

การศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ต่อรูปแบบการไหล  
ในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิตท์  
โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ต่อรูปแบบการไหล  
ในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์  
โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF CLEARANCE SPACE ON FLOW PATTERN  
IN AIRLIFT REACTOR  
VIA COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



THIS SENIOR PROJECT IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของเคลียร์แรนซ์ต่อรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์  
แอร์ลิฟท์โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ  
โดย นายเจษฎา พิทักษ์พล  
นายติลก คำอยู่  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์  
ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาและอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

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

  
.....กรรมการ  
(ดร.ชนวรรณ พิณรัตน์)

  
.....กรรมการ  
(ดร.อานันิพร พ็ชรวรโชติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ต่อรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ แอร์ลิฟท์โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
จัดทำโดย	นายเจษฎา พิทักษ์พล นายดิลก คำอยู่
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมีและการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์มีลักษณะการทำงานที่ง่ายไม่ซับซ้อน ใช้พลังงานต่ำ และง่ายต่อการบำรุงรักษา เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ประกอบด้วยตราฟต์ทิวบ์อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะมีระยะระหว่างด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์กับตราฟต์ทิวบ์เรียกว่าระยะเคลียร์แรนซ์ ซึ่งระยะเคลียร์แรนซ์ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการไหลที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยจำลองหาจำนวนกริด การกระจายตัวของกริดและหาสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ผลการจำลองถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใช้อ้างอิง ก่อนนำมาจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเคลียร์แรนซ์ จากผลการจำลองพบว่าการใช้กริดที่กระจายตัวแบบปกติและการใช้สัมประสิทธิ์แรงต้าน Mosi-Alexander เหมาะสมต่อการทำนายการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เนื่องจากให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลอง และจากการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์พบว่าที่ระยะเคลียร์แรนซ์มากขึ้น 0.05 เมตรจากระยะเคลียร์แรนซ์ที่อ้างอิง ไม่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเคลียร์แรนซ์ที่ใช้อ้างอิง แต่ในทางกลับกันพบว่าที่ระยะเคลียร์แรนซ์ลดลง 0.05 เมตร จากระยะเคลียร์แรนซ์ที่ใช้อ้างอิง ทำให้อากาศไหลย้อนขึ้นไปในส่วนของดาวนคัมเมอร์ เนื่องจากแรงดันในการเคลื่อนที่ (Dynamics Pressure) ของอากาศมีค่ามากกว่าน้ำหนักที่ไหลลงมาในบริเวณดาวนคัมเมอร์ อากาศจึงสามารถแทรกตัวขึ้นไปทางด้านดาวนคัมเมอร์ได้ เพราะฉะนั้นในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จึงควรระมัดระวังระยะเคลียร์แรนซ์ที่น้อยเกินไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Effect of Clearance space on Flow Pattern in Airlift reactor via Computational Fluid Dynamics	
By	Jedsada	Pitukpon
	Dilok	Kumyoo
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Chemical Engineering	
Year	2014	
Advisor	Dr.Santi	Wattananusorn

### ABSTRACT

Airlift reactor is commonly used in various chemical industry and water treatment system because the Airlift reactor is simple system, easy to maintenance and use low energy consumption. Airlift reactor have a draft tube inside of reactor body which is space between draft tube and bottom of airlift. This space is called clearance. Different clearance lead to different flow of fluid in airlift reactor. The effect of clearance on airlift reactor was studied by Computational Fluid Dynamics technique. Number of grid and grid distribution including drag model are suitable for airlift simulation which is validated by comparing with experimental result. Simulation result reveal that normal grid distribution and Morsi-Alexander are suitable for hydrodynamic prediction in airlift reactor. Simulation result of varied space of clearance on airlift show that increasing clearance space 0.05 meters is similar with result from normal clearance space but decreasing clearance space 0.05 meters different from normal clearance space because the air flow separate to downcomer due to dynamics pressure of air is enough to separate and flow upward to downcomer and encounter with water flow downward. Therefore, Airlift reactor design should be careful about insufficient space clearance.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆดังนี้

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาในการทำปริญญานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆในเรื่องของพลศาสตร์ของไหล อีกทั้งยังให้ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการแก้ปัญหา นอกเหนือจากเรื่องเกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหล และชี้แนะแนวทางในการทำปริญญานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ และ อาจารย์ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์ คณะกรรมการคุมสอบปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ช่วยแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดในการทำปริญญานิพนธ์ และทำให้การสอบปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมีและอาจารย์ท่านอื่นๆ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ต่อคณะผู้จัดทำ

นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่คอยให้คำปรึกษา อีกทั้งยังคอยให้ความรู้ในเรื่องต่างๆที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและยังสอนและให้ความรู้ ความเข้าใจในเรื่องต่างๆอีกมากมาย

นายณัฐวัตร ใจกลม นายทัฬหายุทธ สีเทา และนายกฤษณะ สายหยุด ที่ให้คำปรึกษาระหว่างการทำงานและขอขอบคุณเพื่อนๆที่ๆนี้ทุกๆ คนในภาควิชาวิศวกรรมเคมีและขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบิดา มารดาและผู้อุปการะเลี้ยงดูของคณะผู้จัดทำที่เป็นครูคนแรก ของชีวิต ให้กำเนิดและเลี้ยงดูมาจนเติบโต คอยอบรมสั่งสอน ชี้ถูกผิดชี้วัด ส่งให้ศึกษาเล่าเรียนจนประสบความสำเร็จ

เจษฎา พิทักษ์พล

ติลก คำอยู่

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ .....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ .....	iii
สัญลักษณ์.....	x
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD).....	4
2.1.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-Processing).....	4
2.1.2 ขั้นตอนของการคำนวณ (Solver).....	5
2.1.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-Processor).....	5
2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	6
2.2.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation).....	6
2.2.2 สมการควบคุมสำหรับการไหลหลายวัฏภาค (Governing Equation for Multiphase Flow).....	6
2.2.2.1 สมการสัดส่วนเชิงปริมาตร (Volume Fraction Equation).....	7
2.2.2.2 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการความต่อเนื่องของวัฏภาค $q$ คือ.....	7
2.2.2.3 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation).....	8
2.2.2.4 สมการพลังงาน (Energy Equation).....	9
2.2.2.5 สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาค (Interphase Exchange Coefficients).....	9
2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วน.....	12
2.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon.....	12
2.3.1.1 สมการการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon.....	13
2.3.1.2 แบบจำลองสำหรับความหนืดความปั่นป่วน.....	14
2.4 เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ (Air-Lift Reactor).....	15
2.4.1 ส่วนประกอบ.....	16
2.4.2 ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.5.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ การทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลอง.....	18
2.5.2 การจำลองระบบสองวัฏภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์.....	20
2.5.3 การหมุนเวียนของฟองอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ .....	20
<b>บทที่ 3 การออกแบบและขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน.....</b>	<b>22</b>
3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง .....	22
3.1.1 รูปแบบโครงสร้าง.....	22
3.1.2 สภาวะขอบเขต.....	22
3.1.3 รูปแบบการจำลอง .....	24
3.1.4 วัสดุในการจำลอง.....	24
3.1.5 สภาวะ Cell-zone .....	24
3.1.6 ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข .....	24
3.2 การศึกษาอิทธิพลของการกระจายตัวของกริด.....	27
3.3 การศึกษาอิทธิพลของโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient, $C_D$ ).....	28
3.4 การศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์เรนซ์ต่อพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ..	29
<b>บทที่ 4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง.....</b>	<b>32</b>
4.1 การหากริดที่เหมาะสม.....	32
4.2 การเปรียบเทียบอิทธิพลของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient).....	33
4.3 การเปรียบเทียบอิทธิพลของการกระจายตัวของกริด .....	36
4.4 อิทธิพลของระยะเคลียร์เรนซ์ต่อพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์.....	41
<b>บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง .....</b>	<b>52</b>
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	54
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>55</b>
<b>ภาคผนวก ก.....</b>	<b>57</b>
<b>ภาคผนวก ข.....</b>	<b>59</b>
<b>ภาคผนวก ค.....</b>	<b>68</b>

## สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ $a_1, a_2, a_3$ ของโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Mosi-alexander	11
บทที่ 3 การออกแบบและขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน	
ตารางที่ 3.1 แสดงสภาวะขอบเขตที่ใช้กับขอบเขตชนิดต่างๆ	22
ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	25
ตารางที่ 3.3 แสดงความละเอียดของกริดบนโดเมน	26
ตารางที่ 3.4 แสดงระยะเคลียร์เรนซ์ที่ใช้ในการจำลอง	30
บทที่ 4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง	
ตาราง 4.1 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนกริดต่างๆ	32
บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง	
ภาคผนวก ก.	
ตารางที่ 1ก. แสดงความเร็วซูเปอร์พีเซียลในไรเซอร์และความเร็วซูเปอร์พีเซียลขาเข้า	58
ภาคผนวก ข	
ตารางที่ 1ข. พิกัดของ Vertex ที่ตำแหน่งต่างๆ	59
ตารางที่ 2ข. แสดงสภาวะขอบเขตและชนิดของสภาวะขอบเขต	66
ภาคผนวก ค	
ตารางที่ 1ค. แสดงการกำหนดขอบเขตภายในโดเมน	71
ตารางที่ 2ค. แสดงค่าเริ่มต้นที่กำหนดลงในขอบเขต	71
ตารางที่ 3ค. แสดงการกำหนด Time step size และ Number of Time	72

## สารบัญรูปรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
รูปที่ 2.1 เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	15
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	16
รูปที่ 2.3 ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	17
รูปที่ 2.4 การวัดความเร็วของของไหลและปริมาณแก๊สไฮโดรเจนภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	19
บทที่ 3 การออกแบบและขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน	
รูปที่ 3.1 รูปแบบลักษณะโครงสร้างและการกำหนดสภาวะขอบเขตของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	23
รูปที่ 3.2 แสดงกริดแบบปกติ	27
รูปที่ 3.3 แสดงกริดแบบกระจายตัว	28
รูปที่ 3.4 แสดงระยะเคลียร์เรนซ์ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์	29
รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของชุดการจำลองทั้ง 3 ชุด	31
บทที่ 4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง	
รูปที่ 4.1 ผลของจำนวนกริดต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการจำลอง	33
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลเฉลี่ยภายในโรเตอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเตอร์เปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของกริดกับการทดลอง	34
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยภายในดาวนคัมเมอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเตอร์ผลของการกระจายตัวของกริดกับการทดลอง	34
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยในโรเตอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเตอร์ผลของการกระจายตัวของกริดกับการทดลอง	35
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลเฉลี่ยภายในโรเตอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเตอร์เปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงต้านชนิดต่างๆกับการทดลอง	37
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลเฉลี่ยภายในดาวนคัมเมอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเตอร์เปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงต้านชนิดต่างๆกับการทดลอง	37

รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในโรเซอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเซอร์เปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงต้านชนิดต่างๆกับการทดลอง	38
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเซอร์กับความเร็วของของเหลวในโรเซอร์ที่ความสูง 1.75 เมตรโดยเปรียบเทียบระหว่างระยะเคลียร์แรนซ์ที่แตกต่างกัน	41
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเซอร์กับความเร็วของของเหลวในดาวน์คัมเมอร์ที่ความสูง 1.75 เมตรโดยเปรียบเทียบระหว่างระยะเคลียร์แรนซ์ที่แตกต่างกัน	42
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเซอร์กับแก๊สไฮโดรเจนในโรเซอร์ที่ความสูง 1.75 เมตรโดยเปรียบเทียบระหว่างระยะเคลียร์แรนซ์ที่แตกต่างกัน	42
รูปที่ 4.11 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของอากาศที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง A	43
รูปที่ 4.12 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของอากาศที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง B	44
รูปที่ 4.13 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของอากาศที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง C	44
รูปที่ 4.14 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง A	45
รูปที่ 4.15 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง B	45
รูปที่ 4.16 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง C	46
รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งก่อนปะทะกราฟต์ทิวบ์ 0.01 เมตร	47
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวนอนก่อนปะทะกราฟต์ทิวบ์ 0.01 เมตรกับความเร็วของอากาศในแนวแกน	48
รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งในแนวนอนมี 0.055 – 0.075 เมตร	49
รูปที่ 4.20 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบความเร็วของทั้งสองวัฏภาคของชุดการจำลอง A	50

รูปที่ 4.21 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบความเร็วของทั้งสองภูมิภาคของชุดการจำลอง B	50
รูปที่ 4.22 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบความเร็วของทั้งสองภูมิภาคของชุดการจำลอง C	51
<b>บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง</b>	
<b>ภาคผนวก ก.</b>	
<b>ภาคผนวก ข.</b>	
รูปที่ 1ข. แสดงการสร้างจุดในโปรแกรม Gambit	59
รูปที่ 2ข. แสดงการสร้างเส้นจากจุดในโปรแกรม Gambit	60
รูปที่ 3ข. แสดงการสร้างระนาบจากเส้นในโปรแกรม Gambit	60
รูปที่ 4ข. แสดงการสร้างระนาบในแนวแกน YZ ในโปรแกรม Gambit	61
รูปที่ 5ข. แสดงการคัดลอกระนาบในแนวแกน YZ ในโปรแกรม Gambit	61
รูปที่ 6ข. แสดงการสร้างระนาบในแนวแกน ZX ในโปรแกรม Gambit	62
รูปที่ 7ข. แสดงการคัดลอกระนาบในแนวแกน ZX ในโปรแกรม Gambit	62
รูปที่ 8ข. แสดงการลบระนาบในโปรแกรม Gambit	63
รูปที่ 9ข. แสดงการแบ่งระนาบในโปรแกรม Gambit	63
รูปที่ 10ข. แสดงการลบระนาบในโปรแกรม Gambit	64
รูปที่ 11ข. แสดงการสร้างกริดเชิงเส้นในแนวแกน X ในโปรแกรม Gambit	64
รูปที่ 12ข. แสดงการสร้างกริดเชิงเส้นในแนวแกน Y ในโปรแกรม Gambit	65
รูปที่ 13ข. แสดงการสร้างกริดบนระนาบในโปรแกรม Gambit	65
รูปที่ 14ข. แสดงการกำหนดสภาวะขอบเขตในโปรแกรม Gambit	66
รูปที่ 15ข. แสดงส่งออกไฟล์กริดในโปรแกรม Gambit	67
<b>ภาคผนวก ค.</b>	
รูปที่ 1ค. แสดงการเปิดโปรแกรม Fluent	61

## สัญลักษณ์

### ตัวอักษร

$\alpha_q$	สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาค $q$ (-)
$V_q$	ปริมาตรของวัฏภาค $q$ ( $m^3$ )
$\rho_q$	ความหนาแน่นของวัฏภาค $q$ ( $Kg/m^3$ )
$\hat{\rho}_q$	ความหนาแน่นประสิทธิผลของวัฏภาค $q$ ( $Kg/m^3$ )
$\vec{v}_q$	ความเร็วของวัฏภาค $q$ ( $m/s$ )
$\dot{m}_{pq}, \dot{m}_{qp}$	การถ่ายโอนมวลจากวัฏภาค $p$ ไป $q$ และลักษณะการถ่ายโอนมวลจากวัฏภาค $q$ ไป $p$ ตามลำดับ ( $Kg/s$ )
$\vec{F}_{lift,q}$	แรงจากน้ำหนักของวัตถุแรงยก ( $N$ )
$\vec{F}_{vm,q}$	แรงเสมือนมวล (Virtual Mass Force) ( $N$ )
$R_{pq}$	แรงอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค ( $N$ )
$p$	ความดันของทุกวัฏภาค ( $Pa$ )
$\vec{\tau}_q$	เทนเซอร์ของความเค้นและความเครียด ( $N/m^2$ )
$\vec{v}_{pq}$	ความเร็วของวัฏภาค $p$ ที่เกิดการถ่ายโอนมวลไปยังวัฏภาค $q$ ( $m/s$ )
$\vec{v}_{qp}$	ความเร็วของวัฏภาค $q$ ที่เกิดการถ่ายโอนมวลไปยังวัฏภาค $p$ ( $m/s$ )
$\mu_q$	ความหนืดของวัฏภาค $q$ ( $Pa s$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\lambda_q$	ความเค้นเฉือนของวัสดุภาค $q$ (N/m <sup>2</sup> )
$R_{pq}$	แรงอันตรกิริยาระหว่างวัสดุภาค (N)
$K_{pq}$	สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างวัสดุภาค (-)
$h_q$	เอนทาลปีจำเพาะของวัสดุภาค $q$ (J/Kg)
$\bar{q}_q$	ฟลักซ์ของความร้อน (J/m <sup>2</sup> )
$S_q$	แหล่งกำเนิดของเอนทาลปี (J)
$Q_{pq}$	ความเข้มของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัสดุภาค $p$ และ $q$ (J/s, W),
$h_{qp}$	เอนทาลปีระหว่างวัสดุภาค (J/s)
$f$	ฟังก์ชันของแรงต้าน (-)
$\tau_p$	เวลาผ่อนคลายของอนุภาค (s)
$d_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองหรือหยดในวัสดุภาคหุติยภูมิ (m)
$c_o$	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (-)
$k$	พลังงานจลน์ปั่นป่วน (J)
$\mathcal{E}$	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (J/s)
$G_k$	พลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนของความเร็วเฉลี่ย (J)
$G_b$	พลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว (J)
$Y_M$	บทบาทของการขยายตัวที่แกว่งในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการ
สลายตัว (-)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$a$	ความเร็วเสียงในอากาศ (m/s)
$\sigma_k$	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ $k$ (-)
$\sigma_\varepsilon$	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ $\varepsilon$ (-)
$S_k$ และ $S_\varepsilon$	เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดขึ้น (-)
$\mu$	ความหนืดความปั่นป่วน (Pa s)
$C_\mu$	ค่าคงที่ในการคำนวณความหนืดปั่นป่วน (-)
$\varepsilon_G$	ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (-)
$U_{L,rise}$	ความเร็วของของเหลวภายในโรเตอร์ (m/s)
$U_{L,down}$	ความเร็วของของเหลวภายในดาวน์คัมเมอร์ (m/s)
$U_G$	ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียล (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ (Airlift Reactor) ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมเคมีที่ต้องการเพิ่มพื้นที่ให้สารในวัฏภาคแก๊สและของเหลวได้มีการสัมผัสและเกิดปฏิกิริยาได้ดีมากยิ่งขึ้นในระบบสาร 2 วัฏภาค อีกทั้งยังช่วยเพิ่มให้สารในวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคแก๊สสัมผัสกันได้ดียิ่งขึ้นนอกจากนั้นเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ยังถูกใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ต้องการเปลี่ยนน้ำเสียเป็นน้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในอุตสาหกรรม โดยจะใช้การพ่นแก๊สเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำเสียเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆที่ไม่ต้องการให้ปะปนอยู่ในน้ำที่ใช้ในระบบ อีกทั้งยังมีการนำไปใช้ในกระบวนการทางชีวภาพ [1] ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่จำเป็นต้องพ่นแก๊สเข้าไปเพื่อให้สาหร่ายได้ใช้ในการกระบวนการเจริญเติบโต และนอกจากนั้นยังใช้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในระบบวัฏภาคแก๊ส ของเหลวหรือระบบวัฏภาคแก๊ส สเลอรี่ (Slurry) เพื่อกระบวนการหมักทางชีวภาพ และมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในอุตสาหกรรมต่างๆอีกมากมาย เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการหมุนวนภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ดี เวลาที่ใช้ในการผสมของภายในเครื่องปฏิกรณ์จึงใช้เวลาสั้นๆ นอกจากนั้นพลังงานที่ใช้ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์และความเค้นเฉือนนั้นมีปริมาณไม่มากอีกด้วย

