวลา อีกทั้งการประมาณค่าจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ผลให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ แต่การจำลองนั้นมีข้อจำกัดคือ ในกรณีที่ศึกษาการไหลที่ซับซ้อนมากๆ จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีคุณภาพสูง นั้นหมายความว่าทรัพยากรที่ใช้ก็จะมากขึ้นเช่นกัน แต่เพื่อแลกมาด้วยข้อมูลอันมีค่าที่แม้การทดลองก็ทำไม่ได้ ก็คุ้มค่าที่จะลงทุนและที่สำคัญการจำลองต้องมีการเปรียบเทียบกับผลการทดลองหรือทฤษฎีก่อนทุกครั้ง เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องตามผลการทดลองหรือทฤษฎีแล้วจึงสามารถออกแบบต่อไปได้

ด้วยข้อเด่นของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ประกอบกับความก้าวหน้าในปัจจุบัน จึงทำให้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีที่เหมาะสมอย่างยิ่งในด้านการวิจัยออกแบบและความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ อันจะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่อไป

2.1.1 ความสำคัญของวิธีเชิงตัวเลข

เนื่องจากสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) มีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solutions) ซึ่งตัวอย่างที่แสดงถึงความยุ่งยากในการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์คือความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) หรือแม้กระทั่งไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ อย่างไรก็ตาม สมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้สามารถหาผลเฉลยได้โดยวิธีเชิงตัวเลข แม้ว่าวิธีเชิงตัวเลขไม่สามารถหาผลเฉลยได้ทุกตำแหน่ง แต่อย่างน้อยผลเฉลยที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขสามารถนำมาวิเคราะห์หรือแสดงแนวโน้มของปรากฏการณ์ที่สนใจได้[1]

2.1.2 การคำนวณด้วยพลศาสตร์ของไหล

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

- กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณ โดยการป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณปัญหาการไหลในรูปแบบต่างๆ ให้กับโปรแกรมคำนวณ โดยขั้นตอนของกระบวนการนี้ประกอบไปด้วย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **กระบวนการคำนวณ (Solver)**

วิธีเชิงตัวเลขที่สำคัญสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีคือ วิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite Difference Method: FDM) วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ระเบียบวิธี Spectral และวิธีปริมาตรสลับเนื่อง (Finite Volume Method: FVM) โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนของกระบวนการคำนวณประกอบไปด้วย

- การประมาณค่าตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยการเฉลี่ยของฟังก์ชันอย่างง่าย
- การแยก (Discretisation) คือการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equations) ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equations)
- การหาผลเฉลยของสมการพีชคณิต

- **กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor)**

เป็นกระบวนการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณที่มีการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ด้วยความก้าวหน้าทางด้านงานวิศวกรรม ทำให้มีการแสดงผลแบบกราฟิกที่ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่ชุดโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีเครื่องมือที่ใช้ข้อมูลแบบอนเนกประสงค์ประกอบด้วยรูปแบบต่างๆ เช่น

- รูปทรงโดเมนและการแสดงเมช
- เวกเตอร์
- เส้นและคอนทัวร์
- พื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ
- การติดตามอนุภาค
- การจัดภาพการมอง (การย้าย, การหมุน, การปรับ ฯลฯ)

โดยการทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

2.2.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

สมการควบคุมเป็นชุดสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การไหลของของไหล ที่ตั้งอยู่บนกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ อันได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (แรง=มวล×ความเร่ง) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) [2]

2.2.1.1 สมการการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equation)

กฎการอนุรักษ์มวล กล่าวว่า “มวลไม่สามารถสร้างหรือทำให้หายไป” [1] สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดุลมวลของชิ้นของไหลได้ดังนี้คือ

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นของไหล = อัตราการไหลของมวลสุทธิเข้าสู่ชิ้นของไหล

หลังจากที่ดุลมวลของชิ้นของไหลและจัดรูปสมการสำหรับการไหลสภาวะไม่คงตัวในสามมิติ จะได้สมการอนุรักษ์มวลแสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

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

สมการที่ (2.1) ถูกเรียกว่า สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

โดย ρ คือ ความหนาแน่น (Density)
 t คือ เวลา (Time)
 \vec{u} คือ เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector) และกระจายเป็น $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$
 u คือ ความเร็วในแนวแกน x
 v คือ ความเร็วในแนวแกน y
 w คือ ความเร็วในแนวแกน z

ในกรณีของไหลเป็นชนิดอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) ที่มีความหนาแน่นคงที่ ทำให้สมการที่ (2.1) ลดรูปได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

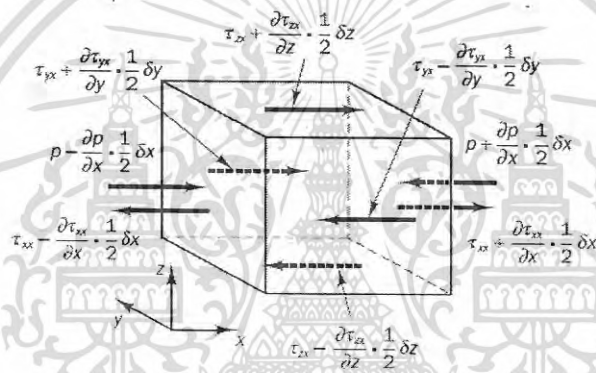
2.2.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน กล่าวว่า "แรงคืออัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม" [1] ซึ่งสามารถแสดงได้โดย

อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมในอนุภาคของไหล = ผลรวมของแรงที่มีต่ออนุภาคของไหล

ซึ่งแรงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

- แรงกระทำต่อพื้นผิวของของไหล (Surface force) อันประกอบไปด้วยแรงดัน (Pressure forces) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) แรงทั้งสองนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.2
- แรงกระทำต่อปริมาตรของไหล (Body force) เช่น แรงโน้มถ่วง แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ฯลฯ



รูปที่ 2.2 แรงกระทำต่อพื้นผิวของของไหล [1]

หลังจากที่ดุลโมเมนตัมของชิ้นของไหลและจัดรูปสมการสำหรับการไหลสถานะไม่คงตัวในสามมิติ จะได้สมการโมเมนตัมรูปแบบไม่อนุรักษ์ (Momentum Equation in Non-Conservation Form) ในทิศทาง x , y และ z แสดงได้ดังสมการที่ (2.3-2.5)

$$\text{แนวแกน } x : \quad \rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.3)$$

$$\text{แนวแกน } y : \quad \rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.4)$$

$$\text{แนวแกน } z : \quad \rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจัดรูปสมการโมเมนตัมในรูปแบบไม่อนุรักษ์ใหม่และนำไปเชื่อมโยงกับกฎการอนุรักษ์มวล จะได้สมการโมเมนตัมรูปแบบอนุรักษ์ (Momentum Equation in Conservation Form) ในแกน x , y และ z แสดงได้ดังสมการที่ (2.6-2.8)

$$\text{แนวแกน } x: \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.6)$$

$$\text{แนวแกน } y: \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.7)$$

$$\text{แนวแกน } z: \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.8)$$

โดย P คือ ความดัน (Pressure)
 τ คือ ความเค้นเฉือน (Shear Stress)
 S_M คือ เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ (Momentum Source Terms)

2.2.1.3 สมการพลังงาน (Energy Equation)

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ กล่าวว่า "พลังงานไม่มีการสูญหายหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ แต่พลังงานจะเปลี่ยนแปลงจากพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง" [1] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน
ของอนุภาคของไหล = อัตราการเพิ่มของ
ความร้อนสุทธิเข้าสู่
อนุภาคของไหล + อัตราของงานสุทธิ
ที่กระทำต่อ
อนุภาคของไหล

หลังจากที่ดุลพลังงานของชิ้นของไหลและจัดรูปสมการสำหรับการไหลสถานะไม่คงตัวในสามมิติจะได้สมการอนุรักษ์พลังงานแสดงได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (p\bar{u}) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E \quad (2.9)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations)

ไอแซก นิวตัน (Isaac Newton) กล่าวว่า "แรงเค้นเฉือนในของไหลแปรผันตรงตามอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (strain) (เช่น เกรเดียนท์ของความเร็ว)" เรียกของไหลเหล่านี้ว่า ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluids) [1] โดยทั่วไปแล้วสมการนาเวียร์-สโตกส์จะประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม 3 สมการ จากสมการควบคุมในพจน์ของความเค้นเฉือนเป็นพจน์ที่มีความสำคัญอย่างมากที่ใช้อธิบายการไหล สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของอัตราความเครียด (Strain Rate) [2] ซึ่งในปี ค.ศ. 1845 สโตกส์ได้นำเสนอว่า

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot \bar{u}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot \bar{u}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.11)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot \bar{u}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.12)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.13)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.14)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.15)$$

โดย μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity Coefficient)

λ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second Viscosity Coefficient)

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

เมื่อแทนค่าความเค้นเฉือนลงในสมการโมเมนตัมในรูปแบบอนุพันธ์ ในสมการ (2.6-2.8) และเขียนเทอมความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous Stress) จะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ในระบบสามมิติในรู้อย่างง่ายได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโมเมนตัม :

$$\text{แนวแกน } x : \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla \cdot u) + S_{Mx} \quad (2.17)$$

$$\text{แนวแกน } y : \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla \cdot v) + S_{My} \quad (2.18)$$

$$\text{แนวแกน } z : \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla \cdot w) + S_{Mz} \quad (2.19)$$

2.3 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน

ในธรรมชาติรูปแบบการไหลสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) การไหลแบบทรานซิชัน (Transition flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) โดยรูปแบบการไหลสามารถวิเคราะห์ได้จากเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ที่เป็นการสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia force) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Re = \frac{\text{Inertia forces}}{\text{Viscous forces}} = \frac{\rho \bar{v}^2}{\mu \bar{v} / L_c} = \frac{\rho \bar{v} L_c}{\mu} = \frac{\bar{v} L_c}{\nu} \quad (2.20)$$

โดยที่ \bar{v} คือ ความเร็วเฉลี่ย

L_c คือ ความยาวคุณลักษณะ (Characteristic length)

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity: $\nu = \mu / \rho$)

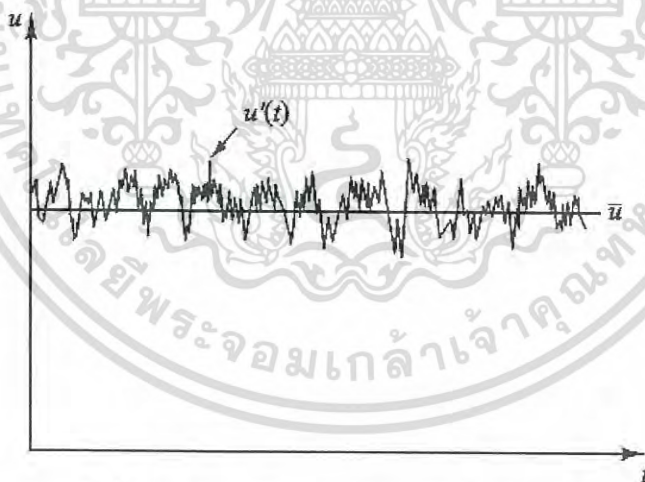
จากการทดลองในระบบของไหลพบว่า ถ้าการไหลมีค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต (Critical Reynolds number: Re_{crit}) การไหลนั้นจะเป็นแบบราบเรียบ ชั้นของของไหลแต่ละชั้นจะไหลผ่านชั้นของของไหลอื่นตามลำดับ ถ้าสภาวะขอบเขตไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การไหลจะเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady) เรียกช่วงการไหลนี้ว่าการไหลแบบราบเรียบ

สำหรับการไหลที่มีค่าเลขเรย์โนลด์มากกว่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต ความวุ่นวายจะเข้ามาแทนที่เป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลอย่างรวดเร็ว ในที่สุดการไหลจะเป็นแบบสุ่ม (Random) และวุ่นวาย (Chaotic) แม้ว่าสภาวะขอบเขตคงที่การไหลก็เป็นแบบไม่คงตัว (Unsteady) ความเร็วและคุณสมบัติการไหล (Flow properties) อื่นๆจะมีลักษณะสุ่มและวุ่นวาย เรียกช่วงการไหลนี้ว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน

1. การไหลแบบปั่นป่วนมีความไม่คงตัวสูง (Highly unsteady) โดยคุณสมบัติการไหลเป็นฟังก์ชันของเวลา ตัวอย่างการวัดความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3
2. การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะไม่ปกติ (Irregularity) ลักษณะการไหลที่ไม่ปกติทำให้การหาผลเฉลี่ยแบบแม่นยำตรงเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางสถิติ (Statistical)
3. การแพร่กระจาย (Diffusivity) การไหลแบบปั่นป่วนต้องแสดงลักษณะการแพร่กระจาย ถ้ารูปแบบการไหลมีลักษณะสุ่ม (Random) แต่ไม่แสดงการแพร่กระจายตัวของคุณสมบัติการไหล จะไม่เรียกการไหลนี้ว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัม ความร้อนและมวล
4. การไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นในสามมิติ (Three dimensional) การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบ 3 มิติและมีการหมุนวน (Rotational) ของของไหล
5. การสลายตัว (Dissipative) การไหลแบบปั่นป่วนสามารถสลายตัวได้ เช่น การใช้ข้อคนกาแฟในถ้วยจนการไหลเป็นแบบปั่นป่วน เมื่อยกช้อนออกจากถ้วยกาแฟการไหลแบบปั่นป่วนจะเริ่มหายไป ในที่สุดกาแฟในถ้วยจะหยุดนิ่ง
6. เลขเรย์โนลด์สูง (Higher Reynolds number) การไหลแบบปั่นป่วนส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อมีเลขเรย์โนลด์สูง แต่ไม่จำเป็นเสมอไปที่ เลขเรย์โนลด์ต่ำก็สามารถเกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้



รูปที่ 2.3 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน [2]

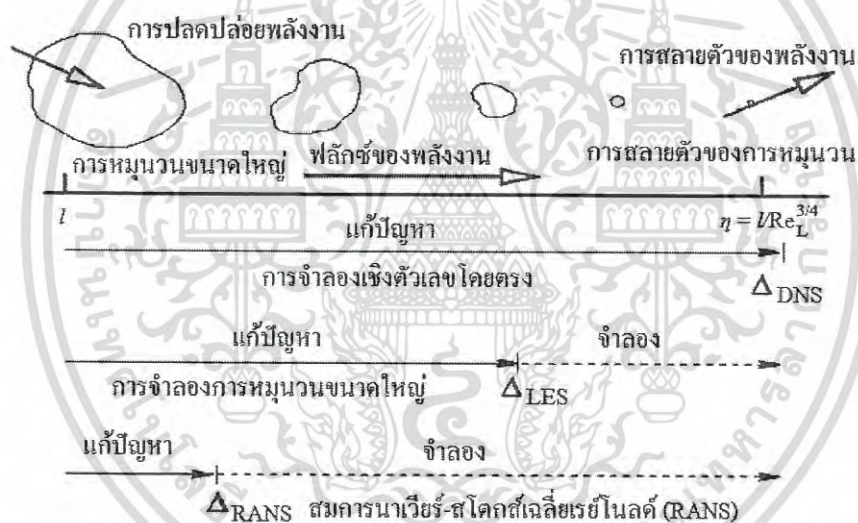
2.3.2 การคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนโดยใช้สมการ นาเวียร์-สโตกส์ นั้นจะคำนวณได้ยากมากเนื่องจากสมการ นาเวียร์-สโตกส์ มีลักษณะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจำเป็นต้องมีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เพื่อหาคำตอบของสมการดังกล่าวที่เรียกว่า การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct Numerical Simulation: DNS) ในการไหลแบบปั่นป่วนประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนวนขนาดใหญ่ (Large-Scale Eddies) และการหมุนวนขนาดเล็ก (Small-Scale Eddies) เพื่อที่จะคำนวณการไหลปั่นป่วนของการหมุนวนขนาดเล็ก จำเป็นต้องสร้างเมชที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ แต่สำหรับกรณีระบบมีขนาดใหญ่ การคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนจึงต้องใช้เมชขนาดเล็กจำนวนมาก การคำนวณจึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงและระยะเวลาในการคำนวณยาวนานมาก ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะเลือกคำนวณเฉพาะการหมุนวนขนาดใหญ่ และใช้การจำลองกับการหมุนวนขนาดเล็ก เรียกวิธีนี้ว่าการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation: LES) ถึงกระนั้นการคำนวณก็ยังคงใช้เวลานานและสิ้นเปลืองทรัพยากรอยู่ดี [1]

จากปัญหาดังกล่าวนี้ทำให้เกิดการพัฒนาสมการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนโดยวิธีทางสถิติ ที่เรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS) เพื่อเพิ่มระดับการจำลองมากขึ้น แต่วิธีนี้มีองค์ประกอบความเร็วแกว่งที่อยู่ในเทอมความเค้นเฉือนเรย์โรลด์ (Reynolds Stress) ซึ่งยากต่อการคำนวณจึงมีการพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อแก้ไขความยุ่งยากดังกล่าว [1] ซึ่งวิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน [1]

2.3.2.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations: RANS)

จากการไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณโดยวิธีทางสถิติ โดยคุณสมบัติการไหลฉับพลัน (ϕ) (Instantaneous Flow Property) เป็นผลรวมระหว่างคุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตามเวลา ($\bar{\phi}$) (Time-averaged Flow Property) และคุณสมบัติของของไหลแกว่ง (Fluctuating Flow Property) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.21)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออสบอร์นเรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) นำเสนอวิธีการแยกเรย์โนลด์ (Reynolds Decomposition) ซึ่งนิยามของเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล ($\bar{\varphi}$) และเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง (φ') แสดงได้ดังสมการที่ (2.22-2.23) [2]

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (2.22)$$

$$\bar{\varphi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0 \quad (2.23)$$

การแยกเรย์โนลด์ (Reynolds Decomposition) ของความดัน เวกเตอร์ความเร็วและองค์ประกอบความเร็ว ซึ่งประกอบด้วยความเร็วในแนวแกน x y และ z สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.24-2.28)

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2.24)$$

$$\bar{u}(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.25)$$

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.26)$$

$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (2.27)$$

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (2.28)$$

อิทธิพลของการแกว่งที่มีต่อการไหลเฉลี่ยสามารถหาได้จากการแทนที่สมการที่ (2.24-2.28) ลงในสมการควบคุมและใช้นิยามของเวลาเฉลี่ยดังแสดงในสมการที่ (2.22-2.23)

สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้คือ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}) = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.29)$$

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวไม่ได้ที่ความหนืดคงที่คือ :

$$\begin{aligned} \text{องค์ประกอบ } x : \quad & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{u} \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{u} \bar{w}) \\ & = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ & + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} \\ + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{(u')^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{u'w'}) \right] &+ S_{M_x} \end{aligned} \quad (2.30)$$

องค์ประกอบ y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{v} \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{v} \bar{w}) \\ = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) \right] &+ S_{M_y} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{u}) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \\ + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) \right] &+ S_{M_y} \end{aligned} \quad (2.31)$$

องค์ประกอบ z :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{w} \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{w} \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}^2) \\ = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \\ + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{(w')^2}) \right] &+ S_{M_z} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{u}) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} \\ + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{(w')^2}) \right] &+ S_{M_z} \end{aligned} \quad (2.32)$$

เรียกสมการที่ (2.30–2.32) ว่าสมการเรย์โนลด์ (Reynolds Equation) ซึ่งเทอมในวงเล็บที่เพิ่มขึ้นมาซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วแกว่งเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน ความเค้นปั่นป่วนพิเศษ (Extra Turbulent Stresses) สามารถอธิบายธรรมชาติของการแพร่ได้ ซึ่งเรียกความเค้นปั่นป่วนพิเศษนี้ว่า ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds Stresses) [1]

เพื่อความสะดวก Boussinesq เสนอความเค้นเรย์โนลด์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น [2]

$$\overline{\tau_{ij}} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ μ_t คือ ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent Viscosity) หรือเรียกว่า ความหนืดหมุนวน (Eddy Viscosity) ซึ่งขึ้นกับตำแหน่ง

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.33) ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (2.30-2.32) ได้ในรูปของสมการที่ (2.34-2.36)

$$\text{องค์ประกอบ } x: \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{u} + S_{Mx} \quad (2.34)$$

$$\text{องค์ประกอบ } y: \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{v} + S_{My} \quad (2.35)$$

$$\text{องค์ประกอบ } z: \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{w} + S_{Mz} \quad (2.36)$$

โดยที่ μ_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (Effective Viscosity) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.37)$$

2.3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k - epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน k - epsilon เป็นหนึ่งในแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สำหรับคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ซับซ้อนเกินไป ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากนิยมเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการวิจัยออกแบบ เริ่มแรกแบบจำลองดังกล่าวถูกคิดค้นโดย Launder และ Spalding [1] หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากขึ้น จนทำให้ปัจจุบันแบบจำลองนี้ถูกแบ่งเป็น 3 แบบจำลองได้แก่ Standard k-epsilon RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon [3] โดยแบบจำลองทั้ง 3 แบบ จะประกอบด้วยชุดสมการการถ่ายโอน 2 ชนิดที่แยกออกจากกันคือ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k) และสมการของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy, ϵ) แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 ชนิดนี้จะแตกต่างกันหลักๆดังนี้

1. วิธีการคำนวณของความหนืดปั่นป่วน
2. ค่าตัวเลขพรีนดท์เทิลปั่นป่วน (Turbulent Prandtl Number) ที่ใช้สำหรับควบคุมการแพร่แบบปั่นป่วนของทั้งพลังงานจลน์ปั่นป่วนและอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน
3. เทอมที่เกิดขึ้นและหายไปในสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน

2.3.2.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon เป็นแบบจำลองกึ่งการทดลอง (Semi-Empirical Model) ซึ่งขึ้นอยู่กับแบบจำลองสมการพลังงานจลน์ปั่นป่วนและสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน สำหรับสมการแบบจำลองการถ่ายโอนของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) จะถูกพิสูจน์จากสมการแม่นยำ (Exact Solution) ส่วนสมการแบบจำลองการถ่ายโอนของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) มาจากเหตุผลทางฟิสิกส์ ในการพิสูจน์ของแบบจำลอง k-epsilon สมมติฐานแบบจำลองนี้คือ การไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบ (Fully Turbulent) ดังนั้นผลของความหนืดเนื่องจากโมเลกุลสารถูกตัดออกไป [3]

2.3.2.2.1 สมการการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) หาได้จากสมการการถ่ายโอนที่ (2.38 และ 2.39) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.38)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.39)$$

โดยที่

G_k คือ การเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย

$$\text{หาได้จาก} \quad G_k = -\rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.40)$$

G_b คือ การเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

$$\text{หาได้จาก} \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.41)$$

Y_M คือ บทบาทของการขยายตัวที่แกว่งในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาได้จาก
$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_i^2 \tag{2.42}$$

เมื่อ $M_i = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$ และ a คือ ความเร็วเสียงในอากาศ
 σ_k และ σ_ε เป็นตัวเลขพริ้นต์เทิลป่วนสำหรับ k และ ε
 $C_{1\varepsilon}$ $C_{2\varepsilon}$ และ $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่ เมื่อ $C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$
 S_k และ S_ε คือ เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดขึ้น

