

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของแก๊สเข้าสู่ดาวน์คัมเมอร์ของ
เครื่องแยกแอร์ลิฟท์แบบภายในด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

STUDY OF INFLUENCING FACTORS ON GAS PENETRATION INTO
DOWNCOMER OF INTERNAL-LOOP AIRLIFT SEPARATOR
BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-M-220-064

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของแก๊สเข้าสู่ตัววนคัมเมอร์ของ
เครื่องแยกแอร์ลิฟท์แบบภายในด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

STUDY OF INFLUENCING FACTORS ON GAS PENETRATION INTO
DOWNCOMER OF INTERNAL-LOOP AIRLIFT SEPARATOR
BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF INFLUENCING FACTORS ON GAS PENETRATION INTO
DOWNCOMER OF INTERNAL-LOOP AIRLIFT SEPARATOR
BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



JEDSADA PITUKPON

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-220-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

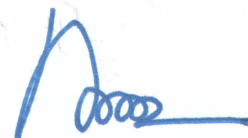
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของแก๊สเข้าสู่ตัววนคัมเมอร์ของเครื่องแยกแอร์ลิฟท์แบบภายในด้วยพลศาสตร์ของการไหลเชิงคำนวณ
Thesis Title Study of Influencing Factors on Gas Penetration Into Downcomer of Internal-Loop Airlift Separator by Computational Fluid Dynamics
นักศึกษ นายเจษฎา พิทักษ์พล
รหัสประจำตัว 58601265
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220--064

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 14.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของแก๊สเข้าสู่ดาวนัมเมอร์ของเครื่องแยกแอร์ลิฟท์แบบภายในด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
นักศึกษา	นายเจษฎา พิทักษ์พล
รหัสประจำตัว	58601265
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์กันอย่างแพร่หลาย แต่การศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายในมีการศึกษาไม่เพียงพอเพื่อใช้ในการออกแบบ โดยงานวิจัยนี้ ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายใน ได้แก่ เคลียร์เรนซ์ ความหนาโรเซอร์และขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จากการศึกษาอิทธิพลของเคลียร์เรนซ์ ในช่วง 0.04 - 0.14 เมตร พบว่าเมื่อเคลียร์เรนซ์มากกว่า 0.07 เมตร แก๊สจะไหลเข้าโรเซอร์และทำให้น้ำเกิดการไหลวน แต่ในทางกลับกันเมื่อเคลียร์เรนซ์ต่ำกว่า 0.07 เมตร พบว่ามีแก๊สบางส่วนไหลแยกเข้าไปสู่ส่วนดาวนัมเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันพลศาสตร์ ในการศึกษาอิทธิพลของความหนาโรเซอร์ ในช่วง 0.001 - 0.01 เมตร พบว่าเมื่อความหนามากกว่า 0.005 เมตร แก๊สจะไหลเข้าทางโรเซอร์เพียงอย่างเดียว ในทางตรงกันข้าม เมื่อความหนาโรเซอร์ต่ำกว่า 0.005 เมตร แก๊สจะเกิดการแยกไหลเข้าไปทั้งส่วนดาวนัมเมอร์และโรเซอร์ และสำหรับการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในช่วง 0.13 - 0.17 เมตร พบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์น้อยกว่า 0.15 เมตร แก๊สจะไหลเข้าสู่ส่วนโรเซอร์เท่านั้น แต่ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.15 เมตร แก๊สจะเกิดการแยกไหลเข้าไปในส่วนดาวนัมเมอร์ด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานการไหล การเกิดการแยกไหลของแก๊สเข้าไปในส่วนดาวนัมเมอร์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการไหลวนของของเหลวลดลง จากผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดในงานวิจัยนี้ เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์แบบตัวแปรไร้มิติ x^* เพื่อใช้ในการออกแบบพบว่า ถ้าค่า x^* มากกว่า 1.556×10^{-2} แก๊สจะไม่มีไหลแยกเข้าไปสู่ส่วนดาวนัมเมอร์ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

Thesis	Study of Influencing Factors on Gas Penetration into Downcomer of Internal-Loop Airlift Separator by Computational Fluid Dynamics
Student	Mr. Jedsada Pitukpon
Student ID.	58601265
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

ABSTRACT

An airlift reactor is pervasively utilized in various industries. However, there is few information regarding the correlation between influencing factors and hydrodynamic in airlift. This study focused on the effect of influencing factors on the flow pattern on internal-loop airlift, by using Computational Fluid Dynamics (CFD), such as clearance, riser thickness, and airlift diameter. In the study on the effect of clearance which ranges between 0.04 - 0.14 m, it was found that the clearance with more than 0.07 m high lead to the gas flow circulation inside the riser, which then caused the whirlpool. On the other hand, in case less than 0.07 m, some of gas separately flowed to the part of the downcomer due to the dynamic pressure. As for the riser thickness which was studied in the range of 0.001 - 0.01 m, it was evident that gas flow occurred only inside the riser in the airlift with more than 0.005 m. As the thickness was lesser than 0.005 m, gas appeared to separately flow inside the downcomer because of the flow resistance. As for the airlift diameter which was studied in the range of 0.13 to 0.17 m, it was evidenced that gas flow will be done only inside the riser with less than 0.15 m and more than 0.15m, gas will be separately flowed inside the downcomer, as effect of the flow resistance too. The fact that gases flow inside the downcomer results in the decrease of the efficiency in terms of the circumfluence of the fluids. From influencing factors in this research, there gave the correlation in dimensionless x^* . That is used for design Airlift reactor. In the Airlift reactor design, if the dimensionless x^* more than 1.556×10^{-2} , gas will flow through riser only which might be compatible to the principal objectives of the airlift.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการไหลแยกของแก๊สเข้าไปในควาน์คัมเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายในโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆดังรายนามต่อไปนี้

ผศ. ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีพลศาสตร์ของไหล ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่นอกเหนือจากเรื่องเกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหล อีกทั้งยังชี้แนะแนวทางในการทำปริญญานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วง

ขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมีและอาจารย์ท่านอื่นๆ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ต่อผู้จัดทำ

คุณเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโปรแกรมในการจำลองการไหล ไม่ว่าจะโปรแกรม GAMBIT หรือ FLUENT อีกทั้งยังคอยให้ความรู้ในเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และความรู้ทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงทฤษฎี ความเข้าใจในเรื่องต่างๆ อีกมากมาย

คุณณัฐวัตร ใจกลม และคุณทัฬหไทย สีเทา ที่ให้คำปรึกษาระหว่างการทำงาน และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมเคมี และขอบคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

และขอขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อุปการะเลี้ยงดูของข้าพเจ้าที่เป็นครูคนแรกของชีวิต ให้กำเนิดและเลี้ยงดูมาจนเติบโต คอยอบรมสั่งสอน ซ้ำถูกผิดชั่วดี ส่งให้ศึกษาเล่าเรียนจนประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้หากวิทยานิพนธ์นี้มีความผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

เจษฎา พิทักษ์พล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vi
สารบัญรูปภาพ	vii
นิยามสัญลักษณ์	ix
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluids Dynamic, CFD).....	4
2.1.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processing).....	4
2.1.2 ขั้นตอนของการคำนวณ (Solver).....	5
2.1.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processor).....	5
2.2 สมการควบคุม (Governing equation)	5
2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation Equation).....	5
2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation).....	6
2.2.3 สมการพลังงาน (Energy equation)	6
2.2.4 สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างภูมิภาค	7
2.3 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon	8
2.3.1 การคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน.....	8

2.3.2	สมการนาเวียร์ – สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์	9
2.3.3	แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k – epsilon	12
2.4	เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ (Airlift reactor)	14
2.5	แรงดันพลศาสตร์ (Dynamic pressure)	17
2.6	ความต้านทานการไหล (Resistance to flow)	18
2.7	ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE	18
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)	22
บทที่ 3	การออกแบบและการคำนวณการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์โดยวิธีเชิงตัวเลข	29
3.1	การสร้างแบบจำลอง	29
3.2	การคำนวณการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายในโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	31
3.3	การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ทำให้ผลการจำลองไม่มีการเปลี่ยนแปลง	34
3.4	การศึกษาการกระจายตัวของกริด	35
3.5	การเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยที่อ้างอิง (Validation)	36
3.6	การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการไหลแยกของแก๊สเข้าสู่ควาน์คัมเมอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	36
บทที่ 4	ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง	39
4.1	ผลการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง	39
4.2	ผลการศึกษาการกระจายตัวของกริด	41
4.3	ผลการศึกษาอิทธิพลของเคลียร์เรนซ์ที่มีผลต่อการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	44
4.4	ผลการศึกษาอิทธิพลของความหนาของโรเซอร์ที่มีผลต่อการไหลแอร์ลิฟท์	47
4.5	ผลการศึกษาอิทธิพลของรัศมีแอร์ลิฟท์ที่มีผลต่อการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	49
4.6	การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการแยกไหลของแก๊ส	52
บทที่ 5	สรุปผลการจำลอง	56
5.1	สรุปผลการจำลอง	56
5.2	ข้อเสนอแนะ	57

เอกสารอ้างอิง	58
ประวัติผู้เขียน.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$	13
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน.....	21
2.3 ขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์รูปร่างต่างๆ ในงานวิจัย.....	25
3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขต.....	30
3.2 ค่าคงที่ a_1, a_2, a_3 ของโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi - alexander.....	32
3.3 ค่าคงที่ในสมการความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$	33
3.4 ช่วงการคำนวณและจำนวนช่วงที่ใช้ในการคำนวณ.....	34
3.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของกริด.....	35
3.6 การออกแบบการจำลองเพื่อการศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์.....	37
3.7 การออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลความหนาของไรเซอร์.....	37
3.8 การออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์.....	38
4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองที่ความละเอียดกริดต่างๆ.....	39

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 วิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน.....	9
2.2 เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์.....	14
2.3 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ (ก.) แบบภายนอก (ข.) แบบภายใน.....	15
2.4 ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์.....	16
2.5 ส่วนที่เป็นเคลียร์เรนซ์.....	17
2.6 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานการไหลของท่อขนาดเล็กกับท่อขนาดใหญ่.....	18
2.7 ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE.....	22
2.8 การวัดความเร็วของของไหลและปริมาณแก๊สโฮลล์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์.....	23
2.9 รูปทรงเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
2.10 ผลในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (1).....	27
2.11 ผลในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (2).....	28
3.1 รูปแบบและขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ใช้ในการจำลอง.....	30
3.2 ตัวอย่างของโดเมนที่ถูกตัดกริด.....	30
4.1 ผลของจำนวนกริดที่มีผลต่อการจำลองเทียบกับผลการทดลองที่อ้างอิง.....	40
4.2 การกระจายตัวของกริดภายในโดเมน.....	42
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สโฮลล์กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลของแก๊ส จากการทดลองที่อ้างอิงเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากกริดรูปแบบต่างๆ.....	43
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของเหลวภายในโรเตอร์เฉลี่ยกับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลของแก๊ส จากการทดลองที่อ้างอิงเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากกริดรูปแบบต่างๆ.....	43
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของเหลวภายในดาวน์คัมเมอร์เฉลี่ยกับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลของแก๊ส จากการทดลองที่อ้างอิงเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากกริดรูปแบบต่างๆ.....	44
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วความเร็วเฉลี่ยของของเหลวภายในโรเตอร์กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลแก๊ส ที่ระยะเคลียร์เรนซ์ต่างๆ.....	45
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วความเร็วเฉลี่ยของของเหลวภายในดาวน์คัมเมอร์กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลแก๊ส ที่ระยะเคลียร์เรนซ์ต่างๆ.....	45
4.8 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่เคลียร์เรนซ์ต่างๆ (1).....	46
4.9 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่เคลียร์เรนซ์ต่างๆ (2).....	46
4.10 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่ความหนาโรเตอร์ต่างๆ ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.04 เมตรต่อวินาที.....	48

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่ความหนาโรเซอร์ต่างๆ ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.12 เมตรต่อวินาที.....	48
4.12 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแอร์ลิปส์ ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.04 เมตรต่อวินาที.....	50
4.13 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแอร์ลิปส์ ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.12 เมตรต่อวินาที.....	51
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วความเร็วเฉลี่ยของแก๊สภายในดาวนคัมเมอร์กับรัศมีเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปส์.....	54



นิยามสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	นิยาม (หน่วย)
ρ	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
α_q	สัดส่วนเชิงปริมาตรของภูมิภาค q (-)
V_q	ปริมาตรของภูมิภาค q (ลูกบาศก์เมตร)
ρ_q	ความหนาแน่นของภูมิภาค q (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$\hat{\rho}_q$	ความหนาแน่นประสิทธิผลของภูมิภาค q (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
\vec{v}_q	ความเร็วของภูมิภาค q (เมตรต่อวินาที)
$\dot{m}_{pq}, \dot{m}_{qp}$	การถ่ายโอนมวลจากภูมิภาค p ไป q และลักษณะการถ่ายโอนมวลจากภูมิภาค q ไป p ตามลำดับ (กิโลกรัมต่อวินาที)
$\vec{F}_{lift,q}$	แรงจากน้ำหนักของวัตถุแรงยก (นิวตัน)
$\vec{F}_{vm,q}$	แรงเสมือนมวล (Virtual Mass Force) (นิวตัน)
R_{pq}	แรงอันตรกิริยาระหว่างภูมิภาค (นิวตัน)
p	ความดันของทุกภูมิภาค (ปาสคัล)
\vec{v}_q	เทนเซอร์ของความเค้นและความเครียด (นิวตันต่อตารางเมตร)
\vec{v}_{pq}	ความเร็วของภูมิภาค p ที่เกิดการถ่ายโอนมวลไปยังภูมิภาค q (เมตรต่อวินาที)
\vec{v}_{qp}	ความเร็วของภูมิภาค q ที่เกิดการถ่ายโอนมวลไปยังภูมิภาค p (เมตรต่อวินาที)
μ_q	ความหนืดของภูมิภาค q (ปาสคัล-วินาที)

นิยามสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	นิยาม (หน่วย)
λ_q	ความเค้นเฉือนของวัสดุภาค q (นิวตันต่อตารางเมตร)
R_{pq}	แรงอันตรกิริยาระหว่างวัสดุภาค (นิวตัน)
K_{pq}	สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างวัสดุภาค (-)
h_q	เอนทาลปีจำเพาะของวัสดุภาค q (จูลต่อกิโลกรัม)
\bar{q}_q	ฟลักซ์ของความร้อน (จูลต่อตารางเมตร)
S_q	แหล่งกำเนิดของเอนทาลปี (จูล)
Q_{pq}	ความเข้มของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัสดุภาค p และ q (วัตต์),
h_{qp}	เอนทาลปีระหว่างวัสดุภาค (วัตต์)
f	ฟังก์ชันของแรงต้าน (-)
τ_p	เวลาผ่อนคลายของอนุภาค (วินาที)
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองหรือหยดในวัสดุภาคทุติยภูมิ (เมตร)
C_o	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (-)
k	พลังงานจลน์ปั่นป่วน (จูล)
ε	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (วัตต์)
G_k	พลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนของความเร็วเฉลี่ย (จูล)
G_b	พลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว (จูล)

x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ (Airlift reactor) ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการใช้พลังงานที่ต่ำ การทำงานภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ซับซ้อนมากนัก ง่ายต่อการบำรุงรักษา อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่นาน เพราะภายในไม่มีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนไหว เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จัดเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเมติก (Pneumatic reactor) มีลักษณะคล้ายกันกับบับเบิลคอลัมน์ (Bubble column) ที่มีท่อสวมอยู่ภายในอีกชั้นหนึ่ง ใช้ลมหรือแก๊สเป็นตัวพาของเหลวให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและแลกเปลี่ยนมวลระหว่างวัฏภาค เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ยกตัวอย่าง เช่น ในอุตสาหกรรมเคมีที่เกิดปฏิกิริยาเคมีในระบบสาร 2 วัฏภาค นอกจากนั้นเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ยังถูกใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ต้องการเปลี่ยนน้ำเสียกลับมาใช้ในกระบวนการอีกครั้งโดยการพ่นแก๊สหรือสารเคมีเข้าไปบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งยังมีการนำไปใช้ในกระบวนการทางชีวภาพ [1] ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย และใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆอีกมากมาย ซึ่งข้อมูลหรือความสัมพันธ์ต่างๆ ที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ยังมีการศึกษาอยู่จำนวนไม่มากนัก

การศึกษาการไหลของของไหลสามารถศึกษาได้จากการทดลอง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ร่วมในการศึกษาได้อีกด้วย ประกอบกับปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยศึกษาลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ได้ เนื่องจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถผลิตข้อมูลที่จำเป็นที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ได้ ไม่ว่าจะเป็น ปริมาณแก๊สโฮลด์อัพ (Gas holdup) หรือสัดส่วนเชิงปริมาณของแก๊สต่อของเหลว [2] ความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์และความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ อีกทั้งยังใช้ระยะเวลาสั้นในการผลิตข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นมีต้นทุนเพื่อศึกษาที่ต่ำ และสามารถทำนายปรากฏการณ์การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้จึงศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะหรือรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ และหาจุดวิกฤตที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหล เช่น ระยะเวลาเคลียร์แรนซ์ ความหนาของโรเซออร์ และ ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลและนำไปประยุกต์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์หรือการขยายขนาด (Scale up) โดยอ้างอิงข้อมูลและเปรียบเทียบกับผลการทดลองและจากผลการจำลองในงานวิจัยของ van Baten และคณะ [3] ซึ่งในงานวิจัยของ van Baten และคณะ ได้เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยผลการทดลอง โดยในการจำลองในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็น Standard k-epsilon และแบบจำลองการไหลแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายภูมิภาคเป็นออยเลอร์เลียน และในงานวิจัยนี้ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT สัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander และใช้แบบจำลองทั้งสองชนิดเช่นเดียวกับงานวิจัยของ van Baten และคณะ ในการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเคลียร์แรนซ์ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาปรากฏการณ์และรูปแบบการไหลของการไหลแบบหลายภูมิภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของความหนาโรเซอร์ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.2.4 ศึกษาอิทธิพลของขนาดแอร์ลิฟท์ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.2.5 หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการไหลเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 สร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จากโปรแกรม GAMBIT และหาวิธีการตั้งค่าแบบจำลองต่างๆ ในโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการไหล โปรแกรม Fluent เพื่อใช้ในการจำลองการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของงานวิจัยที่อ้างอิงเพื่อการอ้างอิงความถูกต้อง

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ที่ค่าต่างๆ ตั้งแต่ 0.04 เมตร จนถึง 0.14 เมตร ต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของความหนาของโรเซอร์ที่ค่าต่างๆ ตั้งแต่ 0.001 เมตร จนถึง 0.010 เมตร ต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ตั้งแต่ 0.13 เมตร จนถึง 0.17 เมตร ต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.3.5 ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีต่อการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เพื่อใช้ในการออกแบบหรือขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รับความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองและการคำนวณการไหลเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขหรือเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.4.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับรูปแบบและลักษณะการไหลแบบหลายวัฏภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

1.4.3 สร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบหรือการขยายขนาด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluids Dynamic, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นสาขาหนึ่งเป็นกลศาสตร์ของไหลที่ใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) และระเบียบวิธี (Algorithm) มาแก้ไขปัญหาและวิเคราะห์การไหลของของไหลที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายเทพลังงานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญเชิงวิศวกรรม เนื่องจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถแสดงรายละเอียดหรือทำนายปรากฏการณ์การไหลและสามารถผลิตข้อมูลได้จำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น อีกทั้งยังมีต้นทุนการดำเนินงานที่ต่ำ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงมีความสามารถในการแก้ปัญหาที่หลากหลายในเชิงวิศวกรรม ยกตัวอย่างเช่น อากาศพลศาสตร์ของเครื่องบินและยานพาหนะ อุทกศาสตร์ของเรือ การผสมและการแยกในกระบวนการทางเคมี การถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น โดยทั่วไปพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก [4, 5]