โดยทั่วไปแล้วการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถศึกษาได้จากการทดลอง นอกจากนี้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ที่นิยมใช้ศึกษาการไหลชนิดต่างๆ ประกอบกับปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ได้ เนื่องจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถผลิตข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ได้ไม่ว่าจะเป็นความเร็วของของไหลที่เคลื่อนที่ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ปริมาณแก๊สโฮลอัพ (Gas Holdup) หรือสัดส่วนเชิงปริมาตรของแก๊ส [2] ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์และข้อมูลอื่นๆที่ใช้ในการศึกษาหรือออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในระยะเวลาอันสั้น มีต้นทุนในการศึกษาต่ำ และสามารถทำนายปรากฏการณ์การไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นสาขาหนึ่งของวิชาพลศาสตร์ของไหลที่รวมวิธีเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Numerical method) และระเบียบวิธี (Algorithm) มาใช้แก้ปัญหาการไหลของของไหลในสถานการณ์ที่สนใจ [3] สำหรับงานวิจัยออกแบบที่ใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีอยู่จำนวนมาก โดยตัวอย่างที่น่าสนใจของการใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ คือ งานวิจัยของ van Baten และคณะ [4] ศึกษาแบบจำลอง CFD สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์และทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง เมื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง CFD แล้วจึงใช้แบบจำลองนั้นทำนายอุทกพลศาสตร์หรือลักษณะการไหลของของไหลในภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์โดยทำการขยายขนาด (Scale Up) ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-epsilon ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนและใช้แบบจำลองแบบออยเลอร์เลียน (Eulerian) สำหรับการทำนายการไหลหลายวัฏภาค จากการจำลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์คือ แก๊สไฮดรอกซิดและความเร็วของของไหลภายในโรเตอร์และดาวน์คัมเมอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ นอกจากนี้ปัจจัยเหล่านี้ยังมีความสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ จึงเกิดแนวคิดที่จะทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงลักษณะของแอร์ลิฟท์ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกปัจจัยทั้ง 2 ชนิดมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมต่อเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ เมื่อได้แบบจำลองที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสมแล้ว จะใช้แบบจำลองที่นี้ในการทำนายปรากฏการณ์การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในสภาวะอื่น ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษการเปลี่ยนแปลงลักษณะระหว่างระหว่างดราฟต์ทิวบ์ (Draft Tube) กับหัวกระจายแก๊สของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีผลต่อการไหลภายใน โดยการปรับระยะห่างระหว่างดราฟต์ทิวบ์กับหัวกระจายหรือระยะเคลียร์เรนซ์แก๊สที่ค่าต่างๆ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในงานวิจัยนี้จะคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent ซึ่งแบบจำลองเป็นแบบสองมิติ สำหรับการทำนายการไหลแบบหลายวัฏภาคจะใช้โมเดล Multiphase-Eulerian และแบบจำลองความปั่นป่วนเป็นโมเดล Standard k-epsilon และใช้โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander ซึ่งเพียงพอต่อการอธิบายปรากฏการณ์การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาแบบจำลองสำหรับการจำลองการไหลในระบบหลายวัฏภาค
- 2) หาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์
- 3) ศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์เรนซ์ต่อลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT และการคำนวณการไหลโดยใช้โปรแกรม FLUENT
- 2) หาแบบจำลองสำหรับการจำลองการไหลหลายภูมิภาคที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์
- 3) ตรวจสอบผลการจำลองของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์กับผลการทดลองของงานวิจัยที่อ้างอิง
- 4) ศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์เรนซ์ต่อลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ โดยใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองและการคำนวณการไหลโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์
- 2) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการไหลของไหลแบบหลายภูมิภาค
- 3) มีความรู้เกี่ยวกับอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับหัวกระจายแก๊สที่มีผลต่อการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์
- 4) ได้แนวทางของการเพิ่มประสิทธิภาพของการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นสาขาหนึ่งเป็นกลศาสตร์ของไหลที่ใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) และระเบียบวิธี (Algorithm) ในแก้ไขปัญหาและวิเคราะห์การไหลของของไหลที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายเทพลังงานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญเชิงวิศวกรรมเนื่องจากสามารถทำนายปรากฏการณ์การไหลและสามารถผลิตข้อมูลได้จำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความสามารถในการแก้ปัญหาที่หลากหลายในเชิงวิศวกรรม เช่น อากาศพลศาสตร์ของเครื่องบินและยานพาหนะ, การผสมและการแยกในกระบวนการทางเคมี เป็นต้น โดยทั่วไปพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก[4]

2.1.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-Processing) คือ ขั้นตอนเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณ โดยการป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณปัญหาการไหลในรูปแบบต่างๆ ให้กับโปรแกรมคำนวณ ในส่วนนี้ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้คือ

2.1.1.1 นิยามรูปร่างขอบเขตที่สนใจ ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่ต้องการการคำนวณในขั้นตอนนี้ขอบเขตยังอยู่ในรูปต่อเนื่องตามธรรมชาติ

2.1.1.2 เนื่องจากขอบเขตที่ต่อเนื่องนั้นยากที่จะคำนวณได้ จึงต้องมีการแบ่งขอบเขตของปัญหาที่มีความต่อเนื่องนั้นให้เป็นส่วนเล็กๆที่ไม่ต่อเนื่องจำนวนมากและไม่เกิดการทับซ้อนกันที่เรียกว่า กริด (Grid) หรือ เมช (Mesh) ซึ่งการแบ่งดังกล่าวจะเป็นการละทิ้งความสวยงามของธรรมชาติเนื่องจากคำตอบของปัญหาการไหล (ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิและอื่นๆ) จะถูกนิยามอยู่บนโหนด (Nodes) ภายในแต่ละเซลล์ (Cell) เท่านั้น

2.1.1.3 เลือกสมการหรือแบบจำลองการคำนวณที่ใช้คำนวณปรากฏการณ์ธรรมชาติทั้งด้านกายภาพและเคมี ยกตัวอย่างเช่น ปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วนในการคำนวณการไหลเป็นต้น ส่วนสมการอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น สมการสภาวะ (Equation of State) สมการการถ่ายเทมวลสาร เป็นต้น

2.1.1.4 นิยามสมบัติของของไหล เช่น ความหนืด ความหนาแน่น เป็นต้น

2.1.1.5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมกับขอบเขตของปัญหา

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 4 แบบด้วยกัน คือ ระเบียบวิธี Finite Difference ระเบียบวิธี Finite Element ระเบียบวิธี Spectral และระเบียบวิธี Finite Volume รูปแบบพื้นฐานของการแก้ปัญหาที่ขึ้นตอนดังนี้

2.1.2.1 ประมาณตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย

2.1.2.2 เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยการประมาณลงในสมการควบคุม แล้วจัดรูปสมการ

2.1.2.3 แก้ปัญหาของสมการพีชคณิต เทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบระเบียบวิธี Finite Volume ลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีนี้ประกอบด้วย

1.) แบ่งโดเมนการคำนวณเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ

2.) อินทิเกรตสมการควบคุมของไหลทุกปริมาตรควบคุมภายใต้ขอบเขตของปัญหา

3.) เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยวิธีเชิงตัวเลข ด้วย

การแทนค่าเทอมต่างๆ ของสมการควบคุมที่อินทิเกรตแล้วด้วยการประมาณค่า

4.) หาคำตอบของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ

2.1.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-Processor) คือ ส่วนแสดงผลที่ได้จากการคำนวณที่มีการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ด้วยความก้าวหน้าทางด้านงานวิศวกรรม ทำให้มีการแสดงผลแบบกราฟิกที่ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่ชุดโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ประกอบด้วย เครื่องมือที่ใช้ดูข้อมูลแบบอนิเมทประกอบประกอบด้วยรูปแบบต่างๆ เช่น

2.1.3.1 รูปทรงโดเมนและการแสดงเมช

2.1.3.2 เวกเตอร์

2.1.3.3 เส้นและคอนทัวร์

2.1.3.4 พื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ

2.1.3.5 การติดตามอนุภาค

2.1.3.6 การจัดภาพการมอง (การย้าย, การหมุน, การปรับ ฯลฯ)

## 2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

### 2.2.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation)

สมการนาเวียร์-สโตกส์ เป็นสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันบนของไหล โดยสมมติฐานว่าความเค้นบนของไหล คือผลรวมของเทอมของความหนืดของการกระจายตัวและเทอมของความดัน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ ที่ไม่มีการระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่แน่นอน แต่จะระบุเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงแทน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ไม่สามารถใช้ระบุตำแหน่งได้ แต่สามารถบอกความเร็วได้ ทำให้คำตอบของชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ ถูกเรียกว่าสนามความเร็วหรือสนามการไหล ซึ่งเป็นตัวอธิบายถึงความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่ง และเวลาที่กำหนด โดยทั่วไปสมการนาเวียร์-สโตกส์ จะประกอบด้วยชุดสมการที่เกี่ยวข้อง 3 สมการด้วยกันคือ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน

### 2.2.2 สมการควบคุมสำหรับการไหลหลายวัฏภาค (Governing Equation for Multiphase Flow)

ในบทนี้จะกล่าวถึงชุดสมการควบคุม [6] สำหรับการคำนวณทาง CFD ที่ใช้ในงานวิจัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลแบบหลายวัฏภาค คือ Euler-Euler โดยถ้าการไหลเป็นแบบสองวัฏภาคคือมีวัฏภาค  $q$  และ  $p$  จะกำหนดให้วัฏภาคที่มีโอบล้อมอีกวัฏภาคไว้เป็นวัฏภาคปฐมภูมิ และวัฏภาคที่กระจายตัวในอีกวัฏภาคเป็นวัฏภาคทุติยภูมิ (เช่น ระบบฟองอากาศในน้ำ น้ำและอากาศจะถูกกำหนดให้เป็นวัฏภาคปฐมภูมิและวัฏภาคทุติยภูมิ ตามลำดับ)

### 2.2.2.1 สมการสัดส่วนเชิงปริมาตร (Volume Fraction Equation)

สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาค  $q$  (แก๊สโฮลล์) ตัวแปรที่สำคัญต่อการอธิบายการไหลในหลายวัฏภาคโดยให้นิยามปริมาตรของวัฏภาค  $q, V_q$

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\alpha_q$  สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาค  $q$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2.2)$$

และ ความหนาแน่นประสิทธิผลของวัฏภาค  $q$  คือ  $\hat{\rho}_q$

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (2.3)$$

โดยที่  $\rho_q$  คือความหนาแน่นของวัฏภาค  $q$

2.2.2.2 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการความต่อเนื่องของวัฏภาค  $q$  คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\vec{v}_q$  คือความเร็วของวัตถุภาค  $q$  และ  $\dot{m}_{pq}, \dot{m}_{qp}$  คือลักษณะการถ่ายโอนมวลจากวัตถุภาค  $p$  ไป  $q$  และลักษณะการถ่ายโอนมวลจากวัตถุภาค  $q$  ไป  $p$  ตามลำดับโดยสามารถระบุลักษณะการถ่ายโอนมวลตามพฤติกรรมของระบบได้ แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้จะละเว้นการถ่ายโอนมวลข้ามวัตถุภาคไว้

### 2.2.2.3 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (R_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\vec{F}_q$ ,  $\vec{F}_{lift,q}$  และ  $\vec{F}_{vm,q}$  คือแรงจากน้ำหนักของวัตถุแรงยก และแรงเสมือนมวล (Virtual Mass Force) ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้จะละเว้นแรงทั้ง 3 ชนิดนี้ไว้  $R_{pq}$  คือแรงอันตรกิริยาระหว่างวัตถุภาค  $p$  ความดันของทุกวัตถุภาค และ  $\vec{\tau}_q$  คือเทนเซอร์ของความเค้นและความเครียด  $\vec{v}_{pq}$  คือความเร็วของวัตถุภาค  $p$  ที่เกิดการถ่ายโอนมวลไปยังวัตถุภาค  $q$  และในทางกลับกัน  $\vec{v}_{qp}$  คือความเร็วของวัตถุภาค  $q$  ที่เกิดการถ่ายโอนมวลไปยังวัตถุภาค  $p$

$$\vec{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left( \lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I}$$

เมื่อ  $\mu_q$  และ  $\lambda_q$  คือความหนืดของวัตถุภาค  $q$  และความเค้นเฉือนของวัตถุภาค  $q$  ตามลำดับ

$R_{pq}$  แรงอันตรกิริยาระหว่างวัตถุภาคที่ใช้ในการคำนวณจะอยู่ในรูป

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad (2.5)$$

โดย  $K_{pq} (= K_{qp})$  คือสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างวัตถุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.4 สมการพลังงาน (Energy Equation)

สมการพลังงานสำหรับของผสมมีดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{u}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q \cdot \nabla \bar{u}_q - \nabla \cdot \bar{q}_q \\ + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $h_q$  คือเอนทาลปีจำเพาะของวัฏภาค  $q$ ,  $\bar{q}_q$  คือฟลักซ์ของความร้อน,  $S_q$  คือแหล่งกำเนิดของเอนทาลปี (เช่น ปฏิกิริยาเคมี, การแผ่รังสี),  $Q_{pq}$  คือความเข้มของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏภาค  $p$  และ  $q$ , และ  $h_{qp}$  คือเอนทาลปีระหว่างวัฏภาค (เช่น อุณหภูมิของไอน้ำในอากาศในกรณีของการระเหยของน้ำ)

### 2.2.2.5 สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาค (Interphase Exchange Coefficients)

สำหรับระบบการไหลในหลายวัฏภาคที่มีวัฏภาคปฐมภูมิและทุติยภูมิ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาคสามารถแสดงได้ตามสมการ 2.8

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $f$  คือฟังก์ชันของแรงต้านซึ่งสามารถนิยามได้ตามโมเดลความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาค (Different Exchange-Coefficient Models) ดังสมการที่ 2.8 โดยที่  $\tau_p$  คือเวลาผ่อนคลายของอนุภาค (Particulate Relaxation Time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $d_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองหรือหยดในวัฏภาคทุติยภูมิ

ฟังก์ชันของ  $f$  จะประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์แรงต้านซึ่งจากโมเดลต่างๆที่นำมาใช้ ซึ่งขึ้นกับเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์ (Re) ด้วย หากเลขเรย์โนลด์ต่างกันจะทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาค หากวัฏภาคปฐมภูมิไม่มีอยู่ในโดเมนการคำนวณจะทำให้สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาคมีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นจึงต้องคูณ  $f$  ด้วยสัดส่วนเชิงปริมาตรดังสมการ 2.10 ของวัฏภาคปฐมภูมิเสมอ

$$f = \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (2.10)$$

และ Re คือเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์สำหรับวัฏภาคปฐมภูมิ  $q$  และวัฏภาคทุติยภูมิ  $p$

$$\text{Re} = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q} \quad (2.11)$$

- โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Schiller-Naumann

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15\text{Re}^{0.687}) / \text{Re} : \text{Re} \leq 1000 \\ 0.44 : \text{Re} > 1000 \end{cases} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (2.13)$$

โดยที่  $a_1, a_2, a_3$  แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่  $a_1, a_2, a_3$  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

- โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Tomiyama

$$C_D = \max\left(\min\left(\frac{24}{Re}(1 + 0.15Re^{0.687}), \frac{72}{Re}\right), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4}\right) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$E_o = \frac{g(\rho_q - \rho_p)d_p^2}{\sigma} \quad (2.15)$$

## 2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon เป็นหนึ่งในแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สำหรับคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ซับซ้อนเกินไป ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากนิยมเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการวิจัยออกแบบ เริ่มแรกแบบจำลองดังกล่าวถูกคิดค้นโดย Launder และ Spalding [3] หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากขึ้น จนทำให้ปัจจุบันแบบจำลองนี้ถูกแบ่งเป็น 3 แบบจำลอง ได้แก่ Standard k-epsilon, RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon [6] โดยแบบจำลองทั้ง 3 แบบ จะประกอบด้วยชุดสมการการถ่ายโอน 2 ชนิดที่แยกออกจากกันคือ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy,  $k$ ) และสมการของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy,  $\mathcal{E}$ ) ความแตกต่างของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 ชนิดนี้คือ

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

### 2.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon เป็นแบบจำลองกึ่งการทดลอง (Semi-Empirical Model) ซึ่งขึ้นอยู่กับกรจำลองสมการพลังงานจลน์ปั่นป่วนและสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน สำหรับสมการแบบจำลองการถ่ายโอนของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $k$ ) จะถูกพิสูจน์จากสมการแม่นยำ (Exact Solution) ส่วนสมการแบบจำลองการถ่ายโอนของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $\mathcal{E}$ ) หากจากเหตุผลทางฟิสิกส์ ในการพิสูจน์ของแบบจำลอง k-epsilon สมมุติฐาน

แบบจำลองนี้คือ การไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบ (Fully Turbulent) ดังนั้นผลของความหนืดเนื่องจากโมเลกุลสารถูกตัดออกไป [6]

2.3.1.1 สมการการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon  
พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $\epsilon$ )  
หาได้จากสมการการถ่ายโอนที่ (2.16 และ 2.17) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.16)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.17)$$

โดยที่

$G_k$  คือ การเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย

หาได้จาก

$$G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.18)$$

$G_b$  คือ การเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

หาได้จาก

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Y_M$  คือ บทบาทของการขยายตัวที่แกว่งในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด

หาได้จาก 
$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ  $M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$  และ  $a$  คือ ความเร็วเสียงในอากาศ

$\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  เป็นตัวเลขพรินด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ  $k$  และ  $\varepsilon$

$C_{1\varepsilon}$   $C_{2\varepsilon}$  และ  $C_{3\varepsilon}$  เป็นค่าคงที่ เมื่อ  $C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$

$S_k$  และ  $S_\varepsilon$  คือ เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดขึ้น

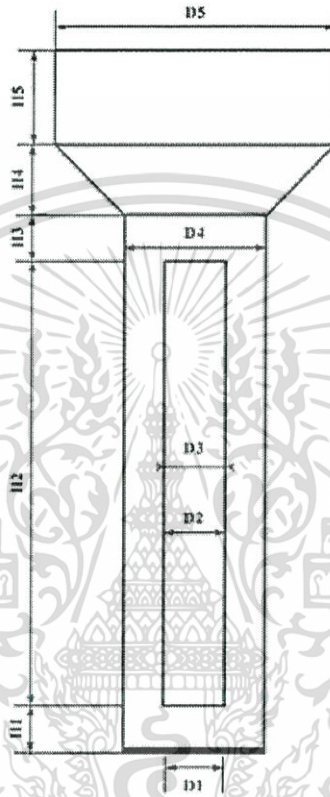
### 2.3.1.2 แบบจำลองสำหรับความหนืดความปั่นป่วน

สำหรับความหนืดความปั่นป่วน ( $\mu_t$ ) ถูกคำนวณด้วยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $k$ ) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $\varepsilon$ ) ดังสมการที่ (2.22)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.22)$$

โดยค่า  $C_\mu$  เป็นค่าคงที่

## 2.4 เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ (Air-Lift Reactor)



รูปที่ 2.1 เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์[4]

เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนระหว่างของเหลวและแก๊สด้วยประสิทธิภาพที่สูง และยังเกิดการกวนผสมโดยไม่ต้องอาศัยแรงเชิงกลส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เป็นที่สนใจในอุตสาหกรรม และเหมาะแก่การใช้งานในการเพาะปลูกสิ่งมีชีวิตทางชีววิทยาและการบำบัดน้ำเสีย [1]

เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

- เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ แบบภายใน
- เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ แบบภายนอก

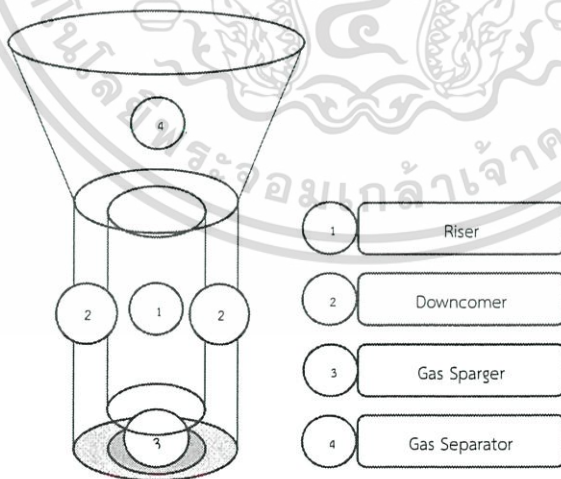
ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบภายในเท่านั้น