2.3.2.2.1.2 แบบจำลองสำหรับความหนืดความปั่นป่วน

สำหรับความหนืดความปั่นป่วน (μ_t) ถูกคำนวณด้วยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ดังสมการที่ (2.43)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2.43}$$

โดยค่า C_μ เป็นค่าคงที่ และค่าคงที่ต่างๆในแบบจำลองแสดงค่าตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน k - epsilon

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

2.3.2.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ถูกพิสูจน์โดยใช้เทคนิคทางสถิติที่เข้มงวด (ถูกเรียกว่า Renormalization Group Theory) แบบจำลองมีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon แต่มีการทำให้ละเอียดขึ้นดังนี้

1. แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon มีการเพิ่มพจน์ในสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ซึ่งเป็นพจน์ที่มีนัยสำคัญที่ใช้ปรับปรุงความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดอย่างรวดเร็ว (Rapidly Strained Flows)
2. เพิ่มผลกระทบของการหมุนวนเนื่องจากความปั่นป่วน เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการคำนวณในกรณีที่มีการไหลแบบหมุนวน
3. แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon เสนอสูตรที่ใช้วิเคราะห์หาค่าตัวเลขพริ้นต์เทิลป่วน ขณะที่แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ใช้เป็นค่าคงที่ที่ผู้ใช้งานกำหนดขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่านั้น

4. แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่า ความหนืดประสิทธิภาพ ในรูปแบบใหม่ที่เหมาะสมกับกรณีระบบมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ทำไม่ได้

ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon มีความแม่นยำและมีความสมจริง ในกรณีการไหลในหลายรูปแบบที่กว้างกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon [3]

2.3.2.2.2.1 สมการการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน

RNG k-epsilon

พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) หาได้จากสมการการถ่ายโอนที่ (2.44 และ 2.45) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.44)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.45)$$

โดยที่ α_k และ α_ε คือ ปริมาณส่วนกลับของตัวเลขพรีนด์เทิลประสิทธิภาพสำหรับ k และ ε

2.3.2.2.2.2 แบบจำลองสำหรับความหนืดประสิทธิภาพ

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{v}{\sqrt{v^3 - 1 + C_v}} dv \quad (2.46)$$

โดยที่ $v = \mu_{eff} / \mu$ และ $C_v \approx 100$

สำหรับสมการ (2.46) จะถูกอินทิเกรทเพื่อหาค่าความหนืดประสิทธิภาพ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ประสิทธิภาพต่างๆ ซึ่งเหมาะสมในกรณีที่ระบบมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำและไหลใกล้ผนัง แต่ในกรณีที่ระบบมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูง ค่าความหนืดปั่นป่วนจะหาได้จากสมการที่ (2.43) แทน โดยค่าคงที่ $C_\mu = 0.0845$ ถูกพิสูจน์ใช้สำหรับทฤษฎีของ RNG และเป็นที่สนใจว่าค่า C_μ มีค่าใกล้เคียงกับค่า $C_\mu = 0.09$ ของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2.2.3 การปรับแก้การหมุนวนของแบบจำลองความปั่นป่วน

RNG k-epsilon

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนโดยทั่วไปแล้วจะได้รับอิทธิพลโดยการหมุนวนในการไหลเฉลี่ย (Mean Flow) ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon นำเสนอตัวเลือกที่ใช้รายงานผลกระทบของการหมุนวนโดยการปรับปรุงการหาค่าความหนืดปั่นป่วนให้เหมาะสม แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ (2.47)

$$\mu_t = \mu_{t0} f(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\epsilon}) \quad (2.47)$$

โดยที่ μ_{t0} คือ ค่าของความหนืดปั่นป่วนที่ถูกคำนวณโดยปราศจากปรากฏการณ์การหมุนวน สามารถคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (2.43) หรือสมการ (2.46)

Ω คือ ตัวเลขคุณลักษณะของการหมุนวน

α_s คือ ค่าคงที่ของการหมุนวนที่สมมุติให้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการไหลทั้งแบบหมุนวนทั้งโดเมนหรือหมุนวนแบบอ่อนแอ

ในที่นี้การปรับแก้การหมุนวนมักจะได้รับผลกระทบของความสมมาตรรอบแกน การไหลแบบหมุนวนและการไหลในสามมิติ สำหรับการหมุนวนแบบอ่อนแอ ค่าของ α_s จะมีค่า 0.07 แต่สำหรับการหมุนวนที่รุนแรงค่า α_s จะมีค่าสูง [3]

2.3.2.2.2.4 การคำนวณส่วนกลับของตัวเลขพรีนดท์เทิลประสิทธิภาพ (Effective Prandtl Numbers)

การคำนวณส่วนกลับของตัวเลขพรีนดท์เทิลประสิทธิภาพสำหรับ k และ ϵ (α_k และ α_ϵ) ทำได้โดยใช้สูตรที่พิสูจน์มาจากทฤษฎี RNG ดังสมการที่ (2.48)

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (2.48)$$

โดยที่ $\alpha_0 = 1$ ในกรณีตัวเลขเรย์โนลด์สูง ($\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \ll 1$) ค่า $\alpha_k = \alpha_\epsilon \approx 1.393$

2.3.2.2.2.5 การคำนวณพจน์ R_ϵ ในสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ)

ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างแบบจำลองความปั่นป่วน RNG และ Standard k-epsilon คือ แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon จะมีการเพิ่มพจน์ของ R_ϵ ในสมการการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.49)

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (2.49)$$

โดยที่ $\eta = Sk / \epsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = 0.012$

ซึ่งผลของพจน์ R_ϵ ดังกล่าวในแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ในสมการการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นโดยการจัดรูปสมการ (2.45) โดยเชื่อมโยงกับสมการ (2.49) ซึ่งพจน์ที่ 3 และ 4 ด้านขวามือของสมการที่ (2.45) สามารถถูกรวมได้เป็นสมการในรูปแบบดังสมการที่ (2.50)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.50)$$

โดยที่

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (2.51)$$

ในขอบเขตที่ $\eta < \eta_0$ พจน์ของ R จะส่งผลด้านบวกและค่า $C_{2\epsilon}^*$ จะมีค่ามากกว่า $C_{2\epsilon}$ ในชั้นลอกการตีพิมพ์ แสดงให้เห็นว่าที่ค่า $\eta \approx 3.0$ จะให้ค่า $C_{2\epsilon}^* \approx 2$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า $C_{2\epsilon}$ ในแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard k-epsilon มีค่าเท่ากับ 1.92 ซึ่งผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าการไหลที่มีความเครียดต่ำไปจนถึงปานกลาง แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon จะให้ผลส่วนใหญ่เทียบได้กับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard k-epsilon [3] และในขอบเขตที่มีอัตราความเครียดสูง ($\eta > \eta_0$) พจน์ของ R จะส่งผลด้านลบและค่า $C_{2\epsilon}^*$ จะมีค่าน้อยกว่า $C_{2\epsilon}$ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard k-epsilon พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon จะมีค่าความหนืดปั่นป่วนที่ต่ำกว่า [3] ดังนั้นแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon จะตอบสนองต่อผลกระทบของอัตราความเครียดสูงและความโค้งของเส้นกระแสการไหลมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard k-epsilon เพราะฉะนั้นจึงเป็นการอธิบายถึงความได้เปรียบด้านประสิทธิภาพของแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2.2.6 ค่าคงที่ของแบบจำลอง

สำหรับค่าคงที่ $C_{1\varepsilon}$ และ $C_{2\varepsilon}$ ของสมการ (2.45) ถูกพิสูจน์เชิงวิเคราะห์โดยทฤษฎีของ RNG แสดงได้ดังนี้ $C_{1\varepsilon} = 1.42$ และ $C_{2\varepsilon} = 1.68$

2.3.2.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon เป็นแบบจำลองที่ถูกปรับปรุงขึ้นและมีความแตกต่างกับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard k-epsilon ใน 2 สิ่งหลักๆได้แก่ [3]

1. แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon จะมีสูตรการคำนวณความหนืดปั่นป่วนในรูปแบบใหม่
2. สมการการถ่ายโอนของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) จะถูกเขียนในรูปแบบใหม่ ซึ่งถูกพิสูจน์จากสมการแม่นยำตรงสำหรับการถ่ายโอนของค่าเฉลี่ยของการหมุนวนผันผวนยกกำลังสอง (Mean-Square Vorticity Fluctuation)

สำหรับคำว่า “Realizable” หมายความว่า แบบจำลองนั้นสอดคล้องกับข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์บางอย่างของความเค้นเรย์โนลด์ เกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการไหลแบบปั่นป่วนโดยทั้งแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard k-epsilon และ RNG k-epsilon จะถูกทำให้เสมือนจริงมากขึ้น โดยข้อดีของแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ในปัจจุบันคือ มีความแม่นยำในการทำนายอัตราการกระจายตัวของการไหลแบบเจ็ตหน้าตัดวงกลม (Round Jet) และการไหลแบบเจ็ตระนาบ (Planar Jet) อีกทั้งแบบจำลองนี้ยังคงมีประสิทธิภาพสูงในการทำนายการไหลที่การหมุนวนที่ซับซ้อนขอบเขตภายใต้เกรเดียนต์ของความดันสวนทาง (Adverse Pressure) สูง การไหลที่มีการแยกและการไหลที่มีการเวียนกลับ [3] เพื่อความเข้าใจถึงหลักการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Realizable k-epsilon ซึ่งจะพูดถึงการรวมกันระหว่างความสัมพันธ์ของ Boussinesq ในสมการที่ (2.33) และนิยามของความหนืดของการหมุนวน (Eddy Viscosity) ในสมการที่ (2.43) เพื่อใช้สำหรับหารูปแบบของความเค้นเรย์โนลด์ปกติ ในรูปแบบของการไหลด้วยค่าเฉลี่ยความเครียดที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible Strained Mean Flow) แสดงได้ดังสมการ (2.52)

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2\nu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (2.52)$$

โดยที่

$$\nu_t \equiv \mu_t / \rho \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการคำนวณค่าความเค้นปกติ (\bar{u}^2) โดยนิยามแล้วจะมีค่าเป็นบวกแต่ในกรณีที่ติดลบนั้น จะถูกเรียกว่า “ไม่เสมือนจริง (Non-Realizable)” เกิดขึ้นต่อเมื่อค่าความเครียดนั้นมีค่ามากเพียงพอซึ่งจะสอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.54)

$$\frac{k}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} > \frac{1}{3C_\mu} \approx 3.7 \quad (2.54)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถตรวจสอบโดยวิธีความไม่สมดุลของ Schwarz สำหรับความเค้นเฉือน ($\overline{u_\alpha u_\beta}^2 \leq \overline{u_\alpha^2 u_\beta^2}$) ซึ่งจะถูกต้องเมื่ออัตราความเครียดเฉลี่ยมีค่าสูง สำหรับวิธีที่ตรงไปตรงมามากที่สุดเพื่อให้แน่ใจว่าระบบมีความเสมือนจริง (ความเค้นปกติและความไม่สมดุลของ Schwarz มีค่าเป็นบวก) คือ การทำให้ค่าแปร C_μ มีความไวต่อผลของการไหลเฉื่อย (การเปลี่ยนรูปร่างเฉื่อย) และความปั่นป่วน (k, ε) สำหรับค่าตัวแปร C_μ ที่แนะนำโดยผู้สร้างแบบจำลอง ยกตัวอย่างเช่น เรย์โนลด์ ที่ได้รับการพิสูจน์กับการทดลองว่าให้ผลที่สอดคล้อง จะให้ค่า C_μ มีค่า 0.09 ในกรณีชั้นย่อยเฉื่อยของชั้นขอบเขตสมดุลและมีค่าเท่ากับ 0.05 ในกรณีที่เป็นการไหลเฉือนเนื้อเดียวที่รุนแรง (Strong Homogeneous Shear Flow) [3]

ทั้งแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon และ RNG k-epsilon เป็นการปรับปรุงมาจากแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon โดยคุณสมบัติการไหลที่ได้รับการปรับปรุงได้แก่ เส้นการไหลโค้งที่รุนแรง กระแสวน และการหมุน แต่แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Realizable k-epsilon จะเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในบรรดาแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k-epsilon เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) ในกรณีต่างๆของการไหลที่มีการแยกและการไหลด้วยความซับซ้อนของคุณสมบัติการไหลรอง (Secondary Flow) ได้ [3]

จุดอ่อนของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon หรือแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon ชนิดอื่นๆ คือ การจำลองสมการของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ดังนั้นแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ที่ถูกนำเสนอโดย Shih และคณะ [3] จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon ดังนี้

1. แก้ไขสูตรการคำนวณความหนืดหมุนวนใหม่ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปร C_μ ที่แต่เดิมถูกนำเสนอโดยเรย์โนลด์
2. รูปแบบใหม่ของสมการแบบจำลองของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ที่ขึ้นอยู่กับสมการจลน์ศาสตร์ของคาเฉลี่ยของการหมุนวนผันผวนยกกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่หนึ่งในข้อจำกัดของแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon คือ แบบจำลองนี้จะสร้างความหนืดปั่นป่วนที่ไม่สอดคล้องทางกายภาพในสถานการณ์ที่โดเมนการคำนวณประกอบด้วยทั้งโซนการหมุนและโซนการหยุดนิ่งของของไหล (ยกตัวอย่างเช่น กรณียหลายกรอบอ้างอิง (Multiple Reference Frames) และกรณีเมชมีการเลื่อนแบบหมุน (Rotating Sliding Meshes) แต่ในความเป็นจริงแล้วแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon จะประกอบด้วยผลของการหมุนเฉลี่ยในรูปแบบนิยามของความหนืดปั่นป่วนที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป ซึ่งผลของการหมุนพิเศษดังกล่าวถูกทดสอบบนการไหลในกรณีที่มีกรอบอ้างอิงเดียวและแสดงลักษณะการทำงานที่เหนือกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon [3]

2.3.2.2.3.1 สมการการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) หาได้จากสมการการถ่ายโอนที่ (2.55 และ 2.56) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.55)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.56)$$

โดยที่ $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ และ C_2 , $C_{1\varepsilon}$ และ $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่

2.3.2.2.3.2 แบบจำลองสำหรับความหนืดปั่นป่วน

สำหรับความหนืดความปั่นป่วน (μ_t) ถูกคำนวณด้วยโดยการผสมระหว่างพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ดังสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.57)$$

สำหรับข้อแตกต่างของแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon กับแบบจำลอง k-epsilon อื่นๆ คือค่า C_μ สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.58)

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ
$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \bar{\Omega}_{ij}\bar{\Omega}_{ij}}, \bar{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \text{ และ } \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

โดยที่ $\bar{\Omega}_{ij}$ คือ เทนเซอร์เฉลี่ยของการหมุนที่ถูกมองในกรอบอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_k และค่าคงที่แบบจำลอง A_0 และ A_s ให้นิยามโดย $A_0 = 4.04$ และ $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$

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

จะเห็นได้ว่าค่า C_μ เป็นฟังก์ชันของ 1. ความเครียดเฉลี่ยและอัตราการหมุน 2. ความเร็วเชิงมุมของระบบที่มีการหมุน และ 3. สนามความปั่นป่วน (k และ ε) โดยค่า C_μ ในสมการที่ 2.57 สามารถแสดงอยู่ในรูปมาตรฐานมีค่า 0.09 สำหรับชั้นย่อยเฉื่อยของชั้นขอบเขตสมดุล [3]

2.3.2.2.3.3 ค่าคงที่แบบจำลอง

ค่าคงที่ C_1, C_2, σ_k และ σ_ε ของแบบจำลองมีค่าดังนี้ $C_{1\varepsilon} = 1.44$
 $C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0$ และ $\sigma_\varepsilon = 1.2$

2.4 แบบจำลองเฟสแยก (Discrete Phase Model)

การคูณแรงบนอนุภาค

การทำนายเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคซึ่งมีอัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคต่อของไหลมีค่าน้อยโดยอาศัยสมมูลแรงที่กระทำบนอนุภาค[3] โดยมีสมการคำนวณดังนี้

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (\bar{u} - \bar{u}_p) + \frac{\bar{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \bar{F} \quad (2.59)$$

เมื่อ \bar{F} คือ ความเร่งเพิ่มเติม (แรง/มวลอนุภาคต่อหน่วย)
 $F_D (\bar{u} - \bar{u}_p)$ คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ (drag force) ต่อ มวลอนุภาคต่อหน่วย และ

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad (2.60)$$

โดยที่ \bar{u} คือ ความเร็วของของไหล
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล
 \bar{u}_p คือ ความเร็วของอนุภาค
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค
 C_D คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน
 μ คือ ความหนืดของของไหล
 และ Reynold number หาได้จากสมการที่ (7)

$$Re = \frac{\rho d_p |\bar{u}_p - \bar{u}|}{\mu} \quad (2.61)$$

การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม

การถ่ายโอนโมเมนตัมจาก continuous phase ไปยัง discrete phase ถูกคำนวณใน ANSYS FLUENT โดยการตรวจสอบการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคที่ผ่านไปยังแต่ละปริมาตรควบคุม[3] ดังสมการที่ (8)

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{other} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE

SIMPLE ย่อมาจาก Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations ซึ่งคิดค้นโดย Patankar และ Spalding ในปี ค.ศ. 1972 [1] ระเบียบวิธีนี้ใช้กระบวนการคาดเดาและปรับแก้การคำนวณความดันบนเมชที่เหลื่อมกัน เนื่องจากไม่มีสมการโดยตรงที่ใช้หาค่าความดันโดยตรงจึงต้องอาศัยการหาค่าความดันผ่านสมการโมเมนตัมแทน ระเบียบวิธีนี้แสดงได้โดยการพิจารณาสมการการไหลราบเรียบแบบคงตัวใน 2 มิติสำหรับระบบพิกัดฉาก ซึ่งสมการโมเมนตัมแยกสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.59 และ 2.60)

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

$$a_{i,j}v_{i,j} = \sum a_{nb}v_{nb} + (p_{i,j-1} - p_{i,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.64)$$

ในขั้นแรกจะคาดเดาค่าสนามความดัน p^* u^* และ v^* แล้วแทนค่าในสมการโมเมนตัมแยกที่ (2.63 และ 2.64) จะได้เป็นสมการที่ (2.65 และ 2.66)

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.65)$$

$$a_{i,j}v_{i,j}^* = \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.66)$$

โดยให้นิยามความดันจริง (Correct Pressure: p) ให้มีค่าเท่ากับผลรวมของความดันปรับแก้ (Pressure Correction: p') และความดันคาดเดา (Guessed Pressure: p^*) เมื่อจัดให้อยู่ในรูปของความดันปรับแก้ดังสมการที่ (2.67)

$$p = p^* + p' \quad (2.67)$$

ในทำนองเดียวกันองค์ประกอบของการปรับแก้ความเร็วตามแนวแกน x และแนวแกน y แสดงได้ดังนี้

$$u = u^* + u' \quad (2.68)$$

$$v = v^* + v' \quad (2.69)$$

แทนค่าสนามความดันจริง p ในสมการโมเมนตัมแยกจะได้ผลลัพธ์เป็นสนามความเร็วจริง (u , v) สมการโมเมนตัมแยกเชื่อมโยงกับสนามความเร็วจริงด้วยสนามความดันจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลบสมการที่ (2.63) และ (2.64) ด้วยสมการที่ (2.65) และ (2.66) ตามลำดับ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p_{i-1,j} - p_{i-1,j}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.70)$$

$$a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p_{i,j-1} - p_{i,j-1}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.71)$$

จากนิยามในสมการ (2.67-2.69) เมื่อแทนค่าในสมการ (2.70 และ 2.71) จะได้เป็น

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.72)$$

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (2.73)$$

สมการที่ (2.72) และ (2.73) ถูกทำให้เป็นสมการอย่างง่ายโดยการตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ เพื่อให้ได้การปรับแก้ความเร็ว การลดรูปนี้เป็นแนวคิดหลักในการประมาณด้วยระเบียบวิธีแบบ SIMPLE ซึ่งสมการอย่างง่ายสามารถแสดงได้ใหม่ดังนี้

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.74)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.75)$$

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

แทนสมการที่ (2.74) และ (2.75) ในสมการที่ (2.68) และ (2.69) ได้ผลลัพธ์เป็น

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

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.77)$$

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

$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j}(p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (2.78)$$

$$v_{i,j+1} = v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1}(p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (2.79)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามความเร็วต้องสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ซึ่งสมการความต่อเนื่องแยกคือ

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{i,j+1} - (\rho v A)_{i,j}] = 0 \quad (2.80)$$

แทนสมการที่ (2.76) ถึง (2.79) ในสมการความต่อเนื่องแยกได้เป็นสมการปรับแก้ความดัน (Pressure Correction Equation) ดังสมการที่ (2.81)

$$a_{I,j} p'_{I,j} = a_{I+1,j} p'_{I+1,j} + a_{I-1,j} p'_{I-1,j} + a_{I,j+1} p'_{I,j+1} + a_{I,j-1} p'_{I,j-1} + b'_{I,j} \quad (2.81)$$

โดยที่ $a_{I,j} = a_{I+1,j} + a_{I-1,j} + a_{I,j+1} + a_{I,j-1}$ และสัมประสิทธิ์อื่นสำหรับสมการปรับแก้ความดันแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน [1]

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

เทอม b' แทนความไม่สมดุลเนื่องจากสนามความเร็วคาดเดาไม่เหมาะสม คำนวณสมการที่ (2.81) จะได้สนามการปรับแก้ความดันทั้งสนามการไหล เมื่อทราบสนามการปรับแก้ความดันแล้ว จึงหาความดันจริงได้จากสมการที่ (2.67) และองค์ประกอบความเร็วจากสมการที่ (2.76) ถึง (2.79) การตัดเทอม $\sum a_{nb} u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb} v'_{nb}$ จะไม่ส่งผลต่อผลเฉลยสุดท้าย (ผลเฉลยลู่เข้า) เนื่องจากการปรับแก้ความดันและการปรับแก้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ($p^* = p$, $u^* = u$ และ $v^* = v$)

อย่างไรก็ตามสมการปรับแก้ความดันอาจเกิดการลู่ออกของผลเฉลย ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วย Underrelaxation ระหว่างกระบวนการการคำนวณซ้ำ ซึ่งหาความดันใหม่ได้จาก

