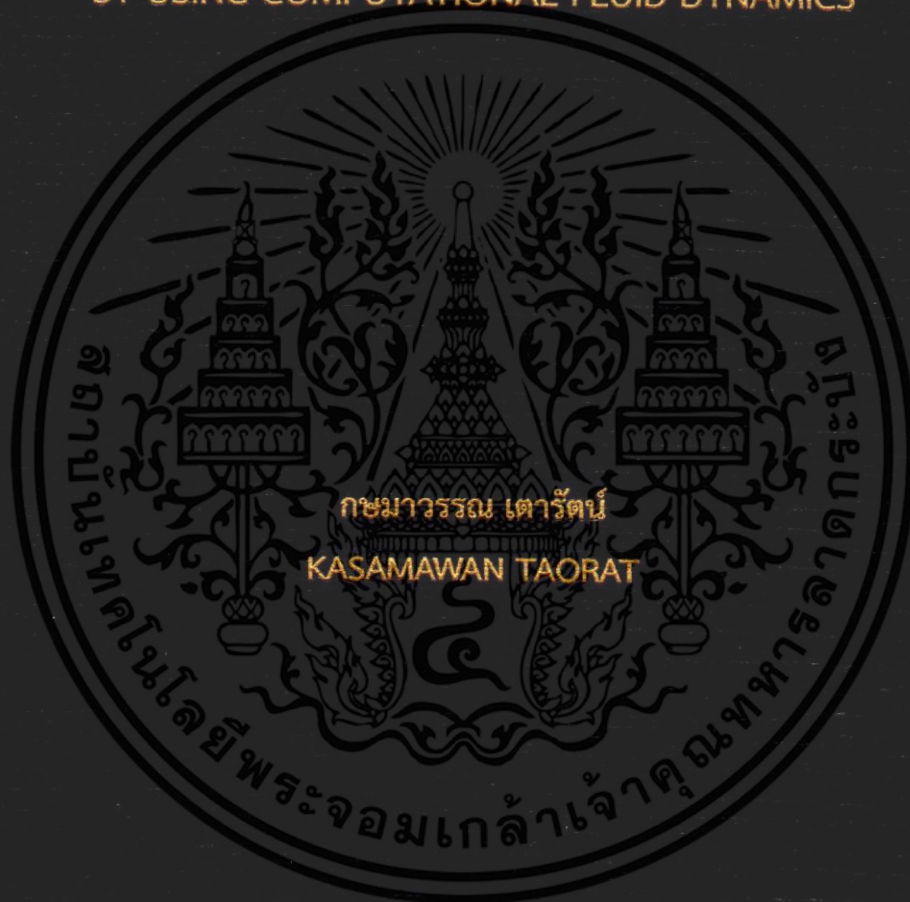


การศึกษาการกระจายตัวของเบดในฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีวงแหวนภายใน
โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

A STUDY OF BED DISTRIBUTION IN FLUIDIZED BED WITH INNER RINGS
BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-057

การศึกษาการกระจายตัวของเบดในฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีวงแหวนภายใน
โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

A STUDY OF BED DISTRIBUTION IN FLUIDIZED BED WITH INNER RINGS
BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



กษมาวรรณ เตารัตน์
KASAMAWAN TAORAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-M-220-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF BED DISTRIBUTION IN FLUIDIZED BED WITH INNER RINGS
BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMUTL-2016-EN-M-220-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการกระจายตัวของเบดในฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีวงแหวนภายในโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
Thesis Title A Study of Bed Distribution in Fluidized Bed with Inner Rings by Using Computational Fluid Dynamics
นักศึกษา นางสาวกษมาวรรณ เตารัตน์
รหัสประจำตัว 54612052
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-057

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้าง คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ การนำไปใช้

วันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการกระจายตัวของเบตในฟลูอิดไดซ์เบตแบบมีวงแหวนภายในโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
นักศึกษา	นางสาวกษมาวรรณ เตารัตน์
รหัสนักศึกษา	54612052
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตที่มีของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ 2 สถานะ คือ แก๊สและของแข็ง โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายพฤติกรรมการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ การศึกษาการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์กระทำโดยการติดตั้งวงแหวนภายในเครื่องปฏิกรณ์ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความสูง ความกว้างของวงแหวน และจำนวนวงแหวน การทดสอบแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์ ใช้แบบจำลองสำหรับของไหลหลายเฟสชนิดออยเลอร์ ผลสมผสานกับทฤษฎีจลน์สำหรับของอนุภาค สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมใช้ฟังก์ชัน Syamtal-O'Brien ความถูกต้องของแบบจำลองมีการทดสอบโดยศึกษาจำนวนกริดและจำนวนรอบการคำนวณซ้ำ แบบจำลองที่เหมาะสมถูกนำมาใช้ศึกษาผลของการติดตั้งวงแหวนที่มีต่อการกระจายตัวของเบต ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งวงแหวนส่งผลให้การกระจายตัวของเบตดีขึ้น การติดตั้งวงแหวนที่มีขนาดความสูง ความกว้างของวงแหวนที่ส่งผลให้การกระจายตัวของเบตดีที่สุด สามารถแสดงในทอมไร์หน่วยมีค่าเท่ากับ 0.125 และ 0.4 ตามลำดับ จำนวนการติดตั้งวงแหวนที่เหมาะสมคือ 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Study of Bed Distribution in Fluidized Bed with Inner Rings by using Computational Fluid Dynamics
Student	Miss Kasamawan Taorat
Student ID.	54612052
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

ABSTRACT

This thesis aims to study bed distributions in gas-solid fluidized bed reactor by using the computational fluid dynamics (CFD) to predict the model of fluid flow behavior in fluidized bed reactor. The bed distribution was studied by installing rings around fluidized reactor. The influence of ring size and number of ring installed on bed distribution were investigated. A simulation of gas-solid flow was investigated by using the multi-fluid phase Eulerian model incorporating with the kinetic theory of granular flow. The Syamlal-O'Brien drag function was used for calculation the momentum exchange coefficients. The simulation model was characterized by varying the number of grids and iterations. The optimization model was used for study of influence of ring installation on bed distribution. The results showed that the reactor with ring installation had a good bed distribution than reactor without ring installation. The optimization of ring installation including height and width of ring were expressed in dimensionless term as 0.125 and 0.4, respectively. The number of 4 rings installation was the best for bed distribution.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์ ที่มอบความรู้ และคำชี้แนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย อีกทั้งคอยให้คำปรึกษาตลอดการดำเนินงานจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย อีกทั้งให้คำแนะนำในการปรับปรุงรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางวิชาการแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่คอยให้การช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานหรืออำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ เป็นอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลอง และแนะนำวิธีการใช้โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ส่งเสริมผู้วิจัยทางการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ผู้วิจัยจะไม่สามารถสำเร็จการศึกษาได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งเสมอมา ตลอดจนกำลังใจและคำปรึกษายามทุกข์ ยามสุข จนทำให้ผู้วิจัยก้าวผ่านปัญหาต่างๆ มาได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและกราบขออภัยมา ณ ที่นี้

กษมาวรรณ เตารัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed reactor).....	4
2.1.1 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เบด.....	4
2.1.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	4
2.1.3 ปัจจัยการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด.....	5
2.1.4 สมการของ Ergun ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด.....	6
2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงค่านวณ.....	9
2.2.1 หลักการทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงค่านวณ.....	9
2.2.2 สมการควบคุม (governing equations).....	10
2.2.3 แบบจำลองฟังก์ชันลาก Syamlal-O'brien.....	12
2.2.4 ทฤษฎีจลนการไหลของอนุภาคของแข็ง (kinetic theory of granular flow).....	13
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	
3.1 การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Gambit 2.4.6.....	20
3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบไม่มีวงแหวนที่อ้างอิงจากงานวิจัย.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และด้วย IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบด (มีวงแหวน).....	21
3.2 การคำนวณแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Fluent 14.5	23
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดสอบแบบจำลอง.....	25
4.1.1 ผลของจำนวนกริดที่มีต่อค่าความดันลดของแบบจำลอง เมื่อเทียบกับผลการทดลอง	25
4.1.2 ผลของจำนวนการคำนวณซ้ำที่มีต่อค่าความดันลดของแบบจำลอง เมื่อเทียบกับผลการทดลอง	26
4.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของเบด	28
4.2.1 ผลของความสูงของวงแหวนที่มีต่อการกระจายตัวของเบด.....	28
4.2.2 ผลของความกว้างของวงแหวนที่มีต่อการกระจายตัวของเบด.....	32
4.2.3 ผลของจำนวนวงแหวนที่มีต่อการกระจายตัวของเบด.....	34
4.2.4 ความสำคัญของความสูงของวงแหวน ความกว้างของวงแหวน และจำนวนวงแหวนที่มีต่อความดันตกคร่อมของเครื่องปฏิกรณ์.....	39
4.2.5 สรุปค่าตัวแปรไร้มิติหน่วยของการติดตั้งวงแหวนที่เหมาะสมต่อ การกระจายตัวของเบด.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	45
ภาคผนวก ก. การคำนวณ	46
ก.1 การคำนวณตำแหน่งติดตั้งวงแหวน.....	46
ก.2 การคำนวณค่าเทอมไร้มิติ	47
ภาคผนวก ข. ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง	48
ประวัติผู้เขียน	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดตัวแปรที่ศึกษาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง21
ตารางที่ 3.2	รายละเอียดตัวแปรที่ศึกษาเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบต22
ตารางที่ 3.3	ค่าพารามิเตอร์สำหรับกำหนดค่าในโปรแกรมการคำนวณ24
ตารางที่ 4.1	ความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์ของแบบจำลองที่ใช้ศึกษา การกระจายตัวของเบต31
ตารางที่ 4.2	ตัวแปรในเทอมไร้นหน่วย40
ตารางที่ ข.1	ความดันลดของเบตในเครื่องปฏิกรณ์สำหรับขั้นตอนการทดสอบแบบจำลอง.....48
ตารางที่ ข.2	สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งที่แสดงในกราฟ LCR49
ตารางที่ ข.2.1	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีการติดตั้งวงแหวน.....49
ตารางที่ ข.2.2	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 1 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร50
ตารางที่ ข.2.3	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 2 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร51
ตารางที่ ข.2.4	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.028 และ 0.0125 เมตร52
ตารางที่ ข.2.5	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.028 และ 0.025 เมตร53
ตารางที่ ข.2.6	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.028 และ 0.05 เมตร54
ตารางที่ ข.2.7	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.014 และ 0.05 เมตร.....55
ตารางที่ ข.2.8	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร56
ตารางที่ ข.2.9	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 4 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร57
ตารางที่ ข.2.10	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 5 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร58
ตารางที่ ข.3	ความดันลดของเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับการพิจารณาความสำคัญ ของตัวแปรที่ศึกษา.....59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์ชั้น.....5
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมกับความเร็วของของไหล ต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด8
รูปที่ 3.1	รูปแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่อ้างอิงจากงานวิจัยแบบไม่มีวงแหวน [1].....21
รูปที่ 3.2	โครงสร้าง 2 มติ ของเครื่องปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษา การกระจายตัวของเบด (มีวงแหวน).....22
รูปที่ 4.1	ผลของจำนวนกริดที่มีต่อค่าความดันลดเมื่อเทียบกับผลการทดลอง.....27
รูปที่ 4.2	ผลของจำนวนการคำนวณซ้ำที่มีต่อค่าความดันลด เมื่อเทียบกับผลการทดลอง.....27
รูปที่ 4.3	บริเวณที่เก็บข้อมูลเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบด (ก) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งวงแหวน และ (ข) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งวงแหวน.....28
รูปที่ 4.4	กราฟ CLR แสดงการกระจายตัวของเบด (ก) ไม่มีวงแหวน (ข) - (ง) วงแหวน 3 ตัว ความกว้าง 0.2r ความสูง (ข) 0.0125 เมตร (ค) 0.025 เมตร และ (ง) 0.05 เมตร.....29
รูปที่ 4.5	ภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ (ก) ไม่มีวงแหวน (ข) - (ง) วงแหวน 3 ตัว มีความกว้าง 0.2r ความสูง (ข) 0.0125 เมตร (ค) 0.025 เมตร และ (ง) 0.05 เมตร.....30
รูปที่ 4.6	กราฟ LCR แสดงการกระจายตัวของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ ติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความสูงของวงแหวน 0.05 เมตร ความกว้างของวงแหวน (ก) 0.2r, (ข) 0.1r และ (ค) 0.4r.....33
รูปที่ 4.7	ภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ ติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความสูงของวงแหวน 0.05 เมตร ความกว้างของวงแหวน (ก) 0.2r (ข) 0.1r และ (ค) 0.4r.....34
รูปที่ 4.8	กราฟ LCR แสดงการกระจายตัวของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ที่ มีวงแหวนกว้าง 0.4r สูง 0.05 เมตร จำนวนวงแหวน (ก) 1 ตัว (ข) 2 ตัว (ค) 3 ตัว (ง) 4 ตัว และ (จ) 5 ตัว.....35