### 2.4.1 ส่วนประกอบ

ภายในเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆ

- ไรเซอร์ (Riser) คือส่วนการทำงานที่เกิดการสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว โดยส่วนใหญ่หัวกระจายแก๊สจะถูกติดตั้งไว้ทางด้านล่างของบริเวณนี้เพื่อผลิตฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ และเนื่องจากแก๊สมีความหนาแน่นน้อยกว่าของผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้เกิดการไหลเวียนภายในเครื่องปฏิกรณ์
- ดาว์นคัมเมอร์ (Downcomer) คือส่วนที่เกิดการไหลสวนกลับของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์และในบริเวณนี้จะมีปริมาณฟองน้อยกว่าบริเวณ Riser ซึ่งการไหลเวียนภายในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับกรอกแบบของไรเซอร์
- หัวกระจายแก๊ส (Gas Sparger) คือบริเวณที่ติดตั้งหัวกระจายแก๊สเพื่อผลิตฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งถ้าหัวกระจายแก๊สสามารถผลิตฟองแก๊สที่มีขนาดเล็กมากพอจะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลของแก๊สสู่ของเหลวได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในบริเวณ ไรเซอร์
- ส่วนแยกแก๊ส (Gas Separator) คือส่วนที่อยู่ด้านบนสุดของเครื่องปฏิกรณ์เป็นส่วนที่ปลดปล่อยฟองแก๊สสู่บรรยากาศเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับมาของฟองแก๊สในบริเวณ ดาว์นคัมเมอร์ การออกแบบมักจะออกแบบให้มีความสัมพันธ์กับขนาดฟองที่หัวกระจายแก๊สสามารถผลิตได้ [1]

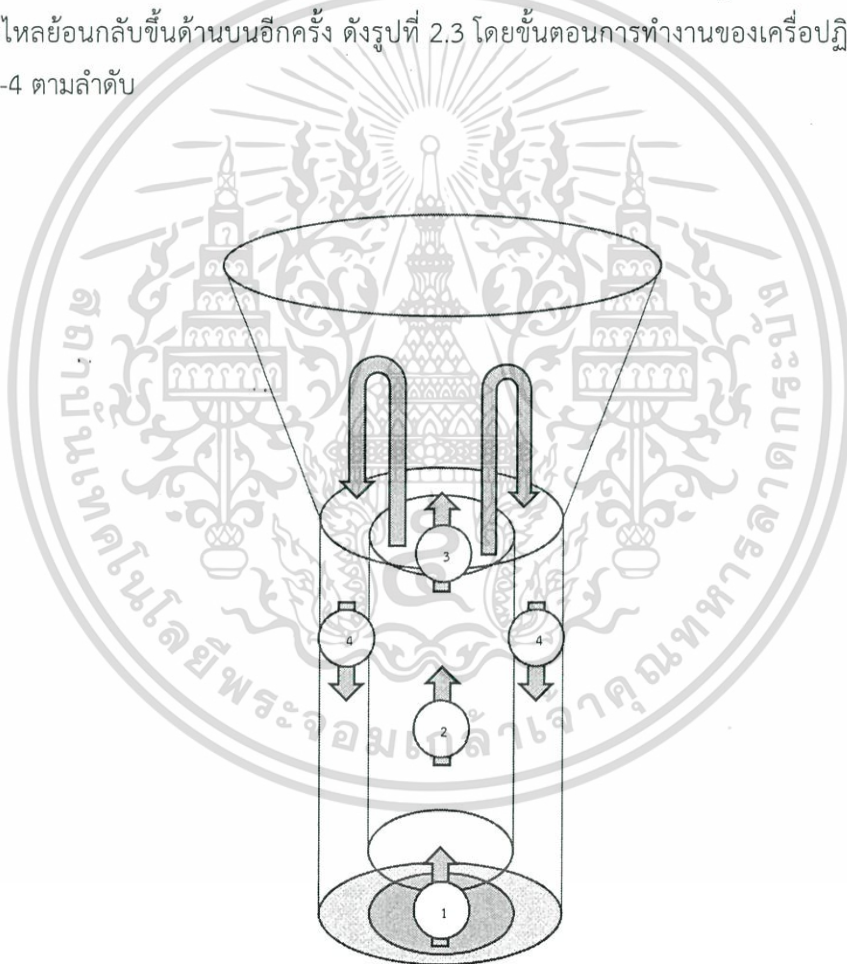
ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

#### 2.4.2 ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์

เครื่องปฏิกรณ์ดำเนินการด้วยการป้อนแก๊สเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านตัวกระจายแก๊สผสมกับของเหลว หลังจากนั้นแก๊สและของเหลวซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าจะไหลขึ้นด้านบนผ่านบริเวณ โรเซออร์ ด้วยความแตกต่างของความหนาแน่นและอัตราความเร็วระหว่างวัฏภาคทำให้แก๊สพาของเหลวที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไปยังส่วนของ โรเซออร์ และส่วนแยกแก๊สตามลำดับหลังจากที่แก๊สถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศในบริเวณส่วนแยกแก๊สแล้วของเหลวซึ่งปราศจากฟองแก๊สจึงมีความหนาแน่นที่สูงกว่าจะไหลกลับลงมาในส่วนของ ดาวน์คัมเมออร์ ลงมายังด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนจะถูกผสมด้วยแก๊สและไหลย้อนกลับขึ้นด้านบนอีกครั้ง ดังรูปที่ 2.3 โดยขั้นตอนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แสดงดังตัวเลข 1-4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

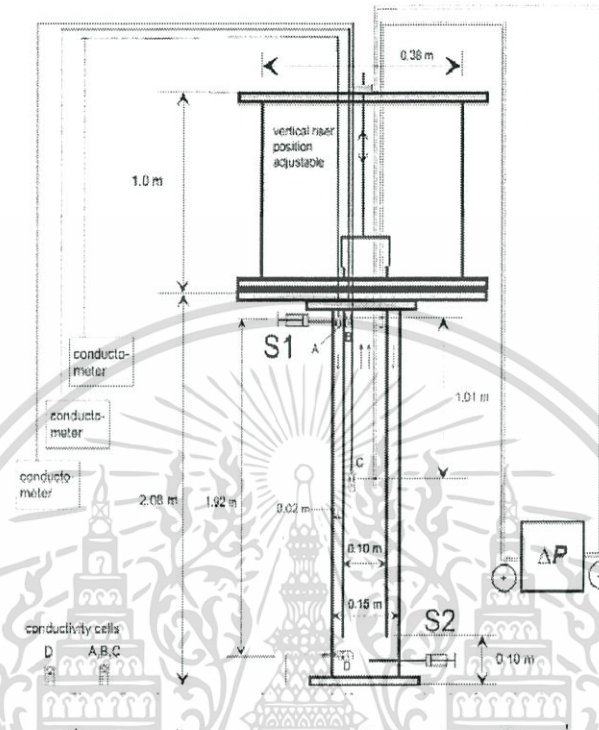
## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ การทดลองเปรียบเทียบกับ การจำลอง

J.M. van Baten และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ในการศึกษาการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเซอร์ค่าต่างๆดังนี้ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 เมตรต่อวินาที ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ 2 เครื่อง ที่มีขนาดต่างกัน แต่ทั้งคู่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโรเซอร์เท่ากันที่ 0.1 เมตร โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองกับอุทกพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือ CFD โดยโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม CFX เวอร์ชัน 4.2 ในการจำลองลักษณะการไหล เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ทำงานในสภาวะ 2 วัฏภาค เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้วจะทำการศึกษาอิทธิพลของการขยายขนาด (Scale Up) ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

ในการทดลองของ J.M. van Baten ทำการวัดความเร็วและปริมาณแก๊สไฮลัฟภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ความสูงค่าหนึ่ง ในการวัดความเร็วภายในโรเซอร์จะทำการฉีดสารตัวนำ (Tracer) ที่เป็นสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaOH) เข้าไปด้านล่างของโรเซอร์ เมื่อสารละลายมีการเคลื่อนที่จะถูกตรวจจับโดยแผ่นตัวนำ (Metrohm) ที่ตำแหน่ง C และ D โดยแผ่นตัวนำจะต่อเข้ากับเครื่อง Conductometer ดังรูปที่ 2.4 เพื่อทำการแปลงสัญญาณหาเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด D ไป C และหาความเร็วในการเคลื่อนที่ เช่นเดียวกับการวัดความเร็วภายในดาวนคัมเมอร์จะทำการฉีดสารตัวนำไปที่ด้านบนของดาวนคัมเมอร์ เมื่อสารตัวนำเคลื่อนที่จะถูกตรวจจับที่แผ่นตรวจจับตำแหน่ง A และ D และส่งสัญญาณไปที่ Conductometer ดังรูปที่ 2.4

ในการวัดปริมาณแก๊สไฮลัฟที่โรเซอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จะวัดได้จากค่าความดันตกคร่อมที่จุด C และ B จากนั้นจะนำความดันตกคร่อมที่วัดได้ไปคำนวณปริมาณแก๊สไฮลัฟ เมื่อได้ความเร็วและปริมาณแก๊สไฮลัฟภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แล้ว จะนำมาหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ โดยในการจำลองจะใช้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับขนาดจริง ดังรูปที่ 2.4 ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้เวลาในการจำลองเป็น 3000 timestep และทำการจำลองที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลค่าต่างๆ เช่นเดียวกันการทดลอง ดังนี้ 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 เมตรต่อวินาที หลังจากการจำลองจะได้แบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบ k-epsilon



รูปที่ 2.4 การวัดความเร็วของของไหลและปริมาณแก๊สไฮลล์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์[4]

เมื่อได้แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แล้ว ได้ทำการศึกษาการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มีต่อการขยายขนาดพบว่าเมื่อมีการขยายขนาดจะทำให้มีการไหลแบบหมุนวนมากขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ แต่ในทางกลับกันเมื่อมีการขยายขนาดส่งผลให้ปริมาณแก๊สไฮลล์มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 การจำลองระบบสองวัฏภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์

M.Brazej และคณะ [7] ได้ทำการศึกษากการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง ไม่ว่าจะเป็น ความเร็วภายในโรเตอร์ ความเร็วภายในดาวน์คัมเมอร์ และปริมาณแก๊สไฮลอป เช่นเดียวกับงานวิจัยของ van Baten และคณะ แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ใช้ ใช้โปรแกรม Fluent CFD ในการจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ ในสภาวะของการทดลองนี้ และได้ใช้แบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาคเป็น Mixture Model ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับ การจำลองพบว่า ข้อมูลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม Fluent CFD มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในระดับหนึ่ง

### 2.5.3 การหมุนเวียนของฟองอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์

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

1. ไม่มีฟองอากาศ
2. มีฟองอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่
3. ฟองอากาศไหลย้อนกลับมาทางด้านโรเตอร์

โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียงแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของแก๊สไฮลอปบริเวณโรเตอร์และคานคัมเมอร์และความเร็วของของเหลวในดาวน์คัมเมอร์ในการไหลรูปแบบที่ 2 ตัวแปรทั้งสองมีค่าที่คงที่ ในขณะที่รูปแบบที่ 3 มีการเพิ่มความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลของแก๊ส อัตราส่วนแก๊สไฮลอปในดาวน์คัมเมอร์และโรเตอร์มักจะถูกรายงานให้มีค่าคงที่ แต่อย่างไรก็ตามในงานชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของแก๊สไฮลอปในดาวน์คัมเมอร์และโรเตอร์มีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล ซึ่งในรูปแบบที่ 2 แก๊สไฮลอปในโรเตอร์และดาวน์คัมเมอร์มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่เท่ากัน แต่ในรูปแบบการไหลที่ 3 แก๊สไฮลอปในโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าในดาวน์คัมเมอร์

#### 2.5.4 การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองของแก๊สไฮลล์กับความเร็วอินเทอร์สตีเชียลในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์

M.Simcik และคณะ [8] ได้นำเสนอผลการทดลองและการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ขนาด 40 ลิตร ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ภูมิภาค นั่นคือ อากาศและน้ำ ในงานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหล โดยทำการทดลองและการจำลองขนาดไรเซอร์ที่ขนาดแตกต่างกัน ซึ่งความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในไรเซอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 7.5 เซนติเมตรต่อวินาที โดยในการจำลองจะเริ่มจากการเปรียบเทียบผลจากการทดลอง โดยกำหนดให้ขนาดของฟองมีขนาดคงที่ หลังจากนั้นจะใช้รูปแบบการจำลองนี้ในการจำลองและพัฒนาโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ การจำลองในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลอง โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบหลายภูมิภาค แบบ Mixture และใช้โปรแกรม CFX ในการจำลอง โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบหลายภูมิภาค แบบ Euler-Euler และการทดลองจะวัดความเร็วอินเทอร์สตีเชียลของของเหลวโดยการฉีดสารตัวนำ (Tracer) กรดซัลฟูริก แล้วทำการวัดค่า pH ส่วนแก๊สไฮลล์จะใช้มือนอมิเตอร์แบบท่อรูปตัวยู ผลจากการทดลองและการจำลองพบว่าการใช้โปรแกรม Fluent และ CFX สามารถอธิบายลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ได้เป็นอย่างดี

### บทที่ 3 การออกแบบและขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง

##### 3.1.1 รูปแบบโครงสร้าง

สร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในรูปแบบสองมิติโดยใช้โปรแกรม Gambit โดยอ้างอิงรูปแบบโครงสร้างเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่มาจากงานวิจัยของ van Baten และคณะ[4] โดยเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ 0.10 เมตร หนา 0.005 เมตร ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับหัวกระจายแก๊สขาเข้าหรือเคลียร์เรนซ์ 0.09 เมตร ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์สูง 3.06 เมตร ที่ความสูง 2.08 เมตรไปจนถึงยอดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นบริเวณที่ใช้ในการแยกแก๊สและของเหลวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.38 เมตร ปลายด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์เปิดออกสู่บรรยากาศและระดับของของเหลวที่บรรจุภายในเครื่องปฏิกรณ์มีความสูง 0.25 เมตร

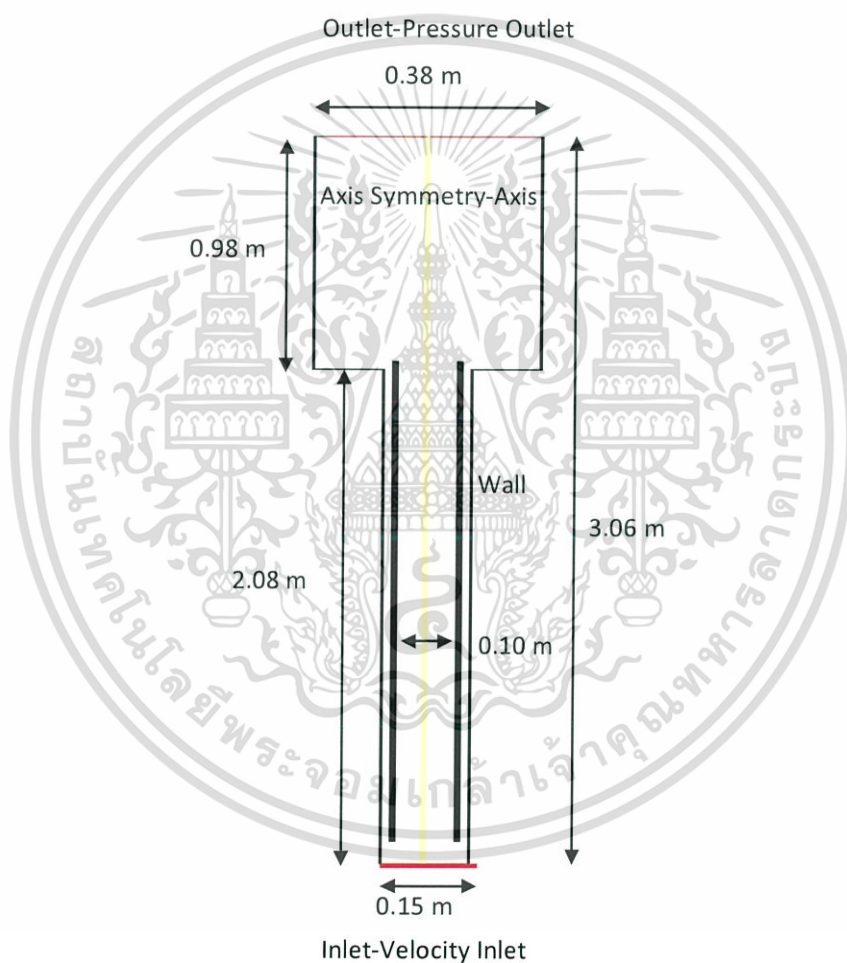
##### 3.1.2 สภาวะขอบเขต

ตารางที่ 3.1 แสดงสภาวะขอบเขตที่ใช้กับขอบเขตชนิดต่างๆ

ประเภท	สภาวะของเขต
Inlet	ชนิด Velocity-Inlet และกำหนดความเร็วขา 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 ตามลำดับ
Outlet	ชนิด Pressure-Outlet ความดันตามความดันบรรยากาศ
Wall	ชนิด Wall
Axis Symmetry	ชนิด Axis ตามแนวที่มีการสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ขอบเขตของ Inlet และ Outlet มีความเข้มข้นความปั่นป่วนเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยบริเวณ Inlet และ Outlet จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิกเท่ากับ 0.18 และ 0.36 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.1 ที่แสดงรูปแบบโครงสร้างต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ นอกจากนี้ยังแสดงถึงการกำหนดสภาวะขอบเขตต่างๆอีกด้วย



รูปที่ 3.1 รูปแบบลักษณะโครงสร้างและการกำหนดสภาวะขอบเขตของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สมมติฐานของแบบจำลอง

- แบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบจำลองสองมิติ
- ความเร็วของของไหลที่ผ่านทางเข้าหรือหัวกระจายแก๊สมีค่าคงที่
- ของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

#### 3.1.3 รูปแบบการจำลอง

สำหรับการจำลองแบบหลายวัฏภาคจะใช้แบบจำลองเป็น Multiphase-Eulerian ใช้ Scheme เป็น Implicit และแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้ Standard K-epsilon ใช้ Turbulence Multiphase Model เป็น Dispersed โดยมีค่า Cmu C1-epsilon C2-epsilon และ C3-epsilon เท่ากับ 0.09, 1.44, 1.92 และ 1.3 ตามลำดับ

#### 3.1.4 วัสดุในการจำลอง

ในการจำลองเป็นการจำลองระบบสองวัฏภาค โดยจะใช้ Water-Liquid เป็น Primary Phase มีความหนาแน่นเท่ากับ  $998.2 \text{ Kg/m}^3$  และความหนืดเท่ากับ  $0.001003 \text{ Kg/m s}$  และ Secondary Phase เป็น Air มีความหนาแน่นเท่ากับ  $1.225 \text{ Kg/m}^3$  และความหนืดเท่ากับ  $1.789 \times 10^{-5} \text{ Kg/m-s}$

#### 3.1.5 สภาวะ Cell-zone

ตั้งค่า Operating Condition เลือก Specified Operating Density เป็น  $1.225 \text{ Kg/m}^3$

#### 3.1.6 ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

สมการควบคุมทั้งหมดถูกใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม FLUENT ซึ่งเป็นวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยการคำนวณเริ่มจากการแบ่งขอบเขตการคำนวณเป็นเซลล์ขนาดเล็กจำนวนมาก และอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมดให้เป็นเซตของสมการพีชคณิต โดยสมการพีชคณิตจะถูกคำนวณจนได้สมการกระจายตัวของตัวแปรตามที่ต้องการ โดยตารางที่ 3.2 แสดงถึงการตั้งค่าของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในโปรแกรม FLUENT

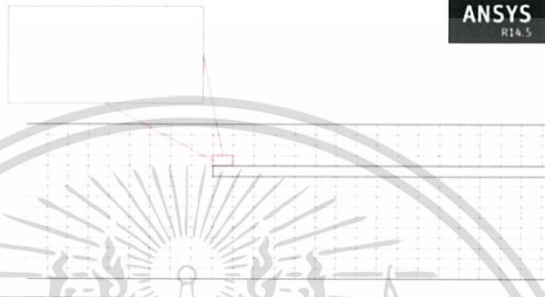


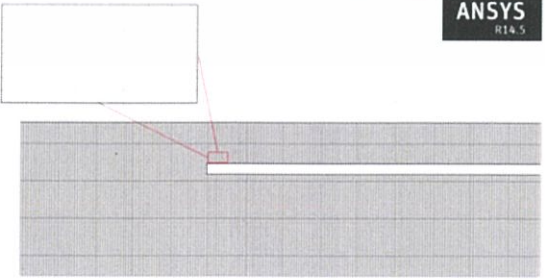
ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ประเภท	ระเบียบวิธีการ
Scheme	Phase Coupled SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Momentum	First Order Upwind
Volume Fraction	First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation rate	First Order Upwind