2.1.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processing) คือ ขั้นตอนเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณ โดยกระบวนการนี้เป็นการป้อนข้อมูลที่ทำเป็นสำหรับการคำนวณปัญหาการไหลในรูปแบบต่างๆ ให้กับโปรแกรมคำนวณ ดังนี้

- 1.) กำหนดรูปร่างเครื่องปฏิกรณ์หรือขอบเขตการไหลที่ต้องการศึกษารูปแบบการไหลของของไหล (Computational domain)
- 2.) แบ่งเซลล์เป็นส่วนเล็กๆ เพื่อใช้โปรแกรมทราบตำแหน่งที่ต้องคำนวณ ที่เรียกว่า กริด (Grid) หรือ เมช (Mesh)
- 3.) เลือกสมการที่ใช้ในการจำลองรูปแบบการไหลที่สนใจ ในการจำลองการไหลจำเป็นต้องใช้สมการเพื่อคำนวณและแสดงผลออกมาในข้อมูลต่างๆ
- 4.) กำหนดสมบัติของของไหล (Fluid properties)
- 5.) กำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary condition) เพื่อใช้ในการจำลองการไหลโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

สำหรับความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกควบคุมโดยคุณภาพของเซลล์ซึ่งขึ้นอยู่กับ

- 1). จำนวนเซลล์ ซึ่งจำนวนเซลล์ยิ่งมากคำตอบของปัญหาก็จะแม่นยำมากขึ้น แต่การแบ่งเซลล์ในการคำนวณก็มีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ด้วย
- 2). ความบิดเบี้ยว (Skewness) โดยทั่วไปแล้วค่าความบิดเบี้ยวอยู่ในช่วงศูนย์ถึงหนึ่ง ซึ่งค่าความบิดเบี้ยวของเมชที่มีคุณภาพดีที่สุดจะเป็นศูนย์และเมชที่มีคุณภาพต่ำที่สุดจะเป็นหนึ่ง
- 3). อัตราส่วนด้าน (Aspect ratio) คืออัตราส่วนระหว่างด้านยาวที่สุดและด้านสั้นที่สุด (l_{max}/l_{min}) อัตราส่วนด้านในอุดมคติสำหรับเซลล์มีค่าเท่ากับหนึ่ง

2.1.2 ขั้นตอนของการคำนวณ (Solver) คือ ส่วนของการคำนวณ ซึ่งเทคนิคในการคำนวณเชิงตัวเลขมีอยู่ 3 วิธี คือ วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method: FDM) วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite element method: FEM) และวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method: FVM) โดยทั่วไปรูปแบบพื้นฐานของการแก้ปัญหาขั้นตอนดังนี้

- 1.) ประมาณตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย
- 2.) เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยการประมาณลงในสมการควบคุม แล้วจัดรูปสมการ
- 3.) แก้ปัญหาของสมการพีชคณิต เทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบระเบียบวิธี Finite Volume

2.1.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processor) คือ ส่วนแสดงผลที่ได้จากการคำนวณที่มีการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ด้วยความก้าวหน้าทางด้านงานวิศวกรรม ทำให้มีการแสดงผลแบบกราฟิกที่ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่ชุดโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ประกอบด้วย เครื่องมือที่ใช้ดูข้อมูลแบบอนิเมทประกอบประกอบด้วยรูปแบบต่างๆ เช่น คอนทัวร์ เวกเตอร์ หรือกราฟ เป็นข้อมูลที่พื้นผิว 2 มิติ หรือ 3 มิติ เป็นต้น

2.2 สมการควบคุม (Governing equation)

ปัญหาในเชิงของของไหลมักถูกจัดการด้วยสมการพื้นฐานทางฟิสิกส์ 3 สมการ ประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) สมการกฎของนิวตัน ข้อที่ 2 และสมการกฎข้อที่ 1 ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Conservation of energy)

2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation Equation)

จากกฎการอนุรักษ์มวลกล่าวว่า มวลหรือสสารไม่สามารถทำลายหรือสามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้ สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ถูกแสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

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

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.2)$$

เมื่อ U เป็นเวกเตอร์ความเร็วในแนวแกนคาร์ทีเซียน ดังนี้

$$U = ui + vj + wk$$

เมื่อ i , j และ k เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit vector) ในแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ

2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันกล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของระบบมีค่าเท่ากับแรงสุทธิที่กระทำต่อระบบและเกิดขึ้นในทิศทางของแรงสุทธิ สมการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้งสามทิศทางถูกแสดงในสมการที่ 4.3 4.4 และ 4.5

แนวแกน x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.3)$$

แนวแกน y

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.4)$$

แนวแกน z

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.5)$$

2.2.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวว่า พลังงานไม่มีการสูญสลายหายไปหรือสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ แต่พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปจากรูปหนึ่งไปสู่อีกรูปหนึ่งได้ สมการพลังงานถูกแสดงดังสมการที่ 2.6

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (\rho U) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E \quad (2.6)$$

2.2.4 สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาค (Interphase exchange coefficients)

สำหรับระบบการไหลในหลายวัฏภาคที่มีวัฏภาคปฐมภูมิและทุติยภูมิ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาคสามารถแสดงได้ตามสมการ 2.8 [10]

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p} \quad (2.7)$$

เมื่อ f คือ ฟังก์ชันของแรงต้านซึ่งสามารถนิยามได้ตามโมเดลความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาค (Different exchange - coefficient models) ดังสมการที่ 2.8 โดยที่ τ_p คือเวลาผ่อนคลายของอนุภาค (Particulate relaxation time)

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (2.8)$$

เมื่อ d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองหรือหยดในวัฏภาคทุติยภูมิ

ฟังก์ชันของ f จะประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์แรงต้านซึ่งจากโมเดลต่างๆที่นำมาใช้ ซึ่งขึ้นกับเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์ (Re) ด้วย หากเลขเรย์โนลด์ต่างกันจะทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่แตกต่างกันด้วยดังสมการที่ 2.9 ซึ่งจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาค หากวัฏภาคปฐมภูมิไม่มีอยู่ในโดเมนการคำนวณจะทำให้สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาคมีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นจึงต้องคูณ f ด้วยสัดส่วนเชิงปริมาตรดังสมการ 2.10 ของวัฏภาคปฐมภูมิเสมอ

$$f = \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (2.9)$$

และ Re คือ เลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์สำหรับวัฏภาคปฐมภูมิ q และวัฏภาคทุติยภูมิ p

$$\text{Re} = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q} \quad (2.10)$$

2.3 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

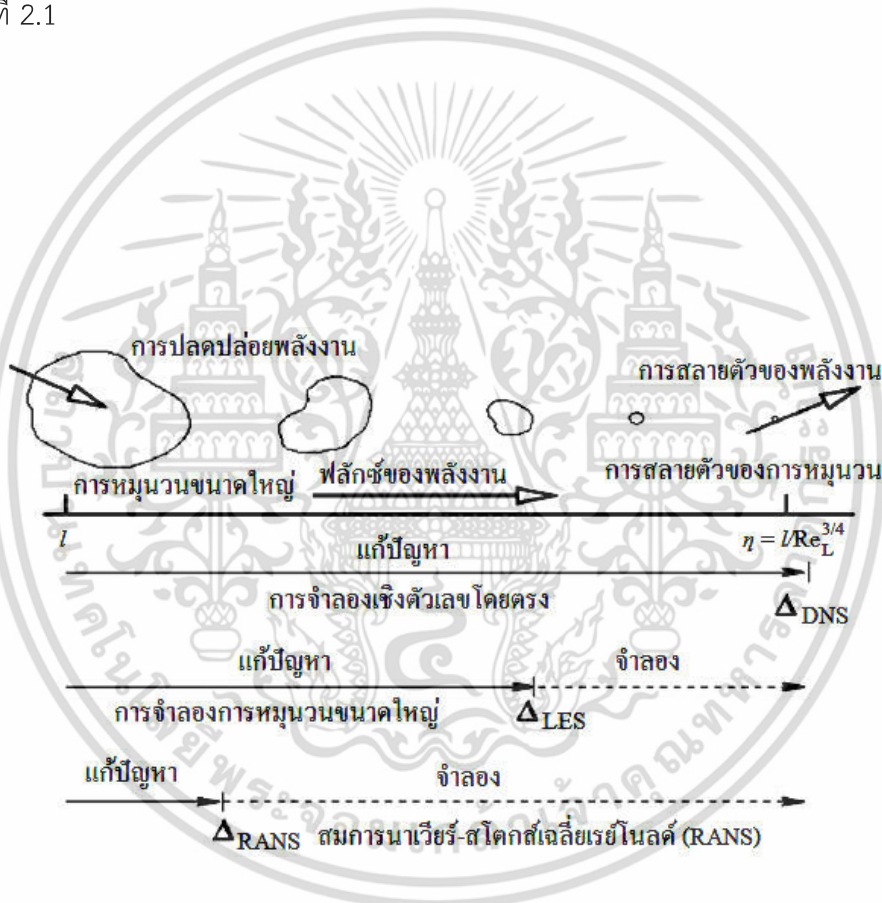
การไหลโดยทั่วไปของของไหลในธรรมชาติประกอบด้วย การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) การไหลแบบทรานซิชัน (Transition flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งแต่ละรูปแบบการไหลสามารถทำนายรูปแบบการไหลโดยใช้ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ได้ ตัวเลขเรย์โนลด์มีความสัมพันธ์กับของแรงเฉื่อย (Inertia force) และแรงของความหนืด (Viscous force) จากการทดลองในระบบของไหล พบว่าเมื่อลักษณะการไหลของของไหลมีเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต (Critical Reynolds number, Re_{crit}) รูปแบบการไหลของของไหลนั้นจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ โดยรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ ชั้นของของไหลแต่ละชั้นจะไหลผ่านชั้นของไหลอื่นตามลำดับ ถ้าสภาวะขอบเขตไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การไหลจะเป็นการไหลแบบคงตัว สำหรับลักษณะการไหลที่มีเลขเรย์โนลด์สูงกว่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต รูปแบบการไหลจะเริ่มมีความวุ่นวายเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่งผลให้รูปแบบการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วขึ้นกับเวลา จนมีรูปแบบการไหลเป็นแบบสุ่ม (Random) และวุ่นวาย (Chaotic) การไหลในช่วงเรย์โนลด์นี้ คือ การไหลแบบปั่นป่วน [5]

2.3.1 การคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน

สมการนาเวียร์ – สโตกส์ ยังคงมีความสำคัญในการใช้เพื่อคำนวณการไหลทั้งแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน แต่เนื่องจากสมการนาเวียร์ – สโตกส์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์จึงมีความยุ่งยากในการหาคำเฉลยของสมการ จึงมีการนำวิธีเชิงตัวเลขมาช่วยในการหาคำเฉลย เรียกวิธีการเชิงตัวเลขนี้ว่าการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct Numerical Simulation: DNS) ซึ่งการจำลองนี้สามารถจำลองการไหลแบบปั่นป่วนได้ทั้งการหมุนวนขนาดเล็ก (Small - scale eddies) และการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large - scale eddies) แต่การหมุนวนขนาดเล็กนั้น ในการจำลองกริดที่ใช้ในการจำลองจำเป็นต้องมีขนาดเล็กมากกว่าขนาดของการหมุนวน จึงทำให้จำนวนกริดที่ใช้มีขนาดสูงและส่งผลให้จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงอีกทั้งยังต้องใช้ระยะเวลาในการจำลองสูงเช่นเดียวกันด้วย ซึ่งสิ้นเปลืองทรัพยากรมากเกินไป จึงเกิดแนวคิดที่จะเลือกคำนวณการหมุนวนขนาดใหญ่และใช้การจำลองกับการหมุนวนขนาดเล็ก

เรียกการจำลองนี้ว่าการจำลองหมุนวนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation: LES) แต่ก็ยังใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงและระยะเวลาในการจำลองที่สูงเช่นเดียวกันอยู่ดี [5]

จากปัญหาดังกล่าว จึงเกิดการพัฒนารวมการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนโดยใช้หลักวิธีการทางสถิติ และเรียนสมการการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนนี้ว่าสมการนาเวียร์ – สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังมีความยุ่งยากในการคำนวณองค์ประกอบความเร็วแกว่งที่อยู่ในเทอมความเค้นเฉือนเรย์โนลด์ (Reynolds stress) จึงมีการพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อแก้ปัญหาความยุ่งยากในการคำนวณองค์ประกอบของความเร็วแกว่งโดยตรง [5] ซึ่งวิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนสามารถสรุปได้แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน [5]

2.3.2 สมการนาเวียร์ – สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier - Stokes Equation, RANS)

จากรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณโดยวิธีทางสถิติ โดยคุณสมบัติการไหลแบบฉับพลัน (Instantaneous flow property, ϕ) เป็นสมบัติของของไหลเฉลี่ยตามเวลา (Time -

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

averaged flow property, $\bar{\varphi}$) และคุณสมบัติของของไหลแกว่ง (Fluctuating flow property, φ')
 ดังสมการที่ 2.11

$$\varphi(t) = \bar{\varphi} + \varphi'(t) \quad (2.11)$$

ออสบอร์นเรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) นำเสนอวิธีการแยกเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition) ซึ่งนิยามของเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล (φ) และเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง (φ') แสดงได้ดังสมการที่ (2.12 และ 2.13) [6]

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (2.12)$$

$$\bar{\varphi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0 \quad (2.13)$$

การแยกเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition) ของความดัน เวกเตอร์ความเร็วและองค์ประกอบความเร็ว ซึ่งประกอบด้วยความเร็วในแนวแกน x y และ z สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.14-2.18

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2.14)$$

$$\bar{u}(t) = \bar{u} + \bar{u}'(t) \quad (2.15)$$

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

$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (2.17)$$

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (2.18)$$

อิทธิพลของการแกว่งที่มีต่อการไหลเฉลี่ยสามารถหาได้จากการแทนที่สมการที่ 2.14-2.18 ลงในสมการควบคุมและใช้นิยามของเวลาเฉลี่ยดังแสดงในสมการที่ 2.12 และ 2.13

สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.20)$$

สมการโมเมนตัมสำหรับเฉลี่ยสำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้จะมีความหนักคงที่คือ

แนวแกน x

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

หรือ

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{u}) + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} \\ &+ \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho\overline{u'^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho\overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (2.21)$$

แนวแกน y

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

หรือ

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}) + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \\ &+ \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho\overline{v'^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho\overline{v'w'}) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (2.22)$$

แนวแกน z

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{u}) = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{w} \\ & + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{(w')^2}) \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (2.23)$$

เรียกสมการที่ 2.21 ถึง 2.23 ว่าสมการเรย์โนลด์ (Reynolds equation) ซึ่งเทอมที่อยู่ในวงเล็บที่เพิ่มมาเกี่ยวข้องกับความเร็วแกว่งที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน ความเค้นปั่นวนพิเศษ (Extra turbulent stresses) สามารถอธิบายธรรมชาติของการแพร่ได้ ซึ่งเรียกความเค้นปั่นวนพิเศษนี้ว่า ความเค้นเรย์โนลด์ [5]

เพื่อความสะดวก Boussinesq เสนอความเค้นเรย์โนลด์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น [4]

$$\overline{\tau_{ij}} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.24)$$

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

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.24 ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ 2.21-2.23 ได้ในรูปของสมการที่ 2.24-2.26

$$\text{องค์ประกอบ x:} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{u} + S_{Mx} \quad (2.24)$$

$$\text{องค์ประกอบ y:} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{v} + S_{My} \quad (2.25)$$

$$\text{องค์ประกอบ z:} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{w} + S_{Mz} \quad (2.26)$$

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

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.27)$$

2.3.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k – epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k – epsilon คือ แบบจำลองกึ่งการทดลอง (Semi – Empirical Model) เป็นหนึ่งในแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากนิยมเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษาและวิเคราะห์การไหลเพื่อการวิจัยออกแบบ เนื่องจากมีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ซับซ้อนเกินไป แบบจำลองชนิดนี้ถูกคิดค้น

โดย Launder และ Spalding [5] โดยสมการจะประกอบด้วยชุดสมการ 2 ชุดสมการที่แยกออกจากกัน คือ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, k) และสมการการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Dissipation rate of turbulent kinetic energy, ε)

พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) หาได้จาก

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.28)$$

อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) หาได้จาก

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.29)$$

เมื่อ $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$, $G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$, $Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2$ และ

$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$ ส่วนค่าคงที่ต่างๆถูกแสดงดังตารางที่ 2.1

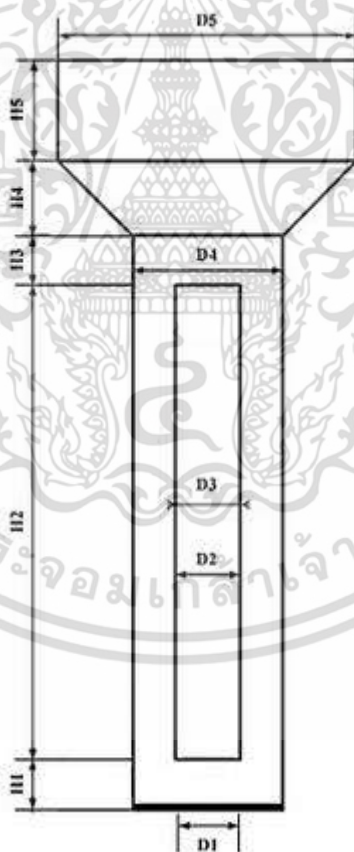
ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard k – epsilon

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

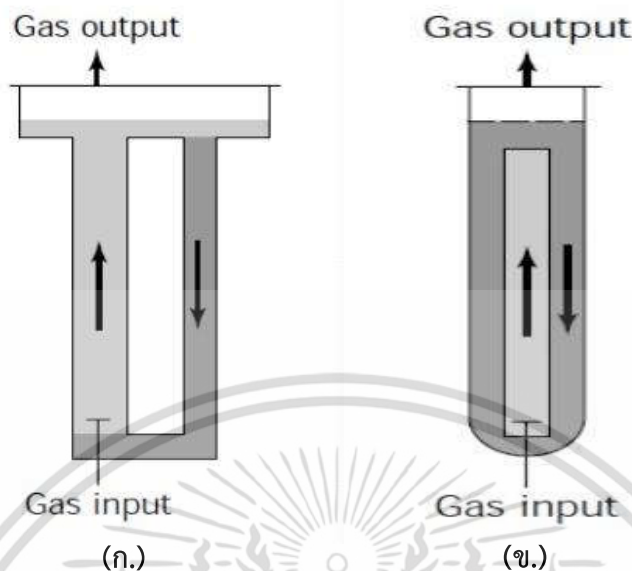
2.4 เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ (Airlift reactor)

ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องบับเบิลคอลัมน์ (Bubble column) และมีการติดคอลัมน์ซ้อนเพิ่มเข้าไปด้านใน แสดงในรูปที่ 2.2 เพื่อให้ของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการไหลวนเมื่อมีการพ่นแก๊สเข้าไปด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีความสามารถในการถ่ายเทพลังงานและถ่ายเทมวลที่ดีกว่าบับเบิลคอลัมน์ นอกจากนี้ข้อได้เปรียบของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ คือ เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์สามารถผสมสารได้ดีโดยไม่ต้องอาศัยแรงกลจากภายนอกเข้ามาช่วยในการปั่นกวนผสมจึงประหยัดพลังงานในการทำงาน อีกทั้งยังไม่มีส่วนที่มีการหมุน (Moving part) จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างสูง เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์สามารถแบ่งตามลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละแบบลักษณะการใช้งานและรูปแบบการไหลก็จะแตกต่างกัน ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ ดังนี้ แสดงดังรูปที่ 2.3