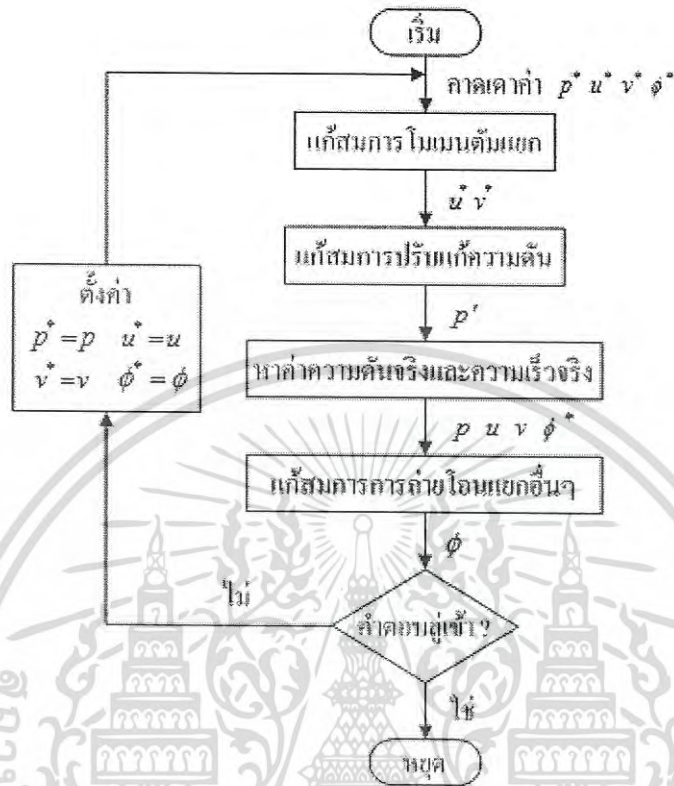
$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (2.82)$$

โดยที่ α_p คือ ตัวประกอบได้การผ่อนปรนของความดัน

การตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนที่ถูกต้องจะช่วยประหยัดต้นทุนในการจำลอง การตั้งค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออก แต่ถ้าตั้งค่าต่ำเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่เข้าอย่างช้าๆ ซึ่งการตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนจะมีค่าต่างกันขึ้นกับกรณีของการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment ; DOE) [4]

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment ; DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือวิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time, OFAT) จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง[4]

2.6.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

1. วิเคราะห์หาว่าปัจจัย (Factor) ใดที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response ; y) มากที่สุด
2. วิเคราะห์หาว่าควรกำหนดให้ปัจจัย x แต่ละตัวมีค่าเท่าใด จึงจะทำให้ y มีค่าดีที่สุด
3. วิเคราะห์หาว่าควรกำหนดให้ปัจจัย x แต่ละตัวมีค่าเท่าใด จึงจะทำให้ y มีค่าแปรปรวนน้อยที่สุด
4. วิเคราะห์หาว่าควรกำหนดให้ปัจจัย x แต่ละตัวมีค่าเท่าใด จึงจะทำให้ผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) มีค่าน้อยที่สุด

2.6.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการเก็บข้อมูลตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา ซึ่งขั้นตอนของการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้[4]

1. การนิยามปัญหา (Statement of the Problem) เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of Factors, Levels, and Ranges) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร (Range) การกำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งได้ 3 แบบดังนี้

- แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอนโดยผู้ทดลองกำหนดเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวแทนของทั้งปัจจัยมิได้เป็นตัวแทนของระดับใดระดับหนึ่ง
- แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่มรวมกัน

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the Response Variable) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องด้วย

4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) เมื่อกำหนดทรีทเมนต์ (Treatment) และตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) แล้ว ต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึง จำนวนซ้ำของการทดลอง (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลองข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

5. การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) ในระหว่างการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเทคนิคแตกต่างกันไปในแต่ละสาขาวิจัย

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์ และสรุปผลรวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูลและวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผล (Effect) เท่าใดแน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ชี้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ช่วงของความเชื่อมั่นในการสรุปผล

7. การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูป กราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น เมื่อสรุปผลแล้วควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

2.6.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง

1. วิธีปฏิบัติหรือทรีทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีที่ผู้ดำเนินการทดลองปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อวัดผลเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

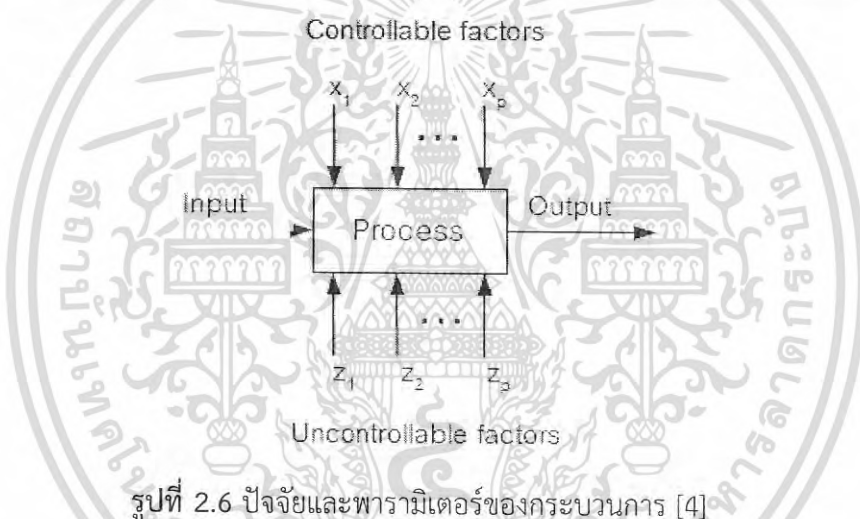
2. ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่ง que คิดว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองและนำมาพิจารณาในการทดลอง ปัจจัยอาจมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณก็ได้ กลุ่มของทรีทเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (A Particular Class of Related Treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนก็ได้ โดยปัจจัยดังแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถแบ่งออกได้เป็น

2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนด ค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลตอบสนองที่สนใจ

2.2 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจจะเป็นเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

2.2.1 ตัวแปรบกวน (Noise Variable หรือ Background Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรา กำลังทำการศึกษามากได้แก่ เวลาหรือเครื่องมืออุปกรณ์ เป็นต้น

2.2.2 Nuisance Variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อน สามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม



รูปที่ 2.6 ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ [4]

3. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง ในการทดลองหนึ่งๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

2.6.4 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง

1. การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองซ้ำทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถผลผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้ วัตถุประสงค์ของการสุ่มมีดังนี้

2.1 เพื่อขจัดอคติ หรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง และเพื่อให้แน่ใจได้ว่าทรีทเมนต์ต่างๆ จะไม่ได้เปรียบและเสียเปรียบกันในเรื่องที่เกี่ยวกับการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันว่าจะไม่มีอคติใดๆ เกิดขึ้นในการทดลอง

2.2 การวิเคราะห์และทดสอบทางสถิติ นั้นมีข้อกำหนดว่าความคลาดเคลื่อน (Error) จะต้องเกิดขึ้นโดยสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลเป็นไปตามข้อกำหนดเหล่านี้ ทั้งนี้การสุ่มจะช่วยขจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ให้เกิดขึ้นกับหน่วยทดลองด้วยโอกาสเท่าๆ กัน

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.6.5 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง

- ประโยชน์ในการพัฒนากระบวนการผลิต :

1. ช่วยเพิ่มผลผลิต (Yield)
2. ช่วยลดความแปรปรวน ทำให้ผลลัพธ์ได้ตามค่าที่ต้องการ
3. ช่วยลดเวลาในการพัฒนากระบวนการผลิต
4. ช่วยเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์
5. ช่วยลดต้นทุน

- ประโยชน์ในการออกแบบเชิงวิศวกรรม :

1. ช่วยในการวิเคราะห์เลือกรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม
2. ช่วยในการวิเคราะห์เลือกวัสดุที่ที่เหมาะสม
3. ช่วยในการเลือกพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดี
4. ช่วยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ทำงานได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.6 ผลสรุปที่ต้องการจากการออกแบบการทดลอง

1. ตัวแปรควบคุมหรือปัจจัย X ใดบ้างที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง หรือลักษณะคุณภาพ Y
2. ความสัมพันธ์หรือฟังก์ชันระหว่างตัวแปร X และ Y มีรูปแบบอย่างไร $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_p)$
3. ถ้าต้องการให้ตัวแปรตอบสนองหรือลักษณะคุณภาพ Y มีค่าที่ดีที่สุด จะต้องกำหนดค่าของตัวแปรควบคุม หรือปัจจัย X แต่ละปัจจัยอย่างไร

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองในการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ถือว่าได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง และไม่ทำให้ต้องสิ้นเปลืองทรัพยากรในการทำการทดลองมากเกินไป พร้อมทั้งสามารถช่วยประหยัดระยะเวลาในการทำการทดลองให้เหมาะสมกับการศึกษาแต่ละปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองนั้น มีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นได้แก่

- วิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Designs)
- วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM)
- วิธีการของทาคุชิ (Taguchi's Method)

ซึ่งแต่ละวิธีจะมีรูปแบบวิธีการแตกต่างกันออกไป พร้อมทั้งมีข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีเช่นเดียวกัน ดังนั้นการเลือกวิธีการออกแบบการทดลอง จึงควรเลือกให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบงานที่ต้องการทำการศึกษา สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการของทาคุชิและวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2-level factorial design) ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการสึกกร่อนสูงสุด เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความเหมาะสมกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกกร่อน โดยวิธีการของทาคุชินั้นสามารถลดจำนวนการทดลองให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่กำหนดและมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการศึกษาในงานวิจัยนี้ และสำหรับวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับนั้น เป็นการออกแบบที่ให้จำนวนการทดลองน้อยกว่าวิธีอื่นๆ เมื่อต้องใช้ในการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์ (Full factorial design) เนื่องจากกำหนดให้แต่ละปัจจัยมีเพียง 2 ระดับเท่านั้น ดังนั้นเราจึงต้องออกแบบภายใต้สมมติฐานที่ว่าปัจจัยทั้งหมดมีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้น ตลอดช่วงของค่าต่ำสุดถึงสูงสุดที่ออกแบบไว้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงขอกกล่าวถึงแต่เพียงทฤษฎีของ วิธีการทาคุชิและวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ เท่านั้น

2.7 วิธีการของทาากุชิ (Taguchi's Method)

2.7.1 แนวคิดและแบบแผนของวิธีการทาากุชิ (Taguchi Methodology)

ดร. ทากุชิ เป็นผู้ค้นพบและวางรากฐานแนวทางทฤษฎีซึ่งเป็นที่ประจักษ์และทราบกันโดยทั่วไปในเรื่อง "Quality Engineering", "Robust Design" และ "Robust Engineering" ซึ่งทฤษฎีเหล่านี้ ดร.ทากุชิ ได้ประกาศให้สังคมทั่วไปได้รับทราบในปี 1950 [4] โดย ดร. ทากุชิ จะมุ่งเน้นไปที่การลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองและการทดสอบ ซึ่ง ดร. ทากุชิ มีแนวความคิดจะใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้น้อยที่สุดและเกิดประโยชน์สูงสุด จากแนวคิดดังกล่าวนี้ ช่วยกระตุ้นให้ ดร. ทากุชิ ได้ตระหนักถึงแนวทางแบบใหม่ โดยมุ่งเน้นที่ประสิทธิภาพและการควบคุมคุณภาพ ซึ่งกล่าวโดยสรุปได้ว่า แนวคิดพื้นฐานของหลักทฤษฎี "ทากุชิ" นั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีนั้นต้องมาจากการรวมกันของชิ้นส่วนหลาย ๆ ชิ้นที่มีคุณภาพดี โดยให้นำแนวคิดนี้มาทดแทนแนวคิดแบบเก่าที่ว่า การตรวจสอบสามารถบรรลุได้ถึงระดับคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์
2. การที่จะบรรลุถึงคุณภาพที่ดีนั้น ทำได้โดยการทำให้เกิดความเป็ยงเบนจากเป้าหมายให้น้อยที่สุด ซึ่งจากการนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่มีความอ่อนไหวต่อปัจจัย หรือสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมไม่ได้
3. ความเป็ยงเบนที่เกิดจากการออกแบบตัวแปร จะต้องสามารถวัดได้ในหน่วยของต้นทุนหรือราคาของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

2.7.2 แนวทางปฏิบัติของทฤษฎีทาากุชิ

ในปัจจุบัน ทฤษฎีหรือแนวทางปฏิบัติของทาากุชิ ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นลักษณะงานหรือลักษณะปัญหาเชิงเดี่ยวหรือไม่ซับซ้อน จนถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับงานหรือลักษณะปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อน และรวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานด้านบริหารจัดการรวมถึงหลักเศรษฐศาสตร์และการบริหารธุรกิจ[4] โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะค้นหาวิธีการหรือคำตอบที่ดีที่สุด แต่ในขณะเดียวกันก็ไม่ลืมที่จะพิจารณาวิธีการหรือทางออกอื่น ๆ หรือทางเลือกอื่นซึ่งมีความได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทฤษฎีอื่น ๆ ในการแก้ปัญหาซึ่งหลักการหรือแนวทางของทาากุชิ นั้น สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การกำหนดปัญหาและการระดมความคิด เพื่อออกแบบปัจจัย หรือตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ
2. ทำการออกแบบการทดลอง และทำการทดลองจริง
3. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองรวมถึงการกำหนดค่าที่ดีที่สุดของตัวแปร
4. ทำการผลิตจริงหรือปฏิบัติจริงเพื่อพิสูจน์ว่าตัวแปรที่เรากำหนดค่าที่ดีที่สุดนั้นสามารถนำมาซึ่งการแก้ไขปัญหาที่แท้จริงได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 แผนการทดลองออร์ทोगอนอล (Orthogonal Array ; OA's)

แผนการทดลองออร์ทोगอนอล เป็นเทคนิคหลักที่มีความสำคัญและมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นแนวทางปฏิบัติของทฤษฎี OA's คือตารางมาตรฐานของการออกแบบการทดลองตามแนวทางของทฤษฎี ซึ่งมีจำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยครั้งและมีความเหมาะสมสำหรับการทดลองนั้นๆ ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ 5 ตัวแปรตัวแปรหรือปัจจัยแต่ละตัวสามารถกำหนดค่าระดับความแตกต่างได้ถึง 3 ระดับ เมื่อนำเอาข้อกำหนดในข้างต้นมาพิจารณาแล้ว เราสามารถทำการทดลองได้ทั้งหมด $3^5 = 243$ การทดลอง โดยที่ไม่ซ้ำกัน[4] ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ เราเรียกว่า การทดลองแบบสมบูรณ์ (Full Factorial) แต่ในขณะที่เดียวกันหากใช้วิธีการออกแบบการทดลองตามวิธีการของทฤษฎีโดยใช้หลักการของแผนการทดลองออร์ทोगอนอลในการออกแบบการทดลอง ซึ่งผลที่ได้คือ L27 (3^5) ซึ่งหมายถึงจำนวนครั้งในการทดลองจะมีเพียง 27 การทดลองเท่านั้น โดยตารางที่ 2.3 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์ (Full Factorial) กับการออกแบบการทดลองตามแนวทฤษฎีทฤษฎี และรูปที่ 2.7 ถึง 2.9 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างตารางการออกแบบแผนการทดลองออร์ทोगอนอล L4, L9 และ L16

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์และการออกแบบการทดลองตามแนวทางทฤษฎี

แผนการทดลองออร์ทोगอนอล	ปัจจัย	ระดับ	การทดลองแบบสมบูรณ์
L4	3	2	8
L8	7	2	128
L9	4	3	81
L12	11	2	2,048
L17	13	3	1,594,323
L64	21	4	4.4×10^{12}
L81	40	4	1.2×10^{19}

Run	Factor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

รูปที่ 2.7 การออกแบบการทดลองชนิด L4 (2^3) [4]

หมายเหตุ : L4 (2^3) หมายถึง การออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Run	Factor			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

รูปที่ 2.8 ตารางการออกแบบการทดลองชนิด $L_9 (3^4)$ [4]

หมายเหตุ : $L_9 (3^4)$ การออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 4 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยกำหนดให้มี 3 ระดับ

Run	Factor				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

รูปที่ 2.9 ตารางการออกแบบการทดลองชนิด $L_{16} (4^5)$ [4]

หมายเหตุ : $L_{16} (4^5)$ หมายถึง การออกแบบการทดลองที่มี 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยกำหนดให้มี 4 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratio ; S/N)

โดยทั่วไปผลของการทดลองจากการออกแบบการทดลองใดๆ มักจะแทนด้วยสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์คือ Y_{ij} ซึ่งก็คือค่าของตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ที่เราสนใจนั่นเอง ซึ่งในแง่ของการออกแบบการทดลองโดยทั่วไปมักจะให้ความสนใจกับ Y_{ij} หรือค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Y_{ij}) ก่อนข้างสูงว่าสอดคล้องกับความต้องการหรือไม่ โดยบางครั้งลึ้มพิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองนั้นๆ ว่ามีมากน้อยเพียงใด[4]

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำของตัวแปรตามใดๆ หรือของขบวนการใดเป็นสิ่งบ่งบอกถึงควมมีคุณภาพสูงและการออกแบบที่ดีมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพที่ดีและการออกแบบที่ดีมีประสิทธิภาพ ดร. ทากูชิ ได้พัฒนาวิธีการคำนวณค่า อัตราส่วน S/N ของผลการทดลองใดๆ เพื่อบ่งชี้ว่าการทดลองนั้นให้ผลตามเป้าหมายที่เราต้องการหรือไม่โดยพิจารณาทั้งค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง โดยคำนวณค่า อัตราส่วน S/N ซึ่งคือ อัตราส่วนหรือผลหารของค่าเฉลี่ย (Signal) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Noise) ดังแสดงในสมการที่ 2.83

MSD (Mean Square Deviation) เป็นตัวแปรค่าหนึ่งที่ได้มาจากการคำนวณตามแนวทางของทากูชิ ซึ่งวิธีการคำนวณจะแสดงอยู่ในสมการที่ 2.84 ถึงสมการที่ 2.86 โดย n คือ จำนวนการทดลอง ซึ่งการเลือกคำนวณค่า MSD ในแนวทางของทากูชิ นั้นมีได้ 3 รูปแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์หรือบรรทัดฐานของตัวแปรตอบสนอง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งขึ้นอยู่กับบรรทัดฐานทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ที่เราจะทำการออกแบบการทดลอง และทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของข้อกำหนดหรือมาตรฐานทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ค่า S/N ที่มีค่าสูง ๆ นั้น จะบ่งบอกถึงผลที่ดีของสมการที่จะได้มาซึ่งค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองที่เราต้องการ (Optimum) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ

สมการอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) :

$$(S/N)_i = -10 \log_{10} (MSD_i) \quad (2.83)$$

สมการค่ายิ่งน้อยยิ่งดี. (Smaller is Better) :

$$MSD_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{i,j} \quad (2.84)$$

สมการค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal is best) :

$$MSD_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - m)^2 \quad : m = \text{ค่าเป้าหมาย (Target value)} \quad (2.85)$$

สมการค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger is Better) :

$$MSD_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{i,j}^2} \quad (2.86)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งกล่าวโดยสรุปได้ว่าวิธีการทาภูชิเป็นเครื่องมือเชิงคุณภาพที่ช่วยปรับปรุงและพัฒนากระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งสามารถเลือกปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการ โดยการออกแบบแผนการทดลองออร์ทोगอนอล (Orthogonal Array) เพื่อลดจำนวนการทดลองให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่กำหนด และประหยัดระยะเวลากับค่าใช้จ่ายอีกด้วย และสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลของทาภูชิเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการพิจารณาจากระดับที่ทำให้ ค่าตัวชี้วัดของทาภูชิ ซึ่งก็คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, S/N) มีค่าสูงสุด และ อัตราส่วน S/N แบ่งได้เป็น 3 กรณีคือ กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger is Better), กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better) และ กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal is Best)

สำหรับงานวิจัยนี้ จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสึกกร่อน โดยใช้วิธีการของทาภูชิในการศึกษา และเลือกใช้แผนการทดลองออร์ทोगอนอลแบบ L9 เนื่องจากมีปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย 3 ระดับ และในการศึกษานี้มีตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราการสึกกร่อนสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกวิธีแบบ ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better) ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) [5]

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ที่ต้องการจะศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆ ปัจจัย (Factor) พร้อมกัน คำว่าแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่สมบูรณ์ในแต่ละครั้งหรือแต่ละซ้ำของการทดลองนั้นกล่าวคือ มีการใช้ระดับของปัจจัยต่างๆ ร่วมกันจึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่างๆ ในการทดลองครั้งหนึ่งๆ ได้พร้อมกัน [4] การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่

1. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละการทำซ้ำของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ $a \times b$ การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลีเคตทั้งหมด n ครั้ง

2. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณเช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่ง ๆ ใน 1 การทำซ้ำที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ โดยปกติในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย “-”

3. การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2 ระดับ เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทดลองสามารถละเลยอันตรกิริยาขั้นสูงบางตัวได้ เนื่องจากถ้าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แบบเต็มมีจำนวนปัจจัยมาก จำนวนการทดลองอาจจะเพิ่มขึ้นมากเกินไปกว่าทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างครบกรณี การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจึงถูกนำมาใช้ในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบกล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจของผู้ทดลอง จึงใช้การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่ามีปัจจัยใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นการทดลองเนื่องจากโดยมากแล้ว ในขณะที่นั้นมีปัจจัยจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป

4. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลางและสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามเป็นตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามลำดับ สังเกตว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบที่สนใจ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้ การออกแบบ 3^k จะเหมาะสม เมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้งแต่การออกแบบนี้ไม่ได้เป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดใน การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์แบบ พหุนามกำลังสอง โดยการออกแบบการทดลองที่เป็นทางเลือกที่ดีกว่า คือ การออกแบบพื้นผิวผลตอบ

- การทดลองชนิดแฟกทอเรียลมีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดี

1. เป็นการใช้น้อยหน่วยทดลองทั้งหมด เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของทรีทเมนต์หลายทรีทเมนต์พร้อมกันได้ จึงเป็นการประหยัดและเสียเวลาน้อยลงกว่าการทดสอบครั้งละ 1 ปัจจัย
2. ทำให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้ จึงช่วยในการสรุปผลได้กว้างขวางกว่าการทดลองครั้งละ 1 ปัจจัย

ข้อเสีย

1. เนื่องจากมีรูปแบบการทดลอง (Treatment Combination) จึงต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้น จึงอาจมีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนหน่วยทดลอง
2. เมื่อจำนวน Run มากๆ อาจจะประสบปัญหาในการป้องกันความคลาดเคลื่อนของการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดๆได้
3. ถ้าจำนวนปัจจัยมีมากขนาดของการทดลองก็จะใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเสียค่าใช้จ่ายสูงและการหาวัตถุทดลองที่มีความสม่ำเสมอจำนวนมากก็เป็นไปได้ยาก และต้องทำการทดลองให้ครบทุก Run ทำให้ต้องสิ้นเปลืองทรัพยากรมาก และใช้เวลา

สำหรับในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ 2 ระดับ (2-level full factorial design) ซึ่งหมายถึงใช้เป็น การทดลองแบบสมบูรณ์ (full factorial) โดยแต่ละปัจจัยเปลี่ยนแปลงได้ 2 ระดับ และต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 2^k โดยที่ k คือจำนวนปัจจัยหรือ Main effect โดยในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 ปัจจัย ดังนั้นในการทดลองนี้จะมีจำนวนรอบการทดลองหรือ $\text{Run} = 2^4 = 16$ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