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9	ภาพคอนทราสต์แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ ที่มีวงแหวนกว้าง 0.4r สูง 0.05 เมตร จำนวนวงแหวน (ก) 1 ตัว (ข) 2 ตัว (ค) 3 ตัว (ง) 4 ตัว และ (จ) 5 ตัว37
รูปที่ 4.10	ทิศทางการไหลของเบดในเครื่องปฏิกรณ์บริเวณที่มีการติดตั้งวงแหวน (ก) เครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งวงแหวน 4 ตัว และ (ข) เครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งวงแหวน 5 ตัว38
รูปที่ 4.11	อิทธิพลของ (ก) จำนวนวงแหวน (ข) ความกว้างของวงแหวน และ (ค) ความสูงของ วงแหวนที่ส่งผลต่อความดันลด.....39
รูปที่ ก.1	ตำแหน่งที่เบดลอยไปสูงที่สุดจากการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีการติดตั้งวงแหวน46
รูปที่ ก.2	ระดับความสูงของวงแหวนแต่ละตัว สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.05 เมตร.....47

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	นิยาม	หน่วย
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลาง	[m]
d_{\min}	เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมเล็กที่สุดในอนุภาคของแข็ง	[mm]
d_{\max}	เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมใหญ่ที่สุดในอนุภาคของแข็ง	[mm]
e_s	restitution coefficient	[-]
g	ความเร่งโน้มถ่วง	[m/s ²]
g_0	radial distribution coefficient	[-]
r	รัศมี	[m]
t	เวลา	[s]
v_i	ความเร็ว	[m/s]
A	พื้นที่หน้าตัดของเบต	[m ²]
C_D	drag coefficient	[-]
L_{mf}	ความสูงต่ำสุดของเบตที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	[m]
L_0	ความสูงของอนุภาคของแข็งในเบตนิ่ง	[m]
L	ความสูงของอนุภาคของแข็งในเบตฟลูอิดไดซ์	[m]
K_{gs}	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม	[-]
Re	Reynolds number	[-]
U_{mf}	ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	[m/s]
P	ความดัน	[Pa]
ΔP	ความดันตกคร่อม	[Pa]
W	น้ำหนัก	[kg]
μ	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล	[Pa.s]
ϕ	แฟคเตอร์รูปร่าง	[-]
δ	ความกว้างของ ring	[m]
θ	ความสูงของ ring	[m]
Z_R	ระยะระหว่าง ring	[m]
ρ_i	ความหนาแน่น	[kg/m ³]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	นิยาม	หน่วย
ρ_s	ความหนาแน่นของอนุภาค	[kg/m ³]
ρ_w	ความหนาแน่นของของไหล	[kg/m ³]
α_i	volume fraction	[-]
τ_i	stress tensor	[Pa]
ε_{mf}	ช่องว่างของวัสดุในเบตฟลูอิดไดซ์	[-]
Θ	granular temperature	[m ² /s ²]
k_s	diffusion coefficient for granular energy	[kg/sm]
η	dynamic viscosity	[kg/sm]
γ_s	collision dissipation of energy	[kg/s ³ m]
φ_{gs}	transfer of kinetic energy	[kg/s ³ m]
λ_s	solid bulk viscosity	[kg/sm]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เทคโนโลยีในสมัยนี้ ล้วนถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการการนำไปใช้ประโยชน์ของผู้บริโภคทั้งสิ้น ในวงการอุตสาหกรรมการผลิตก็เช่นเดียวกัน ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการพัฒนา นอกจากจะคำนึงถึงการนำไปใช้ประโยชน์แล้ว สิ่งสำคัญที่เป็นปัจจัยหลักก็คือ เรื่องการประหยัดพลังงาน หากกล่าวถึงโรงงานที่มีกระบวนการผลิตขนาดใหญ่แล้ว แน่แน่นอนว่าต้องใช้พลังงานมหาศาลในกระบวนการผลิตหนึ่งๆ ดังนั้นหากมีการปรับปรุงเครื่องมืออุปกรณ์ที่สามารถช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ย่อมเกิดประโยชน์แก่ผู้ผลิตและผู้บริโภค สำหรับอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานมากในระดับต้นๆ คืออุตสาหกรรมปิโตรเคมี จัดเป็นอุตสาหกรรมขั้นต้นที่มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการผลิตขนาดใหญ่จึงต้องใช้พลังงานในการผลิตจำนวนมาก เครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี มีหลายชนิด เช่น เครื่องกลั่น (distillation rector) เตาเผา (furnace) หม้อไอน้ำ (boiler) เครื่องแก๊สซิไฟเออร์ (gasifier) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fix bed reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidize bed reactor) เป็นต้น สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้สนใจศึกษาเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ช่วยประหยัดพลังงานได้ คือเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถทำให้ของแข็งและของไหล (แก๊สหรือของเหลว) สัมผัสกันได้อย่างทั่วถึง การกระจายตัวของสารตั้งต้นหรืออุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เป็นไปอย่างทั่วถึงและรวดเร็ว ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ในเวลาอันรวดเร็ว สำหรับสิ่งที่เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดมีหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น การกระจายตัวของเบดที่ดี อุณหภูมิที่ทั่วถึงตลอดช่วงที่เกิดปฏิกิริยา เป็นต้น การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดสามารถใช้ได้ในกระบวนการทางปิโตรเคมีที่หลากหลาย เช่น การแยกสลายน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา การอบแห้ง การเผาไหม้ การผสม เป็นต้น และยังมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร อีกด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดสามารถประยุกต์ใช้ได้กับในหลายอุตสาหกรรม แต่เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ยังมีปัญหาที่มักเกิดขึ้นเสมอ คือ การรวมตัวกันของเบด ซึ่งเกิดจากการไหลของของไหลที่เป็นตัวพาและทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันนั้น กระจายตัวยังไม่ทั่วถึงทั้งหน้าตัดบริเวณขาเข้าหรือตลอดช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาพัฒนาการสร้างเพลตที่สามารถทำให้แก๊สพากระจายตัวได้ดีแล้ว แต่ก็ยังคงพบปัญหาการรวมตัวกันของเบดอยู่ หากยังคงเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นจะส่งผลให้แก๊สกับเบดสัมผัสกันอย่างไม่ทั่วถึง ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ มีเบดบางส่วนที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เป็นการสิ้นเปลืองสารตั้งต้น และใช้พลังงานในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนแก๊สอย่างเปล่าประโยชน์ ดังนั้นจึงทำให้ผู้ทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้เกิดแนวคิดในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ประกอบด้วยสารตั้งต้นสองสถานะคือแก๊สและของแข็ง โดยต้องการให้เบดมีประสิทธิภาพกระจายตัวได้มากขึ้น ด้วยการติดตั้งวงแหวน (ring) รอบแนวรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์ โดยที่ได้แนวคิดนี้มาจากงานวิจัยที่ศึกษาผลของตัวขัดขวางการไหลของของไหลผ่านเมมเบรน โดยที่ตัวขัดขวางการไหลจะทำให้การไหลของของไหลมีความปั่นป่วนมากขึ้น ส่งผลให้ของไหลสามารถไหลผ่านเมมเบรนได้ดีขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดหากมีการเพิ่มความปั่นป่วนได้ย่อมส่งผลให้เบดมีการไหลอย่างปั่นป่วนมากขึ้น ทำให้กระจายตัวได้ดีขึ้นนั่นเอง

สำหรับเทคนิคที่ใช้ศึกษาการกระจายตัวของเบดคือ การสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้วิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลด้วยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เทคนิค CFD ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบการไหลที่ซับซ้อน เนื่องจากสมการที่เกี่ยวข้องกับการไหลมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง มีความยุ่งยากในการหาคำตอบ เทคนิค CFD สามารถใช้แก้ปัญหาเหล่านี้ได้ในเวลาอันรวดเร็ว และสามารถแสดงผลออกมาได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็น คอนทัวร์ กราฟ เวกเตอร์ เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองด้วย

สำหรับการทำนายแบบจำลองการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดมีระเบียบวิธีที่ถูกบรรจุอยู่ในเทคนิค CFD สามารถใช้สร้างแบบจำลองได้ และมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ใช้เทคนิค CFD ทำนายแบบจำลองพฤติกรรมของการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำมาเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิค CFD ทำนายแบบจำลองการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อศึกษาผลของการติดตั้งวงแหวนในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่มีต่อการกระจายตัวของเบดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายพฤติกรรมของการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิค CFD

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความกว้าง ความสูง และจำนวนของวงแหวน ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด

1.2.3 เพื่อศึกษาค่าตัวแปรไร้มิติของความกว้าง ความสูงของ วงแหวน และระยะการติดตั้งวงแหวน ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ทำให้การกระจายตัวของเบดดีที่สุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การทดสอบแบบจำลองของงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาผลของจำนวนกริดและจำนวนการคำนวณซ้ำเพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถเป็นตัวแทนสำหรับการศึกษาผลของการติดตั้งวงแหวน ที่มีรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยมรอบเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเบต

1.3.2 การศึกษาขนาดความกว้างของวงแหวน มีการศึกษา 3 ค่า คิดเป็นร้อยละของรัศมีเครื่องปฏิกรณ์ คือ 10 20 และ 40

1.3.3 การศึกษาความสูงของวงแหวน มีการศึกษา 3 ค่า คือ 0.0125 0.025 และ 0.05 เมตร

1.3.4 การพิจารณาการกระจายตัวของเบต ใช้วิธีการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเบตต่อปริมาตรอากาศกับตำแหน่งความสูงภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยศึกษาบริเวณที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง คือ ริมด้านซ้าย ริมด้านขวา และตรงกลางของภายในเครื่องปฏิกรณ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายพฤติกรรมการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตได้โดยใช้เทคนิค CFD

1.4.2 สามารถทราบผลของความกว้าง ความสูง และจำนวนของวงแหวน ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตว่าเป็นไปในทิศทางใด

1.4.3 สามารถหาค่าความกว้าง ความสูงของวงแหวน และระยะการติดตั้งวงแหวน ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตที่ทำให้การกระจายตัวของเบตดีที่สุดในท่อมไร้น่วยได้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed reactor) [1-2]

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถใช้สำหรับปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous reaction) ระหว่างแก๊สกับของแข็ง ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการเกี่ยวกับปิโตรเคมี เช่น การแยกสลายน้ำมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) การอบแห้ง (dryer) และยังมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมยา เป็นต้น เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกที่บรรจุอนุภาคของแข็งและมีการผ่านของไหลจากด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านชั้นอนุภาคของแข็ง แล้วไหลออกทางส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ การเกิดฟลูอิดไดซ์เบด เป็นนิยามที่ใช้อธิบายพฤติกรรมที่อนุภาคของแข็ง (มีลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น) สัมผัสกับของไหลที่มีความเร็วเพียงพอที่จะทำให้ของแข็งเหล่านั้นมีพฤติกรรมคล้ายของไหล

2.1.1 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เบด

ฟลูอิดไดซ์เบดแบ่งตามสถานะของสารในกระบวนการออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1.1.1 ฟลูอิดไดซ์เบดสองสถานะ (two-phase fluidization) คือในกระบวนการจะประกอบด้วยสารสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลอาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลว

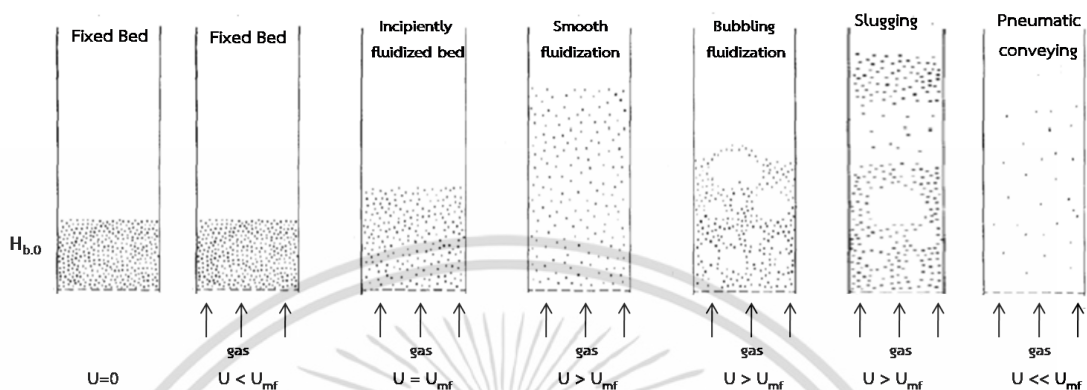
2.1.1.2 ฟลูอิดไดซ์เบดสามสถานะ (three-phase fluidization) คือในกระบวนการจะประกอบด้วยสารสามสถานะ คือของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