### 3.1.7 หากกริดที่เหมาะสมในการจำลอง

หาปริมาณกริดที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิตต์ ปริมาณของกริดหรือความละเอียดของกริดล้วนมีผลต่อการจำลอง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะหาปริมาณกริดที่ทำให้ผลจากการจำลองไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาปริมาณออกเป็น 4 กรณี ดังตารางที่ 3.3

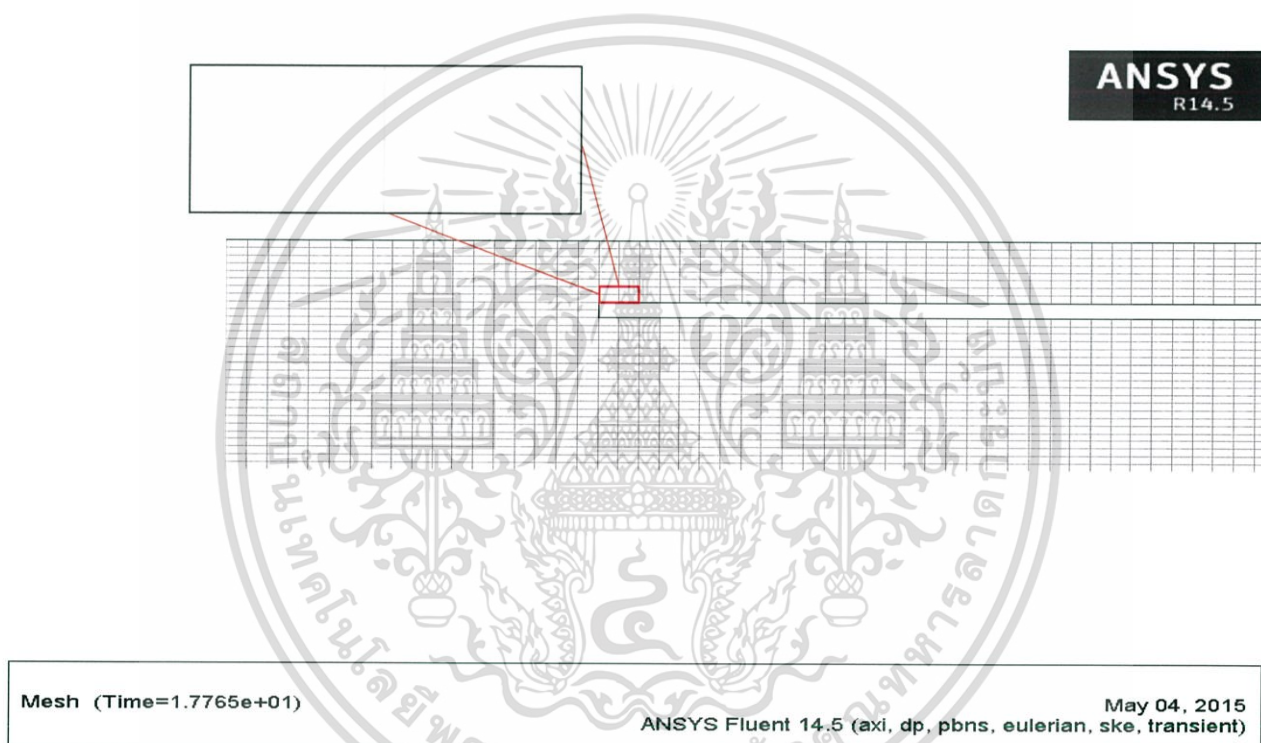
ตารางที่ 3.3 แสดงความละเอียดของจำนวนกริดบนโดเมน

จำนวนเซลล์	รูปโดเมน
7,189	
27,602	
108,460	
429,464	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การศึกษาอิทธิพลของการกระจายตัวของกริด

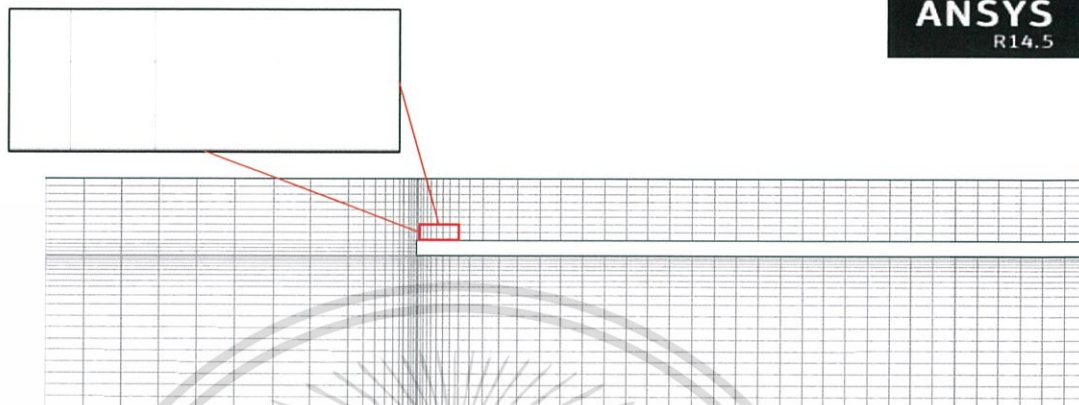
การจำลองการไหลโดยใช้เทคนิค CFD นั้นจำเป็นต้องใช้กริดเพื่อทำนายผลในแต่ละตำแหน่งของโดเมนเพราะฉะนั้น ปริมาณของกริดและลักษณะการวางตัวของกริดจึงส่งผลโดยตรงต่อผลการจำลอง ซึ่งในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ปกติจะใช้ขนาดของกริดเท่ากันตลอดทั้งโดเมนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 แสดงกริดแบบปกติ

แต่ในการศึกษาในหัวข้อนี้จะใช้ขนาดของกริดที่มีขนาดเล็กในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง คือ บริเวณหัวกระจายแก๊ส และบริเวณผนังกราฟทิวบ์เพื่อให้ความสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณนั้นมากขึ้น และใช้กริดหยาบกับบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างต่ำดังรูปที่ 3.2 โดยยังคงจำนวนกริดตลอดโดเมนให้เท่าเดิมเพื่อกำหนดทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณมีปริมาณที่คงที่เมื่อเทียบกับการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mesh (Time=5.0000e-03)

ANSYS Fluent 14.5 (axi, dp, pbns, eulerian, ske, transient)

May 04, 2015

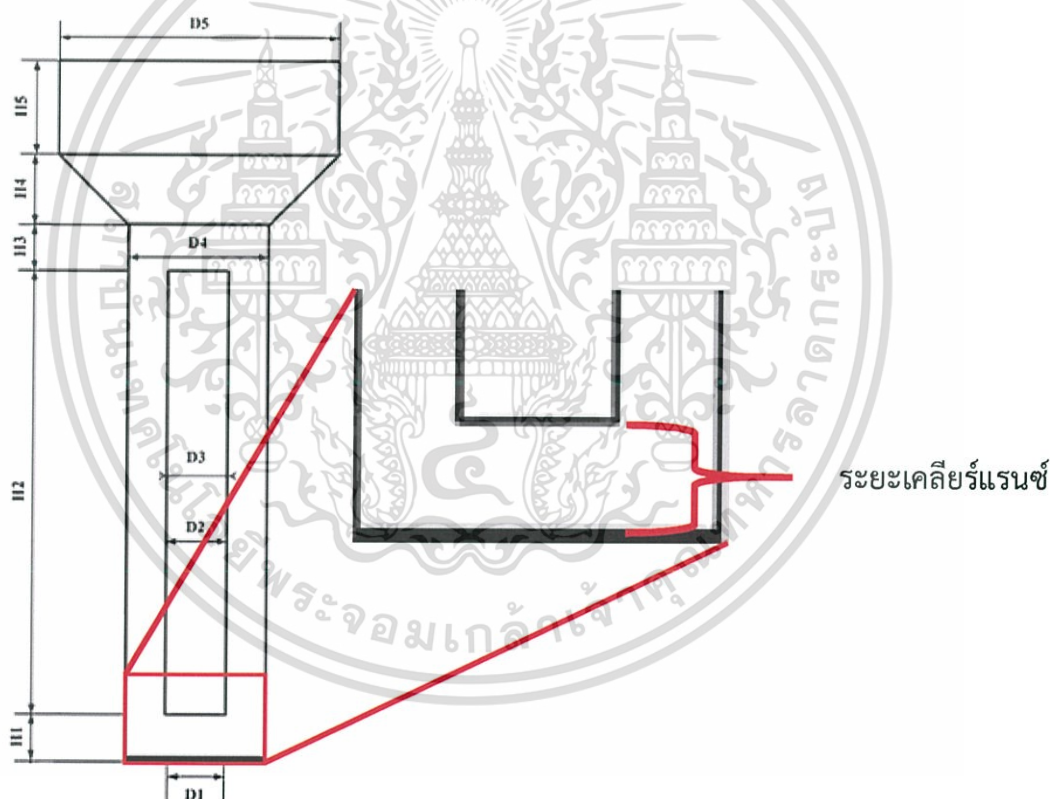
รูปที่ 3.3 แสดงกริดแบบกระจายตัว

### 3.3 การศึกษาอิทธิพลของโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient, $C_D$ )

ในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์ ซึ่งมีระบบการไหลเป็นแบบหลายวัฏภาค ทำให้อันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคจึงมีความสำคัญในการจำลอง ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านเป็นอีกตัวแปรสำคัญหนึ่งที่ใช้ในการจำลอง ในหัวข้อนี้จึงอธิบายอิทธิพลของโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ส่งผลต่อการไหล โดยเปรียบเทียบกับกริดทดลอง เพื่อหาโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มีความเหมาะสมในการศึกษาอื่นๆต่อไป โมเดลสัมประสอทที่แรงต้านที่ได้นำมาศึกษาประกอบด้วย 3 โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน คือ โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Schiller-Naumann, โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Tomiyama

### 3.4 การศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ต่อพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบซึ่งมีทรงกระบอกกลางติดตั้งอยู่ภายใน มีหน้าที่ในการช่วยให้เกิดการไหลเวียนของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ เรียกว่า ดราฟต์ทิวบ์ (Draft Tube) ในเครื่องปฏิกรณ์จะถูกติดตั้งในตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางของเครื่องปฏิกรณ์และเว้นระยะระหว่างดราฟต์ทิวบ์และหัวกระจายแก๊ส เรียกระยะห่างบริเวณนี้ว่า ระยะเคลียร์แรนซ์ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งระยะบริเวณนี้จะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.4 แสดงระยะเคลียร์แรนซ์ของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงต้องการศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ต่อพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์โดยใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลอง โดยจะใช้โมเดลหลายภูมิภาคเป็น

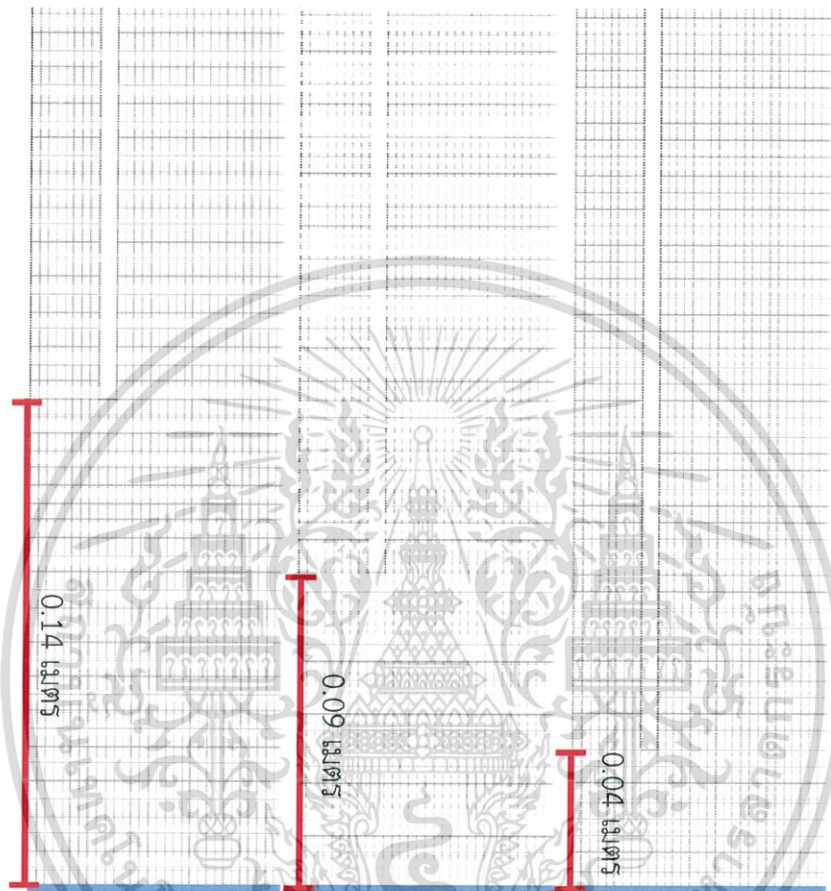
แบบ Eulerian ใช้โมเดล Standard k-epsilon ในการจำลองความปั่นป่วน และใช้ผลของการยืนยันผล การทดลองจากหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 คือใช้กริดที่มีการกระจายตัวแบบปกติและใช้โมเดลสัมประสิทธิ์แรง ด้าน Mosi-alexander ในการจำลองในหัวข้อนี้

การจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์นี้จะปรับระยะเคลียร์แรนซ์ 0.14, 0.09, 0.04 เมตรตามลำดับ ดังตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงระยะเคลียร์แรนซ์ที่ใช้ในการจำลอง

ชุดการจำลอง	ระยะเคลียร์แรนซ์ (เมตร)
A	0.14
B	0.09
C	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของชุดการจำลองทั้ง 3 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

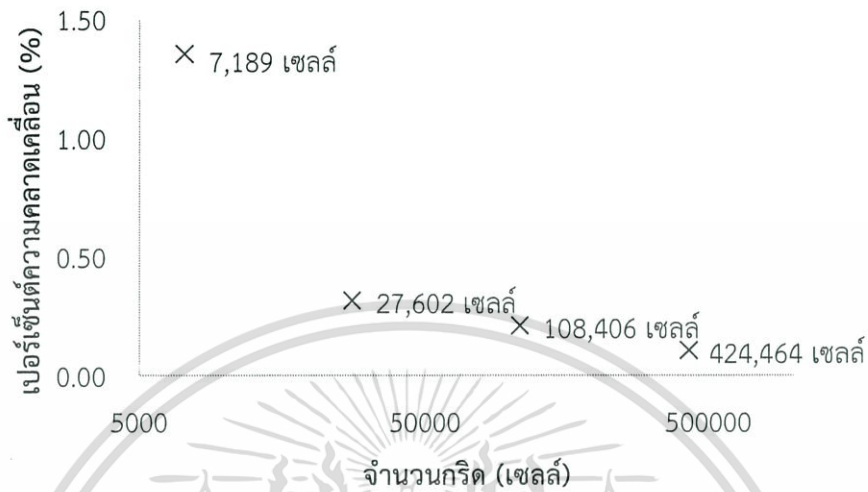
#### 4.1 การหาคกริตที่เหมาะสม

ขนาดและความละเอียดของกริดส่งผลต่อความแม่นยำของคำตอบและเวลาในการคำนวณในการจำลองกระบวนการจึงจำเป็นต้องหาขนาดของกริดและความละเอียดของกริดที่เหมาะสม โดยกำหนดจำนวนกริดที่ศึกษาให้มีความแตกต่างกัน และใช้โมเดลในการจำลองเป็นแบบ Eulerian เนื่องจากเป็นการจำลองแบบหลายวัฏภาคและใช้โมเดลการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนเป็นแบบ Standard k-epsilon ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียนในโรเซอร์ 0.06 เมตรต่อวินาที โดยผลการจำลองกระบวนการของจำนวนกริดต่างๆจะแสดงตามตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อมีการใช้จำนวนกริดที่เพิ่มมากขึ้น ความเร็วเฉลี่ยของเหลวภายในโรเซอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร จะมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ใช้อ้างอิงมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการจำลองก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ตาราง 4.1 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนกริดต่างๆ

จำนวนกริด (เซลล์)	ความเร็วของของไหล (เมตร/วินาที)	ความคลาดเคลื่อน (%)	เวลาในการคำนวณ (นาท)
การทดลอง	0.6654	-	-
7,189	0.6744	1.352	63
27,602	0.6633	0.315	89
108,460	0.6640	0.210	310
429,464	0.6647	0.105	929

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

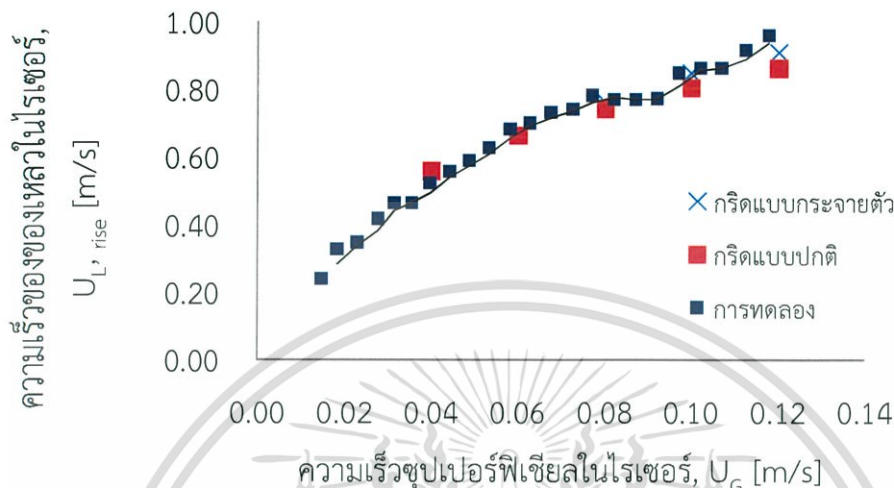


รูปที่ 4.1 ผลของจำนวนกริดต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการจำลอง

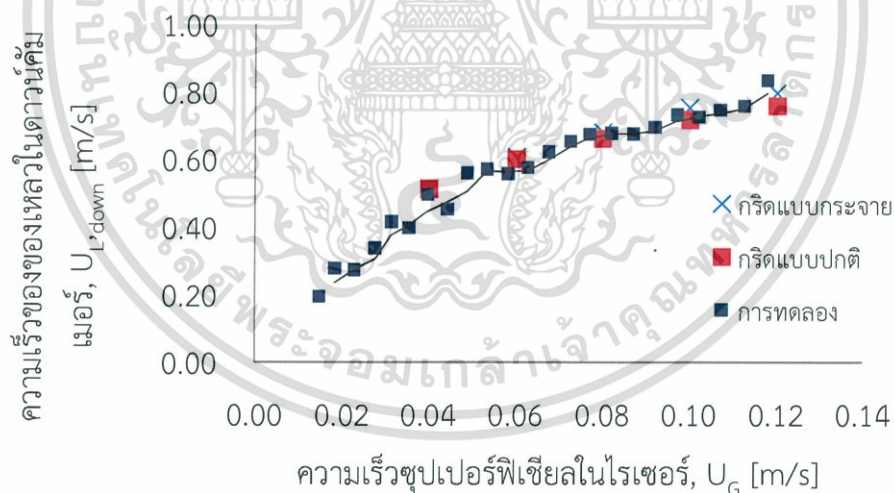
จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในโรเตอร์ที่ความสูง 1.75 เมตรเทียบกับการทดลอง กับจำนวนกริดที่ใช้พบว่ากริด 27,602 เซลล์จะมีความเหมาะสมที่สุดในการจำลองกระบวนการ ถึงแม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่ากริดจำนวน 108,406 เซลล์, 429,464 เซลล์ ตามลำดับแต่ความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในโรเตอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร เทียบกับผลการทดลองพบว่าต่างกันน้อยมาก และเวลาที่ใช้ในการคำนวณน้อยกว่าถึง 10 เท่า ดังนั้นจึงใช้จำนวนกริด 27,602 เซลล์ในการจำลองกระบวนการ