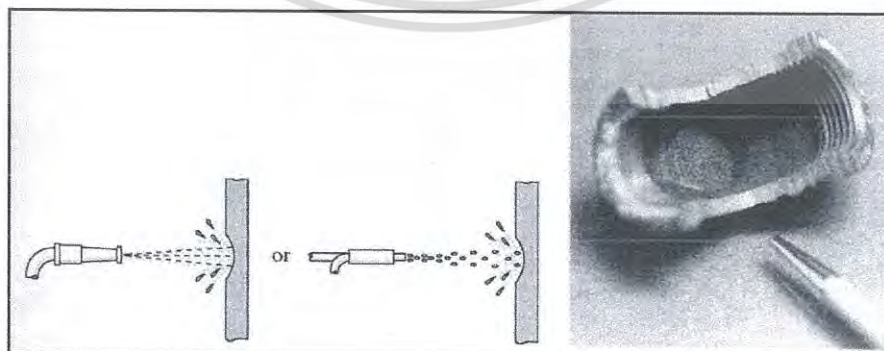
2.9 การสึกกร่อน (Erosion)

การสึกกร่อน คือ การที่ผิวของวัสดุบางส่วนหลุดหายไปเนื่องจากเกิดการปฏิสัมพันธ์ทางกลระหว่างผิวของวัสดุ กับ ของเหลว หรือ ฟองอากาศ หรือ อนุภาคที่มีความแข็งสูงปนมากับของเหลว หรือ ของแข็งไหลผ่าน และเกิดการกระทบผิวหน้างาน เกิดการสึกหรือโดยผิวหน้างานหลุดออกไป โดยทั่วไปจะซ่อมแซมโดย การเชื่อมพอกผิว [6] โดยการสึกกร่อนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. การสึกกร่อนเนื่องจากของผสมระหว่างของเหลวและของแข็ง (Slurry erosion) : เป็นการชนด้วยของผสมระหว่างของเหลวและของแข็ง ซึ่งมีอัตราการสึกกร่อนไม่สูงและผิวเป็นหลุม
2. การสึกกร่อนเนื่องจากหยดของเหลว (Liquid droplet erosion) : เป็นการชนด้วยของเหลวหรือฟองของเหลว โดยจะมีลักษณะการสึกกร่อนไม่สูงมาก และผิวจะเป็นหลุม
3. การสึกกร่อนเนื่องจากฟองแก๊ส (Cavitations erosion) : เป็นการเกิดและแตกของฟองอากาศในลำของเหลว ซึ่งมีอัตราการสึกกร่อนไม่สูงและผิวเป็นหลุม
4. การสึกกร่อนเนื่องจากการชนอนุภาคของแข็ง (Solid particle erosion) : เป็นการชนของอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ลักษณะร่องรอยที่ปรากฏบนผิวจะสัมพันธ์กับรูปแบบของการไหล

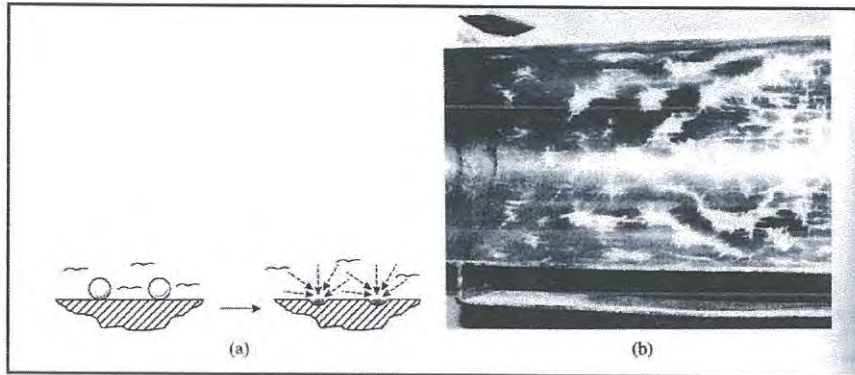


รูปที่ 2.10 การสึกกร่อนเนื่องจากของผสมระหว่างของเหลวและของแข็ง [6]

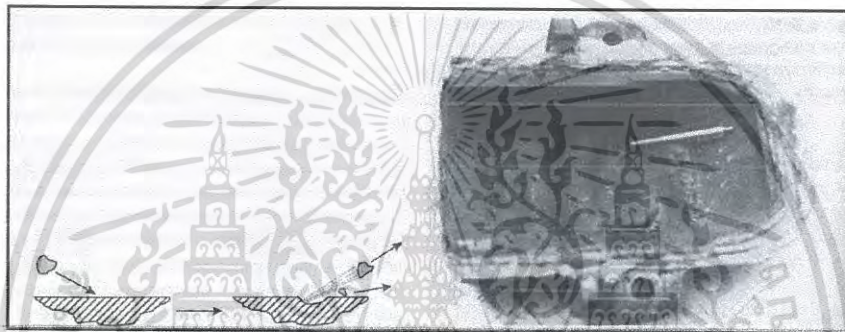


รูปที่ 2.11 การสึกกร่อนเนื่องจากหยดของเหลว [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การร้าวร่อนเนื่องจากฟองแก๊ส [6]



รูปที่ 2.13 การร้าวร่อนเนื่องจากการหดตัวของแข็ง [6]

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการร้าวร่อนเนื่องจากการชนของอนุภาคของแข็ง ภายในท่อข้ออ 90 องศา เนื่องจากในปัจจุบัน การชนถ่ายอนุภาคของแข็งที่กระทบกับผนังท่อทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขนส่ง และการลำเลียงผลิตภัณฑ์ต่างๆ ภายในท่อ ที่มีอนุภาคของแข็งอยู่ในสายการไหล ซึ่งมักจะเกิดการร้าวร่อนตามข้อต่อต่างๆ และจะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะและอายุการใช้งานลดลง และสุดท้ายอาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุได้ ซึ่งเมื่อปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้นย่อมส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตอย่างแน่นอน อาจถึงขั้นต้องหยุดกระบวนการผลิตเนื่องจากต้องปรับปรุงแก้ไขและซ่อมบำรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 สมการทำนายการสึกกร่อน

อัตราการสึกกร่อนเนื่องจากอนุภาคสามารถวัดได้ที่ผนัง โดยมีสมการคำนวณดังต่อไปนี้ [3]

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (2.87)$$

- เมื่อ $C(d_p)$ คือ ฟังก์ชันของขนาดอนุภาค
 α คือ มุมกระทบของเส้นทางอนุภาคกับพื้นผิวผนัง
 $f(\alpha)$ คือ ฟังก์ชันของมุมกระทบ
 v คือ ความเร็วกระทบของอนุภาค
 $b(v)$ คือ ฟังก์ชันของความเร็วอนุภาค
 A_{face} คือ พื้นที่ของพื้นผิวเซลล์ที่ผนัง

ค่าของฟังก์ชันเหล่านี้ถูกนำเสนอโดย Edward และคณะ [7] ซึ่งเป็นสมการคำนวณการสึกกร่อนของโปรแกรม FLUENT [3] ซึ่งในกรณีนี้ $C(d_p)$, $f(\alpha)$ และ $b(v)$ กำหนดให้เป็นฟังก์ชันแบบ piecewise-linear เพื่อที่จะกำหนดภาวะขอบเขตของผนัง โดยที่อัตราการสึกกร่อนมีหน่วยเป็น $kg_{material} / m^2 \cdot s$ และสามารถแปลงเป็นหน่วย $mm / year$ ได้โดยการหารด้วยความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เป็นผนัง [7]

สำหรับการทำนายเทียบกับผลการทดลองจะให้อยู่ในหน่วยของ m / kg โดยหาได้จากสมการที่ (2.88)

$$\text{Penetration ratio} = \frac{R_{erosion}}{\dot{m}_p \cdot \rho_w} \quad (2.88)$$

- โดย \dot{m}_p คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาค
 ρ_w คือ ความหนาแน่นของผนังท่อ

ในการคำนวณหา $f(\alpha)$ จะใช้สมการของ Oka และคณะ ซึ่งจะพิจารณาผลของความแข็งของวัสดุที่ใช้เป็นผนัง [8] ดังสมการที่ (2.89)

$$f(\alpha) = (\sin(\alpha))^{n_1} (1 + H_v (1 - \sin(\alpha)))^{n_2} \quad (2.89)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

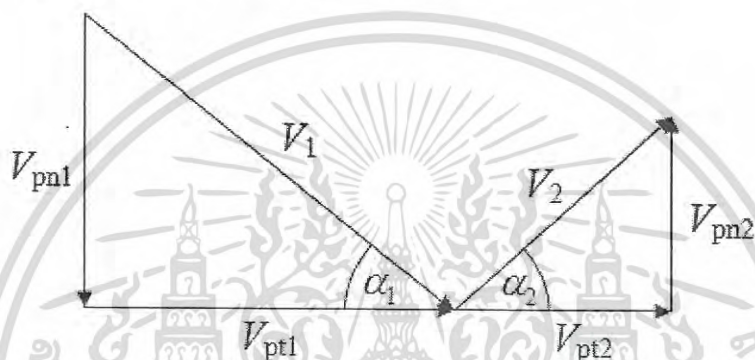
โดยที่ n_1 และ n_2 หาได้จาก

$$n_1 = 0.71(H_v)^{0.14} \quad (2.90)$$

$$n_2 = 2.4(H_v)^{-0.94} \quad (2.91)$$

เมื่อ H_v คือ ค่าความแข็งของวัสดุ

สัมประสิทธิ์การคืนสู่สภาพเดิม (Restitution coefficient)



รูปที่ 2.14 ความเร็วของอนุภาคก่อนและหลังชนกับผนัง [9]

เมื่ออนุภาคกระทบกับผนังจะเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นในทิศทางที่แตกต่างกัน สัมประสิทธิ์การคืนสู่สภาพเดิม (Restitution coefficient) จะถูกนำมาใช้อธิบายการสูญเสียพลังงาน ซึ่งแสดงเป็นอัตราส่วนองค์ประกอบความเร็วของอนุภาค หลังจากเข้าปะทะผนัง (V_2) ส่วนตัวก่อนการปะทะกับผนัง (V_1) โดย e_n และ e_t แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคตลอดการปะทะในทิศทางตั้งฉากและแนวเส้นสัมผัสกับผนัง [9] ดังสมการต่อไปนี้

$$e_n = \frac{V_{pn2}}{V_{pn1}} \quad (2.92)$$

$$e_t = \frac{V_{pt2}}{V_{pt1}} \quad (2.93)$$

V_{pn} และ V_{pt} เป็นความเร็วอนุภาคในแนวตั้งฉากและแนวสัมผัสตามลำดับ ซึ่งสัญลักษณ์เลข 1 คือก่อนเข้าปะทะ และเลข 2 คือหลังปะทะกับผนัง ซึ่งสัมประสิทธิ์นี้ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าไม่มีการสูญเสียโมเมนตัมระหว่างที่ปะทะ และถ้ามีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงอนุภาคสูญเสียโมเมนตัมทั้งหมดหลังจากมีการปะทะ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลการสะท้อนระหว่างอนุภาคกับผนังมีความสำคัญมากในการจำลองการสีก้อนเนื่องจากอนุภาคสามารถปะทะกับผนังได้หลายครั้ง จึงมีผู้เสนอความสัมพันธ์สำหรับสัมประสิทธิ์การคืนสู่สภาพเดิม โดยมีพื้นฐานจากคุณลักษณะของอนุภาคและภาวะการเข้าปะทะ โดย Grant และ Tabakoff [10] เป็นหนึ่งในผู้ที่คิดค้นสัมประสิทธิ์เหล่านี้ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้และมีสมการดังต่อไปนี้

$$e_n = 0.993 - 1.76\alpha_1 + 1.56\alpha_1^2 - 0.49\alpha_1^3 \quad (2.94)$$

$$e_t = 0.988 - 1.66\alpha_1 + 2.11\alpha_1^2 - 0.67\alpha_1^3 \quad (2.95)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การศึกษาผลการทดลองของตำแหน่งการสีกกร่อนสูงสุดที่ทำให้เกิดความเสียหายในท่อข้องอ

Mazumder และคณะ [11] ได้ศึกษาการสีกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งภายในผนังท่อข้องอซึ่งท่อเป็นอลูมิเนียมโดยมีของไหลเฟสเดียวคือแก๊สเป็นตัวพาอนุภาคของแข็งที่เป็นเม็ดทรายเคลื่อนที่ภายในท่อแนวตั้งซึ่งมีความเร็วของของไหลเท่ากับ 34.1 เมตร/วินาที และในกรณีของการไหลแบบหลายเฟสภายในท่อแนวนอนและแนวตั้งที่ความเร็วของแก๊สเท่ากับ 34.1, 27.4, 18.9 และ 9.8 เมตร/วินาทีและความเร็วของของเหลวเท่ากับ 0.3 เมตร/วินาที และ 0.03 เมตร/วินาที ซึ่งผลการทดลองจะใช้วิธีการวัดการสีกกร่อนของข้องอ 90 องศาโดยจะวัดความลึกของรอยก่อนและหลังจากการชนของเม็ดทรายด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Profilometer) หลักการทำงานคือใช้ปลายเข็มขนาดเล็กที่สามารถสปริงขึ้นและลงได้ลากผ่านผิววัสดุนั้นแล้วจะแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งจะแสดงผลเป็นภาพและค่าความหยาบผิวในหน่วยไมครอน โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ในกรณีของการสีกกร่อนที่เกิดจากอนุภาคของแข็งโดยที่เป็นของไหลเฟสเดียวเป็นตัวพาให้ผลการทดลองโดยสูญเสียความหนาของผนังท่อมากที่สุดเท่ากับ 42.5 ไมครอนที่ตำแหน่งองศาการสีกกร่อนเท่ากับ 55 องศา และสำหรับผลการทดลองของการไหลแบบหลายเฟสพบว่าอิทธิพลของการไหลในท่อแนวนอนและแนวตั้งนั้นส่งผลต่อการสีกกร่อนที่แตกต่างกันออกไปซึ่งเมื่อเทียบที่ความเร็วของของเหลวที่เท่ากันแล้ว การไหลในท่อแนวตั้งให้ผลการสีกกร่อนที่สูงกว่าและเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้การสีกกร่อนยิ่งเพิ่มสูงขึ้นด้วยเนื่องจากการไหลร่วมกันระหว่างเฟสแก๊สและของเหลวมีรูปแบบเป็นวงแหวน (Annular flow) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ (Entrainment) ของเหลวที่ผิวท่อเข้ามาในส่วนของเฟสแก๊สซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคทรายจำนวนมากก็ถูกเหนี่ยวนำเข้ามาในเฟสแก๊สด้วยจึงเป็นเหตุให้อนุภาคที่อยู่ใจกลางของเฟสแก๊สมีความเร็วสูงจึงทำให้เกิดการสีกกร่อนที่ผนังท่อข้องอมากขึ้น

2. การศึกษาเชิงตัวเลขของอัตราส่วนมวลที่มีผลกระทบต่อการสีกกร่อนภายในข้องอ

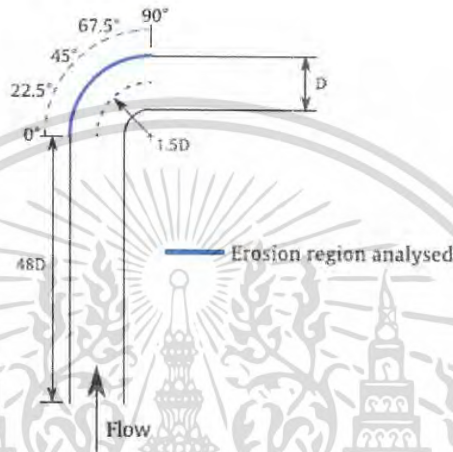
งานวิจัยของ Carlos และคณะ [12] ได้มีการศึกษาการไหล 2 เฟสคือเฟสแก๊สและเฟสของแข็งที่ส่งผลกระทบต่อการสีกกร่อนภายในท่อข้องอ 90 องศาที่อัตราส่วนเชิงมวลของอนุภาคของแข็งต่อมวลของแก๊ส (ϕ) เท่ากับ 0.013, 0.25, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในที่นี้กำหนดให้เฟสแก๊สเป็นอากาศและเฟสของแข็งคือเม็ดทราย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงผลการทดลองมาจาก Mazumder และคณะ[11] จากข้อ 1 ที่กล่าวไปข้างต้น และจากอัตราส่วนเชิงมวลนี้ได้นำมาศึกษาผลของการกระทำกันระหว่างเฟสแก๊สและของแข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. อัตราการไหลควคู่ 1 ทาง (One-way coupling) โดยกำหนดให้ $\phi \ll 1$ หมายถึง เฟสแก๊สมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่อนุภาคไม่ส่งผลต่อเฟสแก๊สด้วยแรงฉุด (Drag force) หรือแรงกระทำอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อัตราการไหลควบคู่ 2 ทาง (Two-way coupling) โดยกำหนดให้ $\phi \approx 1$ หมายถึง เฟสแก๊สส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทางกลับกันเฟสของแข็งก็ส่งผลต่อเฟสแก๊สด้วยวิธีการการลดหรือเพิ่มโมเมนตัมและความปั่นป่วน

3. อัตราการไหลควบคู่ 4 ทาง (Four-way coupling) โดยกำหนดให้ $\phi \gg 1$ หมายถึง นอกจากเฟสแก๊สและเฟสของแข็งมีอิทธิพลต่อกันแล้วแต่ยังมีผลของการกระทำกันระหว่างเฟสของแข็งกันเองอีกด้วย โดยมีการศึกษาตำแหน่งการสึกกร่อนดังรูปที่ (..)



รูปที่ 2.15 แบบการจำลองการสึกกร่อน

จากงานวิจัยสรุปได้ว่า

1. ที่ $\phi = 0.013$ ผลของอัตราการไหลควบคู่ทั้ง 3 แบบให้ผลการสึกกร่อนเหมือนกัน
2. ที่ $\phi = 0.25$ ผลของอัตราการไหลควบคู่ 1 ทางและ 2 ทางให้ผลการสึกกร่อนใกล้เคียงกันมาก แต่อัตราการไหลควบคู่ 4 ทางให้ผลการสึกกร่อนที่ลดลงอย่างชัดเจนแสดงว่าผลของการกระทำกันระหว่างอนุภาคของแข็งส่งผลต่อการสึกกร่อน
3. ที่ $\phi = 0.25$ และ $\phi = 1.0$ ผลของอัตราการไหลควบคู่ 2 ทางให้ผลที่เหมือนกันแสดงว่าอนุภาคนั้นไม่ได้มีความสำคัญที่จะส่งผลต่อเฟสแก๊สเพียงพอที่จะเป็นสาเหตุให้มีการสึกกร่อนเปลี่ยนแปลงไปแต่ผลของอัตราการไหลควบคู่ 4 ทางสามารถทำให้ผลการสึกกร่อนสูงสุดสามารถลดลงได้
4. ผลของอัตราการไหลควบคู่ 4 ทางที่ $\phi = 0.013, 0.25, 0.5, 1.0$ และ 1.5 พบว่าเมื่อ ϕ เพิ่มขึ้นแสดงอย่างเห็นได้ชัดว่าให้ผลการสึกกร่อนสูงสุดมีค่าลดลงเนื่องจากผลของการกระทำกันระหว่างอนุภาคของแข็งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันและทำให้อนุภาคของแข็งไม่ชนกับผนังท่อโดยตรงตรงตำแหน่งองศาการสึกกร่อนสูงสุดทำให้ช่วยลดการสึกกร่อนได้แต่ก็ทำให้อนุภาคหลังการชนเคลื่อนที่ไปในทิศทางออกของท่อมามากขึ้นจึงส่งผลให้ช่วง 60-90 องศาการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม ϕ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการเชิงตัวเลข

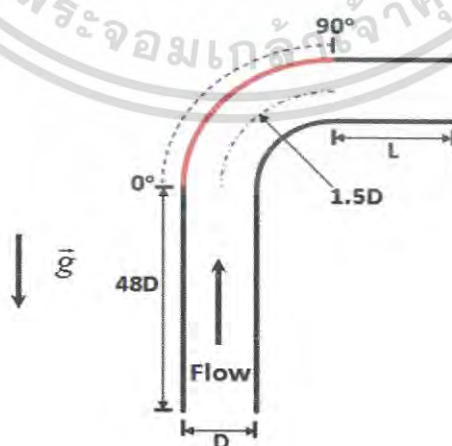
การศึกษาเพื่อทำนายปรากฏการณ์การสีกกร่อนด้วยวิธีการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถทำได้โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข ซึ่งมีขั้นตอนการจำลองดังต่อไปนี้

3.1.1 การสร้างแบบจำลองและการกำหนดสภาวะขอบเขต

สร้างแบบจำลองท่อทรงกระบอกที่มีหน้าตัดวงกลมแบบสามมิติ และมีลักษณะเป็นท่อข้องอ 90 องศา ด้วยโปรแกรม Gambit โดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Carlos และคณะ [12] ซึ่งเป็นชุดการทดลองต้นแบบที่ถูกนำมาใช้ทำนายการสีกกร่อนในงานวิจัยนี้ โดยจะนำมาสร้างเมชเพื่อใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งบริเวณที่ศึกษาจะเป็นภายในข้องอ 90 องศา เนื่องจากเป็นส่วนที่จะเกิดการสีกกร่อนขึ้น พร้อมทั้งมีขนาดและทิศทางกรไหลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของท่อที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดของท่อ	เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D)	0.0254
ความยาวท่อทางเข้า (48D)	1.22
ความยาวท่อทางออก (L)	0.1
รัศมีความโค้งของข้องอ (1.5D)	0.0381



รูปที่ 3.1 สัดส่วนของท่อและบริเวณที่ศึกษา (รูปนี้ไม่ได้อ้างอิงมาจากสัดส่วนที่แท้จริง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสร้างแบบจำลองได้ตามขนาดที่ต้องการแล้ว จะต้องทำแบบจำลองให้สมบูรณ์เพื่อใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขโดยการสร้างเมช ซึ่งเมชที่ใช้จะเป็นเมชทรงหกหน้า (Hexahedral Mesh) เนื่องจากเมชลักษณะนี้มีคุณภาพสูงและใช้เวลาในการคำนวณเร็วกว่าเมชชนิดอื่น โดยจะติเมชให้ละเอียดในบริเวณช่ององศา เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดการสีกกร่อนสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้นจะต้องกำหนดสภาวะขอบเขตให้กับแบบจำลอง เพื่อเป็นการระบุขอบเขตของการทำนายการไหลของของไหลในแบบจำลอง และทำให้รูปแบบการจำลองถูกต้อง ซึ่งถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อการจำลองการไหล โดยในการศึกษานี้จะกำหนดให้ที่ทางเข้าของท่อเข้าเป็นความเร็วขาเข้า (Velocity Inlet) ส่วนที่ทางออกของท่อขาออกจะถูกกำหนดให้เป็นการไหลออก (Outflow) และบริเวณท่อที่เป็นผนังท่อทั้งหมดจะกำหนดให้เป็นผนัง (Wall) และผนังเป็นผิวที่ไม่เคลื่อน (No-Slip) สำหรับส่วนที่เหลืที่ไม่ได้ถูกกำหนดสภาวะขอบเขตจะถูกกำหนดให้เป็นแบบอินทีเรีย (Interior) โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3.2 เมชที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายการสีกกร่อน (จากโปรแกรม Gambit)