2.1.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด บริเวณที่มีของแข็งบรรจุอยู่ เราเรียกว่าเบด (bed) แสดงดังรูปที่ 2.1 เมื่อเริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างผ่านเบดที่นิ่งเริ่มจากความเร็วดำก่อน ในระยะแรกของแข็งจะยังไม่ขยับ และความดันตกคร่อม (pressure drop) จะพัฒนาไปพร้อมกับความเร็วของของไหล ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (fixed bed) เมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยๆ จนถึงความเร็วระดับหนึ่งจะทำให้ของแข็งเริ่มขยับตัวและจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลอีกเพียงเล็กน้อย ของแข็งจะหลุดออกจากกันและลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เบด (incipiently fluidized bed) ความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตกคร่อมจะไม่พัฒนาตามความเร็วของของไหลอีกต่อไป และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลอีกจนถึงระดับหนึ่ง ของแข็งจะหลุดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า pneumatic conveying



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์ชั่น [3]

สำหรับของไหลที่เป็นแก๊สนั้น เมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด แก๊สบางส่วนทำให้ของแข็งเกิดการลอยตัว แก๊สบางส่วนจะรวมตัวกันทำให้เกิดฟองแก๊สแทรกตัวลอยขึ้นมาถึงผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ในขณะที่ฟองแก๊สลอยตัวขึ้นมาจะทำให้ของแข็งบางส่วนไหลลงมายังส่วนล่าง และของแข็งบางส่วนจะลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นไปด้านบนด้วย จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของของแข็งเป็นไปอย่างซุ่มนวลเบาๆ เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดซุ่มนวล ซึ่งต่างจากกรณีที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เบดลักษณะนี้เรียกว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน

2.1.3 ปัจจัยการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

ปัจจัยที่ทำให้เกิดความพหุเหมาะสมขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อให้เบดมีคุณสมบัติคล้ายของไหลมีหลายปัจจัย ปัจจัยที่สำคัญลำดับแรกคือ ความเร็วของของไหล จากการที่ความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นทีละน้อยในระยะแรก เบดจะยังอยู่นิ่ง และความดันตกคร่อมจะพัฒนาไปตามความเร็วของของไหล จนกระทั่งความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง เบดเริ่มขยับตัวและจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ จากนั้นค่อยๆ แยกห่างกันออกไปเป็นอิสระตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นเป็น ความเร็วของของไหลที่ทำให้เบดเริ่มขยับตัว และในขณะเดียวกันความดันตกคร่อมเริ่มคงที่ ความเร็วนี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เซชัน (minimum velocity of fluidization) และเมื่อเพิ่มความเร็วจนกระทั่งเบดหลุดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน ความเร็วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะนี้เรียกว่า ความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดซ์เซชัน จะเห็นว่าหากใช้ความเร็วของของไหลน้อยเกินไปจะทำให้การเกิดฟลูอิดไดซ์เบดไม่สมบูรณ์ ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดไม่สมบูรณ์เช่นกัน แต่ถ้าให้ความเร็วของของไหลมากเกินไปจะทำให้เบดหลุดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ออกไป ดังนั้นการทดลองเพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดจึงเป็นเรื่องสำคัญ

ปัจจัยอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญเช่นเดียวกันคือ ตัวกระจายของไหล (distributer) และชั้นส่วนที่ช่วยให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์ (homogeneity section) เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด หากออกแบบตัวกระจายของไหลไม่เหมาะสมกับลักษณะเบดที่ใช้ จะทำให้เกิดแนวช่องที่มีแต่ของไหลไหลผ่าน เนื่องจากมีความเร็วของของไหลส่วนหนึ่งเร็วกว่าส่วนอื่นๆ บริเวณนี้ทำให้ของแข็งแยกตัวออกไปด้านข้าง เกิดเป็นช่องว่างตลอดความสูงของเบด หรือส่วนหนึ่งของเบด ปัจจัยอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดมีอีกหลายปัจจัย เช่น ลักษณะของของแข็งที่ใช้เป็นเบด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น ฯลฯ) ลักษณะของของไหล (ความหนืด ความหนาแน่น ฯลฯ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ ความสูงของเบด เป็นต้น ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ ต้องถูกศึกษาเพื่อให้การเกิดฟลูอิดไดซ์เบดเป็นไปอย่างสมบูรณ์

2.1.4 สมการของ Ergun ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน [3-5]

ปรากฏการณ์การเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน จะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สที่ใช้เป็นของไหลพาของแข็งขึ้นไปยังด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ และมีความเร็วมากพอที่สามารถเอาชนะน้ำหนักของของแข็งได้ หรืออนุภาคของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนอนุภาคของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวอนุภาคของแข็งกับแรงพยุงจากของไหล หรือ แรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง} = \text{แรงพยุงจากของไหล} \quad (2.1)$$

หรือเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$\Delta PA = W = (AL_{mf})(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_w)g \quad (2.2)$$

จากสมการ (2.2) สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมต่อความสูงของเบดกับน้ำหนักของวัสดุของแข็งที่เริ่มทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_w)g \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ใช้คำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (minimum fluidization velocity; U_{mf}) คือ สมการ Ergun ซึ่งเป็นสมการกึ่งเอมพิริคัล แสดงความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์ความเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์์ สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ของการเกิดฟลูอิดไดซ์ได้ มีสมการดังนี้

$$f_s = \frac{150}{\text{Re}_s} + 1.75, \quad 1 \leq \text{Re}_s \leq 1,000 \quad (2.4)$$

$$\text{Re}_s = \frac{\rho_s U_{mf} d_s}{\mu} \quad (2.5)$$

ความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์ความเสียดทานกับความดันตกคร่อม ความสูงของเบด และความเร็วเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f_s = \frac{\Delta P}{L_{mf}} \frac{d_s}{\rho_w U_{mf}^2} \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) \quad (2.6)$$

แทนค่าสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.4) และให้สมการ (2.6) เท่ากับสมการ (2.4) จะได้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2 \mu U_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi d_s)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf}) \rho_w U_{mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi d_s)} \quad (2.7)$$

โดยที่ ϕ คือ แฟคเตอร์รูปร่าง ใช้สำหรับอธิบายลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน หรือมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ซึ่งหาได้จาก

$$\phi = \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \quad (2.8)$$

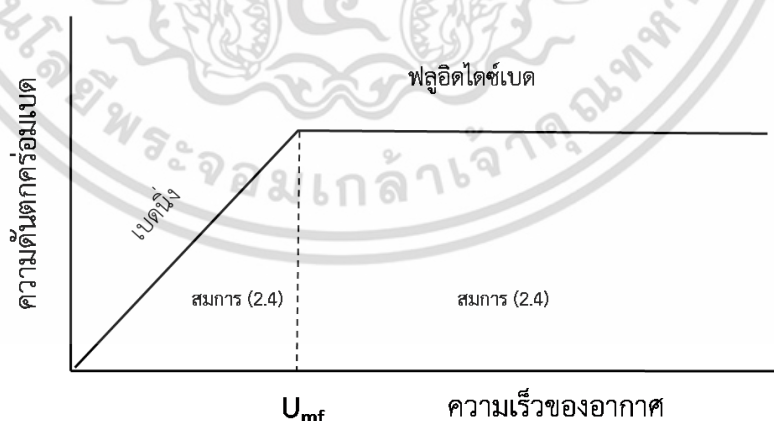
สำหรับอนุภาคเบดที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 เมตร เหมาะต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันที่ความเร็วต่ำ เป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) หรือมีค่าเรย์โนลด์์น้อยกว่า 10 ความหนืดของของไหลจะมีผลต่อการไหลเป็นอย่างมาก ดังนั้นการหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันสามารถตัดเทอมที่สองของสมการที่ 2.7 ออกได้ และเมื่อจัดสมการใหม่เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันสำหรับเบดที่มีอนุภาคเล็กๆ แสดงดังนี้

$$U_{mf} = \frac{(\phi d_s)^2 (\rho_s - \rho_w)}{150 \mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) , 1 \leq \text{Re}_s \leq 1,000 \quad (2.9)$$

สำหรับการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันที่ความเร็วสูง หรือแบบปั่นป่วน (turbulent flow) เหมาะสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 เมตร สามารถตัดทอนที่หนึ่งในสมการ (2.7) ออกได้ เพราะความหนืดมีผลน้อยกว่าความเฉื่อย จัดสมการใหม่เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ดังนี้

$$U_{mf}^2 = \frac{(\phi d_s) (\rho_s - \rho_w)}{1.75 \rho_w} g \varepsilon_{mf}^3 , \quad \text{Re}_s \geq 1,000 \quad (2.10)$$

รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของแก๊สขาเข้า เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน สามารถอธิบายได้จากสมการ (2.4) โดยที่ค่าแฟคเตอร์ความเสียหายมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความดันตกคร่อมตามสมการ (2.6) ถ้าแฟคเตอร์ความเสียหายมีค่ามากจะมีความดันตกคร่อมมากขึ้นด้วย โดยในช่วงแรกความเร็วของแก๊สขาเข้ายังคงต่ำอยู่ ความดันตกคร่อมจะเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับความเร็ว จากสมการ (2.4) พจน์แรกด้านขวามือ ถ้าความเร็วแก๊สต่ำๆ จะส่งผลให้พจน์แรกมีอิทธิพลมากกว่าพจน์ที่สองอยู่มาก แต่เมื่อความเร็วแก๊สขาเข้าเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งจนทำให้พจน์แรกมีค่าน้อยมาก จึงส่งผลให้พจน์ที่สองมีอิทธิพลมากกว่า ทำให้ความดันตกคร่อมเบดเริ่มคงที่ เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สมากขึ้นอีก ความดันตกคร่อมจะค่อนข้างคงที่



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมกับความเร็วของของไหลต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [6]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamics หรือ CFD) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์และแก้ปัญหาหาค่าที่เกี่ยวกับการไหลของของไหลโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) และระเบียบวิธี (algorithms) สมการที่เกี่ยวข้องกับการไหลส่วนใหญ่เป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ซึ่งเป็นสมการที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linearity) มีความยุ่งยากในการหาคำตอบที่แม่นยำตรง (exact solution) สมการเหล่านี้สามารถหาคำตอบที่แม่นยำตรงหรือแสดงแนวโน้มของปรากฏการณ์การไหลได้โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข

ปัจจุบันนี้ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือที่สำคัญและมีประโยชน์อย่างยิ่งในวงการศึกษาและอุตสาหกรรม เช่น อากาศพลศาสตร์ของอากาศยาน วิศวกรรมเคมี (การผสมสาร การแยกสาร การขึ้นรูป การเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นต้น) วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (การระบายความร้อนสำหรับวงจรไฟฟ้า การทำความเย็นบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์) วิศวกรรมทางทะเล (การกระจายตัวของกระแสน้ำทะเลที่มีต่อโครงสร้างใต้น้ำ) วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (การกระจายตัวของมลพิษในอากาศหรือในน้ำ) วิศวกรรมชีวเวช (การไหลของเลือดในหลอดเลือด) วิทยาศาสตร์การกีฬา (การออกแบบหมวกของนักปั่นจักรยาน ลูกฟุตบอล) อดุณิคมวิทยา (การพยากรณ์สภาพอากาศ) เป็นต้น

2.2.1 หลักการทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลถูกสร้างขึ้นด้วยลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลได้ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ กระบวนการก่อนการคำนวณ (pre-processor) กระบวนการคำนวณ (solver) และกระบวนการหลังการคำนวณ (post-processor) รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

- กระบวนการก่อนการคำนวณ (pre-processor) เป็นกระบวนการเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณ ขั้นตอนของกระบวนการนี้ประกอบไปด้วย
 - การกำหนดโดเมนการคำนวณ เพื่อกำหนดขอบเขตที่สนใจศึกษา
 - การสร้างกริด (grid) หรือเมช (mesh) เป็นการแบ่งโดเมนในการคำนวณให้มีขนาดเล็กๆ จำนวนมากพอที่ทำให้การคำนวณมีความละเอียดและให้ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
 - การเลือกสมการหรือแบบจำลองที่จำเป็นต่อปรากฏการณ์ที่ศึกษา
 - การกำหนดคุณสมบัติของของไหล (fluid properties)
 - การกำหนดสภาวะขอบเขต (boundary condition)
- กระบวนการคำนวณ (solver) เป็นกระบวนการคำนวณที่ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งการเลือกใช้ระเบียบวิธีจำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องเสถียรภาพเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้อง แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ

1) ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) เป็นวิธีที่ง่ายในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนโปรแกรม ปัจจุบันระเบียบวิธีนี้ถูกใช้เขียนโปรแกรมเฉพาะทางในบางโปรแกรมเท่านั้น มีข้อดีคือต้องการโครงตาข่ายที่มีโครงสร้าง (structured mesh) และต้องการการแปลงระบบพิกัดสำหรับรูปทรงที่มีความสลับซับซ้อนสูง

2). ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (finite element method) เป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์โครงสร้างของของแข็ง แต่ก็สามารถใช้ได้กับของไหลเช่นเดียวกัน

3). ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method) เป็นระเบียบวิธีมาตรฐานสำหรับใช้พัฒนาซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และโปรแกรมสำหรับงานวิจัย โดยสมการควบคุม (governing equation) จะถูกแก้ปัญหาโดยการพิจารณาให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง และใช้วิธีอินทิกรัลเพื่อให้ได้ระบบสมการพีชคณิต หาคำตอบโดยอาศัยระเบียบวิธีการทำซ้ำ (Iteration) สำหรับขั้นตอนของกระบวนการคำนวณประกอบไปด้วย

- การประมาณค่าตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยการเฉลี่ยของฟังก์ชันอย่างง่าย
- การแยก (discretisation) เป็นการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต (algebraic equations)
- การหาคำตอบของสมการพีชคณิต
- กระบวนการหลังการคำนวณ (post-processor) เป็นกระบวนการที่ใช้แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ สามารถแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น
 - รูปร่างของขอบเขตของปัญหา
 - กราฟ
 - คอนทัวร์และเส้น
 - เวกเตอร์
 - พล็อตพื้นที่ผิวแบบ 2 และ 3 มิติ
 - เส้นการวิ่งของอนุภาค (particle tracking)
 - จัดภาพการมองเห็นให้เหมาะสม (การหมุน เคลื่อนที่ ย่อ-ขยาย เป็นต้น)
 - การนำข้อมูลส่งออก (export) เพื่อนำไปใช้กับโปรแกรมอื่นตามความเหมาะสม

2.2.2 สมการควบคุม (governing equations) [7]

แบบจำลองที่สามารถใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลแบบหลายสถานะคือ แบบจำลอง Eulerian สำหรับการไหลที่ประกอบด้วยแก๊สกับของแข็ง การใช้งานแบบจำลอง Eulerian จะแบ่งสถานะของไหลออกเป็น 2 สถานะ คือ สถานะปฐมภูมิ (แก๊ส) และทุติยภูมิ (ของแข็ง) การคำนวณเชิงตัวเลขของแบบจำลอง Eulerian ใช้สมการการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์อธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล โดยทั่วไปมี 3 กฎ คือ กฎการอนุรักษ์มวล กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน และกฎข้อหนึ่งของอุณหพลศาสตร์ สำหรับงานวิจัยนี้มีความเกี่ยวข้องกับ 2 กฎแรก ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สมการอนุรักษ์มวล (the mass conservation equations)

กฎการอนุรักษ์มวลคือ “มวลไม่สามารถสร้างหรือทำลายได้” สำหรับของไหลสองเฟส (แก๊สและของแข็ง) สามารถแสดงได้ตั้งสมการสำหรับแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) = 0 \quad (2.11)$$

สำหรับของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) = 0 \quad (2.12)$$

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (the momentum conservation equations)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่า “แรงเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม” สำหรับของไหลสองสถานะ (แก๊สและของแข็ง) สามารถแสดงได้ตั้งสมการ

สำหรับแก๊ส

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g^2) = & -\alpha_g \cdot \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_g \\ & + \alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{g} + K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (2.13)$$

สำหรับของแข็ง

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s^2) = & -\alpha_s \cdot \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_s \\ & + \alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{g} + K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 แบบจำลองฟังก์ชันลาก Syamlal-O'brien

แบบจำลอง Syamlal-O'brien Drag function เป็นหนึ่งในหลายๆ แบบจำลองในโปรแกรม Fluent ที่สามารถใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของระบบการไหลที่ประกอบไปด้วยแก๊สและของแข็ง (K_{gs}) มีความหลากหลายในการใช้แก้ปัญหา สำหรับการนำมาใช้คำนวณการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันต้องมีการปรับแก้ค่าคงที่บางตัวให้สอดคล้องกับค่าความเร็วของไหลต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน การใช้งานมีรูปแบบสมการเริ่มต้นดังนี้

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_g \cdot \rho_g}{v_{r,s}^2 \cdot d_s} \cdot C_D \cdot \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$v_{r,s} = 0.5 \cdot (A - 0.06 \cdot Re_s + \sqrt{(0.06 \cdot Re_s)^2 + 0.12 \cdot Re_s \cdot (2 \cdot B - A) + A^2}) \quad (2.16)$$

$$A = \alpha_g^{4.14}, B = 0.8 \alpha_g^{1.28} \text{ for } \alpha_g \leq 0.85$$

$$A = \alpha_g^{4.14}, B = \alpha_g^{2.65} \text{ for } \alpha_g \geq 0.85$$

และ

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s / v_{r,s}}} \right)^2 \quad (2.17)$$

สำหรับค่าคงที่ 0.8 และ 2.65 ที่อยู่ในเทอมค่า B เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของไหลต่ำสุด สำหรับค่าเริ่มต้นนี้ใช้สำหรับการทำนายระบบฟลูอิดไดซ์เซชันที่มีความเร็วของไหลต่ำสุดเท่ากับ 21 cm/s ดังนั้นการนำแบบจำลอง Syamlal -O'brien Drag function ไปใช้งานต้องมีการปรับแก้ค่าคงที่เหล่านี้ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า mathematical manipulation เพื่อให้ผลการทำนายมีความถูกต้อง [8]

2.2.4 ทฤษฎีจลนศาสตร์การไหลของอนุภาคของแข็ง (kinetic theory of granular flow) [4]

จากทฤษฎีจลนศาสตร์ของแก๊สซึ่งอธิบายไว้ว่าอนุภาคของแก๊สมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการไหลของอนุภาคของแข็ง (granular flow) สำหรับการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน ซึ่งของแข็งมีพฤติกรรมการไหลคล้ายของไหล จากการปะทะกันทุกทิศทางของอนุภาคของแข็ง ในการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน ทำให้เกิดพลังงานจลน์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วของอนุภาคของแข็ง ทฤษฎีจลนศาสตร์การไหลของอนุภาคของแข็งจึงถูกนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์กับความเร็วนุภาคของแข็งในเทอมของค่า granular temperature เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{granular temperature} \propto \text{kinetic energy} \propto (\text{fluctuating particle velocity})^2$$

โดยที่ granular temperature เขียนเป็นฟังก์ชันของความเร็วอนุภาคของแข็ง ดังสมการ

$$\Theta = \frac{1}{3} \langle v_s'^2 \rangle \quad (2.18)$$

ค่า granular temperature เป็นสัดส่วนกับพลังงานจลน์ของอนุภาคของแข็ง ดังนั้นสมการพลังงานของอนุภาคจึงถูกใช้เพื่อคำนวณค่า granular temperature ได้ สมการดุลพลังงานของอนุภาคของแข็งสามารถแทนที่ความเร็วอนุภาคของแข็งด้วยค่า granular temperature สามารถเขียนดุลสมการได้ดังนี้

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \Theta) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \Theta) \right] = (-\nabla p_s \vec{I} + \vec{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \Theta) - \gamma_s + \phi_{gs} \quad (2.19)$$

โดยที่ k_s คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัวของพลังงานอนุภาคของแข็ง (diffusion coefficient for granular energy) สามารถคำนวณจากวิธีของ Syamlal et al. [4] สมการแสดงดังนี้

$$k_s = \frac{15\rho_s d_s \alpha_s \sqrt{\pi\Theta}}{41 - 33\eta} \left[1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta - 3) \alpha_s g_0 + \frac{16}{15\pi} (41 - 33\eta) \eta \alpha_s g_0 \right] \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$\eta = \frac{1}{2} (1 + e_s) \quad (2.21)$$

$$g_0 = \frac{1}{1 - \sqrt[3]{\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \right)}} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

γ_s คือ ค่าที่แสดงการกระจายของการปะทะกันของพลังงาน (collision dissipation of energy) สามารถคำนวณจากวิธีของ Lun et.al [4] สมการแสดงดังนี้

$$\gamma_s = \frac{12(1-e_s^2)g_0}{d_s\sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \Theta^{1.5} \quad (2.23)$$

φ_{gs} คือ ค่าการถ่ายโอนพลังงานจลน์ (transfer of kinetic energy) สมการแสดงดังนี้

$$\varphi_{gs} = -3K_{gs}\Theta \quad (2.24)$$

p_s คือ ค่าความดันของอนุภาค (solids pressure) สมการแสดงดังนี้

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta + 2\rho_s \theta \cdot g_0 \alpha_s^2 (1+e_s) \quad (2.25)$$

$\bar{\tau}_s$ คือ ค่า solid phase stress tensor สมการแสดงดังนี้

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s \left(\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T \right) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (2.26)$$

λ_s คือ ค่า solid bulk viscosity สมการแสดงดังนี้

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_0 (1+e_s) \sqrt{\frac{\Theta}{\pi}} \quad (2.27)$$

μ_s คือ ค่า solid shear viscosity สมการแสดงดังนี้

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,skin} + \mu_{s,fr} \quad (2.28)$$

$\mu_{s,col}$ คือ ค่า solid collision viscosity สมการแสดงดังนี้

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1+e_s) \sqrt{\frac{\Theta}{\pi}} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu_{s,skin}$ คือ ค่า kinetic viscosity ตามวิธีของ Syamlal-O'Brien สมการแสดงดังนี้

$$\mu_{s,skin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\Theta \pi}}{6(3 - e_s)} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_s) \cdot (3e_s - 1) \alpha_s g_0 \right]^2 \quad (2.30)$$

$\mu_{s,fr}$ คือ ค่า solid frictional viscosity สมการแสดงดังนี้

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \theta}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (2.31)$$

สำหรับตัวแปร e_s คือ ค่า restitution coefficient เป็นค่าที่ใช้แสดงลักษณะการปะทะกันของอนุภาคของแข็ง โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความเร็วของอนุภาคของแข็งและอิทธิพลของอีกหลายปัจจัย เช่น แรงตึงผิวของอนุภาคของแข็ง ค่าความแตกหักของอนุภาคของแข็ง รูปร่างของอนุภาคของแข็ง เป็นต้น จากปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ค่า restitution coefficient มีค่าเปลี่ยนแปลงตามลักษณะเฉพาะของการปะทะกัน โดยกรณีทั่วไป restitution coefficient มีค่าคงที่ อยู่ในช่วง $0 < e_s < 1$ สำหรับอนุภาคของแข็งที่ถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นทรงกลม มีมวลและเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันทุกอนุภาค [9]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดดังนี้

F. Taghipour และคณะ [10] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลชนิดแก๊สและของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด โดยสร้างเครื่องปฏิกรณ์รูปทรงกระบอกขนาดความสูง 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.28 เมตร ผนังหนา 0.025 เมตร เบดในเครื่องปฏิกรณ์เป็นลูกปัดแก้วทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 250 - 300 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความสูงของเบดเริ่มต้นเท่ากับ 0.4 เมตร สัดส่วนปริมาตรของแข็งต่ออากาศ (solid volume fraction) เท่ากับ 0.6 ใช้อากาศเป็นตัวพาให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 เมตรต่อวินาที จากผลการศึกษาพบว่า การเกิดฟลูอิดไดซ์เบดต้องใช้ความเร็วเริ่มต้นการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด 0.065 เมตรต่อวินาที ความดันตกคล่อมเบดเฉลี่ยอยู่ที่ 4,400 ปาสคาล และการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากวินาทีที่ 1 นอกจากนี้ยังได้มีการสร้างแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดด้วยเทคนิค CFD โดยเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง ใช้โปรแกรม Gambit วาดแบบจำลอง โดยใช้ค่า grid interval spacing เท่ากับ 0.005 เมตรสำหรับการคำนวณใช้โปรแกรม Fluent เลือกแบบจำลอง multiphase Eulerian-Eulerian และทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็งในการคำนวณสมการของไหล จากผลการจำลองพบที่มีความสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี จากข้อมูลและผลการทดลองของงานวิจัยนี้ ได้ถูกนำมาใช้เป็นงานวิจัยอ้างอิงสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้

I. Julian และคณะ [11] ได้ศึกษาการคำนวณพลศาสตร์ของแก๊สและของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เทคนิค CFD ใช้แบบจำลอง multiphase Eulerian-Eulerian สำหรับการพยากรณ์พฤติกรรมของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ สร้างแบบจำลองเป็นแบบ 2 มิติ แบ่งเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นบริเวณทางเข้าของแก๊สซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์แคบกว่าส่วนที่ 2 และเป็นบริเวณที่ทำให้แก๊สกระจายตัวได้ทั่วถึงตลอดพื้นที่หน้าตัด ส่วนที่ 2 เป็นบริเวณที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบด งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของรูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์ เช่น มุมของบริเวณรอยต่อของส่วนที่ 1 และ 2 ของเครื่องปฏิกรณ์ และศึกษาผลของความเร็วของแก๊สที่ส่งผลต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด ผลการพยากรณ์เมื่อเทียบกับผลการทดลองพบว่าสามารถพยากรณ์พฤติกรรมการไหลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ค่าความเร็วของแก๊สที่สามารถทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดได้อยู่ในช่วง 5-20 เซนติเมตรต่อวินาที และมุมของบริเวณรอยต่อที่เหมาะสมคือ 80°