- 1.) เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายใน (Internal loop airlift)
- 2.) เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายนอก (External loop airlift)



รูปที่ 2.2 เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ [3]



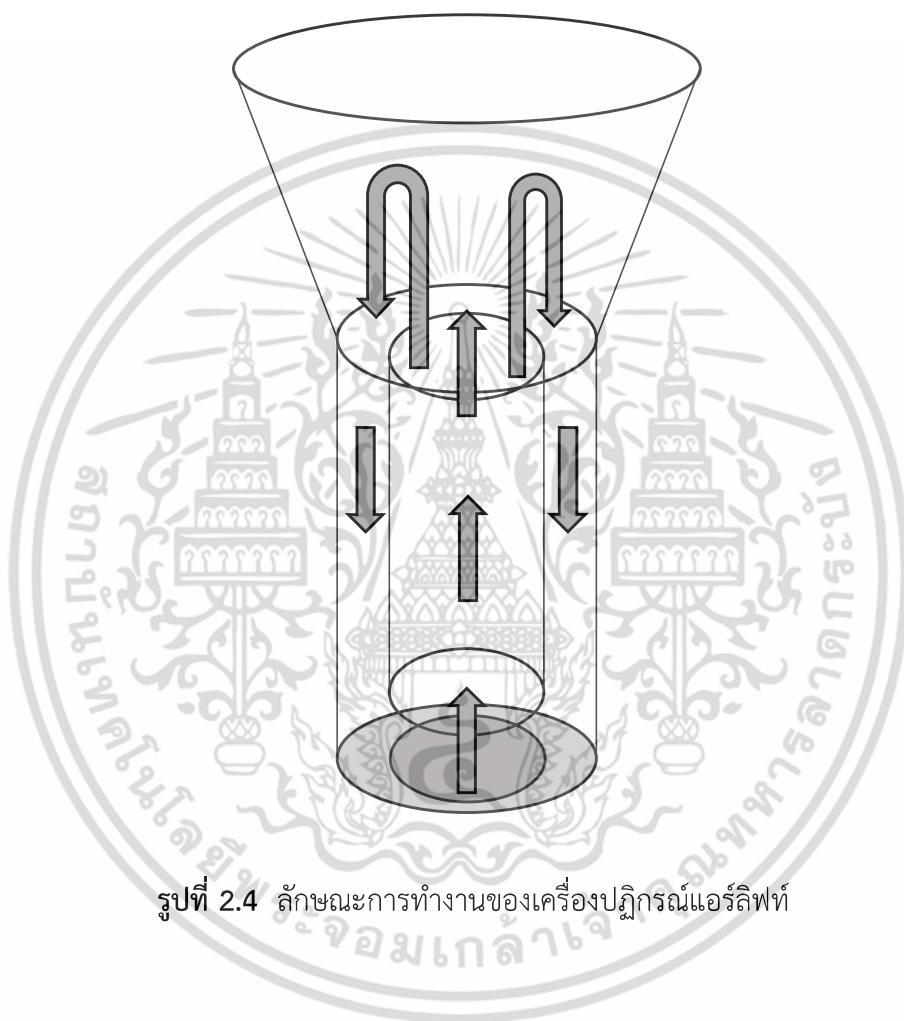
รูปที่ 2.3 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ (ก.) แบบภายนอก (ข.) แบบภายใน [6]

ซึ่งส่วนประกอบต่างๆภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีดังนี้

- 1.) ไรเซอร์ (Riser) คือส่วนการทำงานที่เกิดการสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว โดยส่วนใหญ่หัวกระจายแก๊สจะถูกติดตั้งไว้ทางด้านล่างของบริเวณนี้เพื่อผลิตฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ และเนื่องจากแก๊สมีความหนาแน่นน้อยกว่าของผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้เกิดการไหลเวียนภายในเครื่องปฏิกรณ์
- 2.) ดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) คือส่วนที่เกิดการไหลสวนกลับของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์และในบริเวณนี้จะมีปริมาณฟองน้อยกว่าบริเวณไรเซอร์ ซึ่งการไหลเวียนภายในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบของไรเซอร์
- 3.) หัวกระจายแก๊ส (Gas sparger) คือบริเวณที่ติดตั้งหัวกระจายแก๊สเพื่อผลิตฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งถ้าหัวกระจายแก๊สสามารถผลิตฟองแก๊สที่มีขนาดเล็กมากพอจะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลของแก๊สสู่ของเหลวได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในบริเวณ ไรเซอร์
- 4.) ส่วนแยกแก๊ส (Gas separator) คือส่วนที่อยู่ด้านบนสุดของเครื่องปฏิกรณ์เป็นส่วนที่ปลดปล่อยฟองแก๊สสู่บรรยากาศเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับมาของฟองแก๊สในบริเวณ ดาวน์คัมเมอร์ การออกแบบมักจะทำให้ออกแบบให้มีความสัมพันธ์กับขนาดฟองที่หัวกระจายแก๊สสามารถผลิตได้

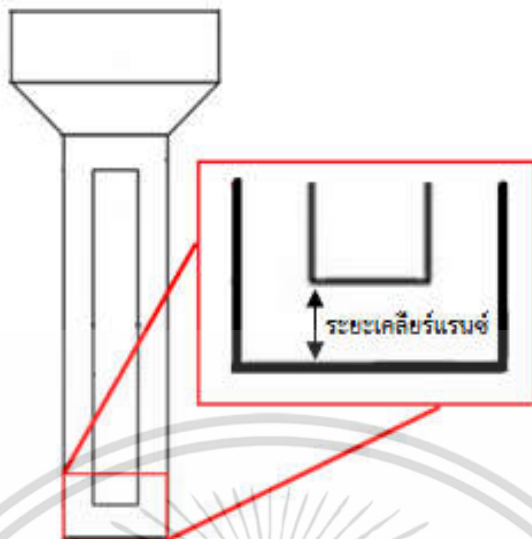
โดยลักษณะการทำงานภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ แก๊สที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทำให้ของเหลวถูกดันขึ้นและทำให้ของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการไหลขึ้นในไรเซอร์ เมื่อของเหลวไหลขึ้นสู่ด้านบนแล้วจะไหลกลับลงมาในท่อด้านนอกหรือที่เรียกว่า ดาวน์คัมเมอร์ โดยไรเซอร์จะถูกติดตั้งไว้เหนือกับหัวกระจายแก๊สเพื่อให้

ของเหลวที่ไหลตกกลับลงมาในตาวอร์นคัมเมอร์เกิดการไหลวนแสดงในดังรูปที่ 2.4 ระยะห่างระหว่างโรเซอร์กับหัวกระจายแก๊สจะเรียกว่าเคลียร์เรนซ์ แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งขนาดหรือระยะเคลียร์เรนซ์นี้จะส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ และนอกจากนี้ความหนาของโรเซอร์และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ก็ยิ่งส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์อีกด้วย



รูปที่ 2.4 ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ส่วนที่เป็นเคลียร์เรนซ์

2.5 แรงดันพลศาสตร์ (Dynamic pressure)

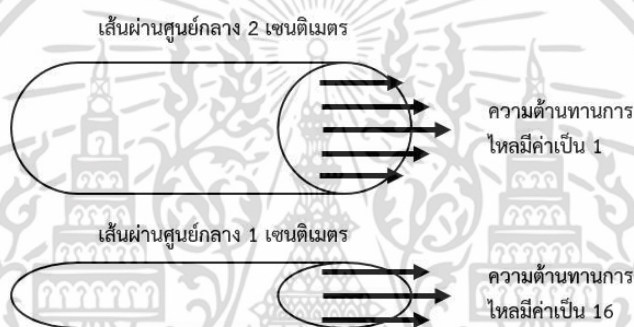
แรงดันพลศาสตร์ของของไหล คือ พลังงานจลน์ที่ของไหล ทั้งของเหลวและแก๊สใช้ในการเคลื่อนที่ต่อหน่วยของปริมาตร แต่ในความเป็นจริงแล้วแรงดันพลศาสตร์ของของไหลนั้นเป็นเทอม เทอมหนึ่งในสมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) ที่ได้มาจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายแล้วแรงดันพลศาสตร์จะเป็นผลต่างระหว่างแรงดันสถิต (Static pressure) กับ แรงดันสแตกเนชั่น (Stagnation pressure) ซึ่งแรงดันพลศาสตร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.30

$$P_{Dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.30)$$

ซึ่ง P_{Dyn} คือแรงดันพลศาสตร์ ρ คือความหนาแน่นของของไหล (g/cm^3) และ v คือความเร็วของของเหลว (เมตรต่อวินาที)

2.6 ความต้านทานการไหล (Resistance to flow)

ความต้านทานการไหล คือ ผลต่างของความดันที่ต้องการที่ทำให้แก๊สหรือของเหลวเกิดอัตราการไหลหรือทำให้เกิดการเคลื่อนที่ภายในท่อจากตำแหน่งหนึ่งๆ ไปยังตำแหน่งหนึ่ง ความต้านทานการไหลเกิดจากแรงเสียดทาน (Friction) ที่มีอยู่ภายในท่อ ความดันที่ระบบต้องใส่เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่มีอยู่ภายในท่อที่มีขนาดต่างกัน ของไหลจึงสามารถเคลื่อนที่หรือเคลื่อนย้ายได้ จึงส่งผลให้การไหลของของไหลในท่อที่มีความต้านทานการไหลต่างกัน การไหลในท่อที่มีขนาดเล็กจะมีผลต่างความดัน (Pressure drop) มากกว่าท่อขนาดใหญ่ และท่อขนาดเล็กจะมีแรงเสียดทานมากกว่า เนื่องจากท่อที่มีขนาดเล็กมีความต้านทานการไหลของของไหล มากกว่าท่อใหญ่ ด้วยเหตุนี้การที่จะทำให้ของไหลผ่านท่อที่มีขนาดเล็กจำเป็นต้องใช้แรงดันมากกว่าท่อขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานการไหลของท่อขนาดเล็กกับท่อขนาดใหญ่

2.7 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE

ระเบียบวิธี SIMPLE (Semi – Implicit Method for Pressure Linked Equations) ใช้เพื่อการประมาณหรือการคาดเดาและปรับแก้การคำนวณความดันบนกริดที่เชื่อมกัน ระเบียบวิธีนี้แสดงได้โดยการพิจารณาสมการการไหลแบบราบเรียบคงตัวใน 2 มิติ สำหรับระบบพิกัดฉาก [5] ดังสมการที่ 2.31 และ 2.32

$$a_{i,j}u_{i,j} = \sum a_{nb}u_{nb} + (p_{i-1,j} - p_{i,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.31)$$

$$a_{i,j}v_{i,j} = \sum a_{nb}v_{nb} + (p_{i,j-1} - p_{i,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.32)$$

โดยเริ่มจากการคาดเดาสนามความดัน p^* แล้วคำนวณสมการโมเมนตัมแยกในสมการ 2.31 และ 2.32 โดยใช้สนามความดันคาดเดา ได้ผลออกมาเป็นองค์ประกอบความเร็ว u^* และ v^* ดังนี้

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{I-1,j}^* - p_{I,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.33)$$

$$a_{I,j}v_{I,j}^* = \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{I,j-1}^* - p_{I,j}^*)A_{I,j} + b_{I,j} \quad (2.34)$$

หลังจากนั้นปรับแก้ความดัน (Pressure correction p') นิยามมาจากผลต่างของความดันจริง p^* และความดันคาดเดา p^* ดังสมการ 2.35 และองค์ประกอบความเร็วในแนวแกน x และ y ดังสมการที่ 2.36 และ 2.37

$$p' = p - p^* \quad (2.35)$$

$$u' = u - u^* \quad (2.36)$$

$$v' = v - v^* \quad (2.37)$$

แทนค่าสนามความดันจริง p ในสมการโมเมนตัมแยกจะได้ผลลัพธ์เป็นสนามความเร็วจริง (u, v) สมการโมเมนตัมแยกเชื่อมโยงกับสนามความเร็วจริงด้วยสนามความดันจริง

ลบสมการที่ 2.31 และ 2.32 ด้วยสมการที่ 2.33 และ 2.34 ตามลำดับ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p_{I-1,j} - p_{I-1,j}^*) - (p_{I,j} - p_{I,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.38)$$

$$a_{I,j}(v_{I,j} - v_{I,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p_{I,j-1} - p_{I,j-1}^*) - (p_{I,j} - p_{I,j}^*)]A_{I,j} \quad (2.39)$$

จากนิยามในสมการ (2.35-2.37) เมื่อแทนค่าในสมการ 2.38 และ 2.39 จะได้เป็น

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{I-1,j} - p'_{I,j})A_{i,j} \quad (2.40)$$

$$a_{I,j}v'_{I,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{I,j-1} - p'_{I,j})A_{I,j} \quad (2.41)$$

สมการที่ 2.40 และ 2.41 ถูกทำให้เป็นสมการอย่างง่ายโดยการตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ เพื่อให้ได้การปรับแก้ความเร็ว การลดรูปนี้เป็นแนวคิดหลักในการประมาณด้วยระเบียบวิธีแบบ SIMPLE ซึ่งสมการอย่างง่ายสามารถแสดงได้ใหม่ดังนี้

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{I-1,j} - p'_{I,j}) \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v'_{I,j} = d_{I,j}(p'_{I,j-1} - p'_{I,j}) \quad (2.43)$$

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

แทนสมการที่ 2.42 และ 2.43 ในสมการที่ 2.36 และ 2.37 ได้ผลลัพธ์เป็น

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{I-1,j} - p'_{I,j}) \quad (2.44)$$

$$v_{I,j} = v_{I,j}^* + d_{I,j}(p'_{I,j-1} - p'_{I,j}) \quad (2.45)$$

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

$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j}(p'_{I,j} - p'_{I+1,j}) \quad (2.46)$$

$$v_{I,j+1} = v_{I,j+1}^* + d_{I,j+1}(p'_{I,j} - p'_{I,j+1}) \quad (2.47)$$

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

สนามความเร็วต้องสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ซึ่งสมการความต่อเนื่องแยกคือ

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{I,j+1} - (\rho v A)_{I,j}] = 0 \quad (2.48)$$

แทนสมการที่ 2.44 ถึง 2.47 ในสมการความต่อเนื่องแยกได้เป็นสมการปรับแก้ความดัน (Pressure correction equation) ดังสมการที่ 2.49

$$a_{I,j} p'_{I,j} = a_{i+1,j} p'_{i+1,j} + a_{I-1,j} p'_{I-1,j} + a_{I,j+1} p'_{I,j+1} + a_{I,j-1} p'_{I,j-1} + b'_{I,j} \quad (2.49)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับแก้ความดัน

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

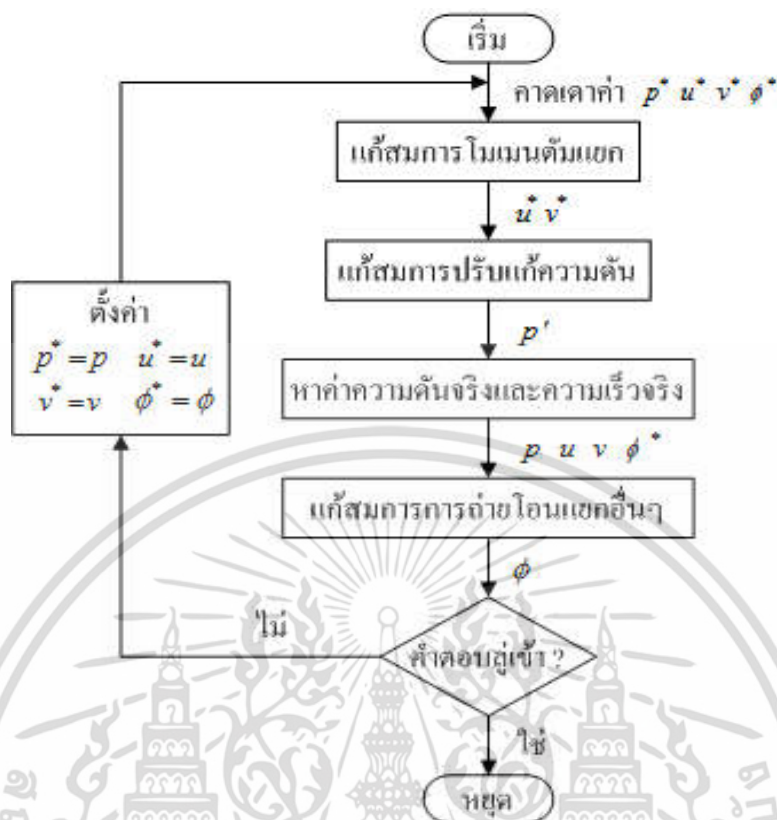
เทอม b' แทนความไม่สมดุลเนื่องจากสนามความเร็วคาดเดาไม่เหมาะสม คำนวณสมการที่ (2.49) จะได้สนามการปรับแก้ความดันทั้งสนามการไหล เมื่อทราบสนามการปรับแก้ความดันแล้วจึงหาความดันจริงได้จากสมการที่ (2.35) และองค์ประกอบความเร็วจากสมการที่ 2.44 - 2.47 การตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ จะไม่ส่งผลต่อผลเฉลยสุดท้าย (ผลเฉลยลู่เข้า) เนื่องจากการปรับแก้ความดันและการปรับแก้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ($p^* = p u^* = u$ และ $v^* = v$)

อย่างไรก็ตามสมการปรับแก้ความดันอาจเกิดการลู่ออกของผลเฉลย ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วย Underrelaxation ระหว่างกระบวนการการคำนวณซ้ำ ซึ่งหาความดันใหม่ได้จาก

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (2.50)$$

โดยที่ α_p คือ ตัวประกอบได้การผ่อนปรนของความดัน

การตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนที่ถูกต้องจะช่วยประหยัดต้นทุนในการจำลอง การตั้งค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออก แต่ถ้าตั้งค่าต่ำเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่เข้าอย่างช้าๆ ซึ่งการตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนจะมีค่าต่างกันขึ้นกับกรณีของการไหล ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE [5]

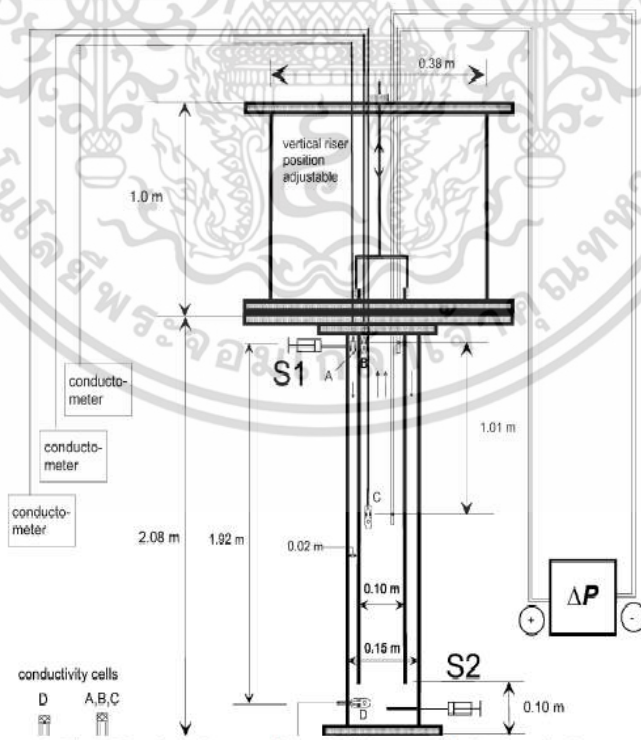
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