3.1.2 รูปแบบของการจำลองเชิงตัวเลขและภาวะการดำเนินงานสำหรับการทำนายการสีกกร่อน

การคำนวณการไหลและการทำนายปรากฏการณ์การสีกกร่อนภายในท่อช่ององศา 90 องศา สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลองและทำนายผล ซึ่งมีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นแบบ Finite Volume โดยการศึกษาในงานวิจัยนี้จะเป็นการคำนวณการไหลแบบคงตัวในสามมิติ (Three-Dimensional Steady State Flow) และเนื่องจากเป็นการไหลแบบปั่นป่วน จึงเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่จะนำมาศึกษา 3 แบบด้วยกัน คือ แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon[3] โดยมีรูปแบบของการจำลองเชิงตัวเลขดังนี้ การคำนวณเชื่อมโยงความเร็วและความดัน จะคำนวณด้วยระเบียบวิธี SIMPLE ส่วนแบบแผนการประมาณค่าเชิงตัวเลข (Numerical Scheme) สำหรับความดันและโมเมนตัม ใช้เป็น Standard และ Second Order Upwind ตามลำดับ ส่วนปริมาณความปั่นป่วนจะใช้เป็นแบบ Second Order Upwind เช่นเดียวกับโมเมนตัม ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะใช้แบบจำลอง Discrete Phase Model โดยมีภาวะการดำเนินงานดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 รูปแบบของการจำลองเชิงตัวเลข

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

ตารางที่ 3.3 ภาวะการดำเนินงานสำหรับการทำนายการสีกกร่อน [12]

ประเภทของไหล	อากาศ
ความหนาแน่นของไหล	1.225 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ความหนืดของไหล	1.7894×10^{-5} ปาสคาล·วินาที
ความเร็วของไหล	34.1 เมตร/วินาที
ประเภทของวัสดุที่ใช้เป็นท่อ	อลูมิเนียม
ความหนาแน่นวัสดุ	2600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ประเภทของอนุภาค	ทราย
ความหนาแน่นของอนุภาค	2700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	182 ไมครอน
ความเร็วของอนุภาค	34.1 เมตร/วินาที
อัตราส่วนมวลของอนุภาคต่อมวลของอากาศ	0.013

3.1.3 การศึกษาหาจำนวนเมชที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง (Grid Independent Study)

หลักการในการจำลองขั้นต้นมีความจำเป็นที่จะต้องหาจำนวนเมชที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง หรือเมชที่เป็นอิสระต่อคำตอบก่อน (grid independent) เพื่อให้ได้จำนวนเมชที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง โดยสามารถทำได้ด้วยการตีเมชที่มีจำนวนเมชต่างๆกัน จากนั้นนำไปจำลองการไหลแบบคงตัวในสามมิติ โดยใช้รูปแบบของการจำลองเชิงตัวเลขที่กล่าวมาข้างต้น (หัวข้อ 3.1.2) และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard k-epsilon ซึ่งเป็นแบบจำลองอ้างอิงตามงานวิจัยของ Carlos และคณะ[12] โดยใช้จำนวนเมช 6 ขนาดได้แก่ 112,455 321,930 485,100 661,500 970,200 และ 1,660,365 เซลล์ ซึ่งจะพิจารณาจากความเร็วที่กึ่งกลางท่อตรงตามแนวแกน z ตั้งแต่ทางเข้าท่อจนถึงปลายท่อตรงก่อนถึงท่อข้ออ 90 องศา เพื่อหาเมชที่ทำให้คำตอบไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การตรวจสอบแบบจำลอง (Model Validation)

การตรวจสอบแบบจำลองสามารถทำได้โดยการใช้แบบจำลองที่ผ่านการศึกษาหาจำนวนเมชที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงมาจำลอง เพื่อเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลอง ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการคำนวณการไหลแบบคงตัวในสามมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 แบบที่ได้เลือกมาข้างต้น คือ แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon เพื่อเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมที่สุดต่อการทำนายการสีกกร่อน โดยจะพิจารณาจากค่าอัตราการสีกกร่อนสูงสุดและองศาการเกิดการสีกกร่อนตลอดความยาวท่อ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง [11] และแบบจำลองของ Oka [8] ที่เป็นแบบจำลองต้นแบบที่ใช้อ้างอิง [12] ซึ่งแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ได้ จะต้องมีการจำลองที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ใช้อ้างอิงในระดับที่ยอมรับได้ และเมื่อแบบจำลองที่ใช้สามารถให้ผลที่ยอมรับได้แล้ว จึงจะนำตัวแปรเงื่อนไขในการคำนวณเหล่านั้นเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการจำลองเพื่อทำนายอัตราการสีกกร่อนที่มีตัวแปรศึกษาอื่นๆต่อไป

3.2 การออกแบบการทดลองตามแบบแผนอโทโกนอลของทากูชิ

3.2.1 กำหนดปัจจัยและระดับที่ต้องการศึกษา

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสีกกร่อนทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ความเร็ว (Velocity) ขนาดอนุภาค (Particle Size) รัศมีความโค้งงอของท่อ (Curvature Radius) และวัสดุพื้นผิว (Surface Material) โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และมีตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราการสีกกร่อนสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกวิธีการวิเคราะห์ของทากูชิที่เป็นแบบ ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$S / N = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่นำไปใช้ออกแบบการทดลองโดยวิธีของทากูชิ

ปัจจัย	ระดับ			หน่วย
	I	II	III	
A: ความเร็ว	34.1	51.15	17.05	เมตร/วินาที
B: ขนาดอนุภาค	180	270	90	ไมครอน
C: รัศมีความโค้งงอของท่อ	1.5D	2D	1D	เมตร
D: วัสดุพื้นผิว	อลูมิเนียม	ไทเทเนียม	เหล็กกล้าไร้สนิม	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 แผนการทดลองออร์ทोगอนอล (Orthogonal Array)

เนื่องจากมีทั้งหมด 4 ปัจจัย 3 ระดับ จึงเลือกแผนการทดลองออร์ทोगอนอลแบบ L9 (L9 Orthogonal Array) ดังตารางที่ 3.5 และเมื่อแทนที่ตัวแปรต่างๆลงในแผนการทดลองออร์ทोगอนอลแบบ L9 จะได้ตารางการทดลองเพื่อไปทำการจำลองตามแผนการทดลองออร์ทोगอนอลต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 แผนการทดลองออร์ทोगอนอลแบบ L9

จำนวนการทดลอง (L9)	ปัจจัย			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

ตารางที่ 3.6 แผนการทดลองออร์ทोगอนอลแบบ L9 ที่บ่อนค่าปัจจัยต่างๆตามแผนการทดลอง

การทดลองที่	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	รัศมีความโค้ง ของท่อ	วัสดุพื้นผิว
1	34.10	180	1.5D	อลูมิเนียม
2	34.10	270	2D	ไทเทเนียม
3	34.10	90	1D	เหล็กกล้าไร้สนิม
4	51.15	180	2D	เหล็กกล้าไร้สนิม
5	51.15	270	1D	อลูมิเนียม
6	51.15	90	1.5D	ไทเทเนียม
7	17.05	180	1D	ไทเทเนียม
8	17.05	270	1.5D	เหล็กกล้าไร้สนิม
9	17.05	90	2D	อลูมิเนียม

หมายเหตุ : D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบการทดลองตามวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ 2 ระดับ

3.3.1 กำหนดปัจจัยและระดับที่ต้องการศึกษา

สำหรับวิธีนี้จะศึกษาปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัยเช่นเดียวกับกับหัวข้อ 3.2 แต่ระดับของแต่ละปัจจัยจะกำหนดให้เป็นแบบ 2 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 พร้อมทั้งมีตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราการสึกกร่อนสูงสุด เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3.7 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่นำไปใช้ออกแบบการทดลองโดยวิธี 2^4 factorial design

ปัจจัย	ระดับ		หน่วย
	Low (-1)	High (1)	
A: ความเร็ว	17.05	51.15	เมตร/วินาที
B: ขนาดอนุภาค	90	270	ไมครอน
C: รัศมีความโค้งงอของท่อ	1D	2D	เมตร
D: วัสดุพื้นผิว	อลูมิเนียม	ไทเทเนียม	-

3.3.2 ตารางการออกแบบการทดลองตามวิธี 2^4 factorial design

เนื่องจากมีทั้งหมด 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 2^k โดยที่ k คือจำนวนปัจจัย ทำให้มีจำนวนรอบการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $2^4 = 16$ การทดลอง โดยเป็นการทดลองแบบสมบูรณ์ (full factorial) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และเมื่อแทนที่ตัวแปรต่างๆลงในตารางในรูปที่ 3.3 จะได้ตารางการทดลองเพื่อไปทำการจำลองต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.8

Run Number	Factor			
	A	B	C	D
1	-	+	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

รูปที่ 3.3 ตารางออกแบบการทดลองแบบ 2^4 factorial design [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 ตารางออกแบบการทดลองแบบ 2^4 factorial design ที่ถูกแทนค่าปัจจัยต่างๆ

การทดลองที่	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	รัศมีความโค้ง ของท่อ	วัสดุพื้นผิว
1	17.05	90	1D	อลูมิเนียม
2	51.15	90	1D	อลูมิเนียม
3	17.05	270	1D	อลูมิเนียม
4	51.15	270	1D	อลูมิเนียม
5	17.05	90	2D	อลูมิเนียม
6	51.15	90	2D	อลูมิเนียม
7	17.05	270	2D	อลูมิเนียม
8	51.15	270	2D	อลูมิเนียม
9	17.05	90	1D	ไทเทเนียม
10	51.15	90	1D	ไทเทเนียม
11	17.05	270	1D	ไทเทเนียม
12	51.15	270	1D	ไทเทเนียม
13	17.05	90	2D	ไทเทเนียม
14	51.15	90	2D	ไทเทเนียม
15	17.05	270	2D	ไทเทเนียม
16	51.15	270	2D	ไทเทเนียม

หมายเหตุ : D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

จากตารางที่ 3.8 หมายความว่า ผู้ทำการทดลองจะต้องปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยทั้งสิ้นคือ ความเร็ว(A), ขนาดอนุภาค (B), รัศมีความโค้งของท่อ (C) และวัสดุพื้นผิว (D) ให้เป็นไปตามตารางที่ 3.8 โดย 1 รอบการทดลอง จะต้องมีการบันทึกค่าตัวแปรตอบสนอง 1 ครั้ง แล้วค่อยปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยให้เป็นตาม Run ที่ 2 และวัดค่าตัวแปรตอบสนอง อีกครั้ง ทำเช่นนี้ไปจนกว่าจะครบทุกการจำลอง ซึ่งจะแสดงผลการจำลองทั้งหมดไว้ในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

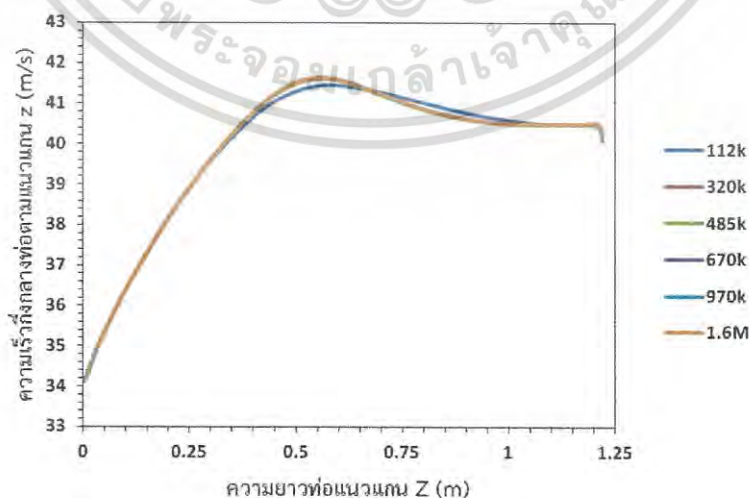
บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1 เมชที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง (Grid Independent)

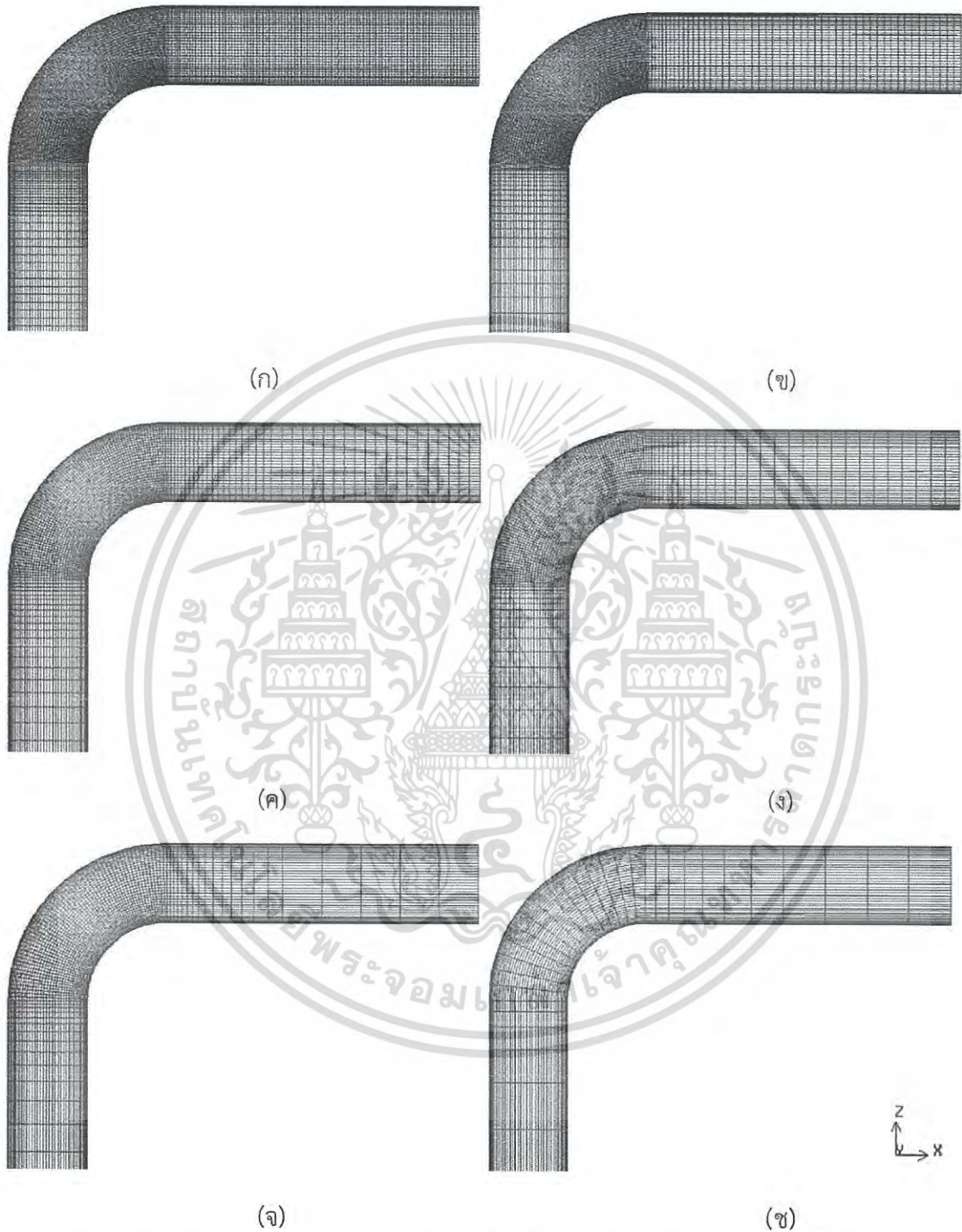
ใช้โปรแกรม FLUENT ในการจำลองเชิงตัวเลข ในขั้นต้นต้องหาจำนวนเมชที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง หรือเมชที่เป็นอิสระต่อคำตอบ (grid independent) โดยสามารถทำได้ด้วยการตีเมชที่มีจำนวนเมชต่าง ๆ กัน แล้วนำไปจำลองการไหลโดยใช้ SIMPLE algorithm และ numerical scheme ของความดัน โมเมนต์ และความปั่นป่วนเป็นแบบ Standard, Second Order Upwind และ second order upwind ตามลำดับ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน standard k-epsilon เพื่อวิเคราะห์หาจำนวนเมชที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความเร็วที่กึ่งกลางท่อตามแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาจำนวนเมช 6 ขนาดได้แก่ 112,455 321,930 485,100 661,500 970,200 และ 1,660,365 เซลล์ โดยรูปแบบของเมชแต่ละขนาดได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.2

ในการจำลองการไหลได้กำหนดให้ท่อวางตามแนวแกน z ดังนั้นของไหลจึงไหลตามแนวแกน z เช่นกัน โดยจะวัดความเร็วที่กึ่งกลางท่อตรงตามแนวแกน z ตั้งแต่ทางเข้าท่อจนถึงปลายท่อตรงก่อนถึงท่อข้องอ 90 องศาเพื่อศึกษาผลของจำนวนเมช ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเมชมากขึ้น จะทำให้มีความแม่นยำมากขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนเมชมากกว่า 321,930 เซลล์เป็นต้นไป พบว่าจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้นทำให้คำตอบของแบบจำลองไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งก็คือไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามระยะแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แต่การคำนวณจะใช้เวลามากขึ้นตามจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเลือกจำนวนเมชที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงคือ 321,930 เซลล์ จึงเหมาะสมที่สุดที่จะถูกนำมาใช้ในการทำนายการเกิดการสั่นร่อนภายในข้องอ 90 องศา และจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองในส่วนอื่นๆ ของงานวิจัยนี้ต่อไป เพื่อช่วยประหยัดระยะเวลาในการคำนวณ



รูปที่ 4.1 ความเร็วที่กึ่งกลางท่อตามแนวแกน z ตลอดความยาวของท่อตรงของจำนวนกริดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แบบจำลองท่อข้องอ 90 องศา ที่จำนวนกริดต่างๆ (ก) 1,660,365 เซลล์ (ข) 970,200 (ค) 661,500 เซลล์ (ง) 485,100 เซลล์ (จ) 321,930 เซลล์ และ (ช) 112,455 เซลล์ (จากโปรแกรม Gambit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

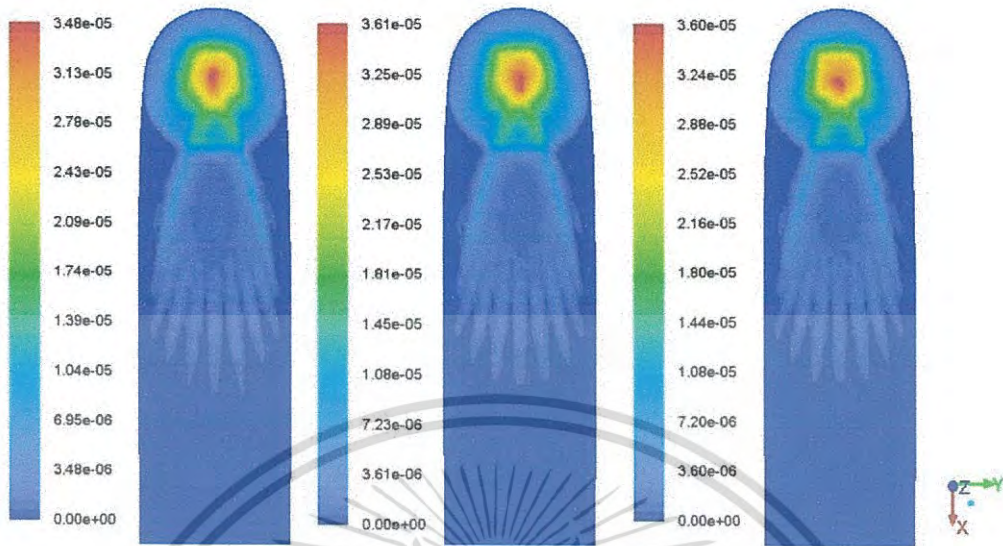
4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองอ้างอิงและการศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ส่งผลต่อการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา

การตรวจสอบแบบจำลองสามารถทำได้โดยการใช้แบบจำลองที่ผ่านการศึกษาหาจำนวนเมชที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงมาจำลอง เพื่อเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลอง โดยการจำลองการสีกกร่อนนี้มีการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ส่งผลต่อการทำนายการสีกกร่อน โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้เลือกมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้มี 3 แบบด้วยกันคือ 1.แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon 2. แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และ 3. แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon[3] เพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา ซึ่งการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิงของ Carlos และคณะ [12] โดยสามารถวิเคราะห์ผลการจำลองได้จากคอนทัวร์ของการสีกกร่อนและตำแหน่งการเกิดการสีกกร่อนของแต่ละองศามาใช้เพื่อเป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนที่จะเลือกนำมาใช้งาน

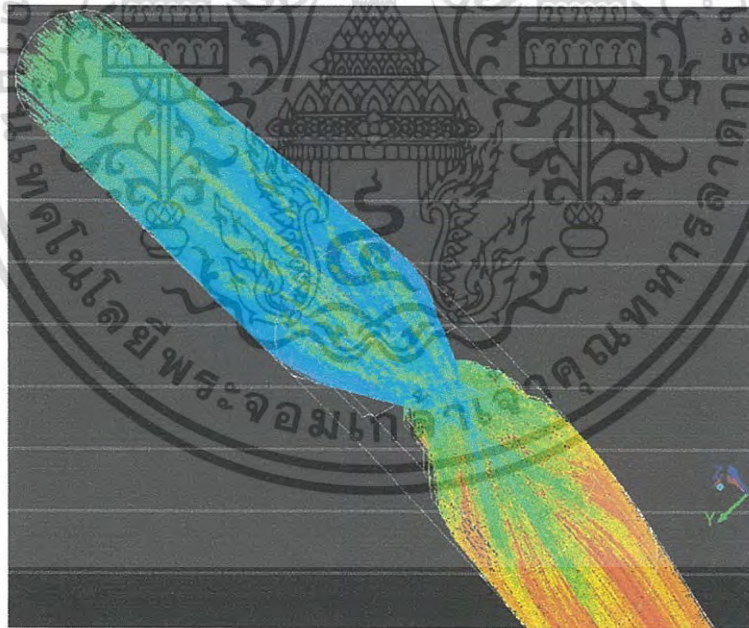
4.2.1 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา

จากการวิเคราะห์คอนทัวร์ของการสีกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าคอนทัวร์ทั้ง 3 แบบของแบบจำลองความปั่นป่วนมีผลการจำลองที่ใกล้เคียงกันมาก โดยในช่วงเริ่มต้นอนุภาคจะเคลื่อนที่พร้อมกับอากาศด้วยความเร็วที่เท่ากัน และอนุภาคจะพุ่งเข้าชนกับผนังท่อที่บริเวณช่องอ 90 องศาด้วยมุมการชนที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้โมเมนตัมหลังการเข้าชนของแต่ละอนุภาคเกิดการสูญเสียที่ไม่เท่ากัน และเป็นเหตุให้คอนทัวร์ของการทำนายการสีกกร่อนให้ผลอัตราการสีกกร่อนออกมาไม่เท่ากันในแต่ละจุด จะสังเกตได้จากสีของคอนทัวร์ โดยพิจารณาได้จากบริเวณที่มีอัตราการสีกกร่อนสูงๆจะมีสีแดงไปจนถึงบริเวณที่มีอัตราการสีกกร่อนต่ำๆจะมีสีน้ำเงิน หรือสามารถดูได้จากค่าในกราฟที่บอกเป็นตัวเลขและสีทางด้านซ้ายของแต่ละรูป และเมื่อพิจารณาบริเวณที่เกิดการสีกกร่อนสูงสุดพบว่าบริเวณกึ่งกลางท่อจะเป็นส่วนที่มีโอกาสเกิดการสีกกร่อนสูงสุด เนื่องจากเกิดจากการชนของอนุภาคมากที่สุด เพราะบริเวณกึ่งกลางท่อจะเป็นส่วนที่อนุภาคเคลื่อนไปรวมกัน สังเกตได้จากภาพเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งบริเวณการสีกกร่อนสูงสุดนี้อาจเกิดมาจากการถูกชนโดยอนุภาคโดยตรง หรืออาจเกิดจากการกระดอนจากการชนที่มุมมองอื่นๆ แต่เมื่อเกิดขึ้นซ้ำๆจะทำให้อัตราการสีกกร่อนเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน และจากงานวิจัยอ้างอิงจะให้ความสำคัญในการวัดการสีกกร่อนที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อของระนาบ $y=0$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของท่อที่เกิดการสีกกร่อนสูงสุด ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการวัดค่าการสีกกร่อนจากการจำลองที่มุมมองการสีกกร่อนต่างๆ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 แบบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [11] และแบบจำลองของ Oka [8] ที่มาจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 คอนทัวร์การสีกกร่อนของแบบจำลองความปั่นป่วนต่างๆ (ก) Standard k-epsilon (ข) RNG k-epsilon (ค) Realizable k-epsilon (จากโปรแกรม Fluent)

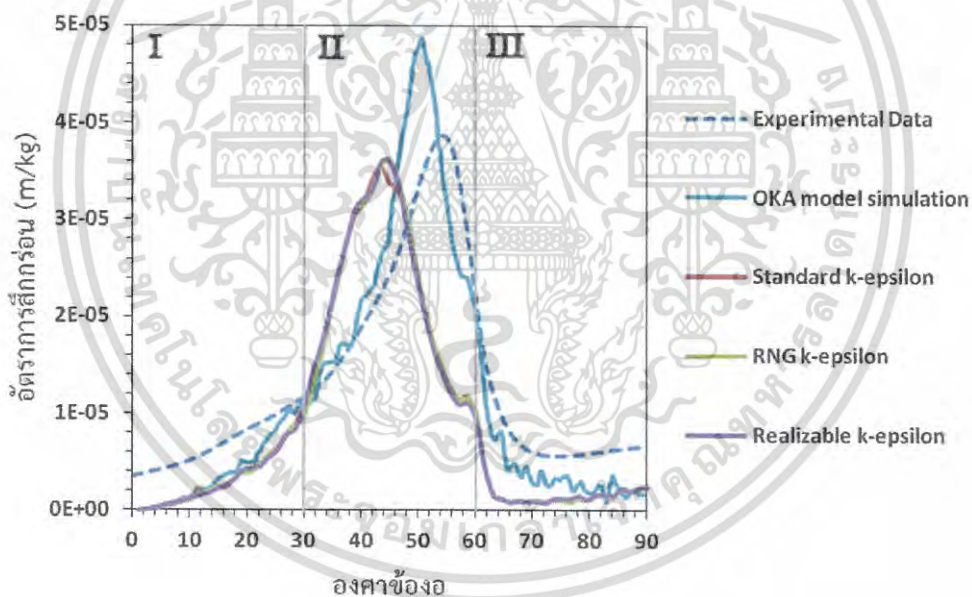


รูปที่ 4.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (จากโปรแกรม Fluent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองและแบบจำลองของ Oka

ในการเปรียบเทียบผลการจำลองจะใช้ผลการทดลองของ Mazumder และคณะ [11] ในการอ้างอิงเพื่อเป็นการยืนยันผลการจำลอง ซึ่งผลการทดลองจะใช้วิธีการวัดหาการสึกกร่อนของข้องอ 90 องศาโดยจะวัดความลึกของรอย ก่อนและหลังจากการชนของเม็ดทรายด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Profilometer) หลักการทำงานคือใช้ปลายเข็มขนาดเล็กที่สามารถสปริงขึ้นและลงได้ลากผ่านผิววัสดุนั้นแล้วจะแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งจะแสดงผลเป็นภาพและค่าความหยาบผิวในหน่วยไมครอน ในการจำลองการสึกกร่อนที่บริเวณข้องอ 90 องศาจะนำกริดที่เป็นอิสระต่อค่าตอบมาศึกษาผลของแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อทำนายการสึกกร่อนเทียบกับผลการทดลองและงานวิจัยของ Carlos และคณะ [12] ที่ใช้แบบจำลองทำนายการสึกกร่อนของ Oka และคณะ [8] โดยการจำลองการสึกกร่อนจะให้ความสำคัญกับการศึกษาแนวโน้มการเกิดการสึกกร่อนของแต่ละองศาภายในข้องอ 90 องศาและค่าการสึกกร่อนสูงสุด จากผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ช่วงที่ 1 บริเวณ 0-30 องศา ช่วงที่ 2 บริเวณ 30-60 องศา และช่วงที่ 3 บริเวณ 60-90 องศา ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับองศาข้องอ

ส่วนที่ 1 บริเวณ 0-30 องศา ในช่วงนี้จะเห็นว่าจากผลการทดลองจะมีค่าการสึกกร่อนเริ่มต้นแต่แบบจำลองของ Oka และคณะ [8] และแบบจำลองใน Fluent นั้นไม่มีค่าเริ่มต้นของการสึกกร่อนอันเนื่องมาจากแบบจำลองการทำนายการสึกกร่อนนั้นมีพจน์ของ $\sin(\theta)$ ทำให้การทำนายตอนเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าค่าการทดลอง ซึ่งในช่วงนี้แบบจำลองของ Oka และคณะ [8] และแบบจำลองใน Fluent มีผลการทำนายการสึกกร่อนที่ใกล้เคียงกัน พร้อมทั้งมีแนวโน้มคล้ายกันกับผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 2 บริเวณ 30-60 องศา ในช่วงนี้ทั้งแบบจำลองของ Oka และแบบจำลองใน Fluent มีความเบี่ยงเบนกับผลการทดลองออกไป แต่ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง แต่ถ้าหากพิจารณาในจุดสูงสุดของค่าการสีกกร่อนจะเห็นว่าแบบจำลองของ Oka จะมีค่าสูงกว่าการทดลองค่อนข้างมาก แต่แบบจำลองใน Fluent มีค่าสูงสุดของการสีกกร่อนใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า แต่แบบจำลองทั้ง 2 นั้นก็มีมุมมองสาเหตุที่เกิดการสีกกร่อนเบี่ยงเบนไปจากผลการทดลองเช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากตารางพบว่าแบบจำลอง RNG k-epsilon มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำนายการเกิดการสีกกร่อนเนื่องจากให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองน้อยที่สุดถึงแม้จะใช้เวลาในการคำนวณที่มากกว่าแบบจำลอง Standard k-epsilon ก็ตาม ส่วนแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ให้ผลการทำนายที่แม่นยำเช่นเดียวกับกับแบบจำลอง RNG k-epsilon แต่จะใช้เวลาในการคำนวณมาก เนื่องจากมีความซับซ้อนของสมการมากกว่า และในช่วงที่ 2 นี้แบบจำลองการทำนายการสีกกร่อนของ Oka [8] ให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดแต่ทำนายองศาของการเกิดการสีกกร่อนสูงสุดคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองการสีกกร่อนของ FLUENT

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการสีกกร่อนกับผลการทดลองเมื่อใช้แบบจำลองทำนายการสีกกร่อนจากงานวิจัยอ้างอิงของ Carlos และคณะ [12] กับ FLUENT

แบบจำลอง	%ความคลาดเคลื่อน		เวลาคำนวณ (ชม.)
	ค่าการสีกกร่อนสูงสุด	องศาการสีกกร่อนสูงสุด	
Standard k-epsilon	8.31	21.8	6.8
RNG k-epsilon	5.9	18.2	7.7
Realizable k-epsilon	6.49	18.2	8.0
Okaและคณะ	26.49	9.1	-

ส่วนที่ 3 บริเวณ 60-90 องศา สำหรับช่วงนี้จะเห็นว่าแบบจำลองของ Oka และคณะ จะให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกว่าแบบจำลองใน Fluent แต่แบบจำลองทั้ง 2 ก็มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลอง

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองใน Fluent สามารถนำมาใช้ทำนายการสีกกร่อนได้ เนื่องจากมีความแม่นยำที่สามารถยอมรับได้ และเพียงพอต่อการศึกษาการสีกกร่อนของท่อข้องอ 90 องศาแล้ว และแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีความเหมาะสมมากที่สุดต่อการทำนายการสีกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา ที่ถูกเลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป คือ แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon เพราะแบบจำลองนี้มีการปรับแก้พจน์ของความหนืดปั่นป่วน (μ_t) ให้เหมาะสมกับการไหลหมุนวน[13] ที่เกิดขึ้นภายในข้องอ 90 องศาจึงทำให้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ให้ค่าการสีกกร่อนและองศาการสีกกร่อนที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด พร้อมทั้งใช้เวลาในการคำนวณอย่างเหมาะสม

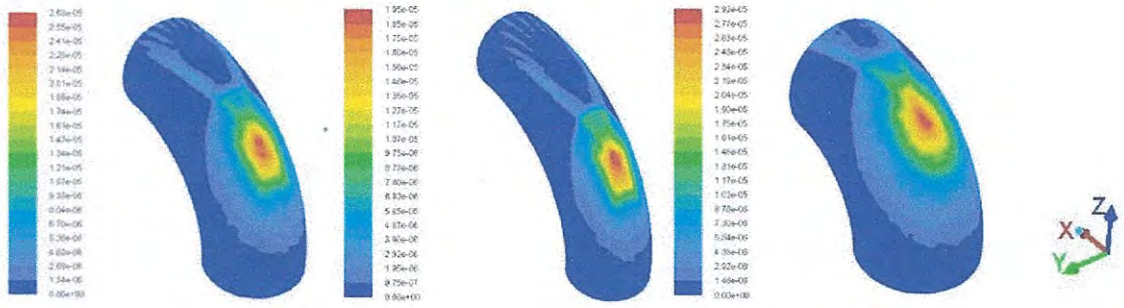
4.3 ผลการจำลองการสึกกร่อนโดยวิธีของทาภูเขา

จากการทำการทดลองตามแผนการทดลองอโทโกนอล L9 จะได้ผลการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งก็คือ อัตราการสึกกร่อนสูงสุด ที่เป็นตัวแปรตอบสนองที่เราต้องการ เพื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้ อัตราส่วน S/N ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และมีลักษณะคอนทัวร์จากการทำนายการสึกกร่อนดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองตามแผนการอโทโกนอล L9 พร้อมทั้งค่า อัตราส่วน S/N

การจำลอง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	รัศมีความ โค้งของท่อ	วัสดุพื้นผิว	อัตราการสึกกร่อน (กิโลกรัมต่อตารางเมตร ต่อวินาที) $\times 10^{-6}$	อัตราส่วน S/N
1	34.10	180	1.5D	อลูมิเนียม	26.80	91.44
2	34.10	270	2D	ไทเทเนียม	19.50	94.20
3	34.10	90	1D	เหล็กกล้าไร้สนิม	29.20	90.69
4	51.15	180	2D	เหล็กกล้าไร้สนิม	103.00	79.74
5	51.15	270	1D	อลูมิเนียม	129.00	77.79
6	51.15	90	1.5D	ไทเทเนียม	97.80	80.19
7	17.05	180	1D	ไทเทเนียม	2.26	112.92
8	17.05	270	1.5D	เหล็กกล้าไร้สนิม	2.13	113.43
9	17.05	90	2D	อลูมิเนียม	1.77	115.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.) การทดลองที่ 1

(ข.) การทดลองที่ 2

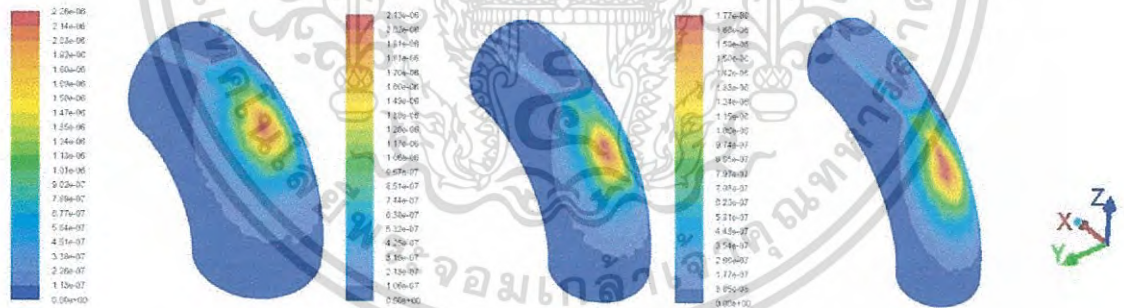
(ค.) การทดลองที่ 3



(ง.) การทดลองที่ 4

(จ.) การทดลองที่ 5

(ฉ.) การทดลองที่ 6



(ช.) การทดลองที่ 7

(ซ.) การทดลองที่ 8

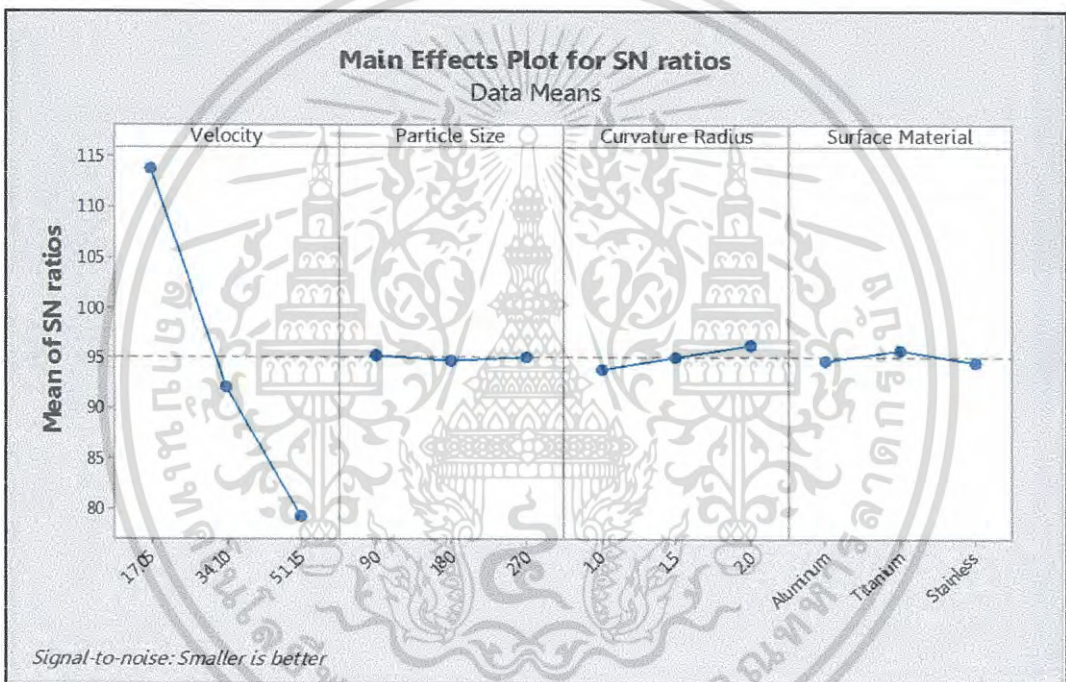
(ฅ.) การทดลองที่ 9

รูปที่ 4.6 ลักษณะคอนทัวร์ของแต่ละการจำลอง (จากโปรแกรม Fluent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่ออัตราการสึกกร่อนสูงสุด

เมื่อใช้กระบวนการของทากูชิ พิจารณาผลโดยอาศัย อัตราส่วน S/N จากผลที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าที่อัตราการสึกกร่อนสูงสุด มีค่าต่ำๆ ซึ่งก็คือเป็นผลที่ดี จะเห็นได้ว่ามี อัตราส่วน S/N ที่สูง ดังนั้นการวิเคราะห์จะสามารถดูได้จากค่า อัตราส่วน S/N ซึ่งค่า S/N ที่มีค่าสูงๆ นั้น จะบ่งบอกถึงผลที่ดีของสมการที่จะได้มาซึ่งค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองที่เราต้องการ (Optimum) [4] และเมื่อได้นำข้อมูลไป สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักกับ อัตราส่วน S/N (main effects plot for SN ratio) จะทำให้เห็นแนวโน้มของแต่ละปัจจัยอย่างชัดเจนว่าส่งผลต่ออัตราการสึกกร่อนสูงสุดอย่างไรบ้าง ดังรูปที่ 4.7 แล้วสามารถวิเคราะห์แต่ละปัจจัยได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักกับ อัตราส่วน S/N (จากโปรแกรม Minitab 17)

- ความเร็ว

ความเร็วเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการสึกกร่อนมากที่สุดปัจจัยหนึ่ง จะเห็นได้ว่า เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกกร่อนมากกว่าปัจจัยอื่นๆ โดยเมื่อเพิ่มความเร็วมากขึ้น จะทำให้อัตราการสึกกร่อนสูงสุด มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อความเร็วสูงขึ้น แรงที่เข้าปะทะกับผนังท่อก็มีมากขึ้นตามไปด้วย และหากดูจากค่า อัตราส่วน S/N จะเห็นว่าลดต่ำลงเมื่อความเร็วสูงขึ้น โดยจะมีค่าต่ำที่สุดที่ความเร็วสูงสุดที่ทำการศึกษา คือ 51.15 เมตร/วินาที เพราะฉะนั้นค่าที่ดีที่สุดและเหมาะสมมากที่สุดสำหรับปัจจัยความเร็ว คือ ความเร็วที่ต่ำที่สุดนั่นเอง ซึ่งเท่ากับ 17.05 เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• ขนาดอนุภาค

ขนาดอนุภาคที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดการสึกกร่อนสูงสุด มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ที่ 180 และ 270 ไมครอนจะเห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นอัตราการสึกกร่อนก็มากขึ้น แต่ผลจากแรงต้านการเคลื่อน (drag force) ก็มีผลมากขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้ความเร็วที่เข้าปะทะกับผนังเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่มากขึ้นเรื่อยๆ มีค่าความเร็วปะทะตกลงไปจากเดิม ซึ่งเมื่อขนาดใหญ่อาจทำให้ผลของแรงต้านการเคลื่อนที่ส่งผลมากขึ้น และเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้อนุภาคที่กระดอนกลับมาหลังจากการชนกับผนังไปกระทบกับอนุภาคใหม่ที่กำลังเคลื่อนที่มาทำให้อนุภาคที่กำลังเข้าชนผนังที่หลังมีแรงปะทะตกลงเนื่องจากมีความเร็วลดลงจากการชนกันเองของอนุภาค ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Nguyen และคณะ[14] ทำให้ที่ขนาดอนุภาคใหญ่มาๆอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการสึกกร่อนน้อยกว่าในช่วงที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ และหากพิจารณา ค่า อัตราส่วน S/N ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 90 ไมครอน

• รัศมีความโค้งงอ

เมื่อท่อมีรัศมีความโค้งงอมากขึ้นจะทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือทรายเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และมุมที่เข้าปะทะกับท่อก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับท่อที่มีรัศมีความโค้งงอมากๆจะส่งผลให้อัตราการสึกกร่อนสูงสุด มีค่าต่ำลง เพราะฉะนั้นการออกแบบท่อให้มีความโค้งรัศมีมากขึ้น จะช่วยให้ลดการเกิดการสึกกร่อนได้ เนื่องจากการไหลภายในท่อมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรัศมีความโค้งงอของท่อ ในกรณี 1D จะเห็นได้ว่าเมื่อถึงจุดโค้งจะเปลี่ยนลักษณะการไหลอย่างทันทีทันใด ทำให้ส่งผลต่อการสึกกร่อนมาก แต่เมื่อมีระยะความโค้งงอมากขึ้น อนุภาคของแข็งภายในจะสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และเกิดการสึกกร่อนน้อยลง ซึ่งค่าที่เหมาะสมและดีที่สุดในปัจจุบันรัศมีความโค้งงอของท่อ คือ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

• วัสดุพื้นผิว

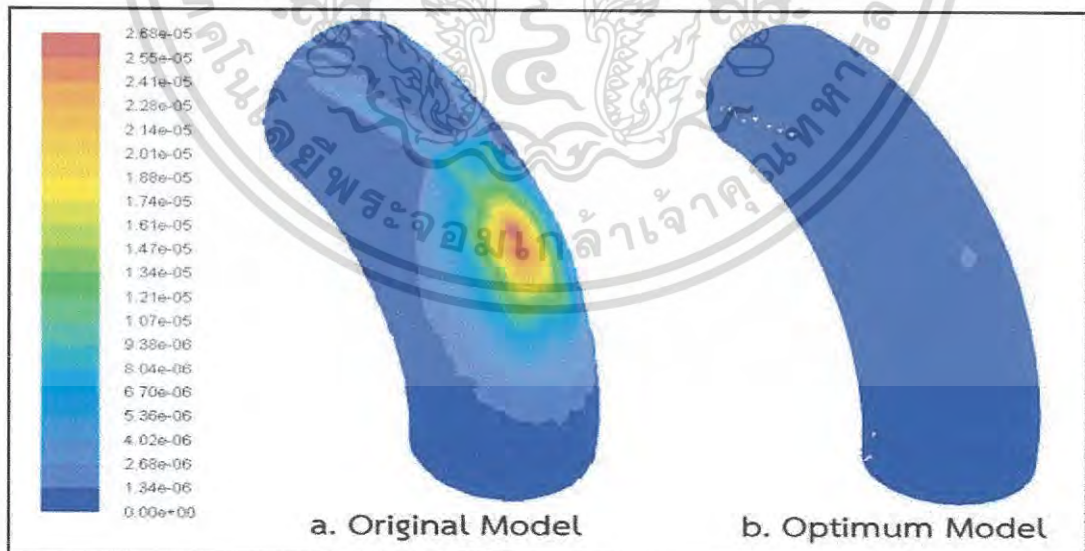
วัสดุพื้นผิวที่ศึกษาในที่นี้มี 3 ชนิดด้วยกัน ซึ่งแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของค่าความแข็งของแต่ละตัว ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งในปัจจุบันที่ได้ศึกษานี้ ไทเทเนียม เป็นวัสดุพื้นผิวที่มีความแข็งมากที่สุด และค่าความแข็งต่ำสุดก็คือ อลูมิเนียม ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าไทเทเนียมมีค่า อัตราส่วน S/N สูงสุด เนื่องจากมีอัตราการสึกกร่อนที่ต่ำที่สุด เพราะมีค่าความแข็งมากสุดนั่นเอง และสำหรับอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม จะเห็นได้ว่าจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากค่าความแข็ง ไม่ได้มีค่าแตกต่างกันมาก เพราะฉะนั้นสำหรับปัจจัยวัสดุพื้นผิว ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ ไทเทเนียม