B. Francine และคณะ [12] ได้ใช้เทคนิค CFD ทำนายพฤติกรรมการไหลของแก๊สและของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด ใช้แบบจำลอง multiphase Eulerian-Eulerian และทฤษฎีการเคลื่อนที่ของอนุภาค (granular kinetic) เพื่อทำนายการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบ 2 มิติ โดยแบบจำลองที่ใช้คำนวณนี้ ถูกสร้างขึ้นสำหรับเบดที่มีลักษณะรูปร่างเหมือนกันทุกอนุภาคและมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นสม่ำเสมอ (uniform density) แต่เบตในเครื่องปฏิกรณ์ของงานวิจัยนี้เป็นชีวมวล เปลือกวอลนัทที่มีรูปร่างแตกต่างกัน และมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความซับซ้อนนี้ โดยศึกษาผลของการใช้และไม่ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon model ผลการศึกษาพบว่า การใช้แบบจำลอง k-epsilon model สำหรับการคำนวณการไหลของเบตแบบ 2 มิติ ให้ผลการทำนายที่แม่นยำกว่าการใช้แบบจำลอง k-epsilon model เนื่องจากอันที่จริงแล้วแบบจำลอง k-epsilon model จะให้ผลการทำนายที่แม่นยำสำหรับการคำนวณการไหลของเบตแบบ 3 มิติ

H. Hossein และคณะ [13] ใช้เทคนิค CFD ทำนายการเกิด spout ทรงกระบอกของเบตแบบจำลองที่เลือกใช้คือ Eulerian-Eulerian Two-Fluid Model เป็นการนำทฤษฎีจลนศาสตร์การเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของเบตที่เป็นอนุภาคของแข็งทรงกลม เบตมีความหนาแน่น 2,503 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีอากาศเป็นตัวพาทำให้เกิดการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบต งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของฟังก์ชันลากที่ส่งผลต่อการทำนาย ประกอบไปด้วย 2 แบบจำลอง คือ Gidaspow drag function และ Syamlal drag function จากการเปรียบเทียบผลการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่าฟังก์ชันลาก Syamlal drag function นั้น มีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมการไหลของแก๊สและของแข็งที่ทำให้เกิด spout ทรงกระบอกในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตมากกว่าแบบ Gidaspow drag function

M. Mostafazadeh และคณะ [14] ได้ใช้เทคนิค CFD ศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบต โดยสร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติ พฤติกรรมการไหลของของไหล 2 สถานะ ของระบบฟลูอิดไดซ์เป็นการไหลแบบไม่คงตัวใช้แบบจำลอง Eulerian-Eulerian ควบคู่กับใช้ทฤษฎีจลนศาสตร์การไหลของอนุภาคของแข็งในการคำนวณสมการของไหล ใช้สมการฟังก์ชันลากของ Gidaspow เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้วิธีเปรียบเทียบความดันลดของเบตระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง โดยที่มีอนุภาคของแข็งสองชนิดผสมกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 และ 2 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 2,400 และ 2,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้ความเร็วของแก๊สเข้าเท่ากับ 0.5 ถึง 2.5 เมตรต่อวินาที และมีการเพิ่มปริมาณเบตจากร้อยละ 45 ถึง 59 โดยเพิ่มความสูงของเบตเริ่มต้นและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเบต จากการศึกษาพบว่าเบตที่มีขนาดใหญ่กว่าจะไหลอยู่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับเบตที่ขนาดเล็กกว่าจะไหลอยู่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และยังพบว่าผลการจำลองแสดงค่าความดันลดสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี

C. Venier และคณะ [15] ได้ศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบการไหลหลายสถานะของแก๊สและของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบต ใช้แบบจำลองชนิด Eulerian-Eulerian ร่วมกับการใช้ทฤษฎีจลนศาสตร์การไหลของอนุภาคของแข็ง สำหรับกระบวนการไหลหลายสถานะนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันในส่วน of เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ผลิตแก๊สไฮโดรเจน เบตที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเท่ากับ 350×10^{-6} เมตร มีความหนาแน่นเท่ากับ 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แก๊สขาเข้ามีความหนาแน่นเท่ากับ 1.4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนืดเท่ากับ 1.8×10^{-5} ปาสคาล-วินาที ทำการศึกษาผลของแบบจำลองฟังก์ชันลาก 3 แบบ คือ Syamlal-O'Brien Gidaspow และ Wen-Yu โดยใช้โปรแกรม OpenFOAM^R ในการคำนวณ ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองฟังก์ชันลากแบบ Syamlal-O'Brien ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับข้อมูลที่ใช้อ้างอิงมากกว่าแบบ Gidaspow และ Wen-Yu

T.J. O'Brien และคณะ [16] ศึกษาการสลายตัวของโอโซน (O_3) ในปฏิกิริยาเคมี โดยมี Fe_2O_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี และปฏิกิริยาเกิดในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด ศึกษาการสลายตัวโดยการสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิค CFD ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยนำผลการจำลองเทียบกับผลการทดลอง จากข้อมูลการทดลอง อนุภาคของเบด (ตัวเร่งปฏิกิริยา) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 117 ไมโครเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความสูงเริ่มต้นเท่ากับ 10.8 เซนติเมตร สัดส่วนโดยปริมาตรของเบดเริ่มต้นเท่ากับ 0.48 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (U_{mf}) เบดเท่ากับ 1.7 เซนติเมตรต่อวินาที การสร้างแบบจำลองได้ใช้ฟังก์ชันลากของ Syamlal-O'Brien โดยมีการปรับแก้ค่าคงที่ในสมการฟังก์ชันลากให้เหมาะสมกับค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ได้จากการทดลอง ผลการจำลองแสดงค่าเป็นสัดส่วนโดยมวลของโอโซน พบว่าผลการจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเป็นอย่างดี โดยที่การสลายตัวของโอโซนมีความสัมพันธ์กับกับความเร็วของของไหลที่ผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์ และความสูงเริ่มต้นของเบด

Y. Che และคณะ [17] ใช้เทคนิค CFD ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของแก๊สในปฏิกิริยาเอทิลีนพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อทำการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม โดยทำการสร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติ ใช้แบบจำลอง Eulerian-Eulerian ร่วมกับการใช้ทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็ง ปัจจัยที่ศึกษาคือขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขนาดอนุภาคจาก 446 ไมโครเมตร เป็น 1,338 ไมโครเมตร จะส่งผลให้ต้องเพิ่มความเร็วของแก๊สขาเข้าจากเดิม 0.60 เมตรต่อวินาที เป็น 0.9 เมตรต่อวินาที เพื่อรักษาประสิทธิภาพของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดในเครื่องปฏิกรณ์

H. Moon และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของจำนวนหัวฉีดแก๊สขาเข้าภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการผลิตอนุภาคโพลีซิลิกอน กระบวนการผลิตคือผ่านอากาศร้อนเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคซิลิกอนอยู่ภายใน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิลิกอนเฉลี่ยเท่ากับ 500 ไมโครเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 2,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การศึกษาใช้เทคนิค CFD โดยสร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติ ใช้แบบจำลองของไหลหลายเฟสชนิด Eulerian - Eulerian ร่วมกับการใช้ทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็งในการคำนวณสมการเกี่ยวกับการไหล การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำโดย นำค่าความดันตกคล่อมเบดจากการจำลองเทียบกับผลการทดลอง พบว่าผลการจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ผลของจำนวนหัวฉีดพบว่า การมีหัวฉีดเพียง 1 ตัว ทำให้เกิดการไหลแบบ spout ส่งผลให้บริเวณที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาน้อยเนื่องจากอากาศสัมผัสอนุภาคซิลิกอนไม่ทั่วถึง ส่วนการเพิ่มหัวฉีดเป็น 4 ตัว เป็นการลดการเกิดการไหลแบบ spout สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากมีบริเวณการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น

S. Wanthamane และคณะ [19] ได้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของตัวขัดขวางการไหลที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลผ่านเมมเบรนโดยใช้เทคนิค CFD รูปร่างของตัวขัดขวางการไหลที่ศึกษามี 3 แบบ คือ ทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยม และทรงสามเหลี่ยม ผลการศึกษาพบว่าการมีตัวขัดขวางการไหลทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น ส่งผลให้ของไหลไหลผ่านเมมเบรนได้ดีขึ้น โดยที่รูปร่างของตัวขัดขวางการไหลทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยม และทรงสามเหลี่ยม สามารถเพิ่มฟลักซ์การไหลได้ 6 8 และ 10 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการที่ไม่มีตัวขัดขวางการไหล

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่าวิธี CFD สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่มีของไหลสองสถานะ ที่ประกอบด้วยแก๊สและของแข็งได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำนายการเกิดปฏิกิริยาเคมีในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดได้ด้วย สำหรับการไหลแบบ 2 สถานะ (แก๊สและของแข็ง) ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดสามารถใช้แบบจำลอง Eulerian-Eulerian ร่วมกับการใช้ทฤษฎีจลนการไหลของอนุภาคของแข็งเพื่อคำนวณสมการของไหล แบบจำลองฟังก์ชันลากสามารถใช้ได้ทั้งแบบ Syamlal-O'Brien และ Gidaspow เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม แต่สำหรับแบบจำลอง Syamlal-O'Brien หากนำไปใช้ต้องมีการปรับแก้ค่าคงที่ที่เหมาะสมกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดก่อน

บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

การศึกษาการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มีวิธีการดำเนินงานหลักๆ 2 ขั้นตอน คือ การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Gambit 2.4.6 และการคำนวณแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Fluent 14.5 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

3.1 การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Gambit 2.4.6

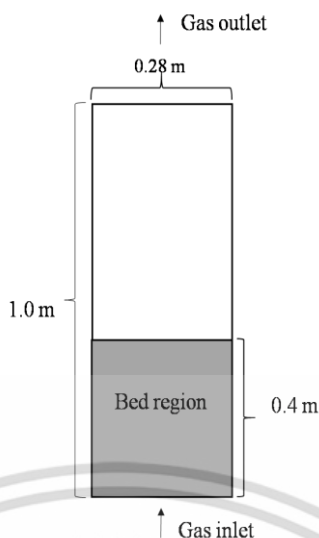
สำหรับการสร้างแบบจำลองในที่นี้เป็นการวาดขอบเขตของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา คือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยแบบจำลองที่วาดหลักๆ มี 2 แบบ คือ เครื่องปฏิกรณ์ที่อ้างอิงจากงานวิจัย [1] (ไม่มีวงแหวน) และเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบต (มีวงแหวน) ในส่วนของวงแหวน ที่มีการติดตั้งนั้น มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกรูปร่างสี่เหลี่ยม ได้ติดตั้งภายในเครื่องปฏิกรณ์และใช้วัสดุชนิดเดียวกับผนังเครื่องปฏิกรณ์ รูปแบบเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองแบบมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบไม่มีวงแหวนที่อ้างอิงจากงานวิจัย [1]

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองและดูการกระจายตัวของเบตภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อไม่มีวงแหวน โดยขนาดของเครื่องปฏิกรณ์และคุณสมบัติของเบตได้อ้างอิงจากงานวิจัยอื่น [1] สร้างเป็นแบบ 2 มิติ มีขนาดกว้าง 0.28 เมตร สูง 1.0 เมตร ความสูงของเบตเริ่มต้น 0.4 เมตร รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3.1

หลังจากวาดแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่อ้างอิงจากงานวิจัย [1] (ไม่มีวงแหวน) เรียบร้อยแล้ว จะนำแบบเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวไปทดสอบแบบจำลองในโปรแกรม fluent โดยเทียบกับผลการทดลองของงานวิจัย [1] ค่าที่นำมาเทียบกันเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคือ ค่าความดันตกของเบต โดยตัวแปรที่ศึกษาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง มี 2 ตัวแปร คือ จำนวนกริดและจำนวนการคำนวณซ้ำ (iterations) รายละเอียดตัวแปรที่ศึกษาเพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทั้งหมด แสดงในตารางที่ 3.1 เมื่อได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมแล้วจะนำค่าตัวแปรเหล่านี้พร้อมแบบจำลองไปใช้สร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตชนิดที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบต (มีวงแหวน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 รูปแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่อ้างอิงจากงานวิจัยแบบไม่มีวงแหวน [1]