#### 4.2 การเปรียบเทียบอิทธิพลของการกระจายตัวของกริด

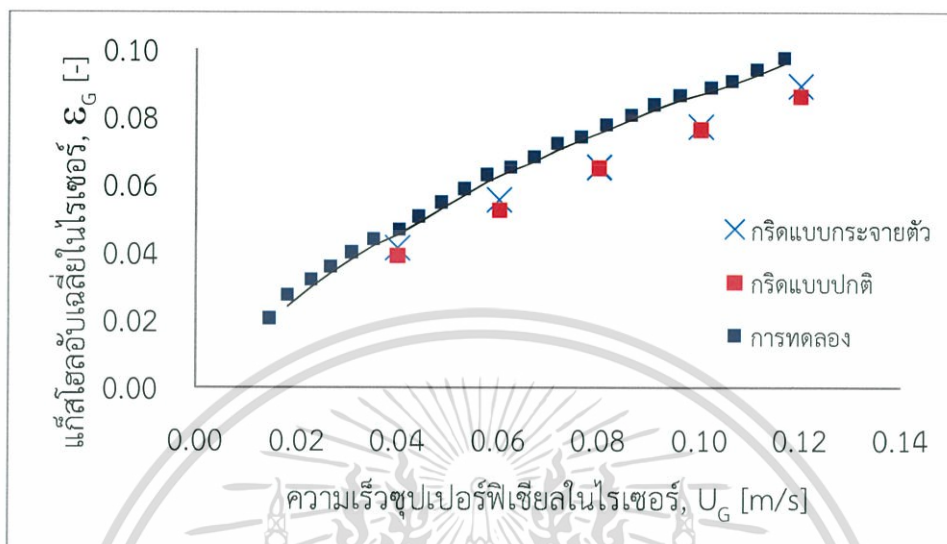
จากการจำลองอิทธิพลของการกระจายตัวของกริดโดยเปรียบเทียบระหว่างกริดที่มีการกระจายตัวหนาแน่นในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของการไหลสูงกับกริดที่กระจายตัวเท่ากันตลอดทั้งโดเมน ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลเฉลี่ยภายในโรเตอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเตอร์เปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของกริดกับการทดลอง



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยภายในดาวน์คัมเมอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเตอร์ผลของการกระจายตัวของกริดกับการทดลอง



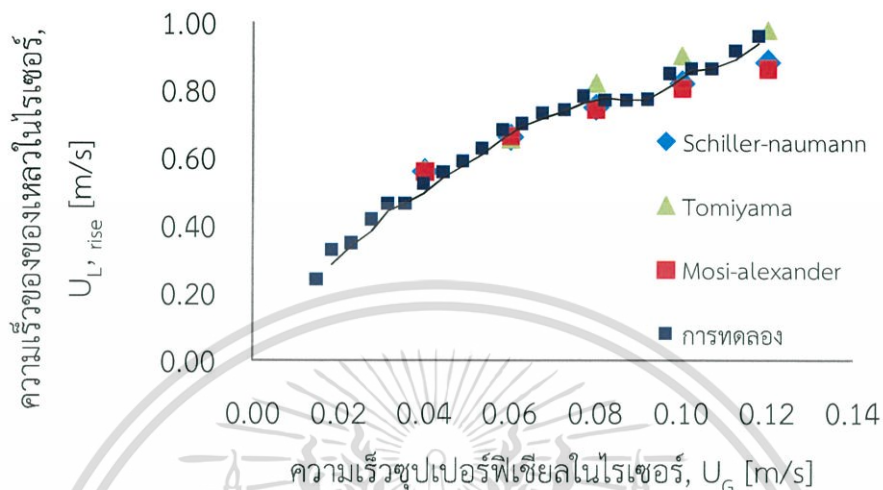
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลเฉลี่ยภายในดาวน์คัมเมอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเตอร์ผลของการกระจายตัวของกริดกับการทดลอง

จากผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 พบว่าการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในกรณีที่กริดมีความละเอียดสูงในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลค่อนข้างสูงมีผลการจำลองที่ใกล้เคียงมากกับการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์แบบปกติที่มีขนาดกริดเท่ากันตลอดโดเมน และในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในกรณีที่กริดมีความละเอียดสูงในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลสูงยังทำให้การจำลองมีเสถียรภาพต่ำและใช้เวลาในการจำลองนานกว่าปกติ

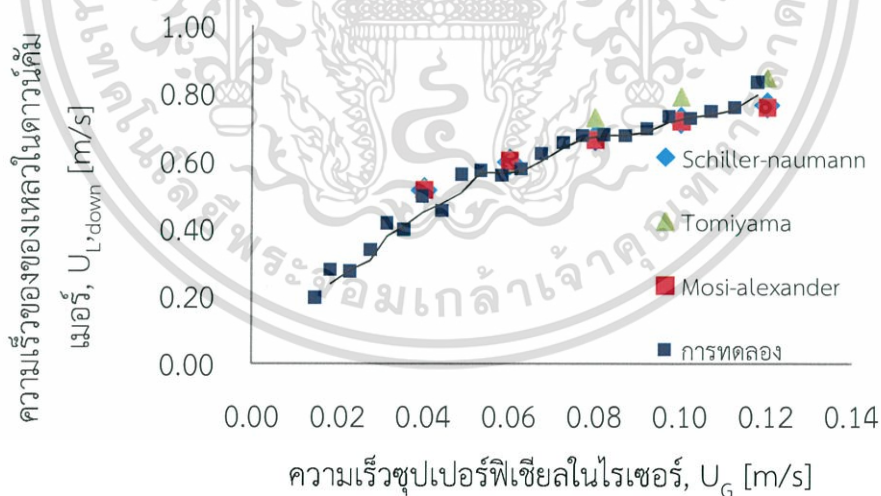
เพราะฉะนั้นในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในงานวิจัยต่อไปจะใช้กริดที่มีขนาดเท่ากันตลอดทั้งโดเมนในการทำนายผล เนื่องจากให้ผลที่มีความใกล้เคียงกับการทดลอง และยังใช้เวลาในการจำลองที่เร็วกว่าการจำลองโดยใช้กริดความละเอียดสูงในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลค่อนข้างสูง

### 4.3 การเปรียบเทียบอิทธิพลของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient)

ในกระบวนการจำลองกระบวนการสัมประสิทธิ์แรงต้านถือเป็นปัจจัยตัวหนึ่งที่มีผลต่อการจำลองกระบวนการ ในการจำลองกระบวนการจึงจำเป็นต้องหาสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เหมาะสมในการจำลองกระบวนการระบบที่สนใจศึกษา โดยในการศึกษาอิทธิพลของสัมประสิทธิ์แรงต้าน สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ทำการศึกษาจะใช้สัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander สัมประสิทธิ์แรงต้าน Schiller-Naumann และสัมประสิทธิ์แรงต้าน Tomiyama ความเร็วแก๊สขาเข้าที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเป็น 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 เมตรต่อวินาที โดยใช้โมเดลในการจำลองระบบหลายภูมิภาคเป็น Eulerian และโมเดล Standard k-epsilon สำหรับการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน โดยผลของการจำลองกระบวนการของสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบต่างๆจะแสดงตามรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 โดยรูปที่ 4.5 กับรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยภายในโรเตอร์และดาวน์คัมเมอร์ตามลำดับที่ความสูง 1.75 เมตรกับความเร็วขาเข้าของแก๊ส และรูปที่ 4.7 เป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไหลที่ความสูง 1.75 เมตรกับความเร็วขาเข้าของแก๊ส จะพบว่า จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 สัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander สามารถจำลองกระบวนการได้มีค่าเข้าใกล้ผลการทดลองมากกว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Tomiyama และ Schiller-Nauman และสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander สามารถทำนายแนวโน้มผลของความเร็วเฉลี่ยภายในโรเตอร์และในดาวน์คัมเมอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร ได้ดีกว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Tomiyama และสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Schiller-Nauman



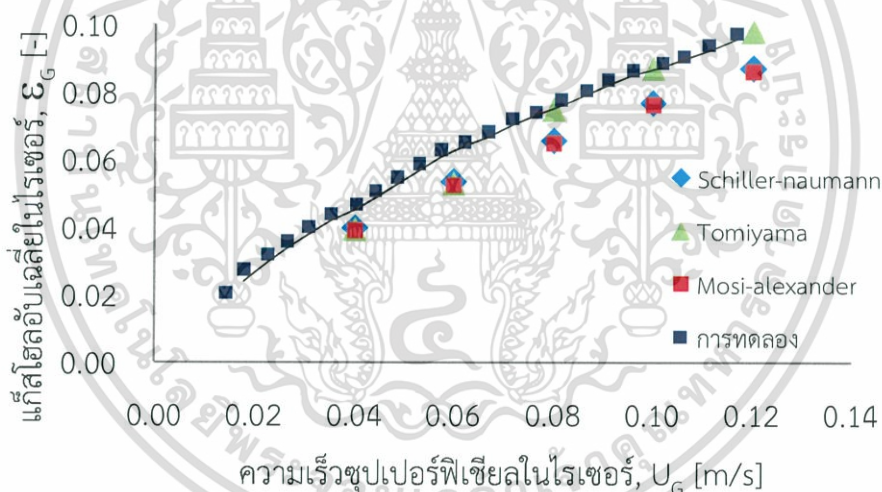
รูปที่.4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลเฉลี่ยภายในโรเตอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเตอร์เปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงต้านชนิดต่างๆกับการทดลอง



รูปที่.4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลเฉลี่ยภายในดาวน์คัมเมอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเตอร์เปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงต้านชนิดต่างๆกับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.7 พบว่าโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Tomiyama สามารถทำนายปริมาณ แก๊สไฮดรอลิกได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Schiller-Naumann และสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander แต่โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Tomiyama สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ที่ความเร็วแก๊สขาเข้าสูงๆ ในขณะที่การจำลองที่ความเร็ว แก๊สขาเข้าต่ำๆ ผลการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับ โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander และสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Schiller-Naumann เราจึงไม่นำสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Tomiyama มาใช้ในการคำนวณเนื่องจากผลของการจำลองที่ใช้สัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Tomiyama ไม่สามารถทำนาย แนวโน้มได้เหมือนกับโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander และสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Schiller-Naumann



รูปที่.4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไฮดรอลิกเฉลี่ยภายในไรเซอร์ที่ความสูง 1.75 เมตร กับ ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในไรเซอร์เปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงต้านชนิดต่างๆกับการทดลอง

โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ใช้ในการจำลองกระบวนการจะใช้สัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander เนื่องจากให้ผลการคำนวณความเร็วเฉลี่ยภายในไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์ได้แม่นยำกว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Schiller-Naumann และสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Tomiyama และ

สัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander สามารถให้แนวโน้มในการคำนวณปริมาณแก๊สไฮลอฟภายในโรเซอร์ได้ดีกว่าโมเดลแบบ Tomiyama

โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander สามารถทำนายพารามิเตอร์ต่างๆได้อย่างแม่นยำผลใกล้เคียงกับการทดลอง ไม่ว่าจะเป็นความเร็วเฉลี่ยภายในโรเซอร์ ความเร็วเฉลี่ยภายในดาวนคัมเมอร์หรือปริมาณแก๊สไฮลอฟ เนื่องจากโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander สามารถที่จะปรับฟังก์ชันตามการเปลี่ยนแปลงของเลขเรย์โนลด์ได้ละเอียดกว่าโมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้านอื่นๆ แต่จะทำให้การจำลองมีเสถียรภาพต่ำ

โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Morsi-Alexander

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (2.14)$$

โดยที่  $a_1, a_2, a_3$  แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่  $a_1, a_2, a_3$  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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Schiller-Naumann

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}) / \text{Re} : \text{Re} \leq 1000 \\ 0.44 : \text{Re} > 1000 \end{cases} \quad (2.11)$$

โมเดลสัมประสิทธิ์แรงต้าน Tomiyama

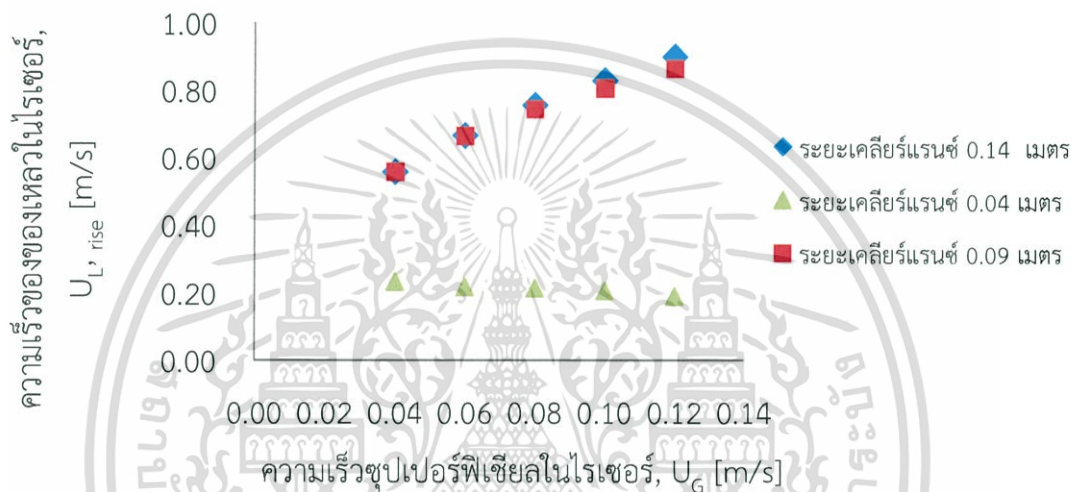
$$C_D = \max \left( \min \left( \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}), \frac{72}{\text{Re}} \right), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right) \quad (2.16)$$



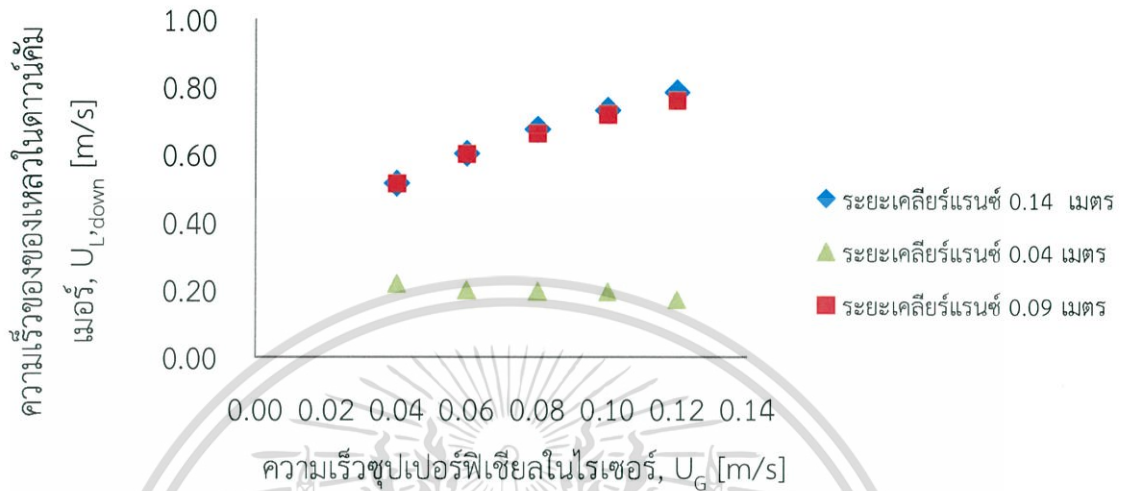
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 อิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ต่อพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์

จากการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเคลียร์แรนซ์ต่อพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยออกแบบการทดลองเป็น 3 ชุด ประกอบไปด้วยระยะเคลียร์แรนซ์ปกติความสูง 0.09 เมตร, ระยะเคลียร์แรนซ์ 0.14 เมตร และระยะเคลียร์แรนซ์ 0.04 เมตรตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในไรเซอร์กับความเร็วของของเหลวในไรเซอร์ที่ความสูง 1.75 เมตรโดยเปรียบเทียบระหว่างระยะเคลียร์แรนซ์ที่แตกต่างกัน

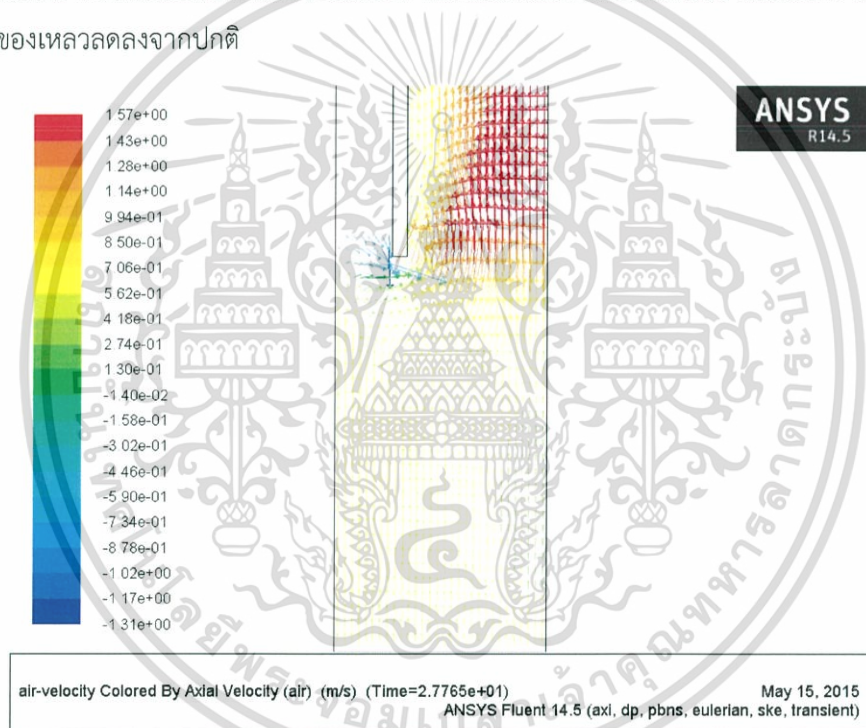


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเตอร์กับความเร็วของของเหลวในดาวน์คัมเมอร์ที่ความสูง 1.75 เมตรโดยเปรียบเทียบระหว่างระยะเคลียร์แรนซ์ที่แตกต่างกัน

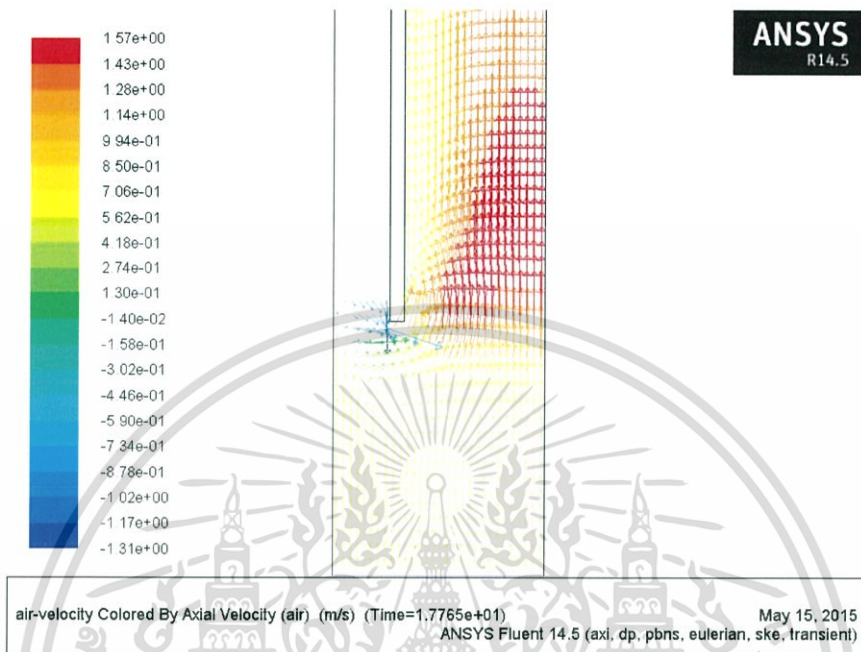


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเตอร์กับแก๊สโฮลล์ในโรเตอร์ที่ความสูง 1.75 เมตรโดยเปรียบเทียบระหว่างระยะเคลียร์แรนซ์ที่แตกต่างกัน