4.3.2 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

จากการวิเคราะห์ อัตราส่วน S/N จะทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งหลักการหรือแนวทางของทากูชินั้นมีขั้นตอนว่า เมื่อทำการทดลองตามแผนการอโทโกนอนเรียบร้อยแล้ว ให้วิเคราะห์ระดับของปัจจัยที่ดีที่สุด จากนั้นให้ทำการทดลองอีกครั้งในกรณีนั้น เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ว่าถูกต้องหรือไม่ และเมื่อนำมาทำการทดลองแล้วผลปรากฏว่าค่าอัตราการสึกกร่อนสูงสุดที่ได้ มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีผลที่ดีกว่าทุกการทดลองที่ทดสอบมาทั้งหมด จึงสามารถยืนยันได้ว่าการประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับวิธีการของทากูชิ สามารถใช้ทำนายการสึกกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าที่เหมาะสมที่สุดกับค่าดั้งเดิม

	แบบจำลองดั้งเดิม	แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด
ระดับปัจจัย	$A_1B_1C_1D_1$	$A_3B_3C_2D_2$
อัตราการสึกกร่อนสูงสุด (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)	2.68E-05	1.47E-06
อัตราส่วน S/N	91.44	116.89



รูปที่ 4.8 แบบจำลองแบบดั้งเดิมและแบบที่เหมาะสมที่สุด (จากโปรแกรม Fluent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการจำลองการสึกกร่อนโดยวิธี 2^4 factorial design

จากการทำการทดลองตามตาราง 2^4 factorial design ที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ในบทที่ 3 จะได้ผลการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งก็คือ อัตราการสึกกร่อนสูงสุด ที่เป็นตัวแปรตอบสนองที่เราต้องการ โดยได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองตามตารางการออกแบบ 2^4 factorial design

การจำลอง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	รัศมีความโค้ง ของท่อ	วัสดุพื้นผิว	อัตราการสึกกร่อน (กิโลกรัมต่อตารางเมตร ต่อวินาที) $\times 10^{-6}$
1	17.05	90	1D	อลูมิเนียม	2.14
2	51.15	90	1D	อลูมิเนียม	127.60
3	17.05	270	1D	อลูมิเนียม	2.41
4	51.15	270	1D	อลูมิเนียม	128.30
5	17.05	90	2D	อลูมิเนียม	1.78
6	51.15	90	2D	อลูมิเนียม	107.40
7	17.05	270	2D	อลูมิเนียม	1.99
8	51.15	270	2D	อลูมิเนียม	103.50
9	17.05	90	1D	ไทเทเนียม	1.80
10	51.15	90	1D	ไทเทเนียม	107.90
11	17.05	270	1D	ไทเทเนียม	2.03
12	51.15	270	1D	ไทเทเนียม	105.90
13	17.05	90	2D	ไทเทเนียม	1.47
14	51.15	90	2D	ไทเทเนียม	84.43
15	17.05	270	2D	ไทเทเนียม	1.64
16	51.15	270	2D	ไทเทเนียม	85.68

จากผลการจำลองที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ผล จะไม่สามารถอ่านค่าจากตาราง ANOVA ได้ในตอนแรก เนื่องจากไม่มีการทำซ้ำ เพราะว่าเป็นการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ทำให้ค่าที่ได้มีค่าเท่าเดิมตลอด ไม่ว่าจะทำซ้ำกี่ครั้งก็ตาม ด้วยเหตุนี้นี้จึงทำให้ ค่า F (F-Value) และ ค่า P (P-Value) ไม่สามารถคำนวณค่าได้ และแสดงผลเป็นเครื่องหมายดอกจัน เนื่องจาก ระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) ของความคลาดเคลื่อน (error) มีค่าเท่ากับ 0 [15] ดังแสดงในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	45477.1	3031.8	*	*
Linear	4	44576.4	11144.1	*	*
Velocity	1	43623.5	43623.5	*	*
Particle Size	1	0.6	0.6	*	*
Curvature Radius	1	508.4	508.4	*	*
Surface Material	1	443.8	443.8	*	*
2-Way Interactions	6	892.4	148.7	*	*
Velocity*Particle Size	1	1.5	1.5	*	*
Velocity*Curvature Radius	1	475.1	475.1	*	*
Velocity*Surface Material	1	415.2	415.2	*	*
Particle Size*Curvature Radius	1	0.1	0.1	*	*
Particle Size*Surface Material	1	0.4	0.4	*	*
Curvature Radius*Surface Material	1	0.1	0.1	*	*
3-Way Interactions	4	4.4	1.1	*	*
Velocity*Particle Size*Curvature Radius	1	0.1	0.1	*	*
Velocity*Particle Size*Surface Material	1	0.4	0.4	*	*
Velocity*Curvature Radius*Surface Material	1	0.1	0.1	*	*
Particle Size*Curvature Radius*Surface Material	1	3.9	3.9	*	*
4-Way Interactions	1	3.9	3.9	*	*
Velocity*Particle Size*Curvature Radius*Surface Material	1	3.9	3.9	*	*
Error	0	*	*		
Total	15	45477.1			

รูปที่ 4.9 ตาราง ANOVA ที่ไม่สามารถคำนวณค่า F และ P (จากโปรแกรม Minitab 17)

จากตารางในรูปที่ 4.9 ค่าที่ไม่สามารถคำนวณได้เกิดจาก วิธีการคำนวณดังต่อไปนี้ [15]

- ค่า DF รวม (Total DF) = จำนวนการทดลอง - 1 :

$$16 - 1 = 15$$

- ค่า DF ของปัจจัยหลัก (Main effect DF) = จำนวนของระดับปัจจัย - 1 :

$$2 - 1 = 1 \text{ (เนื่องจากเป็น 2 ระดับทุกปัจจัย)}$$

- ค่า DF ของอันตรกิริยา (Interaction effect DF) = ค่า DF ของแต่ละปัจจัยที่มีอันตรกิริยาระหว่างกันคูณด้วยกันเอง :

$1 \times 1 = 1$ (เนื่องจาก DF ของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 1 หมดทุกปัจจัย ดังนั้นอันตรกิริยาทุกตัวจะมีค่า DF ของอันตรกิริยาเท่ากับ 1)

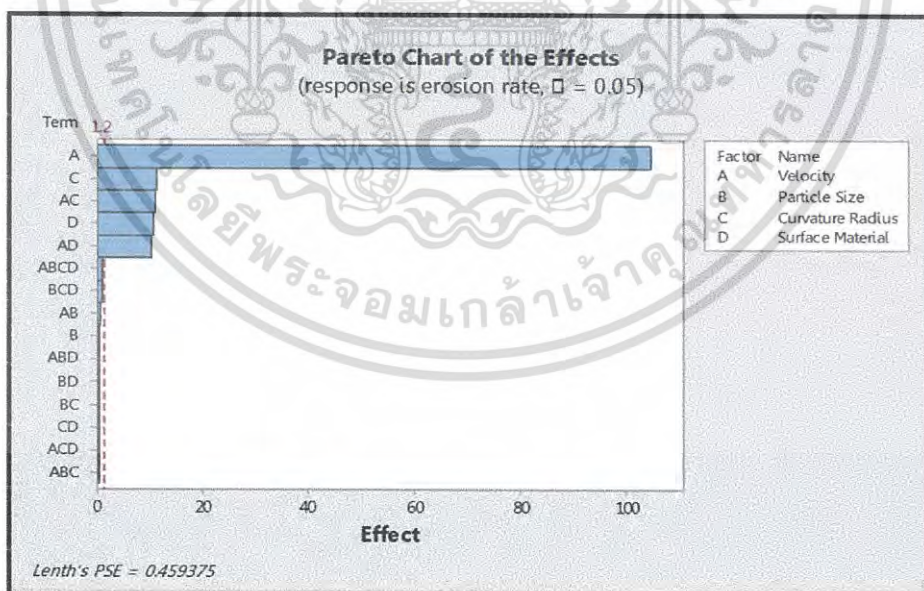
- ค่า DF ของความคลาดเคลื่อนคงเหลือ (Residual error DF) = ค่า DF รวม - ผลรวมของค่า DF ของทุกปัจจัยทั้งปัจจัยหลักและอันตรกิริยา :

$$15 - (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) = 15 - 15 = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่า DF ของความคลาดเคลื่อนคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจะส่งผลทำให้การคำนวณค่า mean square of the error (MSE) ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจาก Adj MS ของแต่ละปัจจัยสามารถหาได้จากการนำค่า Adj SS หารด้วยค่า DF ของปัจจัยนั้นๆ แต่ Adj MS for Residual Error ไม่สามารถถูกคำนวณได้เนื่องจาก ค่า DF ของความคลาดเคลื่อนคงเหลือเท่ากับ 0 และส่งผลไปยังค่า F เนื่องจาก Adj MS ของแต่ละปัจจัยเมื่อหารด้วย MSE จะได้เป็นค่า F แต่ MSE นั้นไม่สามารถคำนวณค่าได้ ซึ่งเช่นเดียวกันกับค่า P ที่จะคำนวณได้มาจากค่า F ดังนั้นก็ไม่สามารถหาค่าได้เหมือนกัน โดยปัญหาเหล่านี้จะเกิดขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่เป็น 2 ระดับ และมีเพียง 1 replicate หรือไม่มี การทำซ้ำนั่นเอง ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการปรับอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรออกอย่างน้อย 1 ตัว โดยส่วนใหญ่จะตัดอันตรกิริยาที่มีอันดับสูงกว่า 2 อันตรกิริยาขึ้นไป เนื่องจากอันตรกิริยาที่มีอันดับสูงๆ ในทางสถิติ นั้น มักจะส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองน้อย หรือไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ทำให้สามารถตัดทิ้งได้ และถ้าหากต้องการพิจารณาอันตรกิริยาที่ถูกตัดทิ้งไปก็สามารถวิเคราะห์ได้จาก effect plots ว่ามี นัยสำคัญทางสถิติอย่างไร [15]

ซึ่งในงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ในตอนแรกที่ยังไม่ตัดอันตรกิริยา อันดับสูงออก จะพบว่าอันตรกิริยาอันดับ 3 และ 4 ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่ออัตราการสึกกร่อนสูงสุด ดัง แสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าอันตรกิริยาที่มีอันดับมากกว่า 2 ขึ้นไปจะไม่เลยเส้นอ้างอิง (เส้นสีแดง) ซึ่ง มีความหมายว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นใน งานวิจัยนี้จึงเลือกตัดอันตรกิริยาอันดับ 3 และ 4 ออกเพื่อให้สามารถคำนวณค่า F และค่า P ได้



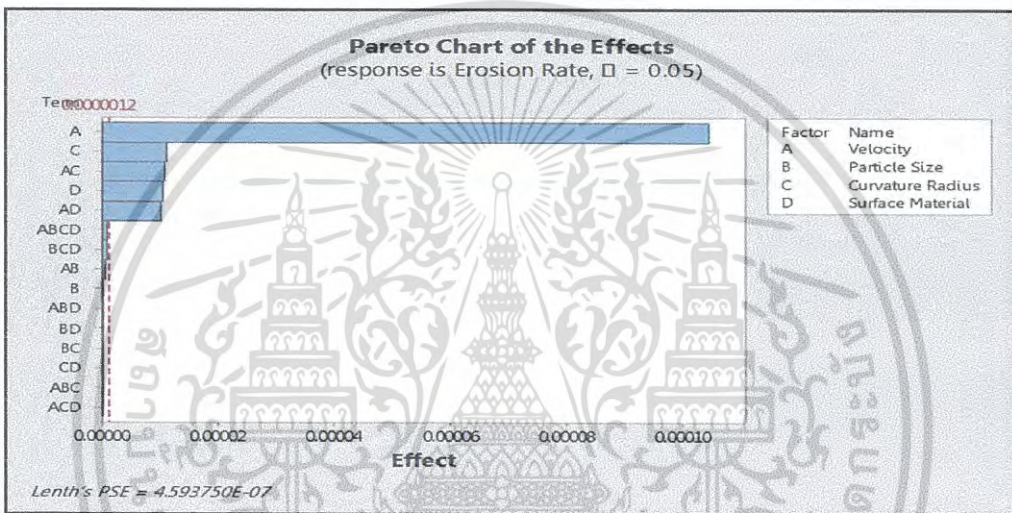
รูปที่ 4.10 แผนภูมิพาเรโตแบบยังไม่ตัดอันตรกิริยา (จากโปรแกรม Minitab 17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

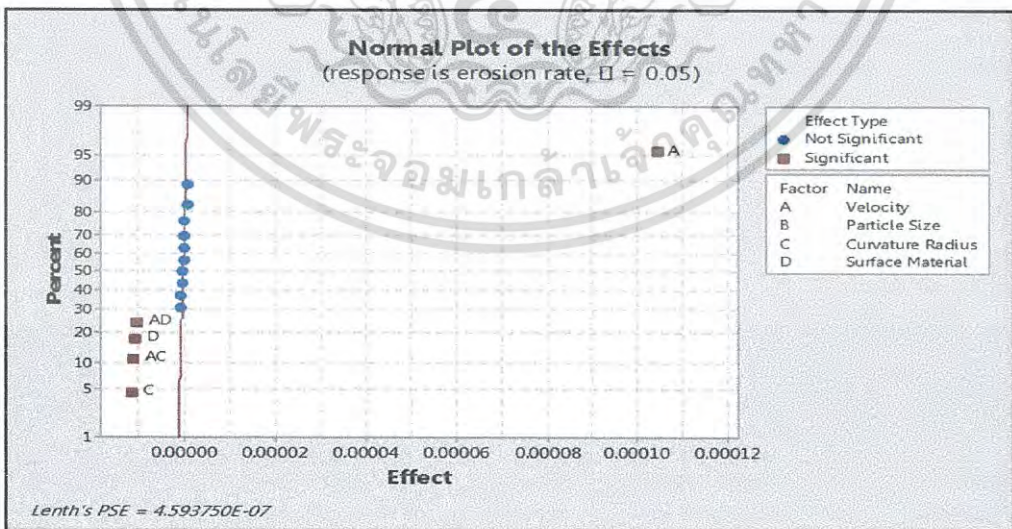
4.4.1 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่ออัตราการสึกกร่อนสูงสุด

- ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

วิธีการสรุปว่าปัจจัยใดมีนัยสำคัญจะพิจารณาจากแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart), Normal Plot of the Effects และ Half Normal Plot of the Effects ดังแสดงในรูปที่ 4.11-4.13 ซึ่งผลสรุปจากกราฟที่ได้พบว่า ปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้นประกอบด้วย ความเร็ว (A), รัศมีความโค้งงอของท่อ (C), วัสดุพื้นผิว (D), อันตรกิริยาระหว่างความเร็วกับรัศมีความโค้งงอของท่อ (AC) และอันตรกิริยาระหว่างความเร็วกับวัสดุพื้นผิว (AD)

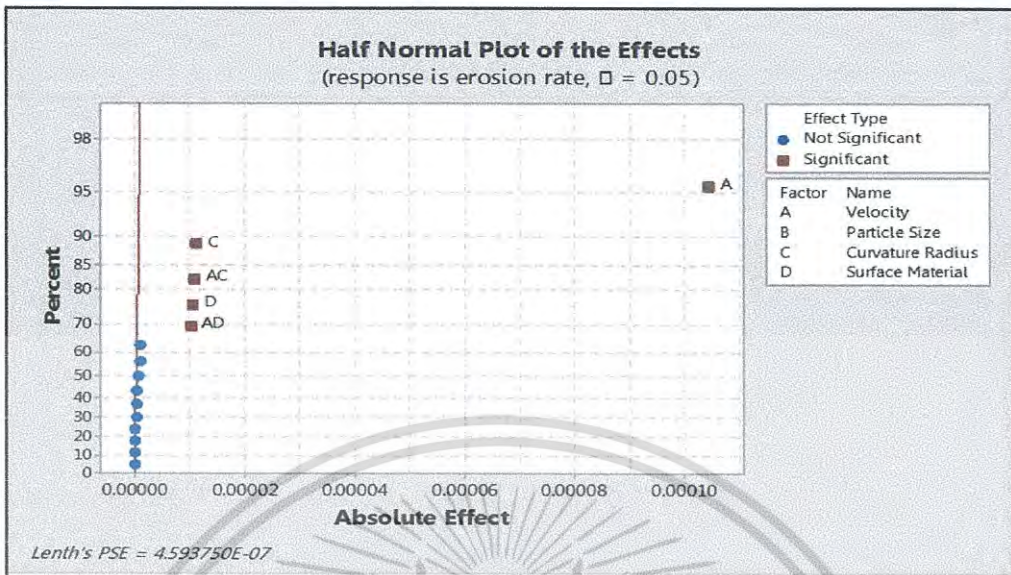


รูปที่ 4.11 แผนภูมิพาเรโต (จากโปรแกรม Minitab 17)



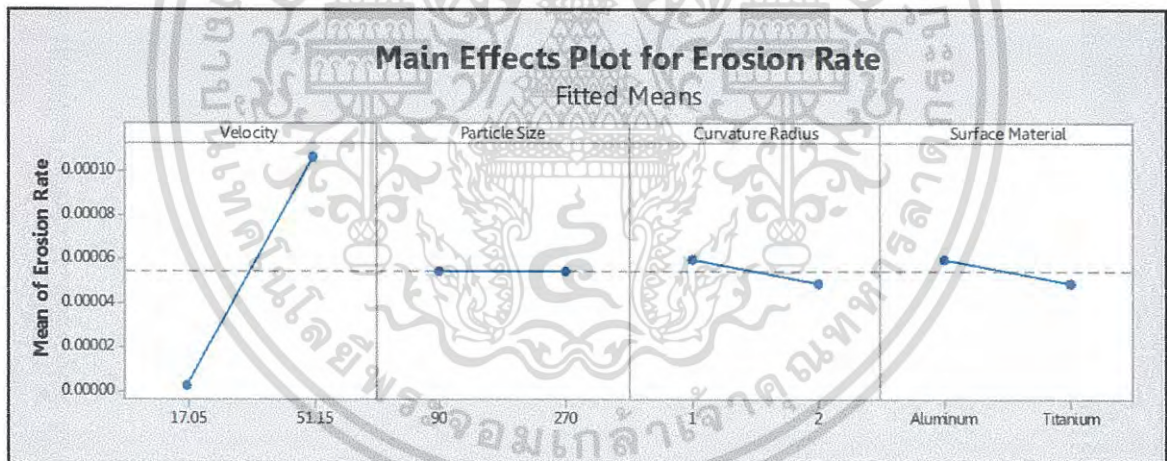
รูปที่ 4.12 Normal Plot of the Effects (จากโปรแกรม Minitab 17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 Half Normal Plot of the Effects (จากโปรแกรม Minitab 17)

- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและอัตราการสึกกร่อนสูงสุด

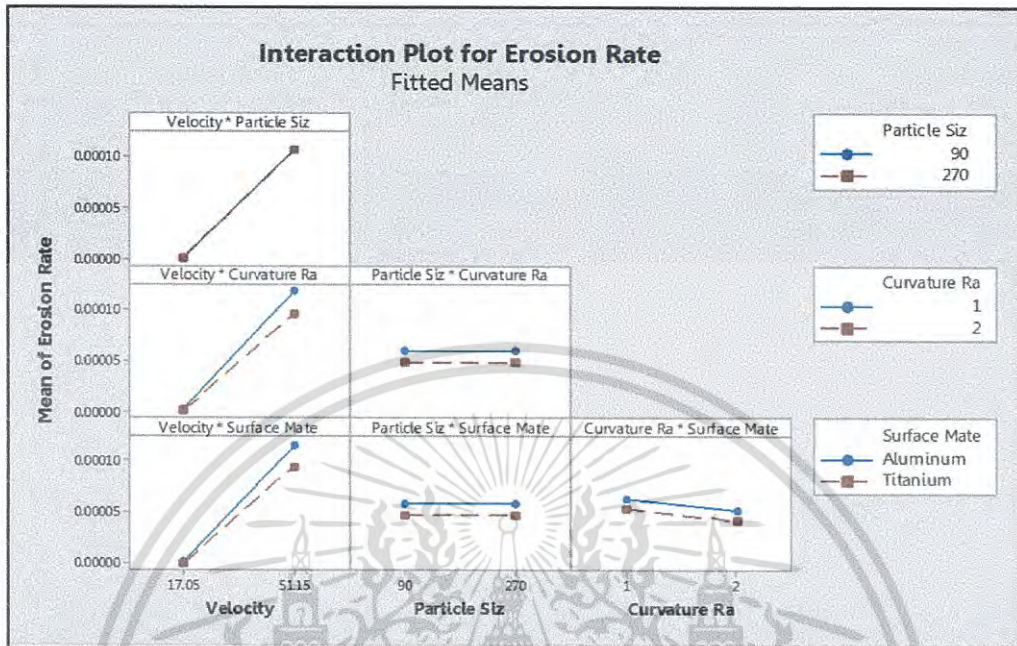


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและอัตราการสึกกร่อนสูงสุด (จากโปรแกรม Minitab 17)

จากรูปที่ 4.14 จะทำให้เห็นผลของแต่ละปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการสึกกร่อนสูงสุด ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับวิธีของทากูชิ โดยแต่ละปัจจัยมีแนวโน้มเดียวกันกับในวิธีของทากูชิที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 ดังนั้นจึงไม่ขออธิบายอีกในหัวข้อนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (Interaction)



รูปที่ 4.15 อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (จากโปรแกรม Minitab 17)

จากรูปที่ 4.15 จะแสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย โดยจะพิจารณาได้จาก หากมีการตัดกันของแต่ละเส้น แสดงว่าทั้ง 2 ปัจจัยนั้นมีอันตรกิริยาต่อกัน แต่ถ้าหากเส้นมีลักษณะที่ขนานกัน แสดงว่าแต่ละปัจจัยนั้นไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีอันตรกิริยาต่อกันคือ ความเร็วกับรัศมีความโค้งของท่อ (AC) และความเร็วกับวัสดุพื้นผิว (AD) โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าที่ความเร็วต่ำๆ ทั้งรัศมีความโค้งของท่อและวัสดุพื้นผิวจะส่งผลน้อยมากต่ออัตราการสึกกร่อนสูงสุด แต่ที่ความเร็วสูงๆ อัตราการสึกกร่อนสูงสุดจะมีค่าต่ำที่รัศมีความโค้งท่อ 2D และวัสดุพื้นผิวเป็นไทเทเนียม