2.8.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

J.M. van Baten และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในการศึกษาการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเตอร์ค่าต่างๆดังนี้ 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 และ 0.12 เมตรต่อวินาที ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ 2 เครื่อง ที่มีขนาดต่างกัน แต่ทั้งคู่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์เท่ากันที่ 0.1 เมตร โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองกับอุทกพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือ CFD โดยโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม CFX เวอร์ชัน 4.2 ในการจำลองลักษณะการไหลเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ทำงานในสภาวะ 2 ภูมิภาค เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้วจะทำการศึกษาอิทธิพลของการขยายขนาด (Scale up) ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

ในการทดลองของ J.M. van Baten ทำการวัดความเร็วและปริมาณแก๊สไฮลอล์ฟภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ความสูงค่าหนึ่ง ในการวัดความเร็วภายในโรเซอร์จะทำการฉีดสารตัวนำ (Tracer) ที่เป็นสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaOH) เข้าไปด้านล่างของโรเซอร์ เมื่อสารละลายมีการเคลื่อนที่จะถูกตรวจจับโดยแผ่นตัวนำ (Metrohm) ที่ตำแหน่ง C และ D โดยแผ่นตัวนำจะต่อเข้ากับเครื่อง Conductometer ดังรูปที่ 2.8 เพื่อทำการแปลงสัญญาณหาเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด D ไป C และหาความเร็วในการเคลื่อนที่ เช่นเดียวกับการวัดความเร็วภายในดาวน์คัมเมอร์จะทำการฉีดสารตัวนำไปที่ด้านบนของดาวน์คัมเมอร์ เมื่อสารตัวนำเคลื่อนที่จะถูกตรวจจับที่แผ่นตรวจจับตำแหน่ง A และ D และส่งสัญญาณไปที่ Conductometer ดังรูปที่ 2.8

ในการวัดปริมาณแก๊สไฮลอล์ฟที่โรเซอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จะวัดได้จากค่าความดันตกคร่อมที่จุด C และ B จากนั้นจะนำความดันตกคร่อมที่วัดได้ไปคำนวณปริมาณแก๊สไฮลอล์ฟ เมื่อได้ความเร็วและปริมาณแก๊สไฮลอล์ฟภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แล้ว จะนำมาหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ โดยในการจำลองจะใช้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับขนาดจริง ดังรูปที่ 2.4 ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้เวลาในการจำลองเป็น 3000 timestep และทำการจำลองที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลค่าต่างๆ เช่นเดียวกับการทดลอง ดังนี้ 0.04 0.06 0.08 0.10 และ 0.12 เมตรต่อวินาที หลังจากการจำลองจะได้แบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบ k-epsilon



รูปที่ 2.8 การวัดความเร็วของของไหลและปริมาณแก๊สไฮลอล์ฟภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แล้ว ได้ทำการศึกษาการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีต่อการขยายขนาดพบว่าเมื่อมีการขยายขนาดจะทำให้มีการไหลแบบหมุนวนมากขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ แต่ในทางกลับกันเมื่อมีการขยายขนาดส่งผลให้ปริมาณแก๊สไฮลด์มีค่าลดลง

2.8.2 การจำลองระบบสองวัฏภาคในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

M.Brazej และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง ไม่ว่าจะเป็น ความเร็วภายในโรเตอร์ ความเร็วภายในดาวนคัมเมอร์ และปริมาณแก๊สไฮลด์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ van Baten และคณะ แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ใช้ ใช้โปรแกรม Fluent CFD ในการจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ในสถานะของการทดลองนี้ และได้ใช้แบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาคเป็น Mixture Model ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่า ข้อมูลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม Fluent CFD มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในระดับหนึ่ง

2.8.3 การหมุนเวียนของฟองอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

W.A.J van Benthum และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการไหลเวียนของฟองอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ โดยจะแบ่งการศึกษาเป็นแบบสองวัฏภาคและสามวัฏภาค ในระบบสองวัฏภาคจะทำการศึกษาน้ำกับอากาศ และในระบบสามวัฏภาคจะทำการศึกษาน้ำ อากาศและอนุภาคของโพลิสไตลีน ที่ความเร็วแก๊สเข้าค่าต่างๆ โดยลักษณะการไหลของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกแบ่งเป็น 3 แบบด้วยกัน คือ

1. ไม่มีฟองอากาศ
2. มีฟองอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์คังที่
3. ฟองอากาศไหลย้อนกลับมาทางด้านโรเตอร์

โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียงแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของแก๊สไฮลด์บริเวณโรเตอร์และดาวนคัมเมอร์และความเร็วของของเหลวในดาวนคัมเมอร์ในการไหลรูปแบบที่ 2 ตัวแปรทั้งสองมีค่าที่คงที่ ในขณะที่รูปแบบที่ 3 มีการเพิ่มความเร็วซูเปอร์ฟิเซียล

ของแก๊ส อัตราส่วนแก๊สไฮลอปในดาวน์คัมเมอร์และโรเซอร์มักจะถูกรายงานให้มีค่าคงที่ แต่อย่างไรก็ตาม ในงานชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของแก๊สไฮลอปในดาวน์คัมเมอร์และโรเซอร์มีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล ซึ่งในรูปแบบที่ 2 แก๊สไฮลอปในโรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่เท่ากัน แต่ในรูปแบบการไหลที่ 3 แก๊สไฮลอปในโรเซอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าในดาวน์คัมเมอร์

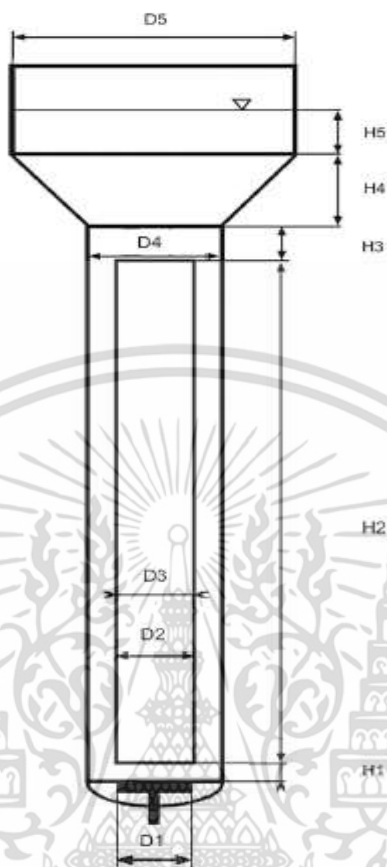
2.3.4 ผลของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับผลการทดลองของปริมาณแก๊สไฮลอปและความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์แบบภายใน

M.Simcik และคณะ [9] เสนอบทความนี้เป็นข้อมูลการทดลองและข้อมูลการจำลองโดยใช้อุทกพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ของอุทกพลศาสตร์ของสารสองวัฏภาค (อากาศและน้ำ) ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์แบบหมุนวนภายใน การทดลองและการจำลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อสังเกตลักษณะการไหลทั่วไป (ปริมาณแก๊สไฮลอปและความเร็วของของเหลวภายในโรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์) ในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ของเราโดยเฉพาะ การทดลองและการจำลองทำการศึกษารูปแบบของโรเซอร์ที่แตกต่างกันโดยเปลี่ยนแปลงความยาวของโรเซอร์และขนาดของโรเซอร์ทั้งหมด 3 แบบ ดังรูปที่ 2.9 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์รูปร่างต่างๆ ในงานวิจัย

	A		B		C	
	มิลลิเมตร	จำนวนกริด	มิลลิเมตร	จำนวนกริด	มิลลิเมตร	จำนวนกริด
D1	100	12	100	12	100	12
D2	62	12	87	12	62	12
D3	70	14	92	14	70	14
D4	142	28	142	28	142	28
D5	420	28	420	28	420	28
H1	23	5	23	5	23	5
H2	1200	60	1200	60	1400	70
H3	200	16	200	20	0	0
H4	170	14	170	12	170	14
H5	120	6	120	6	120	6

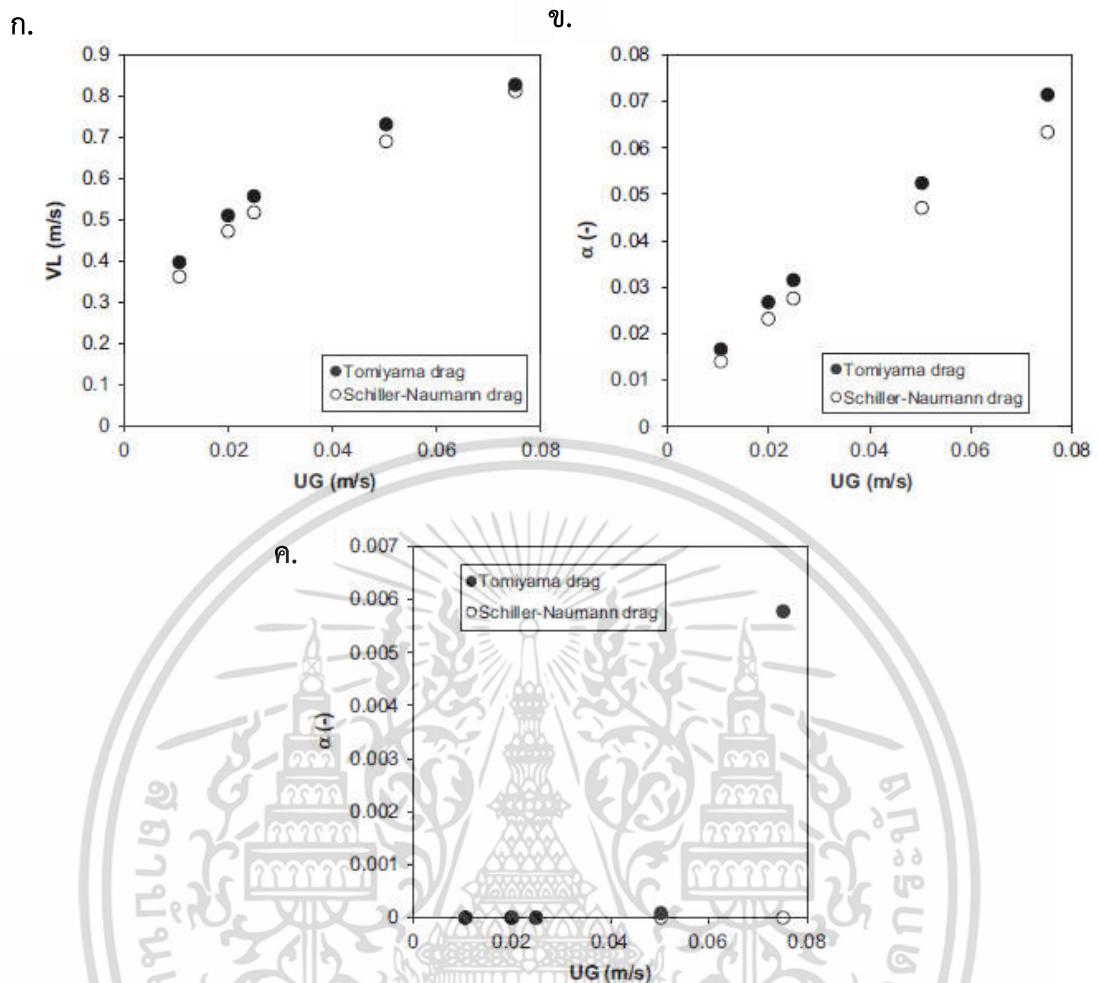
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปทรงเครื่องปฏิกรณ์แอโรลิฟท์ในงานวิจัยนี้ [9]

และความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลของแก๊ส (อากาศ) อยู่ในช่วง 1-7.5 เมตรต่อวินาที การไหลวนภายในเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 3 แบบ ถูกตั้งข้อสังเกตการทดลอง (ไม่มีฟองแก๊สในดาวน์คัมเมอร์ มีฟองแก๊สในดาวน์คัมเมอร์ แต่ไม่เกิดการไหลวน และสุดท้ายรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน) เป้าหมายแรกของงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบการตั้งค่าในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้ค่ามาตรฐานทั่วไปสำหรับจำลองแรงกระทำระหว่างวัฏภาคของระบบสองวัฏภาคและสำหรับจำลองการไหลแบบปั่นป่วน และการสมมติให้ขนาดฟองมีค่าคงที่สามารถวิเคราะห์รูปแบบการไหลทั้ง 3 รูปแบบการไหลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แอโรลิฟท์ในการทดลองของเราและเมื่อการตั้งค่าการจำลองสามารถนำมาใช้ภายหลังในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลเพื่อใช้กับการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแอโรลิฟท์จากรูปแบบเดิมหรือเปลี่ยนชนิดของของไหล การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้ทำในโปรแกรม Fluent 6.3 โดยใช้ สมการพีชคณิต Slip mixture เป็นแบบจำลองสำหรับการไหลแบบหลายวัฏภาค เป้าหมายถัดมาเป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของผลการจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน ผลที่ได้แสดงดังกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 2.10

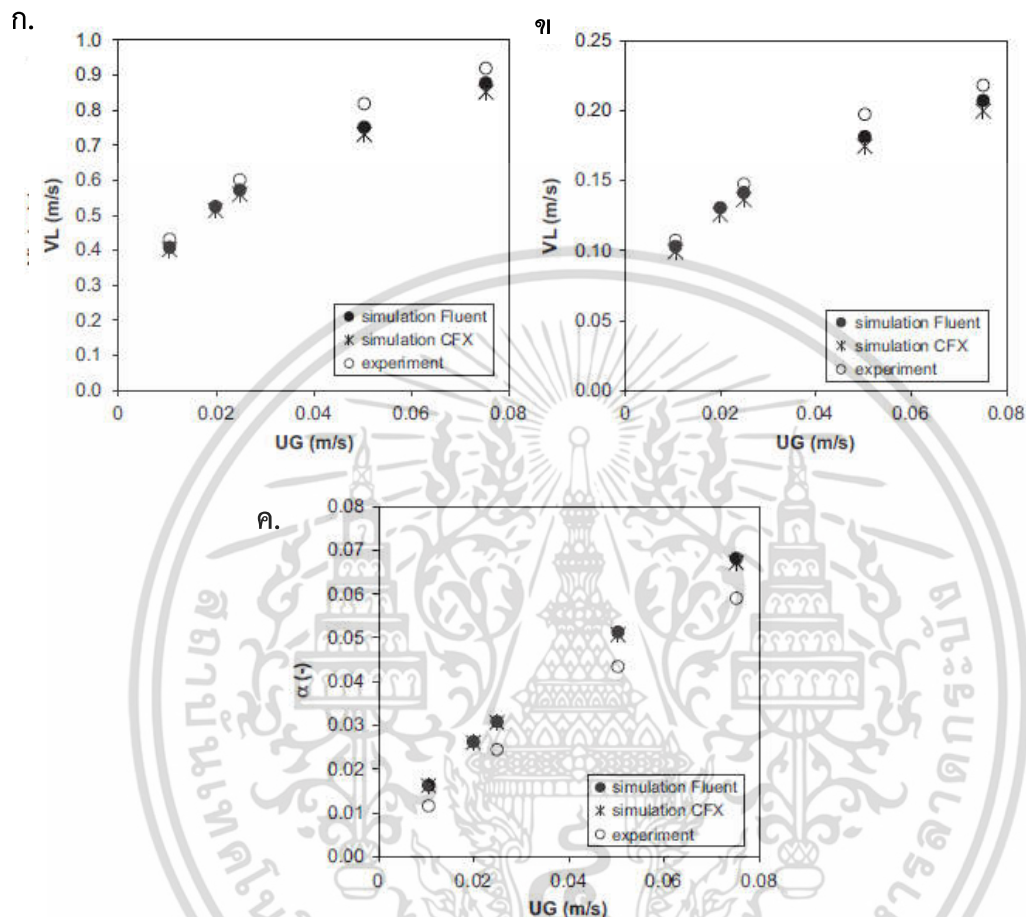
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ผลการจำลอง case A เปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้าน 2 ชนิดที่ฟองแก๊สขนาด 5 mm: Tomiyama(จุดสีดำ) และ Schiller-Naumann (จุดสีขาว) ก.ความเร็วของของเหลวภายในโรเตอร์, ข.ปริมาณแก๊สโฮลล์ฟในโรเตอร์, ค.ปริมาณแก๊สโฮลล์ฟในดาวน์คัมเมอร์เทียบกับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊ส [9]

ผลของความเร็วสลีปฟองแก๊สและแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ในงานวิจัยนี้การจำลอง จำลองในโปรแกรม Fluent นอกจากนั้นผลการจำลองยังใช้โปรแกรม CFX 12.1 และใช้แบบจำลอง Euler-Euler ซึ่งต่างกับโปรแกรม Fluent อีกด้วย การวัดผลการทดลองความเร็วของของเหลวในโรเตอร์และดาวน์คัมเมอร์ทำโดยการรับค่าการตอบสนองต่อการฉีดสารละลายกรดซัลฟูริกเข้าไปแล้ววัดจากเครื่องวัด pH การวัดปริมาณแก๊สโฮลล์ฟในโรเตอร์และดาวน์คัมเมอร์วัดโดยใช้เครื่องมือมาตรรูปตัวยู ผลการศึกษาพบว่าค่าการจำลองค่อนข้างแม่นยำเมื่อไม่มีฟองแก๊สในดาวน์คัมเมอร์และการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้านมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย การใช้แบบจำลองที่แตกต่างกัน

ในโปรแกรมที่ต่างกัน (CFX) ให้ผลการจำลองเกือบจะเหมือนกับผลการจำลองในโปรแกรม Fluent ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองใน case C ผลการจำลองจากโปรแกรม Fluent (จุดสีดำ), จากโปรแกรม CFX (รูปดาว) และผลการทดลอง (จุดสีขาว) (ก.) ความเร็วของของเหลวภายในโรเตอร์, (ข.) ความเร็วของของเหลวภายในคาน์คัมเมอร์และ (ค.) ปริมาณแก๊สไฮลอปในโรเตอร์เทียบกับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊ส [9]

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ แอร์ลิฟท์โดยวิธีเชิงตัวเลข

การออกแบบเพื่อการศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการไหลแยกของแก๊สสวนเข้าไปในส่วนของ
ดาวน์คัมเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายใน แบ่งขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.1 การสร้างแบบจำลอง

ในการคำนวณการไหล จำเป็นที่ต้องสร้างแบบจำลองหรือรูปแบบอุปกรณ์ที่ต้องการศึกษาการ
ไหลก่อน ในงานวิจัยนี้การสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายในถูกสร้างเป็นแบบจำลอง
สองมิติโดยใช้โปรแกรม Gambit แบบจำลองที่สร้างขึ้นมาอ้างอิงขนาดและรูปร่างมาจากงานวิจัยของ van
Baten และคณะ [3] ในอุตสาหกรรมมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์อยู่หลายขนาด ซึ่งหนึ่งในนั้นก็มี
ขนาดเดียวกันกับในงานวิจัยของ van Baten และคณะ [3] ที่ใช้อ้างอิง โดยเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีความ
สูง 3.06 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ที่บริเวณส่วนแยกแก๊สมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.38
เมตร บริเวณที่เป็นส่วนแยกแก๊สอยู่ที่ความสูงตั้งแต่ 2.08 ถึง 3.06 เมตร ปลายด้านบนเปิดสู่บรรยากาศ
และขนาดของโรเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร สูง 2.02 เมตรและมีความหนา 0.005 เมตร ดังรูป
ที่ 3.1 โดยเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์นี้มีค่าความสูงของโรเตอร์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ (Riser
aspect ratio) อยู่ที่ 20.2 และระดับของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่า 2.5 เมตร ในส่วนงานวิจัย
ของ van Baten และคณะ [3] เป็นการจำลองการไหลโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับผลการ
ทดลองเท่านั้น แต่สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการไหลของฟอง
แก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายใน
ในลักษณะต่างๆ ต่อไป