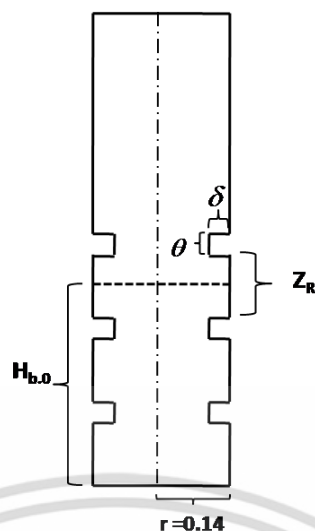
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดตัวแปรที่ศึกษาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ตัวแปร	ค่าที่ศึกษา
จำนวนกริด	31,110 กริด
	17,500 กริด
	11,200 กริด
จำนวนรอบการคำนวณซ้ำ	20 รอบ
	40 รอบ
	80 รอบ

3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบต (มีวงแหวน)

การสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ ใช้ข้อมูลการกระจายตัวของเบตสูงสุดในเครื่องปฏิกรณ์ที่อ้างอิงจากงานวิจัย [1] (ไม่มีวงแหวน) เพื่อกำหนดจุดที่เริ่มติดตั้งวงแหวน ตัวบนสุดโดยให้วงแหวน ตัวบนสุดอยู่ภายใต้เบตที่กระจายตัวในระดับสูงสุด (ป้องกันการติดตั้งวงแหวนในตำแหน่งที่ไม่สัมผัสกับเบตตลอดช่วงเวลาที่เบตเกิดฟลูอิดไดซ์ขึ้น ซึ่งจะเป็นการติดตั้งโดยไร้ประโยชน์) ตัวอย่างการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก.2 โดยที่แต่ละแบบจำลองในหัวข้อนี้จะใช้เบตปริมาณเริ่มต้นเท่ากัน ดังนั้นเมื่อมีการติดตั้งวงแหวน ขนาดต่างๆ การตั้งค่าเบตที่เวลาเริ่มต้นต้องชดเชยปริมาณเบตที่ถูกแทนที่ด้วยวงแหวน ตัวอย่างแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบต (มีวงแหวน) แสดงแบบ 2 มิติ ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โครงสร้าง 2 มิติ เครื่องปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบต (มีวงแหวน)

สำหรับการศึกษาการกระจายตัวของเบต ได้ทำการศึกษาดัชนี 3 ตัวแปร คือ ความสูงของวงแหวน (seta, θ) ความกว้างของวงแหวน (delta, δ) และจำนวนวงแหวน (number of ring) รายละเอียดตัวแปรที่ศึกษาการกระจายตัวของเบต แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดตัวแปรที่ศึกษาการกระจายตัวของเบต

ตัวแปร	ค่าที่ศึกษา
ความสูงของวงแหวน (θ)	0.0125 เมตร
	0.025 เมตร
	0.05 เมตร
ความกว้างของวงแหวน (δ)	0.014 เมตร (0.1r)
	0.028 เมตร (0.2r)
	0.056 เมตร (0.4r)
จำนวนวงแหวน	1 ตัว
	2 ตัว
	3 ตัว
	4 ตัว
	5 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การคำนวณแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Fluent 14.5

สำหรับการทดสอบแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดของงานวิจัยนี้ใช้สมการควบคุมของกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม โดยใช้โปรแกรม Fluent 14.5 การคำนวณแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (validation) และการคำนวณเพื่อดูการกระจายตัวของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบด

สำหรับการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น ได้ใช้รูปแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่อ้างอิงจากงานวิจัย [1] (ไม่มีวงแหวน) เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นเมื่อนำมาคำนวณในโปรแกรม Fluent แบบจำลองให้ค่าความดันลดตรงหรือใกล้เคียงกับการทดลองหรือไม่ หากไม่ตรงกันหรือไม่ใกล้เคียงต้องปรับปรุงแบบจำลองจนกว่าจะได้แบบจำลองที่ให้ค่าความดันลดตรงหรือใกล้เคียงกับการทดลองให้มากที่สุด สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการปรับตัวแปร 2 ตัว คือจำนวนกริดและจำนวนการคำนวณซ้ำ เพื่อหาค่าตัวแปรที่ทำให้แบบจำลองมีค่าความดันลดที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด และหลังจากนั้นจะนำค่าตัวแปรเหล่านั้นมาใช้ในขั้นตอนการคำนวณเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในโปรแกรม Fluent แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับกำหนดค่าในโปรแกรมการคำนวณ

คำอธิบาย	ค่า/สมการ
Model	Multiphase - Eulerian
Solver	Type : Pressure-Baerd Time : Transient
Phase	<u>Primary</u> : Air (density 1.225 kg/m^3), viscosity $1.79 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ <u>Secondary</u> : Solid (density $2,500 \text{ kg/m}^3$), viscosity $1.79 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$, diameter 275×10^{-6} เมตร)
Phase interaction	Drag modification : Syamlal-obrien
Restitution coefficient	0.9
Boundary condition	Inlet : velocity of air phase 0.38 เมตรต่อวินาที Outlet : Outflow Wall : wall
User - defined	Interpreted
Solution controls	Pressure : 0.1 Density : 1 Body forces : 1 Momentum : 0.2 Volume fraction : 0.4
Solution methods	Pressure-velocity coupling : Phase coupled SIMPLE Gradient : Least Squares Cell Based Momentum : First Order Upwind Volume fraction : First Order Upwind Granular temperature : First Order Upwind Transient formulation : First Order Upwind

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล

จากการดำเนินงานตามวิธีการดำเนินงานในบทที่ 3 สามารถแสดงผลการดำเนินงานโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการทดสอบแบบจำลอง และส่วนของการศึกษาการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบต ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลองได้ทำการศึกษาจำนวนกริดและจำนวนการคำนวณซ้ำของแบบจำลอง เพื่อยืนยันความแม่นยำของการคำนวณและความถูกต้องทางด้านกายภาพของแบบจำลอง โดยใช้แบบจำลอง Eulerian-Eulerian และ drag modification เป็นแบบ Syamlal-O'Brien [8] ส่วนคุณสมบัติเฉพาะของของไหลและเบตได้อ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [1] ผลการศึกษาแสดงโดยการเปรียบเทียบค่าความดันลดของเบตระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัย [1]

4.1.1 ผลของจำนวนกริดที่มีต่อค่าความดันลดของแบบจำลองเมื่อเทียบกับผลการทดลอง

การศึกษาได้ทำการกำหนดค่าความกว้างกริดของแบบจำลอง ในโปรแกรม Gambit ที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.003 0.004 และ 0.005 เมตร ซึ่งทำให้ได้จำนวนกริดของแต่ละแบบจำลองเท่ากับ 31,110 17,500 และ 11,200 กริด ตามลำดับ ใช้จำนวนการคำนวณซ้ำเท่ากันคือ 20 รอบ และผลการทดสอบแบบจำลองได้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบตกับระยะเวลาการเกิดฟลูอิดไดซ์โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 พบว่าแบบจำลองที่จำนวนกริดเท่ากับ 31,110 และ 17,500 กริด มีความดันตกคร่อมเบตบางช่วงเท่านั้นที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองที่จำนวน 11,200 กริด แต่บางช่วงมีค่าความดันลดแตกต่างจากผลการทดลองมากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าการคำนวณอาจมีความแม่นยำมากกว่า แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการไหลในทางกายภาพตลอดช่วงระยะเวลาการเกิดฟลูอิดไดซ์ จะเห็นว่า ที่แบบจำลองจำนวน 11,200 กริดนั้นมีแนวโน้มของค่าความดันลดในทางด้านกายภาพดีกว่าอีกสองแบบจำลอง จึงสรุปว่าที่แบบจำลองจำนวน 11,200 กริด มีความเหมาะสมสำหรับทำนายพฤติกรรมการการเกิดฟลูอิดไดซ์

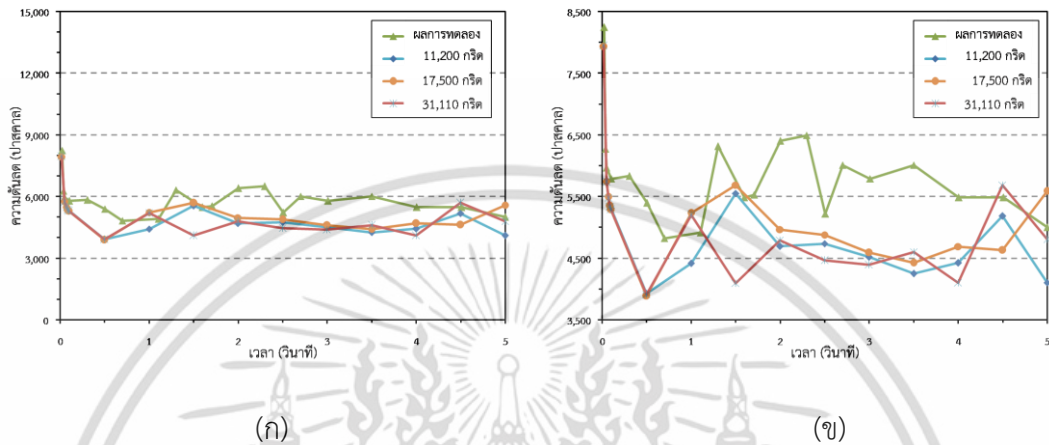
4.1.2 ผลของจำนวนการคำนวณซ้ำที่มีต่อค่าความดันลดของแบบจำลอง

จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1 จำนวนกริดที่เหมาะสมคือ 11,200 กริด เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำมากขึ้น จึงได้ทำการศึกษาผลของการคำนวณซ้ำโดยกำหนดจำนวนการคำนวณซ้ำที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 20 40 และ 80 รอบ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.2

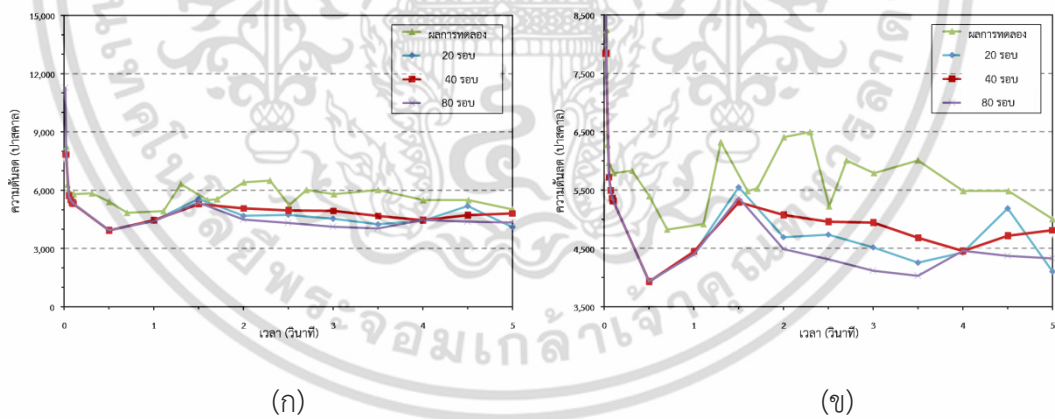
จากรูปที่ 4.2 พบว่าการเพิ่มจำนวนการคำนวณซ้ำเป็น 40 รอบ ทำให้ค่าความดันลดมีค่าเข้าใกล้ผลการทดลองมากกว่าที่การคำนวณซ้ำ 20 และ 80 รอบ ยกเว้นที่เวลา 1.5 และ 3.5 วินาที ที่ให้ค่าต่ำกว่าที่การคำนวณซ้ำ 20 รอบ เพียงเล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วที่การคำนวณซ้ำ 40 รอบ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น และเมื่อพิจารณาทางด้านกายภาพพบว่ายังคงมีแนวโน้มของค่าความดันลดตลอดช่วงเวลา 0 ถึง 5 วินาที ดีกว่าที่การคำนวณซ้ำ 20 และ 80 รอบ จากผลการศึกษาจึงสรุปว่า แบบจำลองที่มีความถูกต้องทั้งในเรื่องความแม่นยำของการคำนวณและทางด้านกายภาพมากที่สุด คือแบบจำลองที่จำนวนกริด 11,200 และที่การคำนวณซ้ำ 40 รอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ผลของจำนวนกริดที่มีต่อค่าความผันผวนเมื่อเทียบกับผลการทดลอง
(ก) สเกลเท่ากับงานวิจัยที่อ้างอิง (ข) ขยายสเกลเพื่อดูแนวโน้ม