- ตาราง Analysis of Variance

จากตาราง ANOVA ในรูปที่ 4.16 จะแสดงให้เห็นถึงค่า P-Value ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) เท่ากับ 95% (จะขึ้นอยู่กับความสำคัญของแต่ละงาน) ทำให้ค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ที่มีค่าเกินกว่า 0.05 นั้นถือว่าเป็นปัจจัยที่ไม่มีความสำคัญทางสถิติ ส่วนปัจจัยที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะถือว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญและไม่สามารถละทิ้งได้ และสุดท้ายจะได้สมการแบบ Full Model ที่ใช้สำหรับคำนวณค่าตัวแปรตอบสนองหรือค่าอัตราการสึกกร่อนสูงสุด ดังรูปที่ 4.16 แต่สมการทางคณิตศาสตร์นี้จะสามารถใช้งานได้เฉพาะค่าในช่วงของปัจจัยที่ศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถคำนวณค่านอกช่วงที่ศึกษาได้ และจะเห็นได้ว่าสมการแบบ Full Model จะมีความยาวและซับซ้อนมากเนื่องจากรวมทุกปัจจัยไว้ด้วยกัน ทั้งที่มีนัยสำคัญ และไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานจริง จะสามารถตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญทิ้งได้ ทำให้ได้ตาราง ANOVA และสมการคำนวณทางคณิตศาสตร์แบบ Reduced Model ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	45468.8	4546.9	2740.71	0.000
Linear	4	44576.4	11144.1	6717.29	0.000
Velocity	1	43623.5	43623.5	26294.83	0.000
Particle Size	1	0.6	0.6	0.36	0.577
Curvature Radius	1	508.4	508.4	306.44	0.000
Surface Material	1	443.8	443.8	267.53	0.000
2-Way Interactions	6	892.4	148.7	89.66	0.000
Velocity*Particle Size	1	1.5	1.5	0.88	0.392
Velocity*Curvature Radius	1	475.1	475.1	286.39	0.000
Velocity*Surface Material	1	415.2	415.2	250.29	0.000
Particle Size*Curvature Radius	1	0.1	0.1	0.08	0.787
Particle Size*Surface Material	1	0.4	0.4	0.21	0.665
Curvature Radius*Surface Material	1	0.1	0.1	0.07	0.801
Error	5	8.3	1.7		
Total	15	45477.1			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.28803	99.98%	99.95%	99.81%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		54.123	0.322	168.08	0.000	
Velocity	104.431	52.216	0.322	162.16	0.000	1.00
Particle Size	-0.384	-0.192	0.322	-0.60	0.577	1.00
Curvature Radius	-11.274	-5.637	0.322	-17.51	0.000	1.00
Surface Material	-10.534	-5.267	0.322	-16.36	0.000	1.00
Velocity*Particle Size	-0.604	-0.302	0.322	-0.94	0.392	1.00
Velocity*Curvature Radius	-10.899	-5.449	0.322	-16.92	0.000	1.00
Velocity*Surface Material	-10.189	-5.094	0.322	-15.82	0.000	1.00
Particle Size*Curvature Radius	-0.184	-0.092	0.322	-0.29	0.787	1.00
Particle Size*Surface Material	0.296	0.148	0.322	0.46	0.665	1.00
Curvature Radius*Surface Material	0.171	0.086	0.322	0.27	0.801	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

erosion rate = 54.123 + 52.216 Velocity - 0.192 Particle Size - 5.637 Curvature Radius
 - 5.267 Surface Material - 0.302 Velocity*Particle Size
 - 5.449 Velocity*Curvature Radius - 5.094 Velocity*Surface Material
 - 0.092 Particle Size*Curvature Radius + 0.148 Particle Size*Surface Material
 + 0.086 Curvature Radius*Surface Material

หมายเหตุ : ค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการต้องคูณด้วย 10^{-6} เพื่อให้ได้ค่าการสึกกร่อนที่แท้จริง

รูปที่ 4.16 ตาราง ANOVA แบบ Full model (จากโปรแกรม Minitab 17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	45466.1	9093.2	8307.65	0.000
Linear	3	44575.8	14858.6	13574.93	0.000
Velocity	1	43623.5	43623.5	39854.82	0.000
Curvature Radius	1	508.4	508.4	464.47	0.000
Surface Material	1	443.8	443.8	405.50	0.000
2-Way Interactions	2	890.4	445.2	406.73	0.000
Velocity*Curvature Radius	1	475.1	475.1	434.08	0.000
Velocity*Surface Material	1	415.2	415.2	379.37	0.000
Error	10	10.9	1.1		
Total	15	45477.1			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.04621	99.98%	99.96%	99.94%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		54.123	0.262	206.93	0.000	
Velocity	104.431	52.216	0.262	199.64	0.000	1.00
Curvature Radius	-11.274	-5.637	0.262	-21.55	0.000	1.00
Surface Material	-10.534	-5.267	0.262	-20.14	0.000	1.00
Velocity*Curvature Radius	-10.899	-5.449	0.262	-20.83	0.000	1.00
Velocity*Surface Material	-10.189	-5.094	0.262	-19.42	0.000	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

erosion rate = 54.123 + 52.216 Velocity - 5.637 Curvature Radius - 5.267 Surface Material - 5.449 Velocity*Curvature Radius - 5.094 Velocity*Surface Material

หมายเหตุ : ค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการต้องคูณด้วย 10^{-6} เพื่อให้ได้ค่าการสึกกร่อนที่แท้จริง

รูปที่ 4.17 ตาราง ANOVA แบบ Reduced Model (จากโปรแกรม Minitab 17)

4.4.2 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

จากการทำ Response Optimization โดยต้องการหาอัตราการสึกกร่อนที่มีค่าต่ำที่สุดในช่วงที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.18-4.19 ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ในช่วงของเส้นสีแดงดังรูปที่ 4.19 และสามารถเลื่อนเส้นสีแดงเพื่อพิจารณาค่าที่อยู่ในช่วงที่ศึกษาได้ด้วย โดยพบว่าที่ความเร็วต่ำสุด (17.05 เมตร/วินาที), รัศมีความโค้งของท่อสูงสุด (2D) และวัสดุพื้นผิวชนิดไทเทเนียม (Ti) จะทำให้อัตราการสึกกร่อนสูงที่สุดมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.55×10^{-6} กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที หรือ 2.44×10^{-6} เมตรต่อกิโลกรัม ซึ่งผลที่ได้ถือว่าสอดคล้องกับในวิธีของทากูชิจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยจากการตัดปัจจัยขนาดอนุภาคออกเนื่องจากไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงไม่ขอทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันการวิเคราะห์ผล เนื่องจากค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยมีค่าเท่ากับค่าที่เหมาะสมที่สุดของวิธีทากูชิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Response Optimization: Erosion Rate

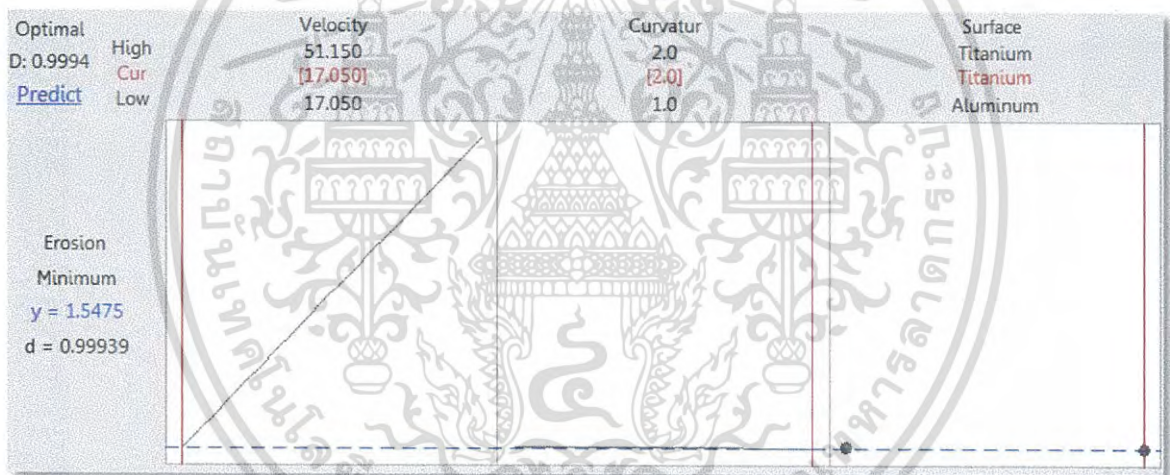
Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Erosion Rate	Minimum		1.47	128.3

Solution

Solution	Velocity	Curvature Radius	Surface Material	Erosion Rate Fit	Composite Desirability
1	17.05	2	Titanium	1.5475	0.999389

รูปที่ 4.18 ตารางการทำ Response Optimization (จากโปรแกรม Minitab 17)



รูปที่ 4.19 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย (จากโปรแกรม Minitab 17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการจำลอง

5.1 สรุปผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับวิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อใช้ศึกษาในเรื่องของพฤติกรรมการเกิดการสีกกร่อน และใช้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสีกกร่อน ซึ่งปัจจัยที่ศึกษามีทั้งหมด 4 ปัจจัย ดังนี้ 1. ความเร็ว 2. ขนาดอนุภาค 3. ขนาดความโค้งของรัศมีท่อ และ 4. วัสดุพื้นผิว

ในขั้นต้นต้องศึกษาหาจำนวนเมชที่เป็นอิสระต่อคำตอบ ซึ่งก็คือจำนวนเมชที่ทำให้คำตอบไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นต้องนำแบบจำลองที่ได้มาตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงเพื่อนำแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบไปประยุกต์ใช้งานต่อในขั้นต่อไป พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน 3 แบบด้วยกัน คือ 1.แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon 2. แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon และ 3. แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon เมื่อได้แบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว จะศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสีกกร่อน โดยใช้วิธีการของทากูชิและวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ 2 ระดับ ในการออกแบบการทดลอง จากนั้นทำการทดลองตามแผนการทดลองที่ถูกออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เป็นแผนการทดลองออร์ทोगอนัลแบบ L9 สำหรับวิธีของทากูชิ และเลือกเป็น 2^4 full factorial design สำหรับวิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ 2 ระดับ และเมื่อได้ผลการจำลองที่เป็นอัตราการสีกกร่อนสูงสุดครบทุกการทดลอง จะใช้โปรแกรม Minitab ในการศึกษาแนวโน้มของปัจจัยต่างๆ และนำค่าที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยมาทำการทดลองอีกครั้ง เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ และหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. จากจำนวนเมชทั้ง 6 ขนาดที่นำมาศึกษาหาเมชที่เป็นอิสระต่อคำตอบ พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเมชมากขึ้น จะทำให้มีความแม่นยำสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนเมชมากกว่า 321,930 เซลล์เป็นต้นไป พบว่าจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้นเริ่มทำให้คำตอบของแบบจำลองไม่เปลี่ยนแปลง แต่การคำนวณจะใช้เวลามากขึ้นตามจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเลือกจำนวนเมชที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง คือ 321,930 เซลล์ จึงเหมาะสมที่สุดที่จะถูกนำมาใช้ในการทำนายการเกิดการสีกกร่อนภายในข้องอ 90 องศา และจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองในส่วนอื่นๆ ของงานวิจัยนี้ต่อไป เพื่อช่วยประหยัดระยะเวลาในการคำนวณ

2. แบบจำลองใน Fluent ให้ผลการจำลองการสีกกร่อนที่แม่นยำเพียงพอ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองและแบบจำลองของ Oka ที่ถูกใช้ในงานวิจัยอ้างอิง [12] ดังนั้นแบบจำลองใน Fluent จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาต่อในงานวิจัยนี้เนื่องจากการตรวจสอบเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้ว และสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกนำมาศึกษาทั้ง 3 แบบ ถือว่าให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกัน

มาก แต่แบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมที่สุด คือ แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon เนื่องจากมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด อีกทั้งใช้ระยะเวลาในการคำนวณได้อย่างเหมาะสม

3. สำหรับวิธีของทากูชิ อัตราส่วน S/N สามารถใช้วิเคราะห์การเกิดการสีกกร่อนได้ โดยสามารถบอกได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสีกกร่อนมากที่สุด คือ ความเร็ว พร้อมทั้งบอกแนวโน้มของแต่ละปัจจัยได้เป็นอย่างดี และสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยได้ ดังนี้

- ความเร็ว : ความเร็วที่ต่ำที่สุด (17.05 เมตร/วินาที)
- ขนาดอนุภาค : ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด (90 ไมครอน)
- รัศมีความโค้งของท่อ : รัศมีความโค้งของท่อที่มากที่สุด (2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง)
- วัสดุพื้นผิว : วัสดุที่มีค่าความแข็งมากที่สุด (ไทเทเนียม)

และสำหรับวิธีการออกแบบเชิงแพททอเรียลแบบสมบูร์ณ 2 ระดับ ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับวิธีของทากูชิ พร้อมทั้งมีค่าที่เหมาะสมที่สุดเท่ากันกับวิธีของทากูชิ แต่สำหรับปัจจัยขนาดอนุภาค จะถูกละทิ้งเนื่องจากไม่มีนัยสำคัญต่อค่าอัตราการสีกกร่อนสูงสุด และพบว่ามีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ดังนั้น ความเร็วกับรัศมีความโค้งของท่อ (AC) และความเร็วกับวัสดุพื้นผิว (AD)

4. ค่าเหมาะสมที่สุดที่นำไปทำนายการสีกกร่อน สามารถใช้ยืนยันการทดลองได้เป็นอย่างดี เนื่องจากได้อัตราการสีกกร่อนสูงสุด ที่มีค่าต่ำที่สุด พร้อมทั้งสามารถลดอัตราการเกิดการสีกกร่อนได้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองดั้งเดิมที่ใช้ โดยแบบจำลองดั้งเดิมมีอัตราการสีกกร่อนสูงสุดเท่ากับ 3.62×10^{-5} เมตรต่อกิโลกรัม และแบบจำลองที่ถูกปรับแก้มีอัตราการสีกกร่อนสูงสุดเท่ากับ 2.32×10^{-6} เมตรต่อกิโลกรัม

5. การประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับวิธีการออกแบบการทดลอง ถือว่ามีประสิทธิภาพอย่างมาก และผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจมาก พร้อมทั้งช่วยลดระยะเวลาและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองได้อีกด้วย อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดได้อย่างเหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นอกเหนือจากปัจจัยที่ได้ศึกษา ยังคงมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการสีกกรณ์อีก แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางวิพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นไม่สามารถศึกษาได้ ยกตัวอย่างเช่น ปัจจัยของมุมที่เข้าปะทะกับผนังท่อของอนุภาค ซึ่งส่งผลอย่างมากต่ออัตราการสีกกรณ์ แต่สำหรับการไหลในท่อโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จะไม่สามารถกำหนดหรือควบคุมมุมที่เข้าปะทะได้ ทำให้ไม่สามารถศึกษาปัจจัยนี้ได้ ดังนั้นหากต้องการศึกษาปัจจัยให้ครอบคลุม ควรเลือกใช้เป็นวิธีการทดลองจริง แต่ก็ต้องแลกมากับค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงเช่นเดียวกัน

2. เนื่องจากภาวะการดำเนินงานต่างๆที่เลือกใช้อ้างอิงมาจากการทดลอง เนื่องจากไม่สามารถหาภาวะการดำเนินงานจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ ผลที่ได้จึงไม่สามารถนำไปใช้กับงานจริงได้ แต่สามารถใช้ศึกษาถึงปัจจัยหรือแนวโน้มของแต่ละปัจจัยว่าส่งผลอย่างไรบ้างต่ออัตราการสีกกรณ์ได้เป็นอย่างดี โดยเมื่อทราบสภาวะการดำเนินงานจริง จะสามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาหรือแก้ไขกระบวนการสีกกรณ์ในโรงงานได้อย่างเหมาะสม

3. วิธีการออกแบบเชิงแพททอเรียลนั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคัดกรองตัวแปรที่มีนัยสำคัญ เพื่อละทิ้งตัวแปรที่ไม่จำเป็น ดังนั้นควรทำเป็นขั้นแรกในการศึกษา จากนั้นเมื่อได้ตัวแปรที่มีนัยสำคัญแล้ว จึงนำมาศึกษาต่อเพื่อประหยัดระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. **พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. สาขาวิศวกรรมเคมี. 2556.
- [2] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. **An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method**. New York : Longman Scientific & Technical. 1995.
- [3] ANSYS, Inc.. **ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide**. April 2009.
- [4] พิชิต สุขเจริญพงษ์, จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์. **Education and Training, Shindan and Consulting Division**. กรุงเทพฯ : 2555.
- [5] Douglas C. Montgomery. **Design and Analysis of Experiments**. 8th ed. New York : John Wiley & Sons. 2013.
- [6] T.H. Courtney. **Mechanical Behavior of Materials**. International Ed. Singapore. : McGraw-Hill. 1990.
- [7] J. K. Edwards, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi. "Evaluation of Alternative Pipe Bend Fittings in Erosive Service" In **Proceedings of ASME FEDSM'00: ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Boston, MA**. June 2000.
- [8] Y. Oka, K. Okamura, and T. Yoshida, "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: part 1: effects of impact parameters on a predictive equation" **Wear**. vol.259, May 2005. pp. 95–101
- [9] M. Parsi, K. Najmi, F. Najafifard, S. Hassani, B.S. McLaury and S.A. Shirazi. "A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications" **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. Vol.21. 2014. pp. 850-873.
- [10] G. Grant and W. Tabakoff. "Erosion prediction in turbo machinery resulting from environmental solid particles" **Journal of Aircraft**. 12, 1975. pp. 471-478
- [11] Q.H. Mazumder, S.A. Shirazi, and B. McLaury, "Experimental investigation of the location of maximum erosive wear damage in elbows" **Journal of Pressure Vessel Technology**. vol.130, no. 1, Feb. 2008. pp. 1–7
- [12] C. Duarte, F. Souza, and V. Santos, "Numerical investigation of mass loading effects on elbow erosion" **Powder Technology**. 283, 2015. pp. 593–606
- [13] J. Kim, M. Yadav, and S. Kim, "Characteristics of Secondary Flow Induced by 90-degree Elbow in Turbulent Pipe Flow" **Computational Fluid Mechanics**. 8, 2014. pp. 229-239

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] V.B. Nguyen, Q.B. Nguyen, and Y.W. Zhang, "Effect of particle size on erosion characteristics" *Wear*. 348-349, 2016. pp. 126–137
- [15] Minitab Pty Ltd. "Minitab 17 support." [Online]. Available : http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/nav_d1e10525/. 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การจำลองการสึกกร่อนภายในช่องอ 90 องศา ในรูปแบบสามมิติด้วยโปรแกรม Fluent โดยอ้างอิงมาจางานวิจัยของ Carlos และคณะ [12] 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 m/s^2		
Models	Viscous	RNG k-e	
	Interaction with Continuous Phase	Drag law : Spherical	
		Physical Model : Erosion/Accretion	
		Injection Type : Surface (Release From Surfaces : inlet)	
	Particle Type : Inert		
	Diameter Distribution : uniform		
	DPM	Point Properties	z-velocity : 17.05, 34.1, 51.15 m/s Diameter : 90, 180, 270 micron
		Total Flow Rate :	0.0001376 kg/s (v = 17.05 m/s) 0.0002752 kg/s (v = 34.10 m/s) 0.0004127 kg/s (v = 51.15 m/s)
		Turbulent Dispersion : Discrete Random Walk Model	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT (ต่อ)

Materials	Fluid	<u>Air</u> Density : 1.225 kg/m^3 Viscosity : $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
	Solid	<u>Aluminum</u> Density : $2,700 \text{ kg/m}^3$ Vickers Hardness : 1.05 GPa
		<u>Stainless Steel</u> Density : 8030 kg/m^3 Vickers Hardness : 1.52 GPa
		<u>Titanium</u> Density : 4600 kg/m^3 Vickers Hardness : 3.19 GPa
	Inert Particle	Density : $2,600 \text{ kg/m}^3$
Boundary Conditions	Inlet	Type : Velocity Inlet
		Velocity Magnitude: 17.05, 34.1, 51.15 m/s
		Turbulent intensity : 4%
		Hydraulic diameter : 0.0254 m
	Outlet	Type : Outflow
	Wall	Type : Wall
Wall motion : Stationary wall		
Shear condition : No slip		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT (ต่อ)

Boundary Conditions	<p><u>Discrete Phase Reflection Coefficients (Polynomial)</u></p> <p>Normal : $0.993 - 0.0307\alpha + 0.000475\alpha^2 - 2.61 \times 10^{-6}\alpha^3$</p> <p>Tangent : $0.988 - 0.029\alpha + 0.000643\alpha^2 - 3.56 \times 10^{-6}\alpha^3$</p>												
	<p><u>Erosion Model</u> : อลูมิเนียม</p> <p><u>Impact Angle Function (Piecewise-linear)</u></p> <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> <p>Diameter Function : 1.8×10^{-9} m Velocity exponent Fn : 2.6</p>	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												
<p><u>Erosion Model</u> : เหล็กกล้าไร้สนิม</p> <p><u>Impact Angle Function (Piecewise-linear)</u></p> <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>1.37</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>1.48</td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>1.40</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <p>Diameter Function : 1.8×10^{-9} m Velocity exponent Fn : 2.6</p>	องศา	$f(\alpha)$	0	0	20	1.37	30	1.48	45	1.40	90	1	
องศา	$f(\alpha)$												
0	0												
20	1.37												
30	1.48												
45	1.40												
90	1												
<p>Wall</p>													

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ANSYS FLUENT (ต่อ)

Boundary Conditions	Wall	Erosion Model : ไทเทเนียม												
		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>1.02</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>1.21</td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>1.27</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	องศา	$f(\alpha)$	0	0	20	1.02	30	1.21	45	1.27	90	1
องศา	$f(\alpha)$													
0	0													
20	1.02													
30	1.21													
45	1.27													
90	1													
		Diameter Function : 1.8×10^{-9} m												
		Velocity exponent Fn : 2.6												
Solution Method	Pressure-Velocity Coupling	Scheme : SIMPLE												
	Spatial Discretization	Gradient : Least Squares Cell Based												
		Pressure : Standard												
		Momentum : Second Order Upwind												
		TKE : Second Order Upwind												
		TDR : Second Order Upwind												

หมายเหตุ : ค่าความเร็ว ขนาดอนุภาค และวัสดุพื้นผิว จะใช้ค่าใดค่าหนึ่งจากในตาราง ขึ้นอยู่กับการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ และค่า total flow rate จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วที่เลือกใช้ และค่า $f(\alpha)$ จะขึ้นอยู่กับวัสดุพื้นผิวที่เลือกใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายธนาธิษณ์ สะกุนา
- วัน เดือน ปีเกิด 6 มีนาคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
- ที่อยู่ 1 (แยก 9) ซอย รามอินทรา 117 ถนน รามอินทรา แขวง/เขต มีนบุรี กรุงเทพฯ 10510
- โทร 084-675-7890
- อีเมล tanatiss.k.h@hotmail.com
- ประวัติการศึกษา
- พ.ศ. 2553-2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การออกแบบโดยใช้เทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2.) เชี่ยวชาญโปรแกรม ANSYS (GAMBIT ; Solid Modeler)
ANSYS (FLUENT ; CFD Simulator) และ Minitab
- ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
- พ.ศ. 2557-ปัจจุบัน การศึกษาวิจัยที่มีอิทธิพลต่อการศึกษาร้อนภายในห้อง 90 องศา ด้วยวิธีการ
ออกแบบการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
- พ.ศ. 2556 การทดสอบและศึกษาวิจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อ
ความร้อน
- พ.ศ. 2555 ฝึกงาน บริษัท สยามเลเททซ์สังเคราะห์ จำกัด
แผนก : Engineering
โครงการที่ได้รับมอบหมาย : ทำการติดตั้ง pH online analyzer เพื่อวัดค่า
pH ของน้ำในบ่อ AZ-1 ก่อนปล่อยออกสู่ภายนอก โดยการลิงค์สัญญาณ pH
มาที่หน้าจอของ Ethyl benzene Styrene monomer plant (EBSM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้