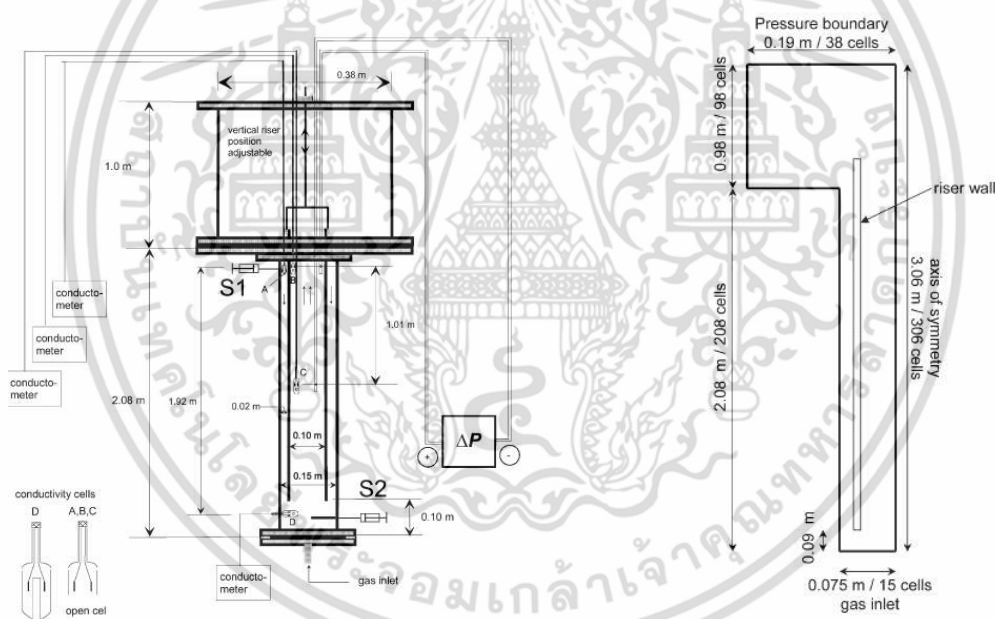
จากนั้นทำการแบ่งโดเมนของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีความต่อเนื่องให้อยู่ในรูปแบบ
ต่อเนื่องหรือที่เรียกว่าการสร้างเมชหรือกริด เพื่อให้ทราบว่าต้องคำนวณตรงจุดไหนในการคำนวณต่อไป
ในงานวิจัยนี้แบ่งโดเมนโดยใช้กริดที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Quadrilateral grid cells) โดยตัวอย่าง
ของโดเมนที่มีการสร้างเมชได้แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งรูปที่แสดงเป็นโดเมนที่มีเมช 27,602 เซลล์

หลังจากการสร้างเมชแล้วต้องกำหนดสภาวะขอบเขตเพื่อใช้ในการคำนวณการไหล โดยกำหนด
เมชที่ตำแหน่งต่างๆ ในโดเมนดังตาราง 3.1 และ รูปที่ 3.1

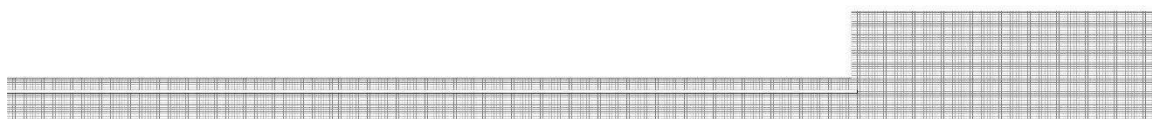
ตารางที่ 3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขต

ประเภท	สภาวะของเขต
Inlet	ชนิด Velocity-Inlet และกำหนดความเร็วขา
Outlet	ชนิด Pressure-Outlet
Wall	ชนิด Wall
Axis Symmetry	ชนิด Axis

ที่ตรงกลางของเครื่องปฏิกรณ์เออร์ลิฟท์กำหนดเป็น Axis เนื่องจากการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นการไหลที่มีความสมมาตรกันทั้งสองฝั่ง ในการคำนวณการไหลด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจึงสามารถคำนวณเพียงข้างเดียวแล้วนำค่าที่คำนวณได้จากฝั่งหนึ่งไปใช้กับอีกฝั่งได้ และบริเวณผนังเครื่องปฏิกรณ์ถูกกำหนดให้เป็น wall เนื่องจากเป็นผนังที่เป็นของแข็ง



รูปที่ 3.1 รูปแบบและขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เออร์ลิฟท์ที่ใช้ในการจำลอง [3]



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของโดเมนที่ถูกตัดกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การคำนวณการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายในโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

3.2.1 การตั้งค่าข้อมูลต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณการไหล เพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณ

3.2.1.1 การตั้งค่าแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ในการจำลองการไหลหรือคำนวณรูปแบบการไหลโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จำเป็นต้องใช้แบบจำลองในการคำนวณการไหลไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลแบบหลายวัฏภาค เนื่องจากรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เป็นการไหลแบบสองวัฏภาค นั่นคือวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว

การตั้งค่าแบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาค ในงานวิจัยนี้แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณรูปแบบการไหลแบบหลายวัฏภาคในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ใช้แบบจำลอง Eulerian model เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการจำลองแบบหลายวัฏภาคในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ [9] แบบจำลองออยเลอร์เลียนมีรูปแบบการคำนวณรูปแบบการไหลของของไหลหลายวัฏภาคที่คำนวณแยกวัฏภาคกัน นั่นคือสมการควบคุม (Governing Equation) มีอยู่ละ 2 สมการดังสมการที่ 3.1 ถึง 3.4 ซึ่งเป็นสมการควบคุมของวัฏภาค c วัฏภาคที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ในงานวิจัยนี้เป็นของวัฏภาคของเหลวและวัฏภาค d วัฏภาคที่มีการแพร่กระจาย (Dispersed phase) เป็นวัฏภาคแก๊ส โดยสมการที่ 3.1 และ 3.2 เป็นสมการความต่อเนื่อง และสมการที่ 3.3 และ 3.4 เป็นสมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial \alpha_c \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c v_c) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \alpha_d \rho_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_d v_d) = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial (\alpha_c \rho_c v_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c v_c v_c) = -\alpha_c \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_c \mu_{c,eff} (\nabla v_c \nabla v_c^T)] + \alpha_c \rho_c g + M_{cd} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial (\alpha_d \rho_d v_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_d v_d v_d) = -\alpha_d \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_d \mu_{d,eff} (\nabla v_d \nabla v_d^T)] + \alpha_d \rho_d g + M_{dc} \quad (3.4)$$

$$\mu_{d,eff} = \mu_d + \mu_{id}, \mu_{c,eff} = \mu_c + \mu_{ic}$$

$$M_{cd} = M_{cd,D} + M_{cd,TD} \quad (3.5)$$

$$M_{cd,D} = K_{cd} (v_d - v_c) = (3/4)(C_D / d) \alpha_d \rho_c |v_d - v_c| (v_d - v_c) \quad (3.6)$$

ในสมการที่ 3.3 และ 3.4 เทอม M_{cd} และ M_{dc} เป็นเทอมที่แสดงถึงแรงกระทำระหว่างวัฏภาค วัฏภาค c กระทำต่อวัฏภาค d และวัฏภาค d กระทำต่อวัฏภาค c ตามลำดับ เมื่อ $M_{cd} = -M_{dc}$ ซึ่งการคำนวณหาค่า M_{cd} และ M_{dc} แสดงไว้ดังสมการที่ 3.5 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ $M_{cd,D}$ เป็นแรงกระทำระหว่างวัฏภาค

ที่มาจากแรงต้าน สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ในสมการที่ 3.6 ค่า C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi – Alexander ซึ่งมีชุดสมการในการคำนวณดังสมการ 3.8 d คือ ขนาดของฟองแก๊ส ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ฟองแก๊สมีค่าคงที่ และมีขนาดฟอง 5 mm (0.005 m) v_c และ v_d คือ ความเร็วของวัฏภาค c และ วัฏภาค d ตามลำดับ

$$M_{cd,TD} = C_{TD} K_{cd} v_{ic} (\nabla \alpha_d / \alpha_d - \nabla \alpha_c / \alpha_c) \quad (3.7)$$

$M_{cd,TD}$ เป็นแรงกระทำที่มาจากกระเจาตัวปั่นป่วนของวัฏภาคเมื่อ $C_{TD} = 1, K_{cd}$ เป็นการคงที่การถ่ายเทโมเมนตัมของแรงต้าน, v_{ic} เป็นความหนืดจลน์ของการปั่นป่วนของวัฏภาคที่มีความต่อเนื่อง $\sigma_c = 0.9$ และงานวิจัยนี้ใช้สัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander

สัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander [10]

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (3.8)$$

โดยที่ a_1, a_2, a_3 แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ a_1, a_2, a_3 ของโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-alexander

เลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์	a_1	a_2	a_3
$0 < Re < 0.1$	0	24	0
$0.1 < Re < 1$	3.690	22.73	0.090
$1 < Re < 10$	1.222	29.1667	-3.8889
$10 < Re < 100$	0.6167	46.50	-116.67
$100 < Re < 1000$	0.3644	98.33	-2778
$1000 < Re < 5000$	0.357	148.62	-47500
$5000 < Re < 10000$	0.46	-490.546	578500
$Re \geq 10000$	0.5191	-1662.5	5416700

การตั้งค่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ในงานวิจัยนี้แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณรูปแบบการไหลโดยอาศัยสมการนาเวียร์ – สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ที่ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่อง (สมการ (2.19)) และสมการโมเมนตัมแบบปั่นป่วน (สมการ (2.24 2.25 และ 2.26)) ซึ่งในสมการนาเวียร์ – สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์มีพจน์ (μ_t) ซึ่งเป็นพจน์ของความหนืดปั่นป่วน ซึ่งจำเป็นต้องมีแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อใช้ในการหาพจน์ดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k – epsilon (หัวข้อที่ 2.3.2) ซึ่งในการคำนวณการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ จำเป็นต้องใช้ 2 สมการแยกกันคือ c และ d เป็น μ_{tc} μ_{td} เช่นเดียวกันกับสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.9 3.10 และ 3.11 ที่เป็นของวิฤภาค c วิฤภาคที่มีความต่อเนื่อง สำหรับค่าคงที่ในสมการ (Turbulent Parameter) แสดงในตารางที่ 3.3

$$\mu_c = C_\mu \rho_c k_c^2 / \varepsilon_c \quad (3.9)$$

$$\partial(\alpha_c \rho_c k_c) / \partial t + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c v_c k_c) = \nabla \cdot [\alpha_c (\mu_c + \mu_{tc} / \sigma_k) (\nabla k_c)] + \alpha_c G_c - \alpha_c \rho_c \varepsilon_c \quad (3.10)$$

$$\partial(\alpha_c \rho_c \varepsilon_c) / \partial t + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c v_c \varepsilon_c) = \nabla \cdot [\alpha_c (\mu_c + \mu_{tc} / \sigma_\varepsilon) (\nabla \varepsilon_c)] + \alpha_c \varepsilon_c / k_c (C_{1\varepsilon} G_c - C_{2\varepsilon} \rho_c \varepsilon_c) \quad (3.11)$$

เมื่อ $G_c = \mu_{tc} [\nabla v_c + (\nabla v_c)^T] : \nabla v_c$

และความหนืดปั่นป่วนในวิฤภาค d (μ_{td}) วิฤภาคที่มีการกระจายตัว ดังสมการที่ 3.12

$$\mu_{td} = (\rho_d / \rho_c) \mu_{tc} / \sigma \quad (3.12)$$

ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่ในสมการความปั่นป่วน Standard k – epsilon

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_3	TKE Prandtl NO.	TDR Prandtl NO.	Dispersion Prandtl NO.
0.09	1.44	1.92	1.3	1	1.3	0.75

3.2.1.2 สมบัติของของไหลที่ใช้ในการคำนวณ สารที่มีการป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ คือ อากาศ ที่อุณหภูมิห้อง มีความหนาแน่น 1.225 kg/m^3 และมีความหนืด $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ และสารที่บรรจุอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ คือ น้ำ ที่อุณหภูมิห้อง มีความหนาแน่น 998.2 kg/m^3 และมีความหนืด $1.003 \times 10^{-3} \text{ kg/m-s}$ โดยในการคำนวณการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิง

ตัวเลข ให้นำเป็นสารในภูมิภาค c หรือ Primary phase และ อากาศเป็นสารในภูมิภาค d หรือ Secondary phase

3.2.1.3 กำหนดสภาวะขอบเขตของความเร็วแก๊สขาเข้า เป็นค่าความเร็วซูเปอร์ฟิเชียล 0.04 0.06 0.08 0.10 และ 0.12 เมตรต่อวินาที เช่นเดียวกับงานวิจัยของ van Baten และคณะ [3] และความเข้มข้นความปั่นป่วน (Turbulent intensity) ที่ 5% ทั้งทางเข้าและทางออก และกำหนดผนังเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์เป็นผิวที่ไม่เคลื่อน

3.2.2 การคำนวณการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ที่ใช้โปรแกรม Fluent ที่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite volume ของไหลที่ใช้ในการคำนวณเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน และรูปแบบการไหลที่คำนวณเป็นแบบสองมิติ

3.2.2.1 รูปแบบการคำนวณในงานวิจัยนี้ การเชื่อมโยงความเร็วและความดัน คำนวณโดยใช้ระเบียบวิธี SIMPLE ที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.7 ส่วนโมเมนตัม สัดส่วนเชิงปริมาตรและแบบแผนการประมาณค่าความปั่นป่วนเป็นแบบ First order upwind

3.2.2.2 การคำนวณรูปแบบการไหลในงานวิจัยนี้เป็นการไหลแบบไม่คงที่ โดยใช้ช่วงการคำนวณ (Time step size) และจำนวนช่วงดังตาราง 3.4

ตารางที่ 3.4 ตารางช่วงการคำนวณและจำนวนช่วงที่ใช้ในการคำนวณ

Time step size	จำนวนช่วง
5×10^{-5}	100
1×10^{-4}	100
5×10^{-4}	100
1×10^{-3}	100
3×10^{-3}	200
5×10^{-3}	1400
1×10^{-2}	1000

3.3 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ทำให้ผลการจำลองไม่มีการเปลี่ยนแปลง

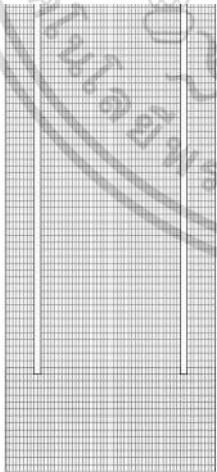
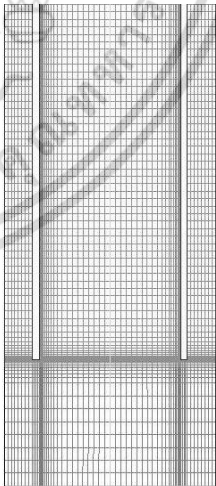
ในการจำลองต้องสร้างกริดเพื่อให้โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณรู้ว่าต้องคำนวณข้อมูลการไหลบริเวณไหน การที่กริดมีจำนวนมากทำให้ผลการจำลองมีค่าเข้าใกล้หขการจำลองที่อ้างอิงมากที่สุด แต่จำนวนกริดที่เพิ่มมากขึ้นผลที่ตามมาคือระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองก็มากขึ้นตามไปด้วย งานที่มีการจำลองรูปแบบการไหล ต้องมีการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองที่ต้องทำให้ผลการทดลองมี

ค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนของกริด ในงานวิจัยของ van Baten และคณะใช้ความละเอียดของกริดอยู่ที่ 7,189 เซลล์ ในงานวิจัยนี้ ศึกษาจำนวนกริดที่แตกต่างกัน 4 แบบ ดังนี้ 7,189 เซลล์ (x1) 27,602 เซลล์ (x2) 108,460 เซลล์ (x4) และ 429,464 เซลล์ (x8)

3.4 การศึกษาการกระจายตัวของกริด

หลังจากที่ได้จำนวนกริดที่เหมาะสมที่ทำให้ผลการจำลองการไหลในเครื่องปฏิกรณ์เออร์ลิฟที่ไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว เพื่อศึกษาว่าด้วยทรัพยากร คือ จำนวนของกริดที่เท่ากัน เราสามารถจำลองให้ผลการจำลองเข้าใกล้ผลการทดลองได้หรือไม่ เรานำจำนวนกริดที่ได้มาทำการกระจายจำนวนกริด ไปบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงๆ เช่นบริเวณทางเข้าของแก๊ส บริเวณผนังและบริเวณที่น้ำมีการไหลตกกลับลงมา ให้บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงๆ มีปริมาณกริดอยู่มากๆ หรือทำให้กริดมีความละเอียดมากขึ้น และบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เช่น บริเวณด้านในของท่อ ทำการลดปริมาณของกริดลง หรือทำให้กริดมีความหยาบขึ้น เพื่อเอาจำนวนของกริดไปชดเชยบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง เพื่อคงจำนวนของปริมาณกริด ดังแสดงในตารางที่ 3.5 เป็นการเปรียบเทียบกริดที่ไม่มีการกระจายตัวกับกริดที่มีการกระจายตัวไปบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงๆ

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของกริด ที่ไม่มีการกระจายตัวและมีการกระจายตัว

กริดที่ไม่มีการกระจาย	กริดที่มีการกระจายตัว
	

3.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยที่อ้างอิง (Validation)

งานวิจัยที่นำผลทดลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการจำลองอ้างอิงจากงานวิจัยของ van Baten และคณะ [3] โดยในการจำลองจะใช้จำนวนกริดที่ได้จากการจำลอง ข้อ 3.3 และใช้รูปแบบกริดตามการจำลองในข้อ 3.4 และใช้สภาวะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบไม่คงที่ แบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง ใช้แบบจำลองออยเลอร์เลียนสำหรับรูปแบบการไหลหลายวัฏภาค และแบบจำลองสำหรับความปั่นป่วน ใช้ Standard k – epsilon และคำนวณตามช่วงเวลาและจำนวนช่วงตามตารางที่ 3.4 หลังจากช่วงเวลาที่ทำกริดจำลองเสร็จ การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จะเข้าสู่สภาวะคงที่ ในการเก็บค่าเพื่อนำมาเทียบกับผลการทดลองที่อ้างอิง เก็บข้อมูลความเร็วของของเหลวที่ไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ความสูง 1.75 เมตร ที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลค่าต่างๆ หากค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เปรียบเทียบของการจำลองต่างจากข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยที่อ้างอิง ให้ปรับตัวแปรเงื่อนไขในการคำนวณใหม่ เช่น แบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้าน หรือ แบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาค เป็นต้น จนกว่าผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่อ้างอิงในระดับที่ยอมรับได้ นั่นคือแบบจำลองที่ได้ตั้งค่าไปก่อนหน้านี้มีความถูกต้อง และแม่นยำ จึงใช้ตัวแปรเงื่อนไขที่ได้ไปใช้ในการทำนายรูปแบบการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลต่อไป

3.6 การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการไหลแยกของแก๊สเข้าสู่ดาวนั้คัมเมอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