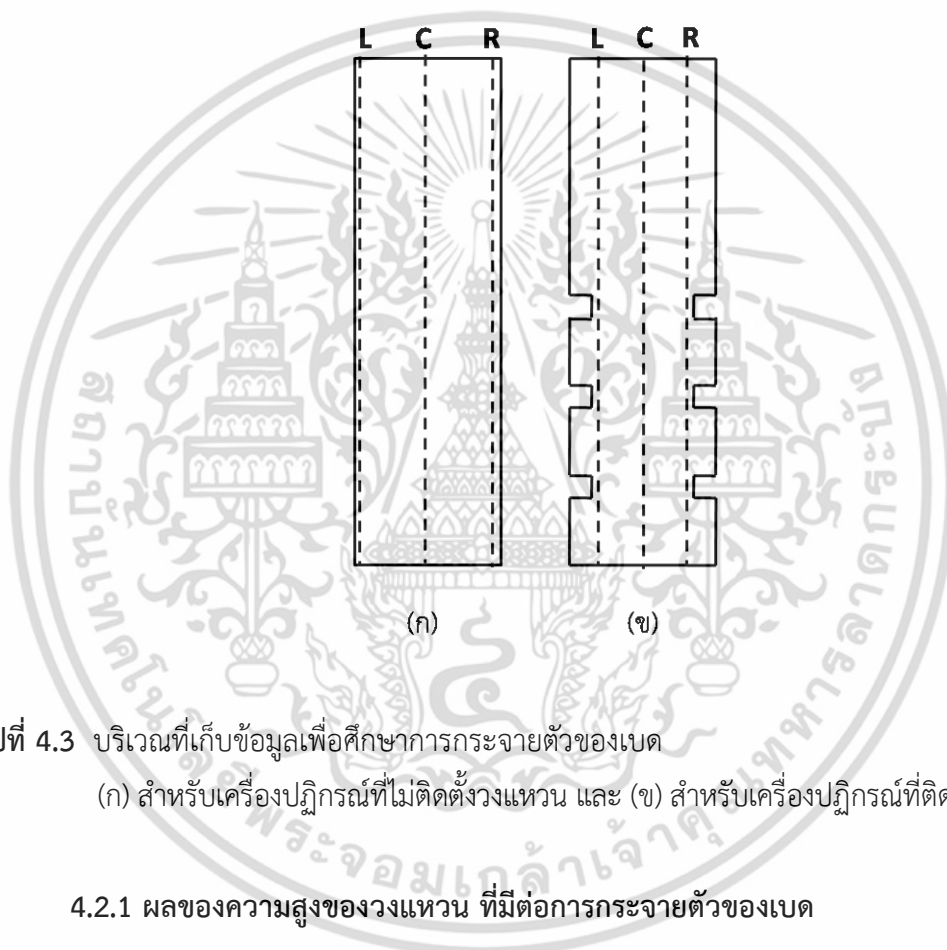


รูปที่ 4.2 ผลของจำนวนการคำนวณซ้ำที่มีต่อค่าความผันผวนเมื่อเทียบกับผลการทดลอง
(ก) สเกลเท่ากับงานวิจัยที่อ้างอิง (ข) ขยายสเกลเพื่อดูแนวโน้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของเบต

การพิจารณาการกระจายตัวของเบตในแต่ละแบบจำลองนั้น ใช้วิธีสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งกับระดับความสูงภายในเครื่องปฏิกรณ์ตั้งแต่ที่ความสูง 0-0.6 เมตร ที่บริเวณด้านซ้าย (L) กลาง (C) และขวา (R) ของเครื่องปฏิกรณ์ (LCR graph) เส้น L และ R ห่างจากวงแหวน ระยะ 0.01 เมตร ตัวอย่างบริเวณที่มีการเก็บค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง เพื่อนำมาแสดงใน LCR graph แสดงดังรูปที่ 4.3



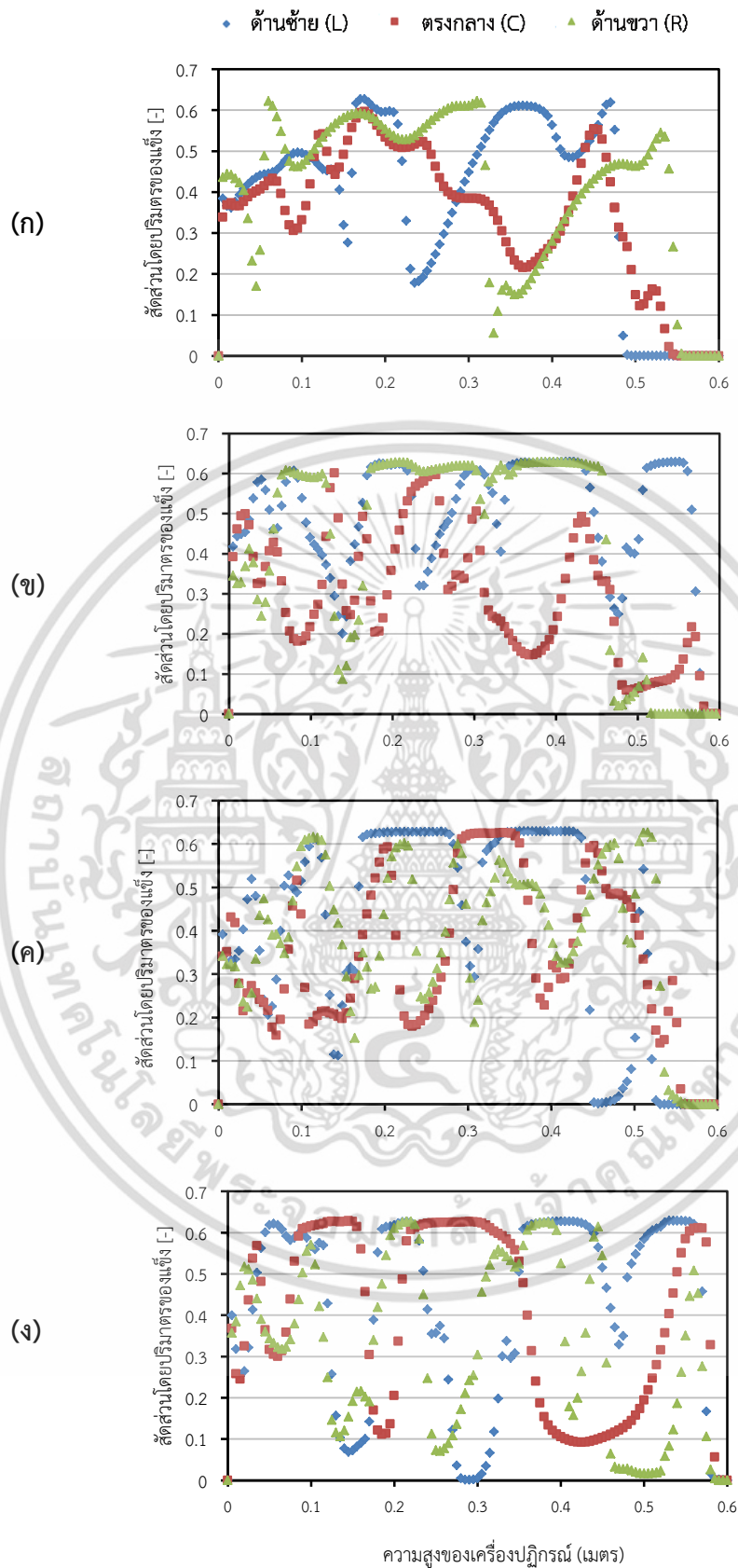
รูปที่ 4.3 บริเวณที่เก็บข้อมูลเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเบต

(ก) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งวงแหวน และ (ข) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งวงแหวน

4.2.1 ผลของความสูงของวงแหวน ที่มีต่อการกระจายตัวของเบต

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการติดตั้งวงแหวน ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตโดยที่ไม่มีงานวิจัยอื่นเป็นแนวทางสำหรับการติดตั้งวงแหวน ดังนั้นการเริ่มศึกษาจึงเริ่มจากติดตั้งวงแหวนจำนวน 3 ตัว และความกว้างเท่ากับ 0.028 เมตร ($0.2r$) ก่อน และเริ่มศึกษาตัวแปรแรกคือ ผลของความสูงของวงแหวนที่มีผลต่อการกระจายตัวของเบต ความสูงของวงแหวนที่ศึกษาคือ 0.0125 0.025 และ 0.05 เมตร แสดงผลการศึกษาในรูปของกราฟ CLR ภาพคอนทัวร์ และค่าความดันลดที่วินาทีที่ 5 ซึ่งใช้พิจารณาการกระจายตัวของเบตประกอบกันดังนี้

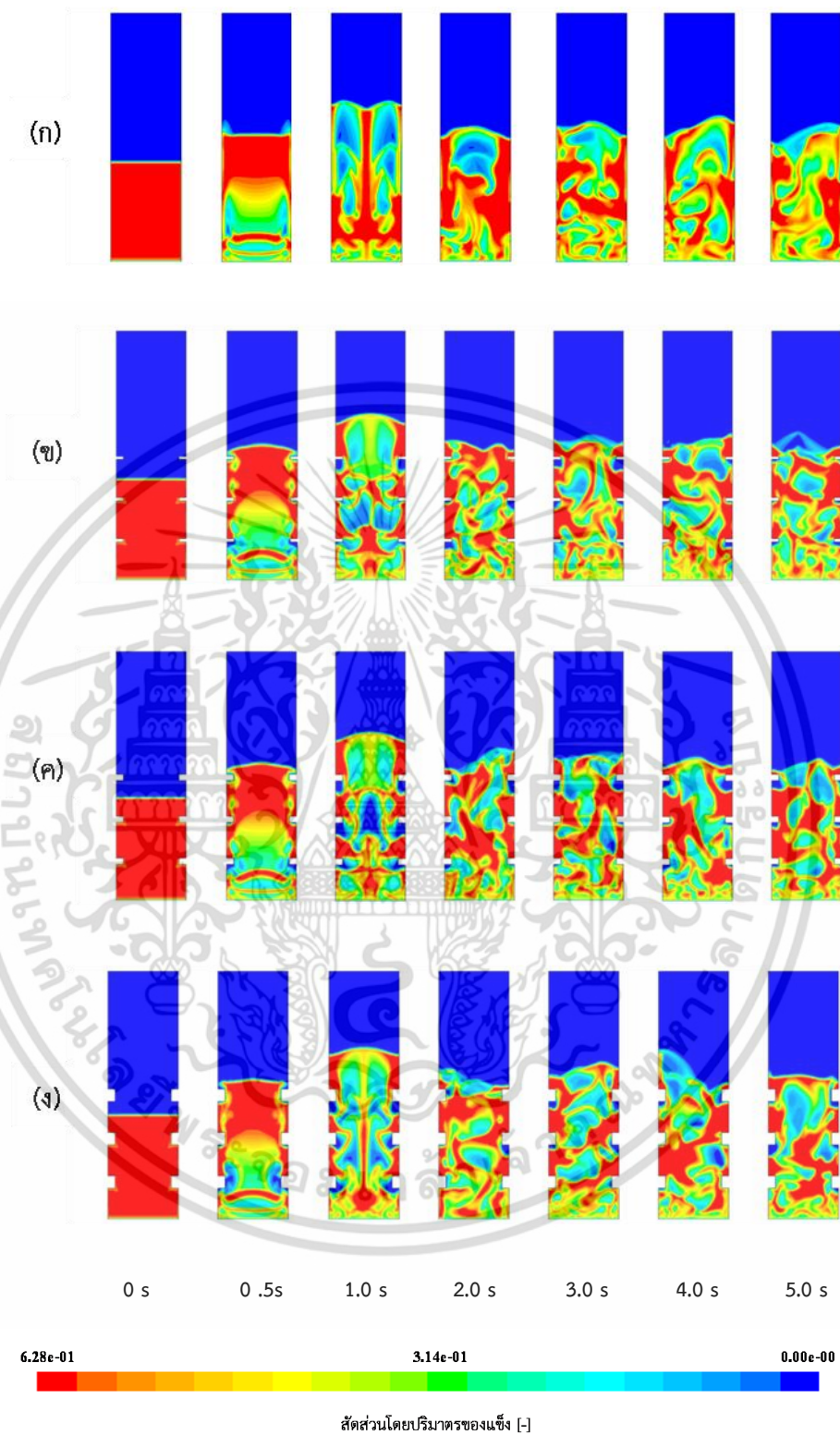
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟ CLR แสดงการกระจายตัวของเบด (ก) ไม่มีวงแหวน (ข) - (ง) วงแหวน 3 ตัว