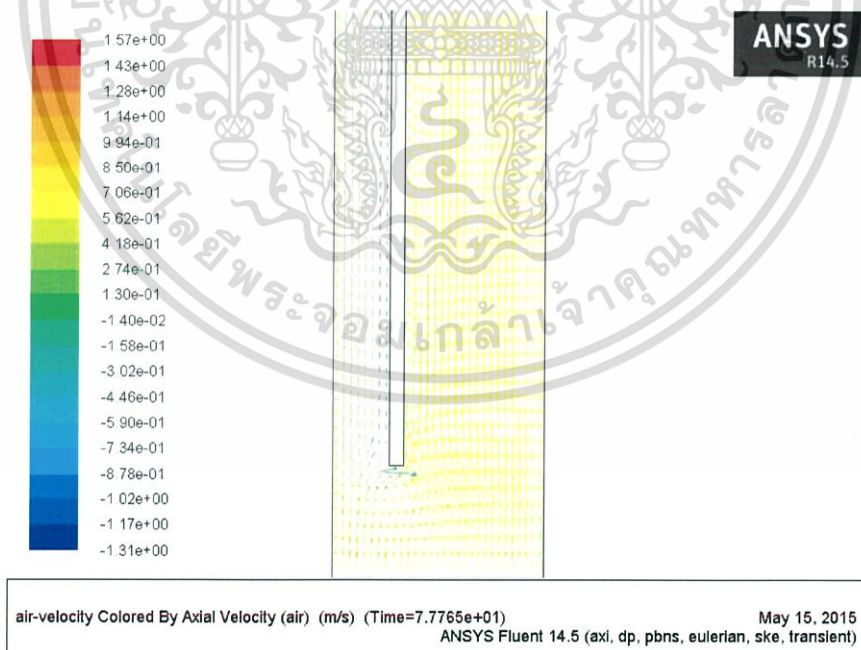
จากผลการจำลองพบว่าที่ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียลในโรเตอร์เท่ากันและระยะเคลียร์แรนซ์มากขึ้น ความเร็วของน้ำและแก๊สไฮลัฟที่ความสูง 1.75 เมตร มีแนวโน้มและค่าที่ใกล้เคียงกันมากแต่ในทางกลับกันพบว่าที่ระยะเคลียร์แรนซ์น้อยลง ความเร็วของน้ำและแก๊สไฮลัฟที่ความสูง 1.75 เมตร มีค่าที่มีแนวโน้มแตกต่างออกไปอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการไหลที่ในบริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ในชุดการทดลองที่มีระยะเคลียร์แรนซ์ต่ำจะทำให้อากาศที่เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการแยกไหลไปในส่วนของดาวคัมเมอร์แต่น้ำยังคงไหลสวนกลับลงมาในด้านดาวคัมเมอร์อยู่แต่มีความเร็วช้าลง ดังรูป 4.13 และ 4.16 ซึ่งในส่วนดาวคัมเมอร์ปกติแล้วจะไม่มีอากาศไหลเข้าไปได้ และในส่วนของโรเตอร์ความเร็วของทั้งแก๊สและของเหลวลดลงจากปกติ



รูปที่ 4.11 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของอากาศที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง A

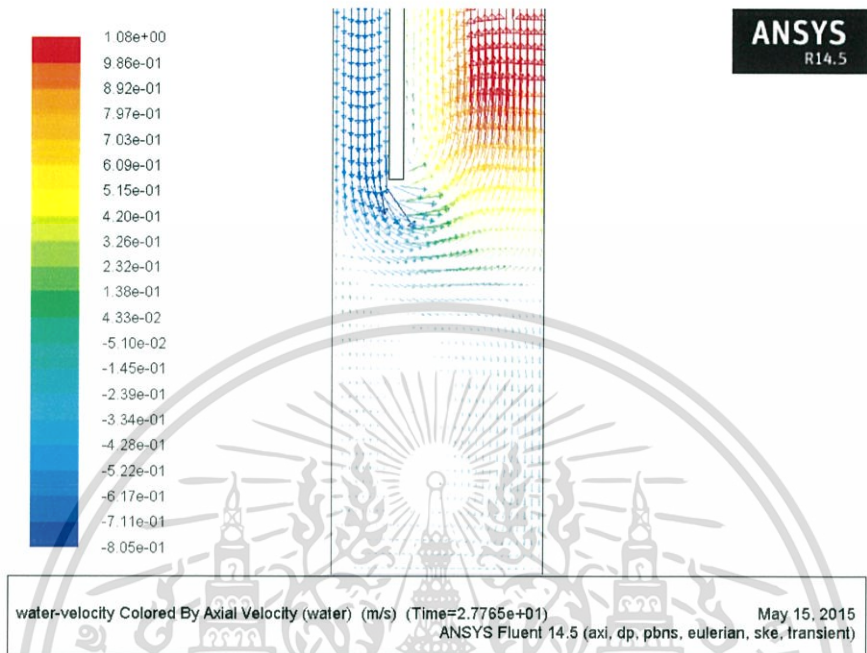


รูปที่ 4.12 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของอากาศที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง B

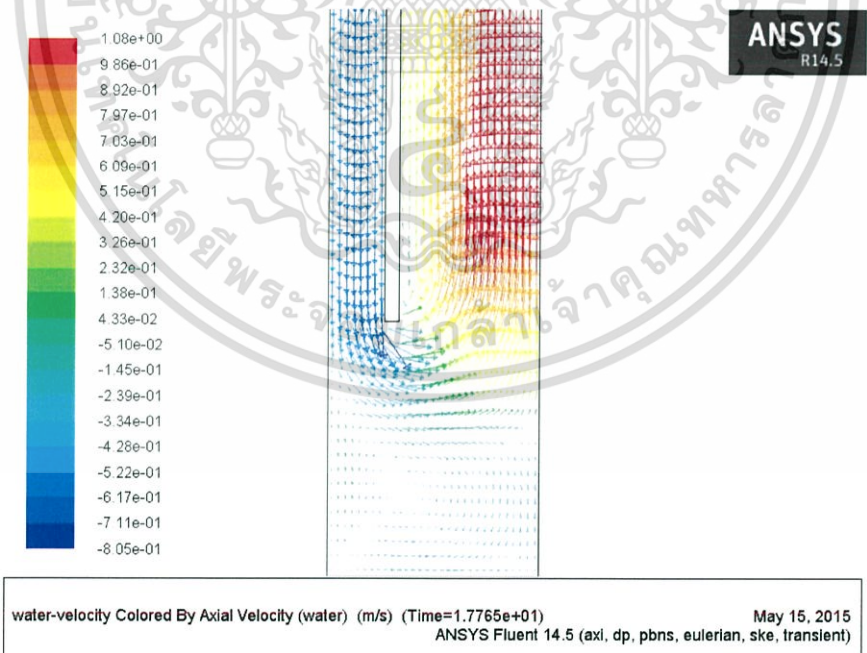


รูปที่ 4.13 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของอากาศที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

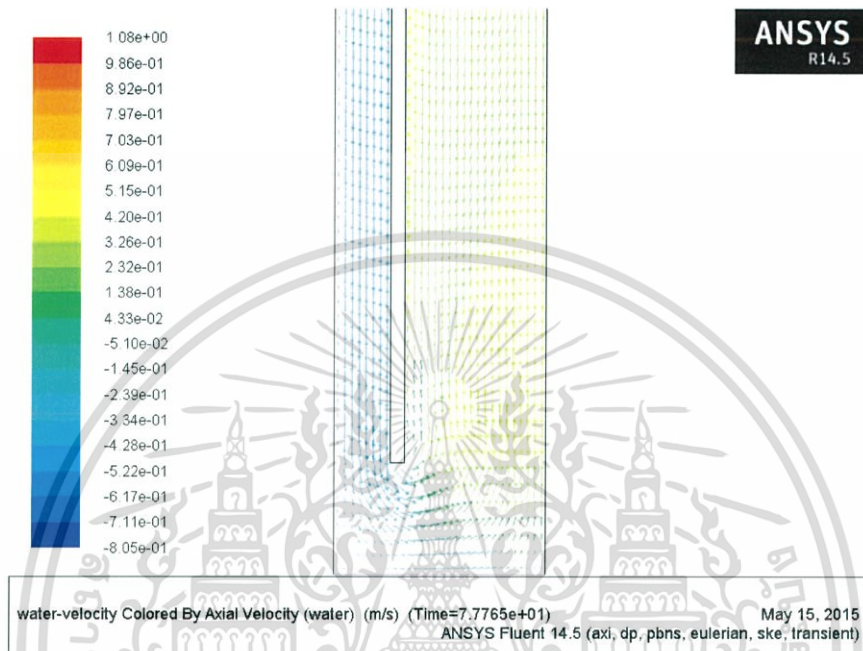


รูปที่ 4.14 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง A



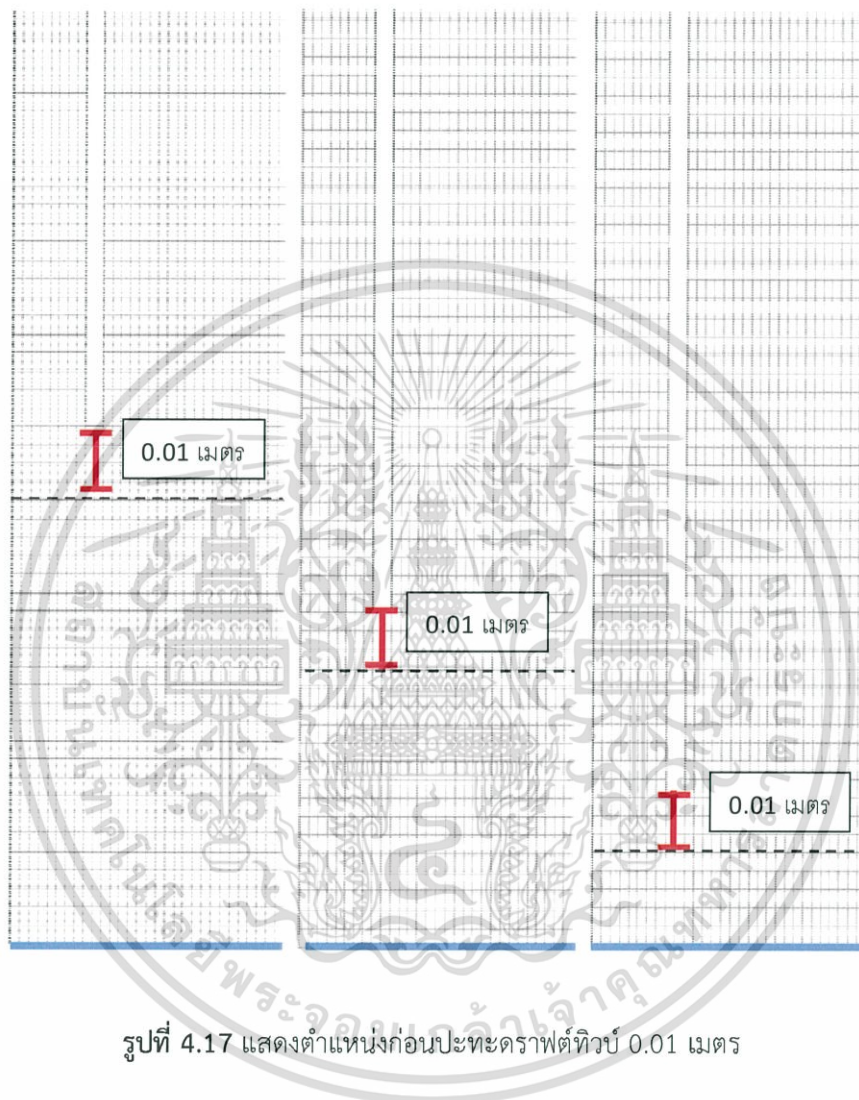
รูปที่ 4.15 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



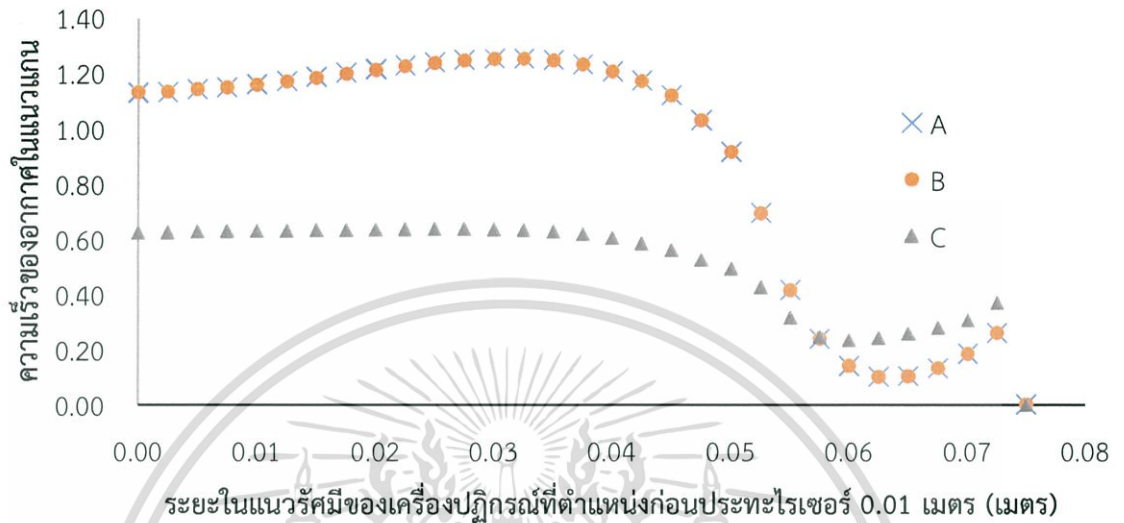
รูปที่ 4.16 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ชุดการจำลอง C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งก่อนปะทะกราฟต์ทิวป์ 0.01 เมตร

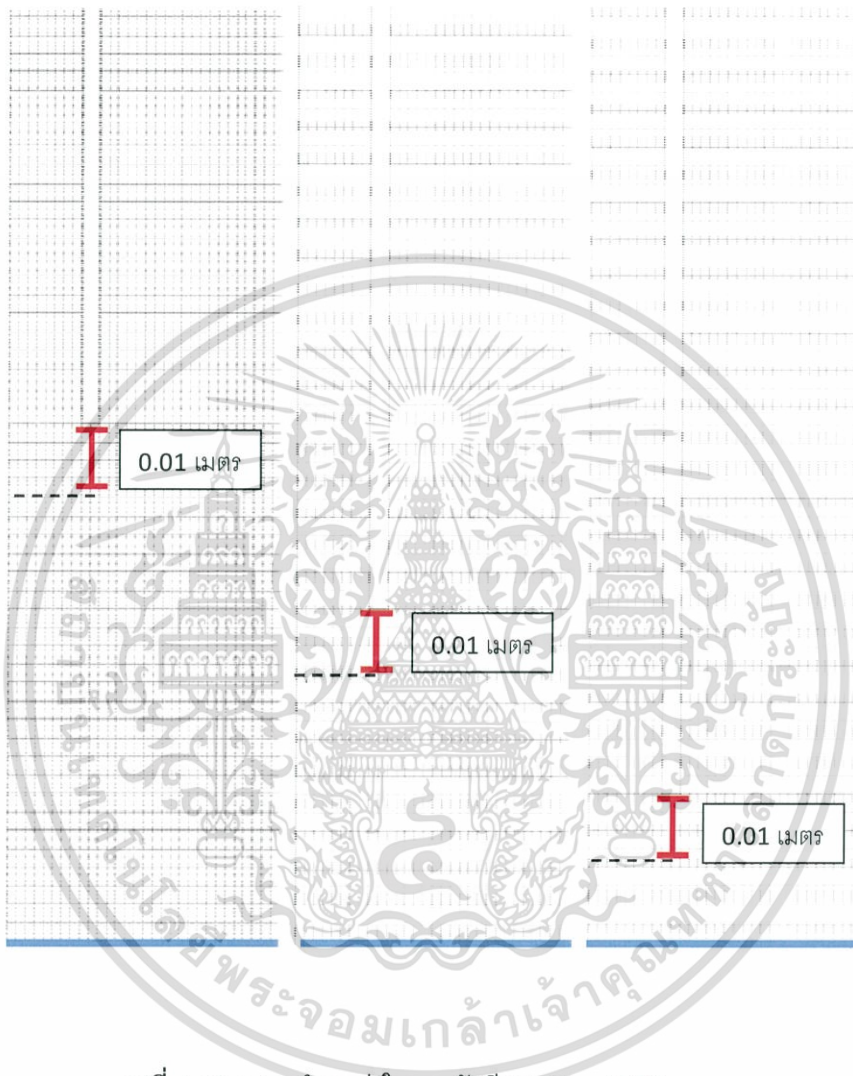
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวรัศมีก่อนปะทะกราฟต์ทิวป์ 0.01 เมตรกับความเร็วของอากาศในแนวแกน

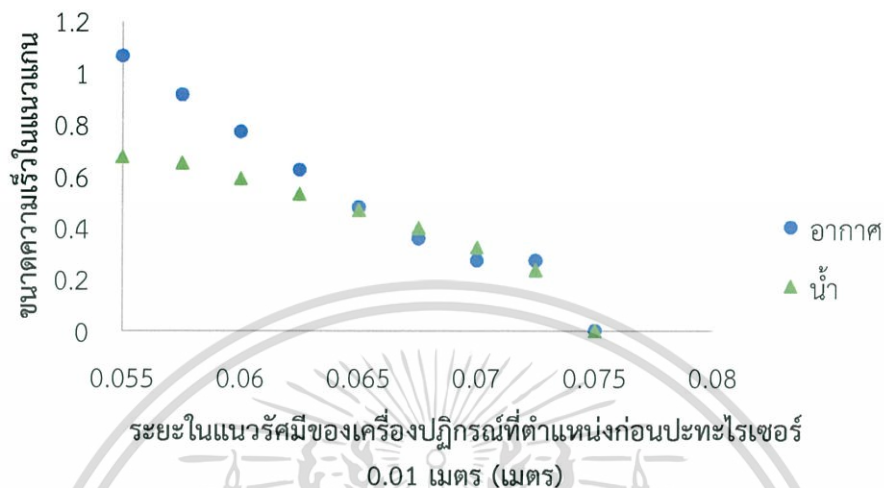
จากการสังเกตผลการจำลองที่ตำแหน่งก่อนปะทะกราฟต์ทิวป์ 0.01 เมตรดังรูป 4.18 ในทุกชุดการจำลองพบว่าในชุดการจำลอง C ซึ่งมีการแยกไหลของอากาศที่ดาว์คัมเมอร์ มีความเร็วที่บริเวณนี้ต่ำกว่าชุดการจำลองอื่นๆ ดังรูปที่ 4.17

และเมื่อนำผลการจำลองชุดต่างๆมาเปรียบเทียบความเร็วทั้งสองภูมิภาคที่ตำแหน่งที่ตรงกับดาว์คัมเมอร์ดังรูปที่ 4.19 และผลการจำลองดังรูป 4.20, 4.21 และ 4.22 ที่ 0.055 เมตร - 0.075 เมตรในแนวรัศมี

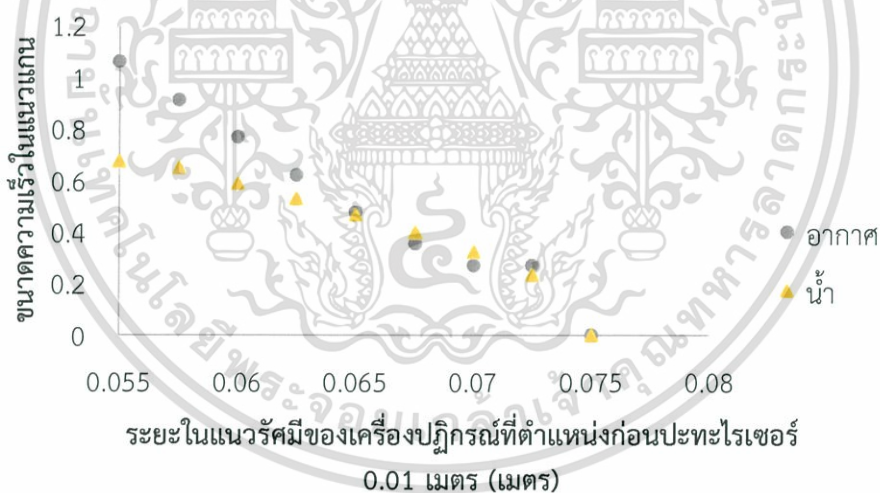


รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งในแนวรัศมี 0.055 – 0.075 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