โดยใช้จำนวนกริด รูปแบบการกระจายตัวของกริด และแบบจำลองต่างๆที่ได้ศึกษามาใช้ในการหาตัวแปรที่ส่งผลต่อการไหลแยกของแก๊สเข้าไปในดาวนั้คัมเมอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

3.6.1 ศึกษาระยะของเคลียร์แรนซ์ที่มีผลต่อรูปแบบการไหล โดยในการจำลองเพื่อศึกษาจะ ออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์

ระยะเคลียร์แรนซ์ (เมตร)	ความหนาไรเซอร์ (เมตร)	รัศมีแอร์ลิปส์ (เมตร)
0.04	0.005	0.075
0.05	0.005	0.075
0.06	0.005	0.075
0.07	0.005	0.075
0.08	0.005	0.075
0.09	0.005	0.075
0.10	0.005	0.075
0.11	0.005	0.075
0.12	0.005	0.075
0.13	0.005	0.075
0.14	0.005	0.075

3.6.2 ศึกษาความหนาของไรเซอร์ที่มีผลต่อรูปแบบการไหล โดยในการจำลองเพื่อศึกษาจะ ออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาของไรเซอร์

ระยะเคลียร์แรนซ์ (เมตร)	ความหนาไรเซอร์ (เมตร)	รัศมีแอร์ลิปส์ (เมตร)
0.07	0.001	0.075
0.07	0.003	0.075
0.07	0.005	0.075
0.07	0.007	0.075
0.07	0.009	0.075
0.07	0.010	0.075

3.6.3 ศึกษารัศมีหรือขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีผลต่อรูปแบบการไหล โดยในการจำลองเพื่อศึกษาจะออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 การออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

ระยะเคลียร์เรนซ์ (เมตร)	ความหนาไรเซอร์ (เมตร)	รัศมีแอร์ลิฟท์ (เมตร)
0.07	0.005	0.065
0.07	0.005	0.075
0.07	0.005	0.085



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

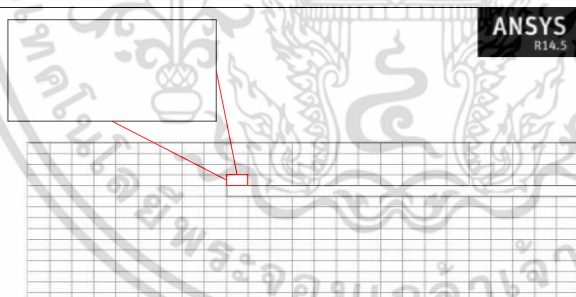
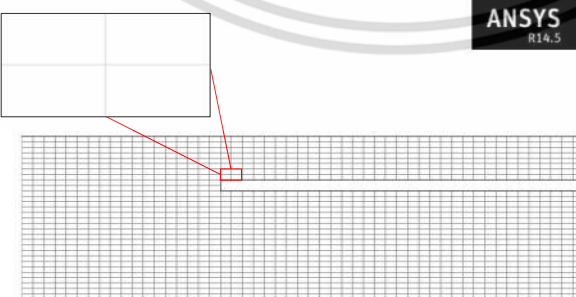
บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

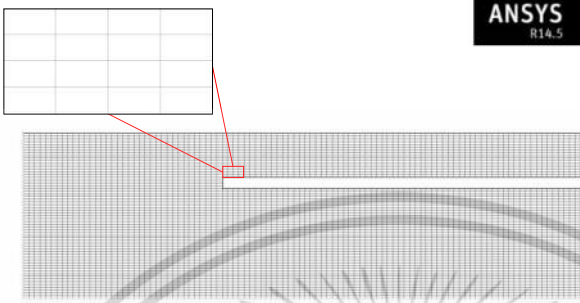
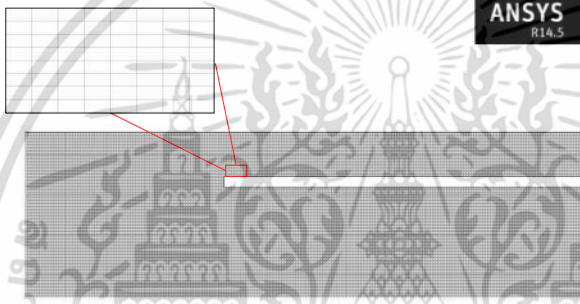
4.1 ผลการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

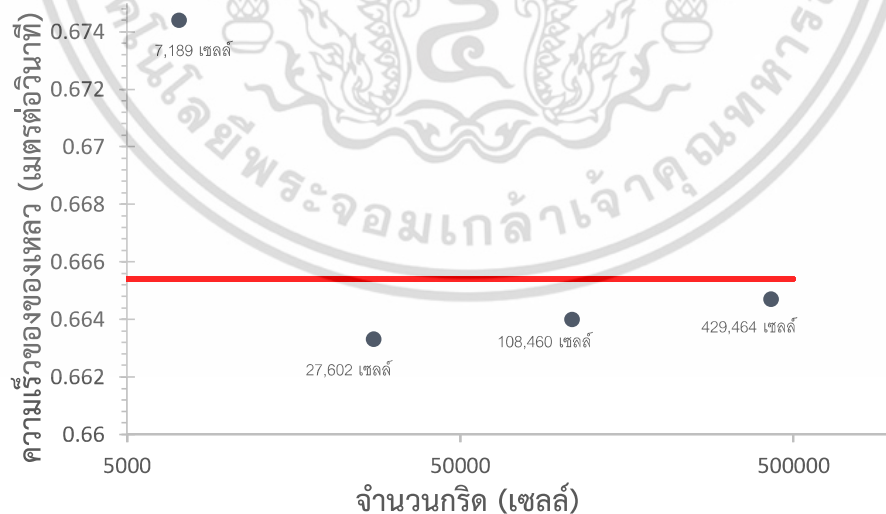
จากการคำนวณการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปธ์แบบภายในใช้แบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาคเป็นแบบ ออยเลอร์เลียน และแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์อ้างอิงตามงานวิจัยของ van Baten และคณะ [3] โดยศึกษาความละเอียดกริดที่แตกต่างกัน 4 ความละเอียด (7,189 เซลล์ 27,602 เซลล์ 108,460 เซลล์ และ 429,464 เซลล์) ซึ่งกริดที่ใช้เป็นกริดรูปสี่เหลี่ยม เวลาที่ใช้ในการจำลองและค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองที่ได้ด้วยจำนวนกริดที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยที่อ้างอิง แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 โดยค่าที่ใช้ในการอ้างอิงคือความเร็วของของเหลวเฉลี่ยภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูง 1.75 เมตร เมื่อความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊สที่ป้อนมีค่า 0.06 เมตรต่อวินาที

ตาราง 4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองที่ความละเอียดกริดค่าต่างๆ

จำนวนเซลล์	โดเมน	เวลาที่ใช้ (นาที)	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
7,189		63	1.352
27,602		89	0.315

ตาราง 4.1 (ต่อ) การเปรียบเทียบผลการจำลองที่ความละเอียดกริดค่าต่างๆ

จำนวนเซลล์	โดเมน	เวลาที่ใช้ (นาทีก)	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
108,460		310	0.210
429,464		929	0.105



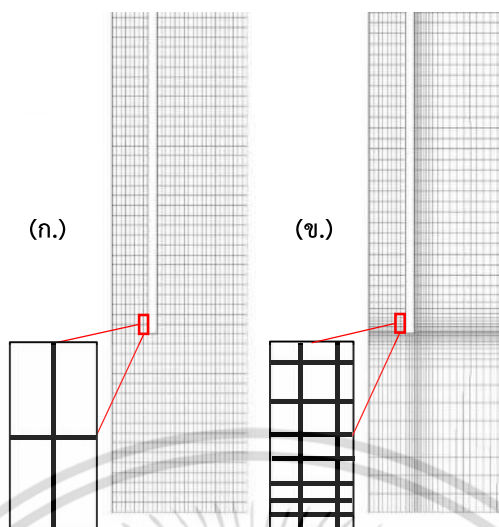
รูปที่ 4.1 ผลของจำนวนกริดที่มีผลต่อการจำลองความเร็วของของเกลวเทียบกับผลการทดลองที่อ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองที่ความละเอียดกริดค่าต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการจำลองในงานวิจัยที่อ้างอิง พบว่า เมื่อมีการเพิ่มจำนวนกริดมากขึ้น ทำให้ผลการจำลอง ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวภายในโรเตอร์ที่สูง 1.75 เมตร มีค่าเข้าใกล้ผลการทดลองมากขึ้น ดังรูปที่ 4.1 อย่างไรก็ตามการที่ใช้จำนวนกริดที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กริดจำนวน 27,602 เซลล์ มีความเหมาะสม เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ จำนวนกริดที่จำนวน 27,602 เซลล์ มีค่า 0.315 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการทดลองเมื่อเทียบกับจำนวนกริด 108,406 เซลล์ และ 429,464 เซลล์ ที่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ใช้เวลาในการจำลองน้อยกว่าเกือบถึง 10 เท่า แต่ผลการจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่แตกต่างกันเท่าไร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กริดจำนวน 27,602 เซลล์ในการจำลองต่อจากนี้

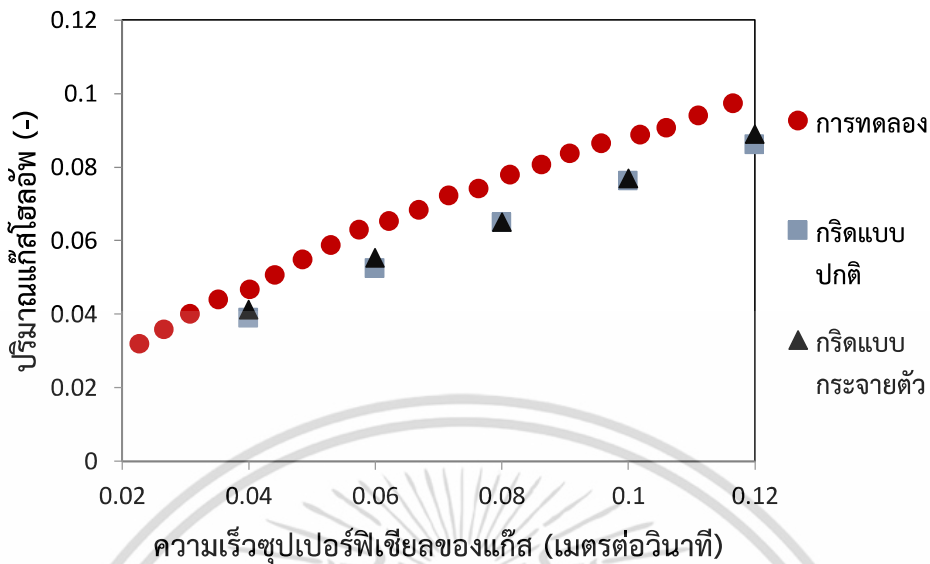
4.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของกริด

ในการจำลองนอกจากปริมาณของกริดแล้วการกระจายตัวของกริดนั้นส่งผลต่อการจำลอง เช่นเดียวกัน เนื่องจากการจำลองจำเป็นต้องใช้กริดเพื่อคำนวณผลในแต่ละตำแหน่งของโดเมน ดังนั้นการวางตำแหน่งของกริดจึงมีความสำคัญต่อผลการจำลอง การวางกริดให้มีความละเอียดมากในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง เช่น บริเวณผนังและบริเวณที่มีการปั่นแก๊สเข้าอาจทำให้ผลการจำลองมีค่าเข้าใกล้กับผลการทดลองที่อ้างอิงมากยิ่งขึ้น ในการศึกษาผลกระทบของการกระจายตัวของกริดจึงแบ่งการสร้างกริดเพื่อจำลองเป็น 2 แบบ และกำหนดจำนวนกริดของโดเมนทั้งสองแบบให้มีปริมาณกริดเท่ากันคือ 27,602 เซลล์ โดยแบบแรกเป็นการกระจายตัวของกริดแบบปกติดังรูปที่ 4.2 (ก.) ซึ่งในบริเวณต่างๆภายในโดเมนจะมีความละเอียดของกริดเท่ากัน และแบบที่ 2 เป็นการกระจายตัวของกริดที่บริเวณที่มีเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงดังรูปที่ 4.2 (ข.)

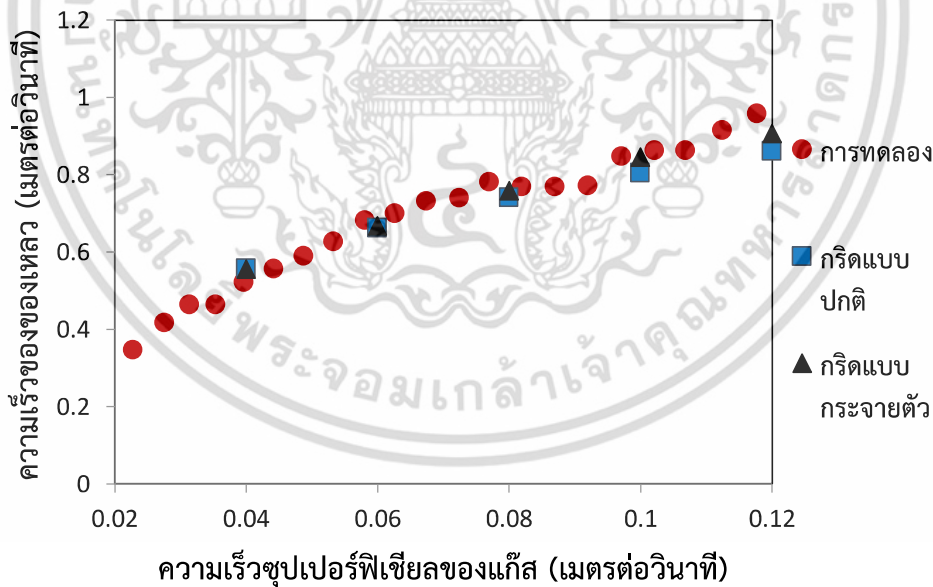


รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของกริดภายในโดเมน (ก.) การกระจายตัวแบบปกติ (ข.) การกระจายตัวของกริดไปยังที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง

ผลการจำลองจากโดเมนที่มีรูปแบบการเรียงตัวของกริดที่ต่างต่างกัน 2 แบบ คือแบบกระจายตัวแบบปกติ และแบบกระจายตัวไปยังที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงๆ ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อ้างอิง ถูกแสดงไว้ในกราฟในรูปที่ 4.3 - 4.5 พบว่าการใช้กริดที่มีการกระจายตัวไปยังบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลสูง ให้ผลการจำลองมีค่าเข้าใกล้กับผลการทดลองที่อ้างอิงมากกว่าผลการจำลองที่ได้จากการใช้กริดที่มีการกระจายตัวแบบปกติเท่ากันตลอดทั้งโดเมนเพียงเล็กน้อย แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองจากรูปแบบของกริดที่ต่างต่างกัน ใช้ระยะเวลาที่ต่างกันอย่างมาก ในกรณีที่กริดมีการกระจายตัวไปยังบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลสูงใช้เวลาในการคำนวณสูงกว่ากริดที่มีการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากมีเสถียรภาพในการจำลองที่ต่ำกว่ากรณีของกริดที่มีการกระจายตัวแบบปกติตลอดทั้งโดเมน ค่าที่ได้จากการจำลองจึงมีค่าลู่ออก ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองมากกว่าการกระจายตัวแบบปกติ

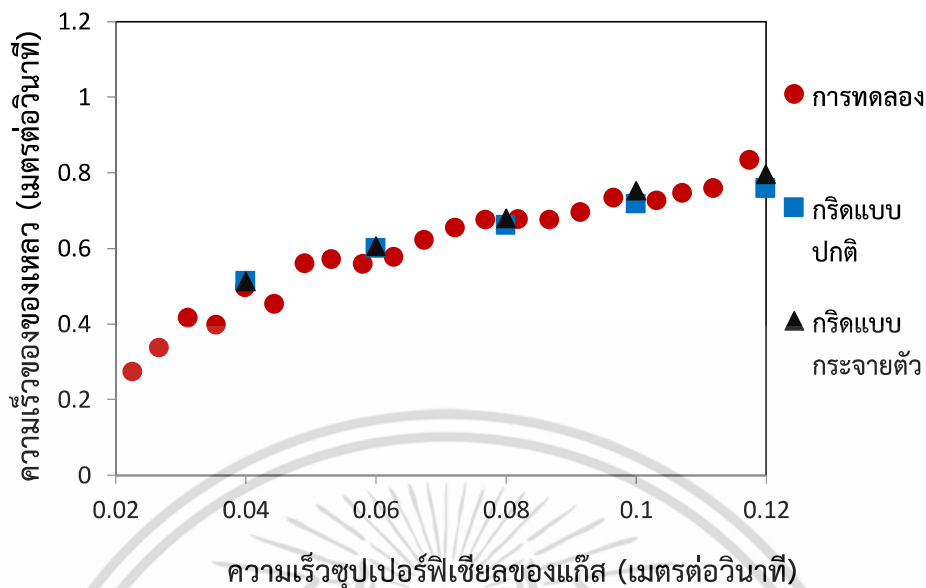


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไหลกับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊ส จากการทดลองที่อ้างอิงเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากกริดรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของเหลวภายในโรเตอร์เฉลี่ยกับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊ส จากการทดลองที่อ้างอิงเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากกริดรูปแบบต่างๆ

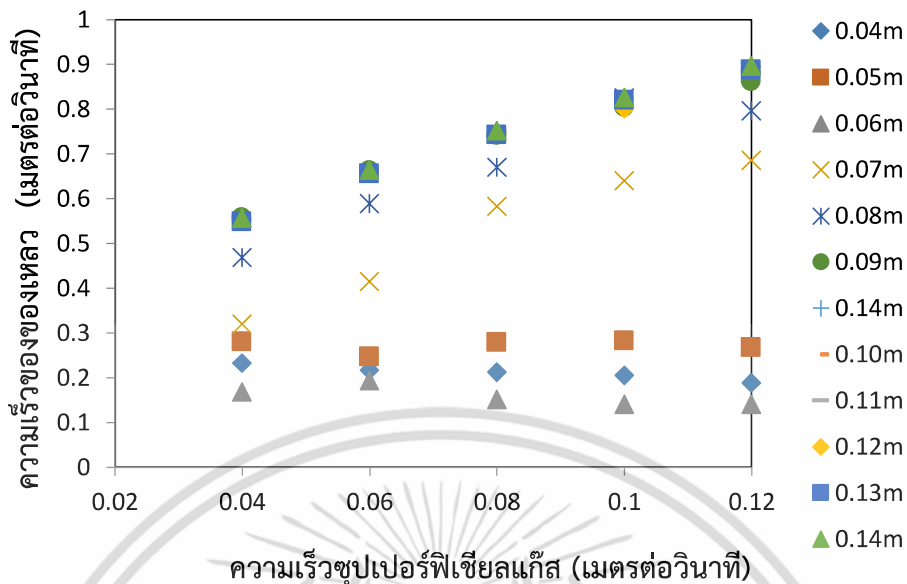
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