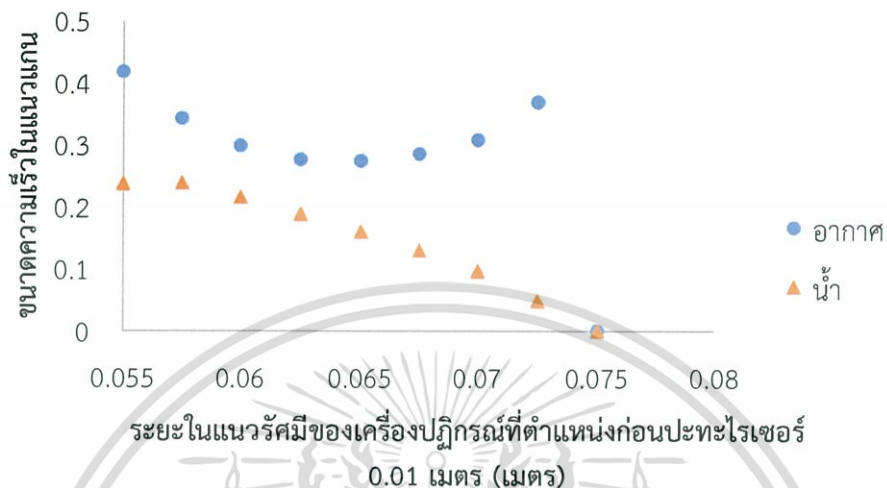


รูปที่ 4.20 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบความเร็วของทั้งสองวัสดุของชุดการจำลอง A



รูปที่ 4.21 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบความเร็วของทั้งสองวัสดุของชุดการจำลอง B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบความเร็วของทั้งสองวัฏภาคของชุดการจำลอง C

จะสังเกตเห็นได้ว่าในชุดการจำลอง A และ B ความเร็วของน้ำและอากาศที่บริเวณนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากเมื่อพิจารณาแรงดันในการเคลื่อนที่ (Dynamics Pressure) ของทั้งอากาศและน้ำจะพบว่า น้ำที่มีความหนาแน่นสูงกว่าแต่มีความเร็วใกล้เคียงกับอากาศจะแรงดันในการเคลื่อนที่สูงกว่าอากาศ ทำให้อากาศไม่สามารถไหลขึ้นไปในบริเวณดาวน์คัมเมอร์ได้ แต่ในชุดการทดลอง C จะสังเกตได้ว่าความเร็วของอากาศสูงกว่าน้ำทำให้แรงดันในการเคลื่อนที่ของน้ำมีค่ามากกว่าทำให้อากาศสามารถแยกไหลแทรกตัวขึ้นไปในบริเวณดาวน์คัมเมอร์ได้

การที่แก๊สเกิดการไหลแยกขึ้นในด้านดาวน์คัมเมอร์เนื่องในช่องการไหลของอากาศถูกบ่อนเข้ามาเต็มหน้าตัดและมีโพرفิลที่ยังพัฒนาไม่เต็มที่ทำให้ความเร็วของอากาศตลอดหน้าตัดมีค่าเท่ากันตลอดหน้าตัด ประกอบกับความเร็วของน้ำที่ไหลลงมาในด้านของดาวน์คัมเมอร์มีค่าน้อย ทำให้อากาศแรงดันในการเคลื่อนที่ ที่มากพอที่จะไหลสวนน้ำซึ่งไหลกลับลงมาในด้านดาวน์คัมเมอร์ได้ แต่ขณะเดียวกันในกรณีของชุดการจำลอง A และ B โพرفิลของอากาศถูกพัฒนาเต็มที่แล้ว ทำให้ความเร็วที่ตำแหน่งตรงกับดาวน์คัมเมอร์มีความเร็ว น้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วของอากาศในชุดการจำลอง C ทำให้อากาศมีแรงดันในการเคลื่อนที่ ไม่สูงพอที่จะสามารถแทรกตัวผ่านน้ำที่ไหลกลับลงมาด้วยความเร็วสูงกว่าในชุดการทดลอง C ในด้านดาวน์คัมเมอร์ได้ อากาศจึงไหลขึ้นไปในด้านของโรเตอร์แทน ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์จึงควรที่จะคำนึงถึงระยะเคลียร์เรนชโดยไม่ควรให้น้อยเกินไปจนทำให้เกิดแก๊สไหลสวนทางขึ้นไปในด้านดาวน์คัมเมอร์ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของแอร์ลิปท์ลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการจำลอง

#### 5.1 สรุปผลการจำลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการไหลและปริมาณแก๊สไฮโดรเจนภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเคลียร์แรนซ์หรือความเร็วซูเปอร์ฟิเซียล เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการศึกษาและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในอนาคต โดยในการศึกษาจะใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ (โปรแกรม FLUENT) ที่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็น Finite Volume ซึ่งรูปแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์และเงื่อนไขขอบเขตนั้นเป็นไปตามการทดลองของ van Baten และคณะ [4] โดยในการทดลองใช้ฟันทันแก๊สเข้ามีความเร็วแก๊สเข้าหรือความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลเป็น 0.04 0.06 0.08 0.10 และ 0.12 เมตรต่อวินาที เข้าไปภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่บรรจุด้วยน้ำ ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ คือ เมื่อมีการฟันทันแก๊สเข้ามาด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จะทำให้ฟันทันที่อยู่ด้านในของโรเตอร์ถูกดันขึ้นด้านไปตามแรงของแก๊สที่ฟันทันเข้ามาและฟันทันที่อยู่ภายในดาวนคัมเมอร์จะไหลเข้ามาแทนที่น้ำภายในโรเตอร์ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนภายในดาวนคัมเมอร์ สำหรับการคำนวณในระบบหลายวัฏภาคจะใช้แบบจำลองเป็น Multiphase-Eulerian และการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้แบบจำลอง Standard k-epsilon

การเปรียบเทียบผลการจำลองเทียบกับผลการทดลองอ้างอิง [4] โดยใช้จำนวนกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 27,602 เซลล์และเลือกแบบจำลองในการจำลองแบบหลายวัฏภาค Multiphase-Eulerian และเลือกแบบจำลองชนิด Standard k-epsilon มาคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ และทำการศึกษาอิทธิพลของสัมประสิทธิ์แรงต้านชนิดต่างๆ ซึ่งได้เลือกแบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เหมาะสมกับการไหลแบบหลายวัฏภาคมา 3 ชนิด พบว่าแบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ศึกษาเป็น Morsi-Alexander เนื่องจากแบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้านชนิดนี้สามารถคำนวณความเร็วในการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนได้แม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้าน Tomiyama และแบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้าน Schiller-Naumann เป็นผลมาจากสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Morsi-Alexander มีช่วงการใช้ค่าคงที่ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ ละเอียดมากกว่า

สัมประสิทธิ์แรงต้านแบบ Tomiyama และ Schiller-Naumann ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลอง Morsi-Alexander จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์

การศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงความหนาแน่นของกริดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงที่สูงและในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยจะใช้กริดที่มีขนาดหยาบเปรียบเทียบกับกริดที่ละเอียดสูงโดยให้ขนาดกริดมีขนาดเท่ากันตลอดทั้งโดเมนโดยที่จำนวนของกริดของทั้งสองกรณีมีจำนวนเท่ากับที่ 27,602 เซลล์ พบว่าการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ในกรณีที่กริดมีความละเอียดสูงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลที่สูงมีผลการจำลองที่ใกล้เคียงกันมากกับการจำลองที่มีขนาดกริดเท่ากันตลอดทั้งโดเมน นอกจากนี้ในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่กริดมีความละเอียดสูงในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงยังทำให้การจำลองมีเสถียรภาพต่ำและใช้เวลาในการจำลองนานกว่าแบบที่กริดมีขนาดเท่ากันตลอดทั้งโดเมน ดังนั้นการเลือกใช้โดเมนที่มีขนาดกริดเท่ากันตลอดทั้งโดเมนจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เนื่องจากมีความเสถียรมากกว่าและใช้เวลาในการจำลองที่น้อยกว่า

อิทธิพลของการปรับระยะเคลียร์เรนซ์ จากการจำลอง เมื่อมีการเพิ่มระยะเคลียร์เรนซ์ พบว่าลักษณะการไหลของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับกับระยะเคลียร์เรนซ์ตามงานวิจัยที่อ้างอิง แต่เมื่อทำการลดขนาดเคลียร์เรนซ์ลงมา พบว่าลักษณะการไหลของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ แก๊สขาเข้าที่ไหลเข้ามีการแยกไหลเข้าไปภายในดาวนคัมเมอร์ เนื่องจากเมื่อมีการปรับระยะเคลียร์เรนซ์ลดความเร็วแก๊สขาเข้าจะมีความมากกว่าแก๊สที่ระยะเคลียร์เรนซ์สูง ทำให้ความเร็วของแก๊สมีความมากกว่าความเร็วของของเหลวที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ ส่งผลให้ความดันของการเคลื่อนของแก๊สมีความมากกว่าของเหลวและโดยทั่วไปของไหลจะมีการเคลื่อนที่จากความดันที่สูงไปที่ความดันต่ำทำให้แก๊สขาเข้าสามารถแทรกตัวเข้าไปในดาวนคัมเมอร์ เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้เกิดวัตถุประสงค์ของการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ที่ต้องการให้แก๊สไหลเข้าไปในโรเตอร์เพื่อที่จะทำให้ของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์เกิดการไหลแบบหมุนวน ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์จะมีระยะของเคลียร์เรนซ์ที่เหมาะสม ดังนั้นก่อนที่จะออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิฟท์ควรที่จะศึกษาระยะของเคลียร์เรนซ์ที่เหมาะสมเพื่อจะป้องกันการเกิดการไหลแยกของวัฏภาคแก๊สเข้าไปภายในดาวนคัมเมอร์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการจำลอง สามารถศึกษาหาระยะเคลียร์แรนซ์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลของวัฏภาคแก๊ส ที่มีการแยกไหลเข้าไปภายในดาวนัมเมอร์ หรือระยะเคลียร์แรนซ์วิกฤต ในการทดลองนี้เป็นเพียงการศึกษาระยะของเคลียร์แรนซ์สูงและต่ำที่มีผลต่อการไหลเท่านั้น ไม่ได้หาระยะวิกฤต เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเวลาในการทำวิจัย
2. งานวิจัยสามารถนำไปศึกษาต่อยอดในเรื่องอื่นๆได้ เช่น การจำลองเพื่อศึกษาขนาดฟองและจำนวนฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ การถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สและของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรมต่อไปได้อย่างกว้างขวาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] William B. Zimmerman, Buddhika N. Hewakandamby, Václav Tesař , and H.C. Hemaka Bandulasena, Olumuyiwa. Omotowaa, “On the design and simulation of an airlift loop bioreactor with microbubble generation by fluidic oscillation,” Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK, food and bioproducts processing 8 7 ( 2 0 0 9 ) 215–227.
- [2] M.Y.Chisti, M.Moo-Young, “Gas Holdup in Pneumatic Reactor,” Department of Chemical Engineering, University Of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1 (Canada), The Chemical Engineering Journal, 38 (1998) 149 - 152, 1987.
- [3] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ, **พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**, vol. 2556. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. สาขาวิศวกรรมเคมี.
- [4] J.M. van Baten, J. Ellenberger, R. Krishna, “Hydrodynamics of internal air-lift reactors: experiments versus CFD simulations,” Department of Chemical Engineering, University of Amsterdam, Nieuwe Achtergracht 166, 1018 WV Amsterdam, The Netherlands, Chemical Engineering and Processing 42 (2003) 733/742.
- [5] H. K. Versteeg, W. Malalasekela, *An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method*. Longman Scientific & Technical.
- [6] ANSYS, Inc., *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. 2009.
- [7] M. Blažej, G.M. Cartland Glover, S.C. Generalis, J. Markoš, “Gas-liquid simulation of an airlift bubble column reactor,” Department of Chemical and Biochemical Engineering, Faculty of Chemical and Food Technology, Slovak Technical University, Radlinského 9, Bratislava 812 37, Slovak Republic, Chemical Engineering and Processing 43 (2004) 137–144.
- [8] W.A.J. van Benthum, R.G.J.M. van der Lans, M.C.M. van Loosdrecht, J.J. Heijnen, “Bubble recirculation regimes in an internal-loop airlift reactor,” Delft University of

Technology, Kluwer Institute for Biotechnology, Julianalaan 67, 2628 BC Delft, Netherlands, Chemical Engineering Science 54 (1999) 3995-4006, 1999.

[9] Tingting Xua, Xuedong Jianga, Ning Yanga, Jiahua Zhu, "CFD simulation of internal-loop airlift reactor using EMMS drag model," State Key Laboratory of Multi-Phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China, Particuology 19 (2015) 124-132, 2014.

[10] M. Y. Chisti, M. Moo-Young, "Airlift Reactor: Characteristics, Application and Design Considerations," Department of Chemical Engineering University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1, Chem. Eng. Comm. 1987, vol 60, pp. 195-242, 1987.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### ตัวอย่างการคำนวณความเร็วซูเปอร์ฟิเซียล

เครื่องปฏิกรณ์แอร์ลิปท์จะป้อนอากาศบริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์โดยการกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลด้วยความเร็วในโรเตอร์ ซึ่งในการจำลองจะต้องกำหนดสถานะขอบเขตที่บริเวณขาเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

กำหนดให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าเท่ากันตลอดการไหล และความหนาแน่นของอากาศมีค่าคงที่


$$\begin{aligned} m_{\text{Inlet}} &= m_{\text{Riser}} \\ \rho_{\text{air}} \times V_{\text{air @ inlet}} \times A_{\text{Inlet}} &= \rho_{\text{air}} \times V_{\text{air @ riser}} \times A_{\text{Riser}} \\ V_{\text{air @ inlet}} &= \frac{V_{\text{air @ riser}} \times A_{\text{Riser}}}{A_{\text{Inlet}}} \\ V_{\text{air @ inlet}} &= \frac{V_{\text{air @ riser}} \times \pi r_{\text{Riser}}^2}{\pi r_{\text{Inlet}}^2} \\ V_{\text{air @ inlet}} &= \frac{V_{\text{air @ riser}} \times r_{\text{Riser}}^2}{r_{\text{Inlet}}^2} \\ V_{\text{air @ inlet}} &= \frac{0.04 \text{ m/s} \times 0.05^2 \text{ m}^2}{0.075^2 \text{ m}^2} \\ V_{\text{air @ inlet}} &= 0.01778 \text{ m/s} \end{aligned}$$

และความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตารางที่ 1ก.

ตารางที่ 1ก. แสดงความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเซอร์และความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลขาเข้า

ความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลในโรเซอร์ (เมตร/วินาที)	ความเร็วซูเปอร์ฟิเซียลขาเข้า (เมตร/วินาที)
0.04	0.01778
0.06	0.02667
0.08	0.03556
0.1	0.04444
0.12	0.05333



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้าง ด้วยโปรแกรม Gambit

1.สร้างจุดโดยการเลือก Operation → Geometry → Vertex → From Coordinate จากนั้นทำการระบุตำแหน่งตามตารางที่

ตารางที่ 1ข. พิกัดของ Vertex ที่ตำแหน่งต่างๆ

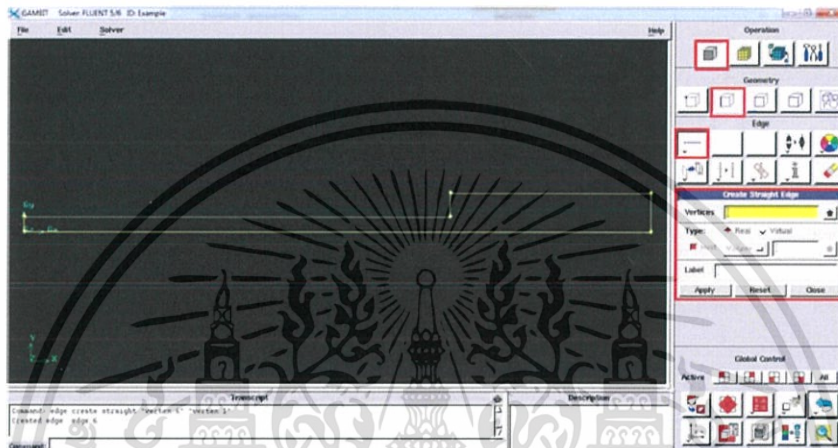
Vertex	Position (X,Y,Z)
1	(0,0,0)
2	(0,0.075,0)
3	(2.08,0.075,0)
4	(0.19,2.08,0)
5	(0.19,3.06,0)
6	(0,3.06,0)



รูปที่ 1ข. แสดงการสร้างจุดในโปรแกรม Gambit

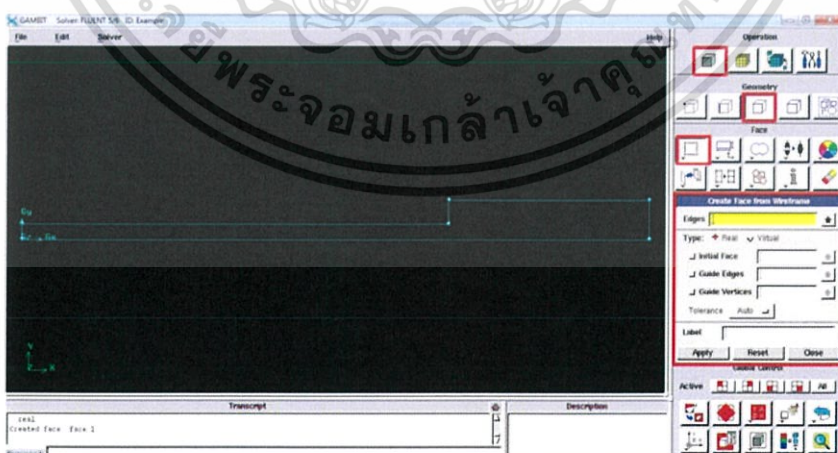
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.สร้างเส้นเชื่อมระหว่าง Vertex โดยการเลือก Operation → Geometry → Edge → Straight คลิกเลือก Vertex ทั้งหมด



รูปที่ 2ข. แสดงการสร้างเส้นจากจุดในโปรแกรม Gambit

3.เปลี่ยนจากเส้น (Edge) เป็นระนาบ (Face) โดยการเลือก Operation → Geometry → Face → Wire Frame



รูปที่ 3ข. แสดงการสร้างระนาบจากเส้นในโปรแกรม Gambit

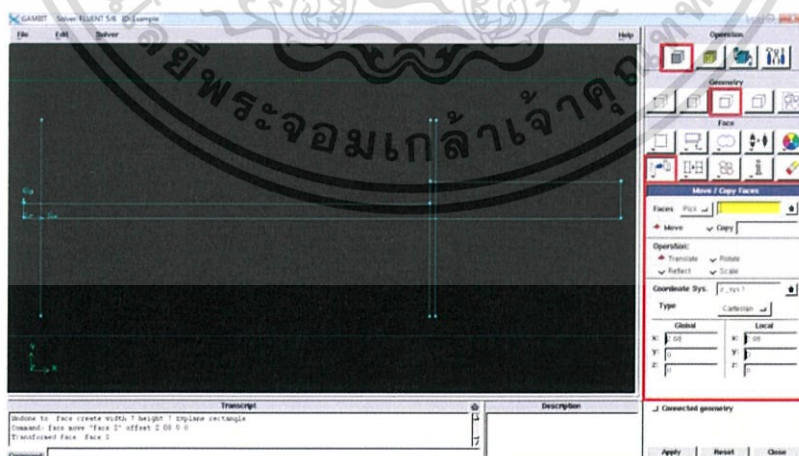
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.สร้างระนาบในระนาบ YZ โดยการเลือก Operation → Geometry → Face → Rectangle → กำหนดขนาด Width =1 Height =1 → Direction → YZ centered



รูปที่ 4ข. แสดงการสร้างระนาบในแนวแกน YZ ในโปรแกรม Gambit

5.คัดลอกระนาบไปที่ตำแหน่ง  $x=0.09, 2.08, 2.11$  เมตร ตามลำดับ โดยการเลือก Operation → Geometry → Face → Move/Copy → เลือก Copy → เลือก Translate → กำหนด  $X=0.09, 2.08, 2.11$  ตามลำดับ