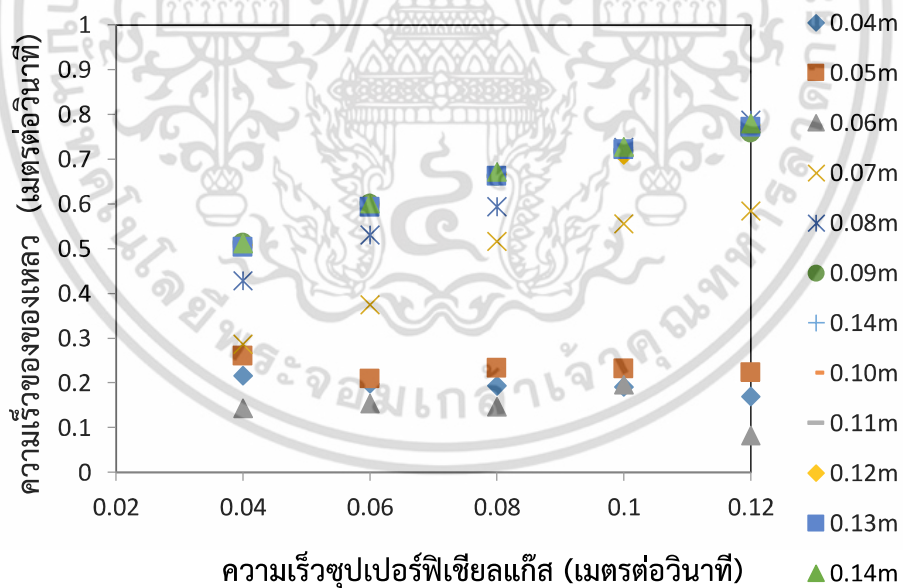
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเปลวภายในดาวนคัมเมอร์เฉลี่ยกับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊ส จากการทดลองที่อ้างอิงเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากกริดรูปแบบต่างๆ

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของเคลียร์เรนซ์ที่มีผลต่อการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

การจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเคลียร์เรนซ์ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ โดยกำหนดค่าเคลียร์เรนซ์ให้อยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.12 เมตร โดยระยะเคลียร์เรนซ์ที่อ้างอิงมีค่า 0.09 เมตร (จากงานวิจัยของ van Baten และคณะ [3]) ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองพบว่าความเร็วเฉลี่ยที่ความสูง 1.75 เมตร สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเฉลี่ยของของเหลวภายในโรเตอร์และดาวนคัมเมอร์กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊ส ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 จากการจำลองพบว่าผลการจำลองสามารถแยกออกเป็น 2 กลุ่ม ได้อย่างชัดเจน และพบว่ากลุ่มที่มีเคลียร์เรนซ์สูงกว่า 0.07 เมตร ค่าความเร็วของของเหลวเฉลี่ยทั้งภายในโรเตอร์และดาวนคัมเมอร์มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่มีเคลียร์เรนซ์ต่ำกว่า 0.07 เมตร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่เคลียร์เรนซ์น้อยกว่า 0.07 เมตร ภูมิภาคแก๊สที่ถูกบ่อนเข้ามาที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เกิดการแยกไหลเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ ซึ่งปกติแล้วลักษณะการไหลของภูมิภาคแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จะไหลเข้าไปในโรเตอร์และออกทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เท่านั้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปเวกเตอร์การไหลของแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 4.8

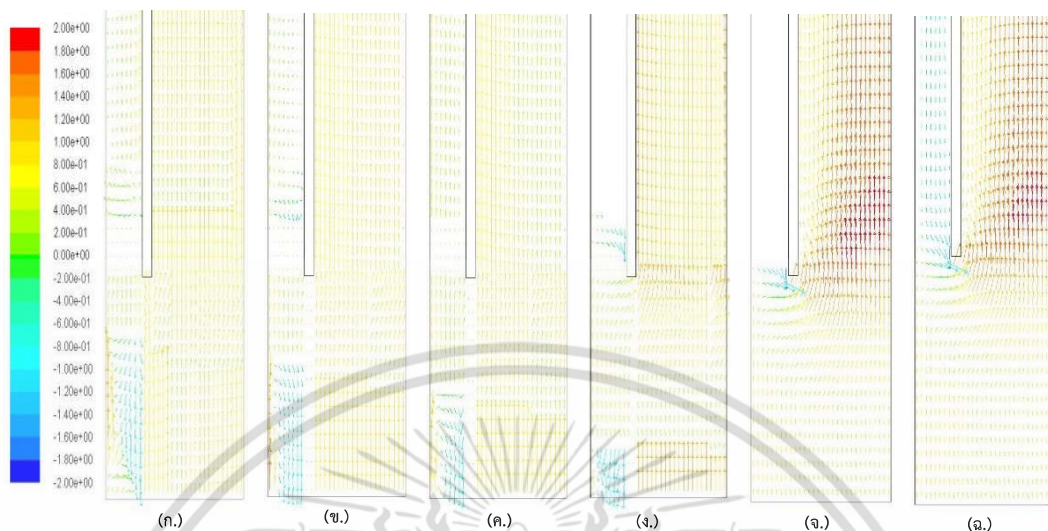


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วความเร็วเฉลี่ยของของเหลวภายในโรเตอร์กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลแก๊ส ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ต่างๆ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วความเร็วเฉลี่ยของของเหลวภายในคาน์คัมเมอร์กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลแก๊ส ที่ระยะเคลียร์แรนซ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่เคลียร์แรนซ์ (ก.) 0.04 เมตร (ข.) 0.05 เมตร (ค.) 0.06 เมตร (ง.) 0.07 เมตร (จ.) 0.08 เมตร (ฉ.) 0.09 เมตร ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.06 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.9 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่เคลียร์แรนซ์ (ก.) 0.10 เมตร (ข.) 0.11 เมตร (ค.) 0.12 เมตร (ง.) 0.13 เมตร (จ.) 0.14 เมตร

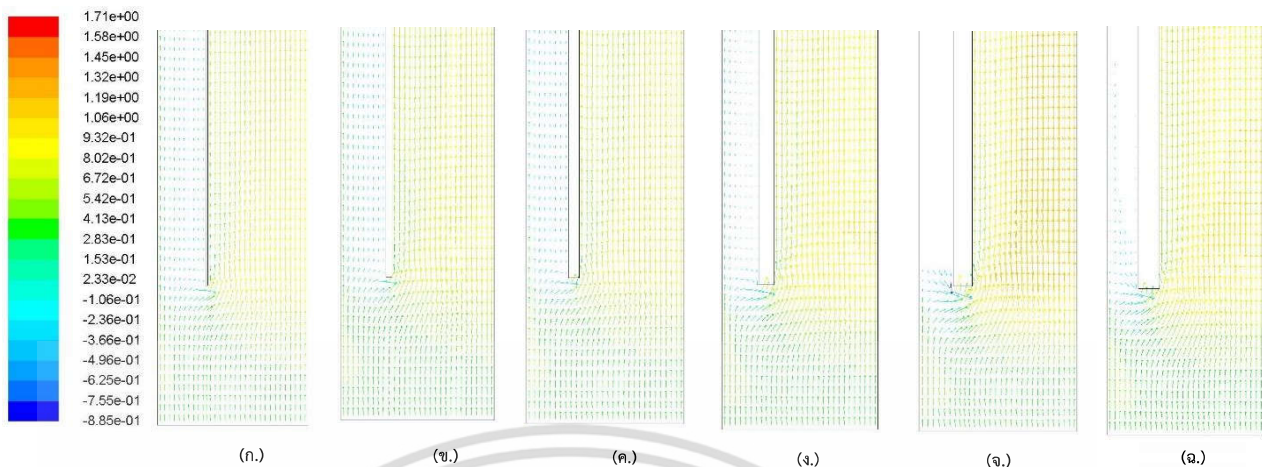
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 และ 4.9 เป็นรูปของเวกเตอร์การไหลของแก๊สจากการจำลองที่เคลียร์แรนซ์ต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของเคลียร์แรนซ์ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในแอร์ลิฟท์ ตั้งแต่ 0.04 ถึง 0.14 เมตร ที่เคลียร์แรนซ์ต่ำกว่า 0.07 แก๊สเกิดการไหลแยกเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ จึงส่งผลให้การไหลวนของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เกิดการขัดขวางการไหลด้วยวัฏภาคแก๊สที่ไหลสวนกลับขึ้นไปในดาวนคัมเมอร์ ทำให้ความเร็วของของเหลวเฉลี่ยทั้งภายในโรเซอร์และดาวนคัมเมอร์มีความเร็วลดลง

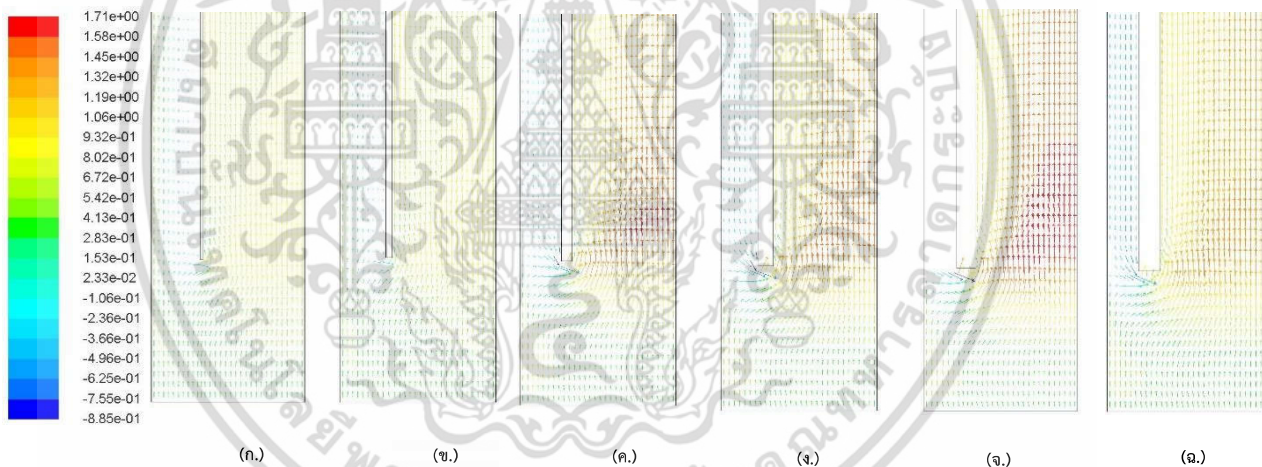
ที่วัฏภาคแก๊สสามารถไหลสวนกลับไปในดาวนคัมเมอร์ได้สามารถอธิบายได้จาก ความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้ามา ก่อนปะทะกับโรเซอร์ในกรณีที่เคลียร์แรนซ์สูงกว่า 0.07 เมตร มีความเร็วน้อยกว่าความเร็วแก๊สก่อนปะทะโรเซอร์ในกรณีที่ ระยะเคลียร์แรนซ์ต่ำกว่า 0.07 เมตร ทำให้แก๊สมีแรงดันพลศาสตร์ ไม่สูงพอที่จะเอาชนะแรงดันพลศาสตร์ของน้ำที่ไหลตกกลับลงมาในดาวนคัมเมอร์ ในกรณีนี้แก๊สจึงไม่สามารถไหลแทรกขึ้นไปในดาวนคัมเมอร์ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าโพर्फิลการไหลในกรณีที่เคลียร์แรนซ์ที่มีค่าสูงกว่า 0.07 เมตร โพर्फิลการไหลของอากาศพัฒนาได้เต็มที่แล้วความเร็วของการอากาศจึงมีค่าไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดทำให้มีแรงดันไม่สูงมากพอที่จะทำให้แก๊สสามารถแยกไหลสวนกลับเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ได้ ในทางกลับกันในกรณีที่เคลียร์แรนซ์ต่ำกว่า 0.07 เมตร โพर्फิลการไหลของแก๊สยังพัฒนาได้ไม่เต็มรูปแบบที่ใกล้กับผนังท่อจึงมีความเร็วสูงที่ให้แก๊สมีแรงดันพลศาสตร์สูงพอที่จะไหลแทรกขึ้นไปในดาวนคัมเมอร์ได้ ที่เคลียร์แรนซ์ 0.07 เมตร (เคลียร์แรนซ์วิกฤต) จึงเป็นค่าที่แบ่งการเปลี่ยนแปลงการไหลของแก๊ส และที่เคลียร์แรนซ์วิกฤตนี้การแยกไหลของแก๊สจะขึ้นอยู่กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊สด้วย

4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของความหนาของโรเซอร์ที่มีผลต่อการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

การจำลองรูปแบบการไหลเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดความหนาของโรเซอร์ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ในการจำลองเพื่อศึกษานี้แบ่งการจำลองขนาดต่างๆของความหนาของโรเซอร์ออกเป็น 6 ขนาดความหนา คือ 0.001 0.003 0.005 0.007 0.009 และ 0.010 เมตร โดยที่ขนาดต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ใช้ขนาดตามงานวิจัยที่อ้างอิงของ van Baten [3] แต่ใช้ขนาดของเคลียร์แรนซ์ตามค่าเคลียร์แรนซ์วิกฤตที่ได้ศึกษาในหัวข้อก่อนหน้านี ในการจำลองรูปแบบการไหลเพื่อการศึกษาอิทธิพลของขนาดความหนาของโรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ผลจากการจำลองถูกแสดงเป็นเวกเตอร์การไหลของวัฏภาคแก๊ส ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 จากผลการจำลองรูปแบบการไหลพบว่ารูปแบบการไหลของแก๊สถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แก๊สที่ถูกป้อนเข้าไปที่บริเวณแก๊สขาเข้า แก๊สมีการไหลเข้าไปภายในส่วนที่เป็นโรเซอร์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น และ อีกรูปแบบ คือ แก๊สที่ถูกป้อนเข้ามาบริเวณแก๊สขาเข้าเกิดการไหลแยกเข้าไปในส่วนที่เป็นโรเซอร์และไหลเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ด้วย



รูปที่ 4.10 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่ความหนาโรเซอร์ต่างๆ (ก.) 0.001 เมตร (ข.) 0.003 เมตร (ค.) 0.005 เมตร (ง.) 0.007 เมตร (จ.) 0.009 เมตร (ฉ.) 0.010 เมตร ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.04 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.11 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่ความหนาโรเซอร์ต่างๆ (ก.) 0.001 เมตร (ข.) 0.003 เมตร (ค.) 0.005 เมตร (ง.) 0.007 เมตร (จ.) 0.009 เมตร (ฉ.) 0.010 เมตร ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.12 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพบว่าขนาดความหนาของโรเซอร์ที่มีขนาดมากกว่า 0.005 เมตร แก๊สมีพฤติกรรมหรือรูปแบบการไหลเช่นเดียวกับแบบแรก นั่นคือแก๊สที่ถูกป้อนจากบริเวณส่วนที่เป็นทางเข้าของแก๊ส แก๊สมีการไหลเข้าไปส่วนที่เป็นโรเซอร์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่ขนาดความหนาของโรเซอร์น้อยกว่า 0.005 เมตร แก๊สมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบที่สอง นั่นคือแก๊สเกิดการแยกไหลเข้าไปในส่วนของดาวนคัมเมอร์ด้วย ไม่ได้ไหลเข้าไปในส่วนของโรเซอร์เพียงส่วนเดียว ซึ่งการที่แก๊สเกิดการแยกไหลเข้าไปในส่วนของดาวนคัมเมอร์ซึ่งเป็นส่วนที่วิภูภาคของเหลวใช้ในการไหลวนและตกกลับลงมาในส่วนของดาวนคัมเมอร์ ส่งผลให้การไหลวนของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์เกิดการขัดขวางเนื่องจากการไหลสวนขึ้นไปของวิภูภาคแก๊ส ความเร็วของของเหลวจึงมีค่าลดลง อัตราการผสมในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์จึงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ลดลง

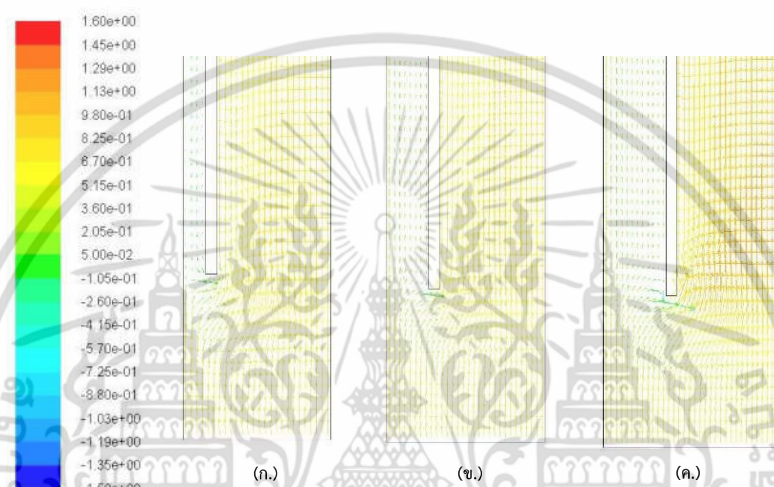
การที่แก๊สเกิดการไหลแยกเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ในกรณีที่ขนาดความหนาของโรเซอร์น้อยกว่า 0.005 เมตร เนื่องจากเมื่อขนาดของความหนาของโรเซอร์น้อยๆ ส่งผลให้ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของดาวนคัมเมอร์มีค่ามากขึ้น ความต้านทานการไหล ของแก๊สที่ไหลแยกส่วนเข้าไปในดาวนคัมเมอร์จึงน้อยลง ทำให้แก๊สไหลแยกเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ได้ง่ายกว่าในกรณีที่ขนาดความหนาของโรเซอร์สูงๆ เนื่องจากที่ขนาดความหนาของโรเซอร์สูงๆ ทำให้ส่วนที่เป็นพื้นที่หน้าตัดของส่วนที่เป็นดาวนคัมเมอร์มีค่าน้อย ความต้านทานการไหลของแก๊สเข้าไปในดาวนคัมเมอร์จึงสูงทำให้แก๊สไม่สามารถไหลแยกเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ได้

ขนาดความหนาของโรเซอร์ที่ 0.005 เมตร เป็นจุดที่แบ่งรูปแบบการแยกไหลของแก๊ส จึงเป็นค่าวิกฤตของการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ ที่ขนาดความหนาโรเซอร์มากกว่าขนาดวิกฤตแก๊สไม่เกิดการไหลแยก ในทางกลับกันที่ขนาดความหนาของโรเซอร์น้อยกว่าขนาดวิกฤตแก๊สจะเกิดการแยกไหลเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ นอกจากนั้นที่ขนาดความหนาโรเซอร์วิกฤตการแยกไหลของแก๊สเข้าไปในดาวนคัมเมอร์นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของโรเซอร์แล้วยังขึ้นอยู่กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลแก๊สขาเข้าอีกด้วย ที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลแก๊สขาเข้าสูงๆ แก๊สจะไม่เกิดการแยกไหลเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ แต่มีความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลแก๊สต่ำๆ แก๊สจะเกิดการแยกไหลเข้าไปในดาวนคัมเมอร์

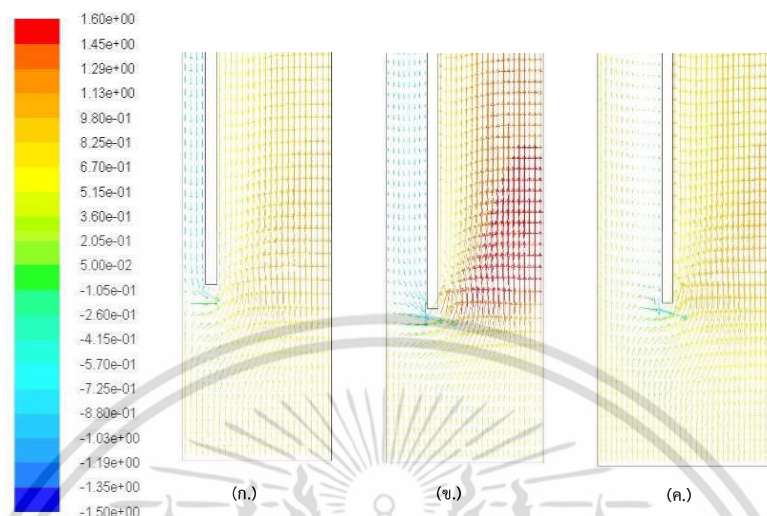
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของรัศมีแอร์ลิปท์ที่มีผลต่อการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์

การจำลองรูปแบบการไหลเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ ในการจำลองแบ่งขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ที่แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.13 0.15 และ 0.17 เมตร โดยที่ใช้ค่าเคลียร์แรนซ์วิกฤตที่ 0.07 m และความหนาของโรเซอร์ใช้เป็นความหนาวิกฤต คือ 0.005 เมตร ในการจำลองรูปแบบการไหลเพื่อการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ผลจากการจำลองถูกแสดงเป็นเวกเตอร์การไหลของวิภูภาคแก๊ส ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 จากผลการจำลองพบว่ารูปแบบการไหลของแก๊สในกรณีที่ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์สูงกว่า 0.15 เมตร หรือที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.17 เมตร แก๊สนอกจากจะมีการ

ไหลเข้าไปในโรเซอร์แล้วจะมีการแยกไหลเข้าไปในส่วนที่เป็นดาวนั้คัมเมอร์ด้วย ซึ่งไปขัดขวางการไหลวนของภูมิภาคของเหลว ทำให้ความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ลดลง และลดประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ลง ต่างจากกรณีนี้ที่เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.15 เมตร หรือที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.13 เมตร แก๊สไม่เกิดการแยกไหลเข้าไปในส่วนที่เป็นดาวนั้คัมเมอร์ จะไหลเข้าสู่ส่วนที่เป็นโรเซอร์เท่านั้น ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์



รูปที่ 4.12 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแอร์ลิปท์ (ก.) 0.13 เมตร (ข.) 0.15 เมตร (ค.) 0.17 เมตร ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.04 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.13 เวกเตอร์ของความเร็วของแก๊สที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแอร์ลิฟท์ (ก.) 0.13 เมตร (ข.) 0.15 เมตร (ค.) 0.17 เมตร ที่ความเร็วแก๊สขาเข้า 0.12 เมตรต่อวินาที

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในการเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อจะมีความต้านทานการไหล ความต้านทานการไหล คือ ผลต่างของความดันที่จำเป็นต้องใช้ในการเคลื่อนที่ของไหลจากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งหนึ่งภายในท่อ นั่นคือท่อที่มีขนาดใหญ่การไหลของของไหลภายในท่อจะไหลได้ง่ายกว่าท่อที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากท่อที่มีขนาดใหญ่มีความต้านทานการไหลน้อยกว่าท่อที่มีขนาดเล็ก ของไหลจึงสามารถไหลได้ง่ายกว่า เช่นเดียวกับการที่แก๊สเกิดการไหลแยกเข้าไปในดาวน์คัมเมอร์ในกรณีเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.15 เมตร ความต้านทานการไหลของแก๊สเข้าไปในดาวน์คัมเมอร์มีน้อยกว่ากรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ต่ำกว่า 0.15 เมตร จึงทำให้แก๊สไหลสามารถเข้าไปในดาวน์คัมเมอร์ในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.15 เมตรได้ง่ายกว่าในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.15 เมตร แต่ในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เท่ากับ 0.15 เมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต) การที่แก๊สไหลแยกเข้าไปในดาวน์คัมเมอร์นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊สขาเข้าอีกด้วย เช่นเดียวกันกับที่ขนาดเคลียร์แรนซ์วิกฤตและขนาดความหนาของไรเซอร์วิกฤต

4.6 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการแยกไหลของแก๊ส

จากการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีส่วนความยาวต่อความกว้างของโรเตอร์เท่ากับ 20.2 ตัวแปรตัวแรกที่ทำการศึกษา คือ ขนาดเคลียร์แรนซ์ (C_L) พบว่าอิทธิพลของขนาดเคลียร์แรนซ์ส่งผลต่อการแยกไหลของแก๊สดังสมการ (4.1)

$$C_L \begin{cases} < 0.07 \text{ เมตร,} & \text{แก๊สแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์} \\ = 0.07 \text{ เมตร,} & \text{การแยกไหลของแก๊สขึ้นกับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียล} \\ > 0.07 \text{ เมตร,} & \text{แก๊สไม่เกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์} \end{cases} \quad (4.1)$$

การลดขนาดเคลียร์แรนซ์ให้มีขนาดเล็กลงน้อยกว่าขนาดเคลียร์แรนซ์วิกฤต (0.07 เมตร) ส่งผลเสียเนื่องจากทำให้แก๊สเกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์และทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ลดลงด้วย ดังนั้นเพื่อป้องกันการแยกไหลของแก๊สและไม่ให้ประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ลดลงต้องออกแบบให้เคลียร์แรนซ์มีค่าสูงๆ

แก๊สไม่เกิดการแยกไหล $\propto C_L$

และในการศึกษาตัวแปรตัวถัดมาที่ส่งผลต่อการแยกไหลของแก๊สเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์ คือ ขนาดความหนาของโรเตอร์ (T_{Riser}) พบว่าอิทธิพลของความหนาของโรเตอร์ที่มีผลต่อการแยกไหลของแก๊สเป็นดังสมการ (4.2)

$$T_{Riser} \begin{cases} < 0.005 \text{ เมตร,} & \text{แก๊สแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์} \\ = 0.005 \text{ เมตร,} & \text{การแยกไหลของแก๊สขึ้นกับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียล} \\ > 0.005 \text{ เมตร,} & \text{แก๊สไม่เกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์} \end{cases} \quad (4.2)$$

การลดความหนาของโรเตอร์ให้มีขนาดเล็กลงน้อยกว่าความหนาวิกฤต (0.005 เมตร) ส่งผลเสียเนื่องจากทำให้แก๊สเกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์และทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ลดลงด้วย ดังนั้นเพื่อป้องกันการแยกไหลของแก๊สและไม่ให้ประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ลดลงต้องออกแบบให้ความหนาของโรเตอร์มีค่าสูงๆ

แก๊สไม่เกิดการแยกไหล αT_{Riser}

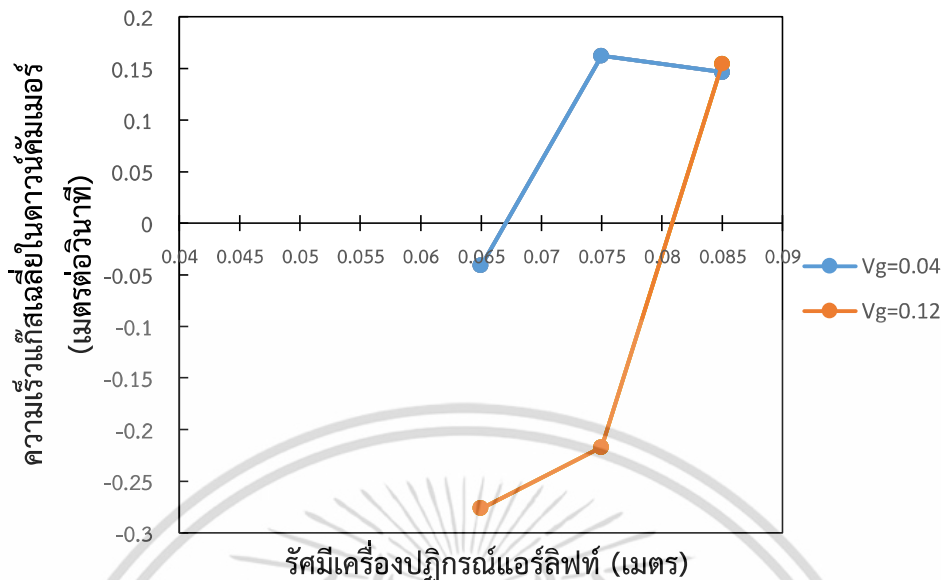
นอกจากเคลียร์เรนซ์และความหนาของไรเซอร์แล้ว ขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ($D_{Airlift}$) ก็เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการแยกไหลของแก๊สเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์อีกด้วย พบว่าอิทธิพลของขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ต่อการแยกไหลของแก๊สเป็นดังสมการ (4.3)

$$D_{Airlift} \begin{cases} > 0.15 \text{ เมตร,} & \text{แก๊สแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์} \\ = 0.15 \text{ เมตร,} & \text{การแยกไหลของแก๊สขึ้นกับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียล} \\ < 0.15 \text{ เมตร,} & \text{แก๊สไม่เกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์} \end{cases} \quad (4.3)$$

การเพิ่มขนาดของแอร์ลิฟท์ให้มีขนาดกว้างขึ้นมากกว่าขนาดวิกฤต (0.15 เมตร) ส่งผลเสียเนื่องจากทำให้แก๊สเกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์และทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ลดลงด้วย ดังนั้นเพื่อป้องกันการแยกไหลของแก๊สและไม่ให้ประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ลดลงต้องออกแบบให้ขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต

แต่พบว่าอิทธิพลของขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ไม่ได้ส่งผลต่อการไหลแยกของแก๊สเป็นแบบเชิงเส้นกลับส่งผลต่อความเร็วในการไหลแยกเป็นพาราโบลา ดังกราฟรูปที่ 4.14 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์กับความเร็วเฉลี่ยการไหลวนของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ด้วยเหตุนี้ความสัมพันธ์ของขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์กับการแยกไหลของแก๊สจึงมีความสัมพันธ์แบบกำลังสอง

$$\text{แก๊สไม่เกิดการแยกไหล} \quad \alpha \frac{1}{D_{Airlift}^2}$$



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วความเร็วเฉลี่ยของแก๊สภายในดาวนคัมเมอร์กับรัศมีเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

จากความสัมพันธ์ของอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อการไหลแยกของแก๊สเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์ที่กล่าวมาข้างต้น ได้ความสัมพันธ์ออกมาเป็นตัวแปรไร้หน่วย x^* ดังสมการที่ 4.4 เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

$$x^* = \frac{C_L \times T_{Riser}}{D_{Airlift}^2} \tag{4.4}$$

และจากค่าวิกฤตจากตัวแปรต่างๆ ได้ x^*_{Cri} ดังนี้

$$x^*_{Cri} = \frac{C_{L,Cri} \times T_{Riser,Cri}}{D_{Airlift,Cri}^2} = \frac{0.07(m) \times 0.005(m)}{0.15^2(m^2)} = 1.556 \times 10^{-2} (-)$$

และใช้ค่าวิกฤตที่ได้นี้เป็นตัวแบ่งลักษณะรูปแบบการแยกไหลของแก๊สเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์ กล่าวคือ ถ้าการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ มีค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลแยกของแก๊สคำนวณแล้วมีค่า

มากกว่า 1.556×10^2 ไม่เกิดการแยกไหลของแก๊สเข้าสู่ดาวน้คัมเมอร์ แต่ในการออกแบบถ้าคำนวณค่า x^* แล้วมีค่าต่ำกว่า 1.556×10^2 แก๊สจะเกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวน้คัมเมอร์และส่งผลกระทบต่อความเร็วการไหลวนของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ แต่ถ้าคำนวณค่า x^* แล้วมีค่าเท่ากับค่าวิกฤตพอดีการแยกไหลของแก๊สนั้นก็จะขึ้นอยู่กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊สขาเข้า ดังสมการที่ 4.5

$$x^* \begin{cases} < 1.556 \times 10^2, & \text{แก๊สแยกไหลเข้าสู่ดาวน้คัมเมอร์} \\ = 1.556 \times 10^2, & \text{การแยกไหลของแก๊สขึ้นกับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียล} \\ > 1.556 \times 10^2, & \text{แก๊สไม่เกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวน้คัมเมอร์} \end{cases} \quad (4.5)$$

ดังนั้นในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ควรให้ค่า x^* มีค่ามากกว่า 1.556×10^2 ทั้งนี้เนื่องจากการวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของไรเซอร์ (Riser aspect ratio) ที่ 20.2 ดังนั้นค่า x^* นี้จึงเป็นของสัดส่วนความกว้างต่อความยาวของไรเซอร์ค่านี้ ในอนาคตเพื่อให้ค่า x^* สามารถใช้ได้กับไรเซอร์ที่รูปแบบควรศึกษาความสัมพันธ์ของ สัดส่วนความยาวต่อความกว้างของไรเซอร์ที่มีต่อรูปแบบการไหลแยกของแก๊สเข้าสู่ดาวน้คัมเมอร์ด้วย และเพื่อพัฒนาตัวแปรไร้หน่วยให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นควรศึกษาความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัว

บทที่ 5

สรุปผลการจำลอง

5.1 สรุปผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาหาตัวแปรที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ซึ่งศึกษาอิทธิพลของเคลียร์เรนซ์ ความหนาของโรเซอร์ และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีผลต่อการไหลแยกของแก๊สเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายใน ซึ่งส่งผลต่อการไหลวนของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ในงานวิจัยนี้ใช้สัดส่วนความยาวต่อความกว้างของโรเซอร์ที่ค่า 20.2 ในส่วนของการจำลองใช้ความละเอียดกริดเท่ากับ 27,604 เซลล์ ซึ่งเพียงพอต่อการจำลองและให้ร้อยละความผิดพลาดอยู่ในระดับที่ต่ำและเป็นกริดที่การกระจายตัวแบบปกติ

จากการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเคลียร์เรนซ์พบว่า เคลียร์เรนซ์วิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.07 เมตร สำหรับเคลียร์เรนซ์ที่มากกว่าเคลียร์เรนซ์วิกฤต แก๊สจะไหลเข้าทางด้านโรเซอร์เท่านั้นส่งผลให้ของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการหมุนวน แต่ในทางกลับกันถ้ามีค่าต่ำกว่าเคลียร์เรนซ์วิกฤตจะทำให้แก๊สเกิดการไหลแยกเข้าไปในดาวนคัมเมอร์และโรเซอร์ ซึ่งผิดวัตถุประสงค์ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ นอกจากนี้ที่เคลียร์เรนซ์วิกฤตการไหลย้อนขึ้นไปในดาวนคัมเมอร์จะขึ้นกับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลของแก๊ส ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงดันพลศาสตร์ ดังนั้นในการออกแบบเคลียร์เรนซ์ควรมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต

จากการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาโรเซอร์ พบว่า ขนาดความหนาวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.005 เมตร สำหรับความหนาของโรเซอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤตแก๊สเกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์ ในทางตรงกันข้ามถ้าความหนาโรเซอร์มีค่ามากกว่าค่าความหนาวิกฤตแก๊สจะไม่เกิดการแยกไหลเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์ และยังพบอีกว่าที่ความหนาวิกฤตการไหลแยกของแก๊สเข้าสู่ดาวนคัมเมอร์นั้น ขึ้นอยู่กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลแก๊สขาเข้า ทั้งนี้เป็นผลมาจากความต้านทานการไหลในดาวนคัมเมอร์ ดังนั้นในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ควรหาค่าความหนาวิกฤตของแอร์ลิฟท์นั้นๆ และออกแบบให้ความหนาของโรเซอร์มีค่ามากกว่าความหนาวิกฤตของระบบนั้นๆ

จากการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตมีค่า 0.15 เมตร สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต แก๊สจะไหลเข้าทางโรเซอร์เพียงเท่านั้น ในทางตรงข้ามถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีค่ามากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตจะทำให้แก๊สเกิดการไหลแยกเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ลดลง เป็นผลมาจากความต้านทานการไหลในดาวนคัมเมอร์ ในการออกแบบควรหาขนาดวิกฤตของแอร์ลิฟท์นั้นๆ และออกแบบให้ขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤตเพื่อป้องกันการไหลแยกของแก๊ส

หลังทราบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลแยกของแก๊สเข้าสู่ดาวนัมเมอร์จึงเกิดค่าตัวแปรไร้หน่วย x^* เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์หรือใช้ในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ แต่สมการตัวแปรไร้หน่วยดังกล่าวยังใช้ได้เพียงแอร์ลิฟท์ที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของโรเตอร์ที่ 20.2 เพื่อให้ได้ตัวแปรที่สามารถใช้ได้กับเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์หลายระบบควรศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของโรเตอร์ที่มีต่อการไหลแยกของแก๊สในดาวนัมเมอร์ด้วยและเพื่อให้สมการตัวแปรไร้หน่วยมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นควรหาเปอร์เซ็นต์ความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวและศึกษาหาตัวแปรที่เกี่ยวข้องตัวอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการไหลแยกของแก๊สเข้าไปในดาวนัมเมอร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.) ในการพัฒนาตัวแปรไร้หน่วยที่ใช้ในการออกแบบหรือขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ให้สามารถใช้ได้กับแอร์ลิฟท์ที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของโรเตอร์ที่หลากหลายควรศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของโรเตอร์ที่มีผลต่อการไหลแยกของแก๊สในดาวนัมเมอร์
- 2.) เพื่อพัฒนาให้ตัวแปรไร้หน่วยมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นควรศึกษาความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวว่ามีความสำคัญมากน้อยแตกต่างกันอย่างไร เนื่องจากในสมการตัวแปรไร้หน่วยที่ใช้ในการออกแบบแอร์ลิฟท์ให้ความสำคัญกับตัวแปรแต่ละตัวเท่ากัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] William B. Zimmerman, Buddhika N. Hewakandamby, Václav Tesař, H. C. Hemaka Bandulasena and Olumuyiwa. Omotowaa. “On the design and simulation of an airlift loop bioreactor with microbubble generation by fluidic oscillation” **Food and Bioproducts Processing**. Vol. 87. 2009. pp. 215–227.
- [2] M. Y. Chisti and M. Moo-Young. “Gas Holdup in Pneumatic Reactor” **The Chemical Engineering Journal**. Vol. 38. 1998. pp. 149-152.
- [3] J. M. van Baten and J. Ellenberger, R. Krishna. “Hydrodynamics of internal air-lift reactors: experiments versus CFD simulations” **Chemical Engineering and Processing** Vol. 42. 2003. pp. 733-742.
- [4] H. K. Versteeg and W. Malalasekela. **An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method**. New York : Longman Scientific & Technical. 1995.
- [5] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. **พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. สาขาวิศวกรรมเคมี. 2556.
- [6] B. Sarfraz. Compiler. 2013. **Airlift bioreactor**. [Slide]. The slide share.
- [7] M. Blažej, G. M. Cartland Glover, S. C. Generalis and J. Markoš, “Gas-liquid simulation of an airlift bubble column reactor”. **Chemical Engineering and Processing**. Vol. 43. 2004. pp. 137–144.
- [8] W. A. J. van Benthum, R. G. J. M. van der Lans, M. C. M. van Loosdrecht and J. J. Heijnen. “Bubble recirculation regimes in an internal-loop airlift reactor” **Chemical Engineering Science**. Vol. 54. 1999. pp. 3995-4006
- [9] M. Simcika, A. Mota, M. C. Ruzicka, A. Vicente and J. Teixeira, “CFD simulation and experimental measurement of gas holdup and liquid interstitial velocity in internal loop airlift reactor” **Chemical Engineering Science**. Vol. 66. 2011. pp. 3268–3279

[10] ANSYS, Inc., *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. 2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเจษฎา พิทักษ์พล
 วัน เดือน ปีเกิด 18 ธันวาคม พ.ศ. 2535 ที่กรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 59/345 หมู่บ้านลิลิต ถ. กาญจนภิเษก ต. เสาธงหิน อ. บางใหญ่ จ. นนทบุรี
 11140 โทร : 090-915-0151 อีเมล : jpitukpon@gmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2558-ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554-2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การออกแบบโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

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

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2558 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของแก๊สเข้าสู่ตัววนคัมเมอร์ของเครื่องแยกแอร์ลิฟท์แบบภายในด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พ.ศ. 2557 การศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ต่อรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