รูปที่ 5ข. แสดงการคัดลอกระนาบในแนวแกน YZ ในโปรแกรม Gambit

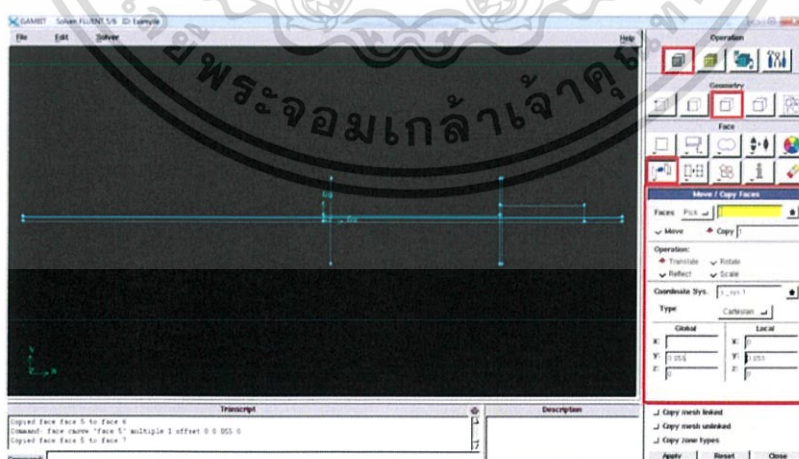
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.สร้างระนาบในระนาบ ZX โดยการเลือก Operation → Geometry → Face → Rectangle → กำหนดขนาด Width =7 Height =7 → Direction → ZX centered



รูปที่ 6ข. แสดงการสร้างระนาบในแนวแกน ZX ในโปรแกรม Gambit

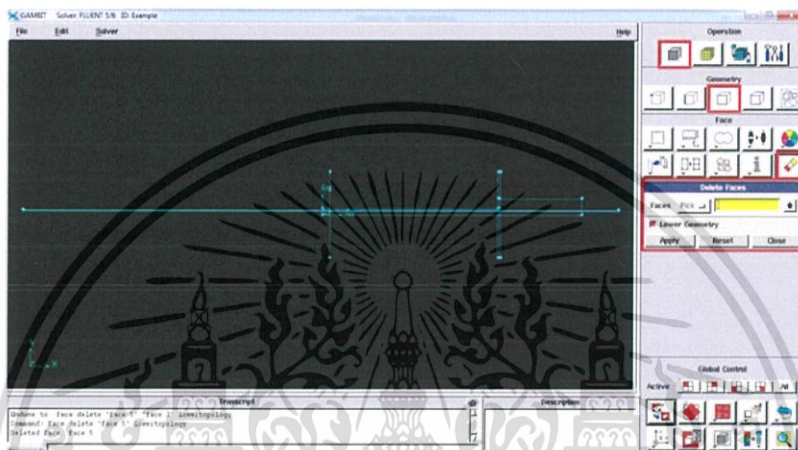
7.คัดลอกระนาบไปที่ตำแหน่ง  $x=0.05, 0.055$  เมตร ตามลำดับ โดยการเลือก Operation → Geometry → Face → Move/Copy → เลือก Copy → เลือก Translate → กำหนด  $Y=0.05, 0.055$  ตามลำดับ



รูปที่ 7ข. แสดงการคัดลอกระนาบในแนวแกน ZX ในโปรแกรม Gambit

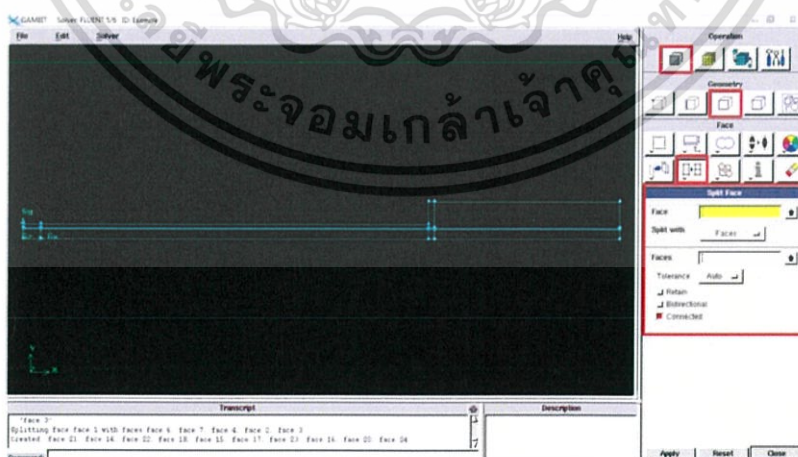
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.ลบระนาบที่ไม่ต้องการออก โดยการเลือก Operation → Geometry → Face → Delete Face → เลือกลบระนาบที่สร้างขึ้นในข้อ 4 และ ข้อ 6



รูปที่ 8ข. แสดงการลบระนาบในโปรแกรม Gambit

9.ทำการแบ่งโดเมนหลักออกเป็นส่วนๆโดยการเลือก Operation → Geometry → Face → Split Face → เลือกโดเมนหลัก → Split with = Face → เลือก Face จากระนาบที่สร้างในข้อที่ 5 และ 7 ตามลำดับ

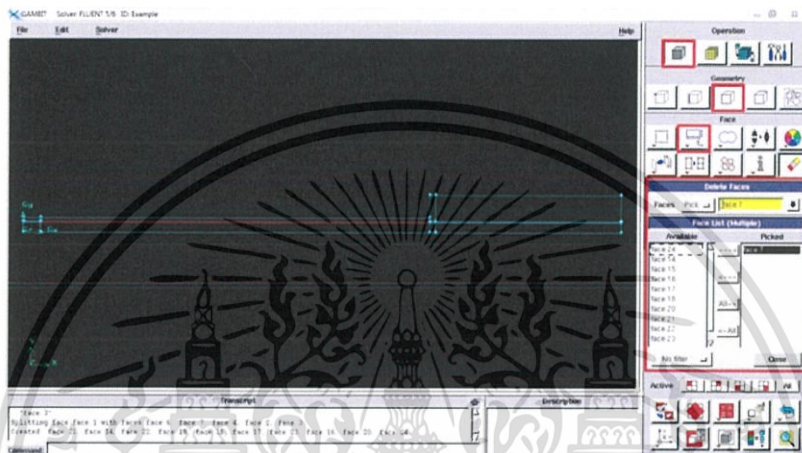


รูปที่ 9ข. แสดงการแบ่งระนาบในโปรแกรม Gambit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.ลบระนาบที่เป็นส่วนของกราฟต์ทิวบ์ออกไปโดยการเลือก

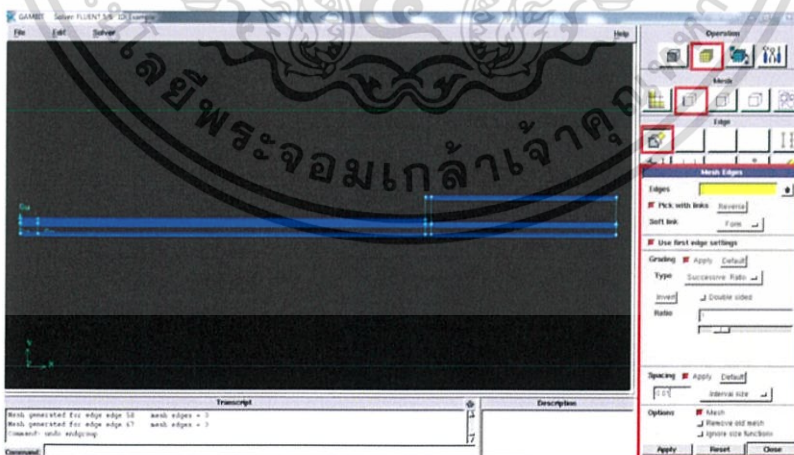
Operation → Geometry → Face → Delete Face → เลือกระนาบส่วนของกราฟต์ทิวบ์



รูปที่ 10ข แสดงการลบระนาบในโปรแกรม Gambit

11.สร้างกริดบนเส้นในทิศทาง X ให้มีปริมาณกริด 0.01 เมตร/กริด โดยการเลือก

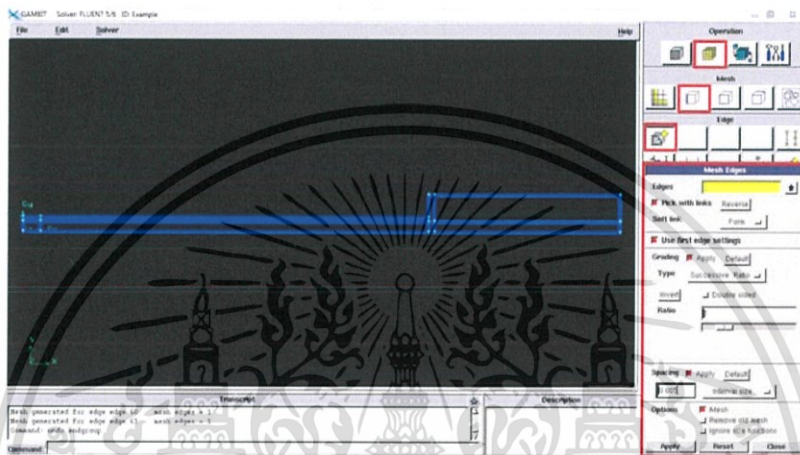
Operation → Mesh → Mesh Edge → กำหนด Interval size = 0.01



รูปที่ 11ข. แสดงการสร้างกริดเชิงเส้นในแนวแกน X ในโปรแกรม Gambit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.สร้างกริดบนเส้นในทิศทาง Y ให้มีปริมาณกริด 0.005 เมตร/กริด โดยการเลือก Operation → Mesh → Mesh Edge → กำหนด Interval size = 0.005



รูปที่ 12ข. แสดงการสร้างกริดเชิงเส้นในแนวแกน Y ในโปรแกรม Gambit

13.สร้างกริดบนระนาบทั้งหมดโดยการเลือก Operation → Mesh → Mesh Faces → กำหนด Element เป็น Quad และ กำหนด Type เป็น Map



รูปที่ 13ข. แสดงการสร้างกริดบนระนาบในโปรแกรม Gambit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14.กำหนดตำแหน่งของสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) โดยการเลือก Operation → Zones → Specify Boundary Type โดยการกำหนดชื่อและชนิดของสภาวะขอบเขตดังตารางที่ 2ข.

ตารางที่ 2ข. แสดงสภาวะขอบเขตและชนิดของสภาวะขอบเขต

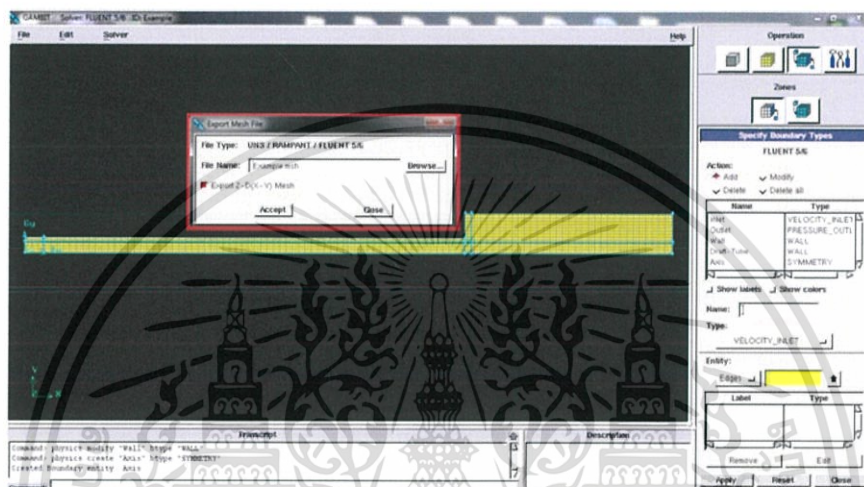
ชื่อสภาวะขอบเขต	ชนิดสภาวะขอบเขต
Inlet	VELOCITY_INLET
Outlet	PRESSURE_OUTLET
Wall	WALL
Draft-tube	WALL
Axis	SYMMETRY



รูปที่ 14ข. แสดงการกำหนดสภาวะขอบเขตในโปรแกรม Gambit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. นำออกไฟล์กริดโดยเลือก File → Export → Mesh → เลือก Export 2-D(X-Y) Mesh → ตั้งชื่อและเลือก Browse... เพื่อกำหนดตำแหน่งของไฟล์กริด



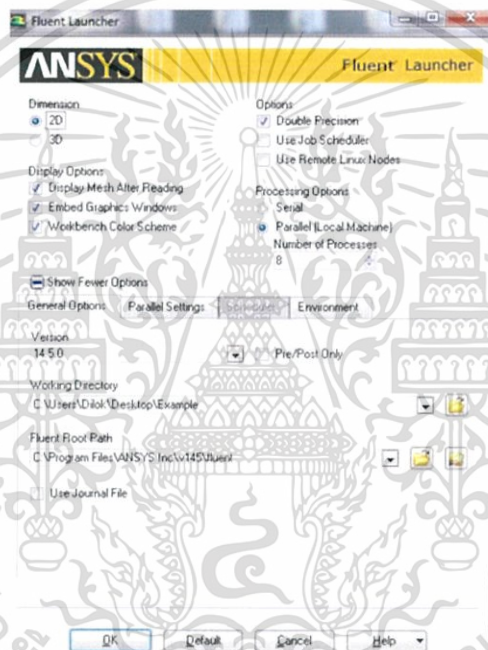
รูปที่ 15ข. แสดงส่งออกไฟล์กริดในโปรแกรม Gambit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

### ตัวอย่างการใช้โปรแกรม Fluent

1.เปิดโปรแกรม Fluent → เลือก Dimension เป็น 2D → เลือก Working Directory เป็นตำแหน่งเพื่อจัดเก็บข้อมูล



รูปที่ 1ค. แสดงการเปิดโปรแกรม Fluent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.เปิดไฟล์เพื่อนำเข้ากริดที่ผ่านการออกแบบจากโปรแกรม Gambit โดยเลือก File → Read → Mesh → เลือกไฟล์นามสกุล.msh → OK

3.เมื่อเปิดไฟล์กริดสำเร็จ จะเริ่มตั้งค่าโดยเลือก General → Solver → เลือกTime=Transient, 2D Space =Axisymmetric → เลือก Gravity → Gravitational Acceleration ในแนวแกน X ( $m/s^2$ ) = 9.81

4.จากนั้นกำหนดแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาคโดยเลือก Models → Multiphase → Model = Eulerian, Scheme = Implicit

5.กำหนดแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนโดยเลือก Model → Viscous → Model=k-epsilon → Turbulence Multiphase Model = Dispersed

6.กำหนดสารที่ใช้ในการจำลองโดย Material → Create/Edit... → Fluent Database... → ค้นหา water-liquid (h2o<l>) → เลือกCopy → เลือกClose → เลือก Change/Create → เลือก Close จะปรากฏ water-liquid อยู่ในรายชื่อของ Fluid

7.กำหนดวัฏภาคปฐมภูมิและทุติยภูมิโดยเลือก Phases → Phase-1-Primary Phase → กำหนดPhase Material เป็น water-liquid พร้อมกำหนดชื่อ → Phase-2-Secondary Phase → กำหนดPhase Material เป็น air พร้อมกำหนดชื่อ → กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัฏภาคทุติยภูมิ 0.005 m

8.กำหนดอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค (Interaction) โดยเลือกPhase → Interaction → Phase → Drag เลือก Morsi-Alexander → Surface Tension กำหนด Surface Tension =0.073 N/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 9. กำหนดสภาวะขอบเขต

- Axis : Boundary Conditions → Axis → เลือกเปลี่ยน Type จาก Symmetry เป็น Axis
- Inlet : Boundary Conditions → Phase →
  - water → Edit → Momentum → กำหนด Turbulent Intensity(%) = 5, Hydraulic Diameter(m)=0.15
  - air → Edit → Momentum → กำหนด Velocity Magnitude (m/s) = 0.02667 → Multiphase → กำหนด Volume Fraction = 1
- Outlet : Boundary Conditions
  - water → Edit → Momentum → กำหนด Turbulent Intensity(%) = 5, Hydraulic Diameter(m)=0.38
  - air → Edit → Multiphase → กำหนด Backflow Volume Fraction = 1

10. กำหนด Solution Control ในกรณีที่ Solution เกิดการลู่ออก (diverge) โดยการลด Solution Control → Under-Relaxation Factors → โดยการลดค่า Turbulent Viscosity ในช่วง 0.1-1, Volume Fraction ในช่วง 0.1-0.2, Momentum ในช่วง 0.1-0.3

11. กำหนด Solution Initialization โดย Solution Initialization → Initialize ระบบจะบ่อนค่าเริ่มต้นในการคำนวณ

12. การกำหนดค่าเริ่มต้นภายในโดเมนโดยการเลือก Adapt → Region → Region Adaption → จากนั้นกำหนดขอบเขตภายในโดเมนที่ต้องการกำหนดค่าเริ่มต้นดังตารางที่ 1ค.

ตารางที่ 1ค. แสดงการกำหนดขอบเขตภายในโดเมน

ลำดับที่	X	Y	ขอบเขต
1.	Xmin =0.09 Xmax =2.11	Ymin =0 Ymax =0.05	ไรเซอร์
2.	Xmin =0.09 Xmax =2.11	Ymin =0.055 Ymax =0.075	ดาวนัคัมเมอร์
3.	Xmin =2.5 Xmax =3.06	Ymin =0 Ymax =0.19	ขอบเขตของน้ำ

จากนั้นจะป้อนค่าเริ่มต้นที่กำหนดลงในขอบเขตที่ได้สร้างขึ้นโดย Solution Initialization → Patch. ดังตารางที่ 2ค.

ตารางที่ 2ค. แสดงค่าเริ่มต้นที่กำหนดลงในขอบเขต

Register to Patch	Phase	Value
hexahedron-r0	water	Axial Velocity = 0.05
hexahedron-r0	air	Axial Velocity = 0.05
hexahedron-r0	air	Volume Fraction = 0.1
hexahedron-r1	water	Axial Velocity = -0.05
hexahedron-r2	air	Volume Fraction = 1

ผลจากการกำหนดค่าเริ่มต้นสามารถตรวจสอบโดย Graphic and Animations → Contours → โดยเลือก Contour ของ Axial Velocity และ Volume Fraction ของแต่ละภูมิภาคดังรูป (หมายเหตุ : การกำหนดค่าเริ่มต้นของโดเมนเพื่อให้การคำนวณลู่เข้าได้เร็วมากขึ้นและยังสามารถหลีกเลี่ยงการลู่ออกได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. จากนั้นเริ่มการคำนวณโดย Run calculation → กำหนด Time step size และ Number of Time step ดังตารางที่ → Calculate

ตารางที่ 3ค. แสดงการกำหนด Time step size และ Number of Time

ลำดับที่	Time step size	Number of Time step
1	0.00005	100
2	0.00004	100
3	0.0005	100
4	0.001	100
5	0.003	200
6	0.005	1400
7	0.01	1000

โดยต้องทำการคำนวณทุกๆ Time Step ตามลำดับ โดยระหว่างการคำนวณจะแสดงผลดังรูป (หมายเหตุ : เนื่องจากการคำนวณการไหลแบบหลายภูมิภาคมีความซับซ้อนของการคำนวณจึงต้องกำหนดกลวิธีในการคำนวณข้างต้นเพื่อป้องกันการลู่ออกของการคำนวณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. การเก็บผลการจำลองหลังจากการคำนวณสิ้นสุด โดยอันดับแรกจะต้องสร้างเส้นเพื่อเก็บข้อมูลในบริเวณที่สนใจก่อนโดยเลือก Surface → Line/Rake... → กำหนดเส้นบนโรเซอร์ที่ตำแหน่งความสูง 1.75 เมตร ที่  $x_0 = x_1 = 1.75$ ,  $y_0 = 0$ ,  $y_1 = 0.05$ ... → กำหนดเส้นบนดาวนัคัมเมอร์ที่ตำแหน่งความสูง 1.75 เมตร ที่  $x_0 = x_1 = 1.75$ ,  $y_0 = 0.055$ ,  $y_1 = 0.075$

จากนั้นเก็บผลการจำลองโดยเลือก Result → Report → Surface Integrals → กำหนด Report type เป็น Area-Weighted Average → เลือก Field Variable เป็น Velocity... → Axial Velocity → Phase-water → เลือกชื่อเส้นที่ได้กำหนดไว้เพื่อแสดงผลการจำลอง

หรือผลแก๊สโฮลล์โดยเลือก เลือก Field Variable เป็น Phase... → Volume fraction → Phase-water → เลือกชื่อเส้นที่ได้กำหนดไว้เพื่อแสดงผลการจำลอง

หากต้องการแสดงผลการจำลองด้วย Contours โดยเลือก Graphics and Animation → Graphics → Contours → หลังจากนั้นเลือกตัวแปรที่ต้องการให้แสดงผล

15. การ Save ข้อมูลการจำลองโดยเลือก File → Write → Case&Data → กำหนดชื่อไฟล์และป้อนนามสกุลไฟล์เป็น “.gz” จากนั้นเลือกที่จัดเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้