มีความกว้าง $0.2r$ ความสูง (ข) 0.0125 เมตร (ค) 0.025 เมตร และ (ง) 0.05 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ (ก) ไม่มีวงแหวน
 (ข) - (ง) วงแหวน 3 ตัว มีความกว้าง $0.2r$ ความสูง (ข) 0.0125 เมตร (ค) 0.025 เมตร
 และ (ง) 0.05 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 กราฟ CLR แสดงการกระจายตัวของเบต จะเห็นว่าการกระจายตัวของเบตเมื่อมีการติดตั้งวงแหวน (รูปที่ 4.4 (ข)-(ง)) สิ่งแรกที่พบคือเบตมีการกระจายตัวดีกว่าการไม่ติดตั้งวงแหวน (รูปที่ 4.4 (ก)) สังเกตจากเมื่อไม่มีการติดตั้งวงแหวน จุดที่แสดงค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งทั้งด้านซ้าย กลาง และขวา มีลักษณะตึกๆ กันตลอดช่วงความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่ศึกษา และค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งมีค่าส่วนใหญ่อยู่ที่ 0.2 – 0.6 ไม่พบบริเวณที่สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงถึงบริเวณช่องว่างของอากาศที่ถูกปล่อยผ่านขึ้นมาจากด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ได้สัมผัสกับเบต แต่เมื่อมีการติดตั้งวงแหวนจำนวน 3 ตัว พบว่ากราฟ CLR แสดงจุดของค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งมีลักษณะห่างกันมากขึ้น แสดงถึงการที่เบตมีการกระจายตัวแยกอิสระต่อกันมากขึ้น และที่ความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.05 เมตร (รูปที่ 4.4 (ง)) พบว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งมีค่าต่ำจนถึงศูนย์เป็นบริเวณกว้างกว่าที่ความสูงเบต 0.0125 และ 0.025 เมตร แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ความสูงวงแหวนเท่ากับ 0.05 เมตร มีบริเวณช่องว่างของอากาศที่ถูกปล่อยผ่านขึ้นมาจากด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ได้สัมผัสกับเบตได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น

รูปที่ 4.5 แสดงภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง จะเห็นว่าการติดตั้งวงแหวน นั้น ทำให้บริเวณสีแดงซึ่งเป็นบริเวณที่มีเบตหนาแน่นนั้นอยู่ห่างกันมากขึ้น หรือมีบริเวณสีน้ำเงินซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศไหลในลักษณะบัพเปิดมากขึ้นนั่นเอง ให้ผลสอดคล้องกับภาพกราฟ CLR รูปที่ 4.4 และเมื่อพิจารณาความดันลดในตารางที่ 4.1 พบว่าการติดตั้งเบตส่งผลต่อความดันลดมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.025 เมตร มีค่าความดันลดสูงที่สุด ส่วนที่ความสูงเท่ากับ 0.05 เมตร มีค่าความดันลดสูงกว่าที่ความสูงวงแหวน 0.0125 เมตร เพียงเล็กน้อย แต่ที่ความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.05 เมตร เบตมีการกระจายตัวดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าความสูงของวงแหวน ที่เหมาะสมคือ 0.05 เมตร และจะใช้ค่าความสูงของวงแหวน นี้ไปศึกษาผลของค่าความกว้างของวงแหวน (δ) ต่อไป

ตารางที่ 4.1 ความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์ของแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการกระจายตัวของเบต

ลำดับ	จำนวนวงแหวน	ความกว้างของวงแหวน (เมตร)	ความสูงของวงแหวน (เมตร)	ความดันลด (ปาสคาล)
1	0	0	0	5,996.00
2	3	0.028 (0.2r)	0.0125	5,590.19
3	3	0.028 (0.2r)	0.025	6,049.58
4	3	0.028 (0.2r)	0.05	5,687.01
5	3	0.014 (0.1r)	0.05	5,719.49
6	3	0.056 (0.4r)	0.05	5,859.97
7	1	0.056 (0.4r)	0.05	6,762.79
8	2	0.056 (0.4r)	0.05	6,080.48
9	4	0.056 (0.4r)	0.05	5,239.33
10	5	0.056 (0.4r)	0.05	3,977.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับขึ้นการในชั้นเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

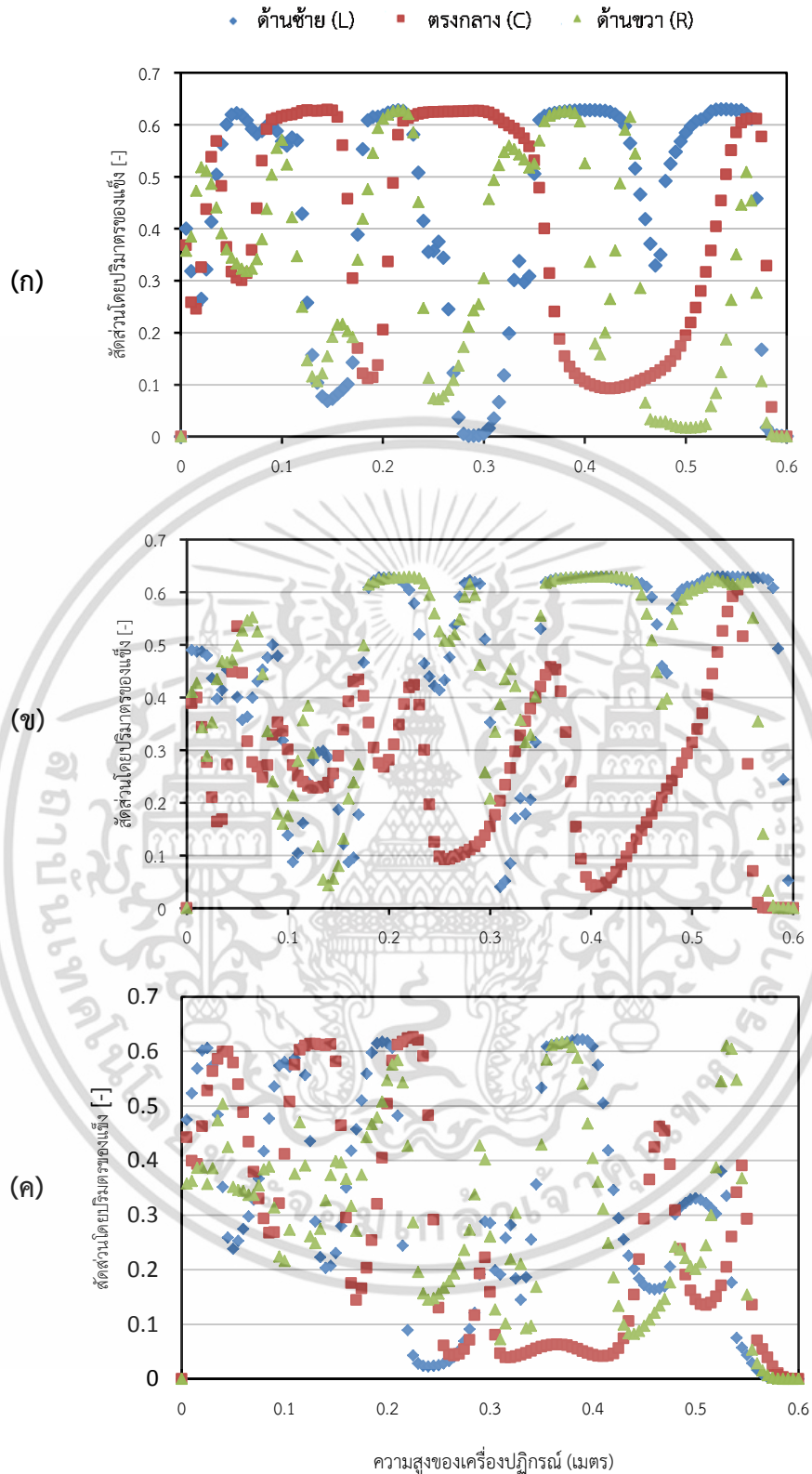
4.2.2 ผลของความกว้างของวงแหวนที่มีต่อการกระจายตัวของเบต

การศึกษาผลของความกว้างของวงแหวนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเบต สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตที่ยังคงติดตั้งวงแหวนจำนวน 3 ตัว ความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.05 เมตร (อ้างอิงจากความสูงที่ทำให้เบตกระจายตัวดีที่สุดในหัวข้อ 4.2.1) และความกว้างของวงแหวนที่ศึกษามี 3 ค่า คือ 0.1r 0.2r และ 0.4r ผลการศึกษามีดังนี้

จากรูปที่ 4.6 พบว่าที่ค่าความกว้างของวงแหวน เท่ากับ 0.4r นั้น มีการกระจายตัวของเบตดีกว่าค่าอื่น สังเกตจากบริเวณที่สกัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งสูงๆ (ใกล้เคียง 0.6) จุดของค่าสกัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งไม่ติดกันเหมือนที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.2r แล้ว และที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.4r บริเวณค่าสกัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งต่ำๆ (ใกล้เคียง 0) มีค่าสกัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งของเบตอยู่ที่บริเวณนี้มากกว่าที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.2 r และ 0.1r แต่หากเทียบระหว่างที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.4r และ 0.1r การกระจายตัวของเบต มีความกระจายตัวดีใกล้เคียงกัน

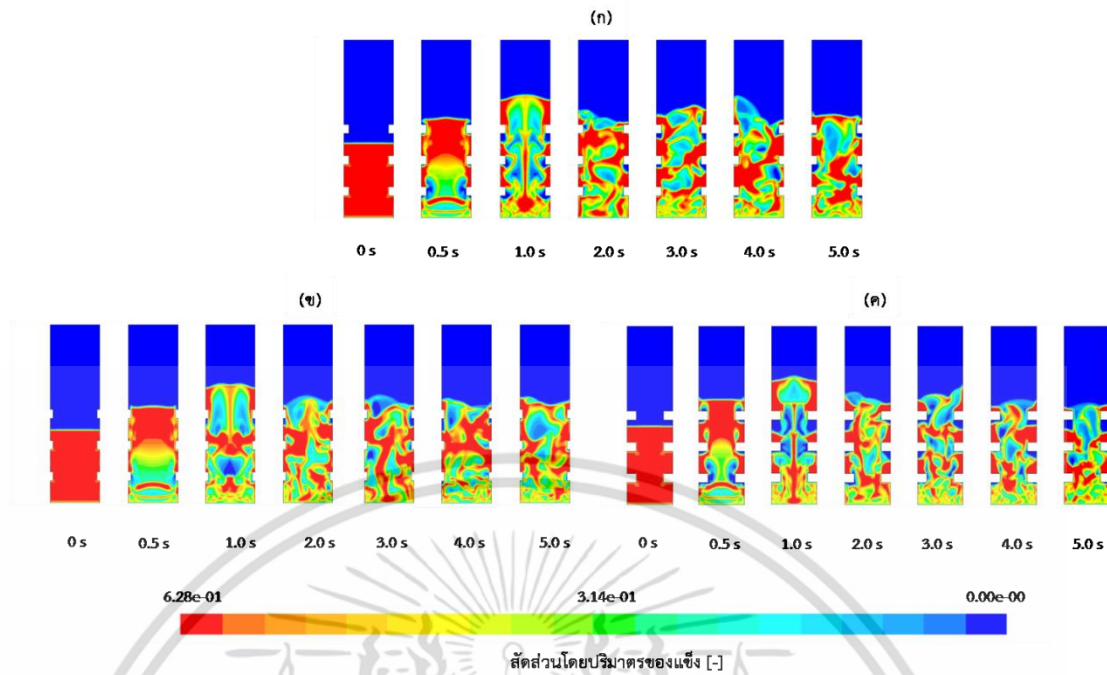
จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาที่ภาพคอนทราสต์ สังเกตได้ว่าที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.4r (รูปที่ 4.7 (ค)) มีพื้นที่ของสกัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งต่ำๆ (สีน้ำเงิน) มากกว่าที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.2r (รูปที่ 4.7 (ก)) และ 0.1r (รูปที่ 4.7 (ข)) และที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.4r ภาพคอนทราสต์ช่วง 0.5 -5 วินาที แสดงให้เห็นว่าอากาศได้แทรกตัวผ่านเบตได้ดีจนเกิดเป็นลักษณะคล้ายฟองอากาศ เมื่อสังเกตที่ 5 วินาที ด้านบนสุดของเบตที่เคยเป็นสีแดงจากที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.2r ที่ความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.05 เมตร ที่เคยติดกันนั้นจะไม่พบในแบบจำลองที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.4r แล้ว (สีแดงได้ขาดออกจากกัน) ซึ่งถือเป็นข้อดีเนื่องจากการช่วยให้อากาศได้แทรกตัวผ่านเบตได้ง่ายขึ้น การทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาความดันลดจากตารางที่ 4.1 พบว่าที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.4r ให้ค่าความดันลดสูงสุด แต่ทั้งสามแบบจำลองที่ศึกษาในหัวข้อนี้มีค่าความดันลดไม่ต่างกันมาก โดยเมื่อเทียบกับการกระจายตัวที่ได้นั้น ที่ความกว้างของวงแหวนเท่ากับ 0.4r จึงเหมาะสมที่สุด และได้ถูกใช้เป็นค่าความกว้างของวงแหวนเพื่อใช้ศึกษาผลของจำนวนวงแหวนต่อไป



รูปที่ 4.6 กราฟ LCR แสดงการกระจายตัวของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความสูงของวงแหวน 0.05 เมตร ความกว้างของวงแหวน (ก) 0.2r, (ข) 0.1r และ (ค) 0.4r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



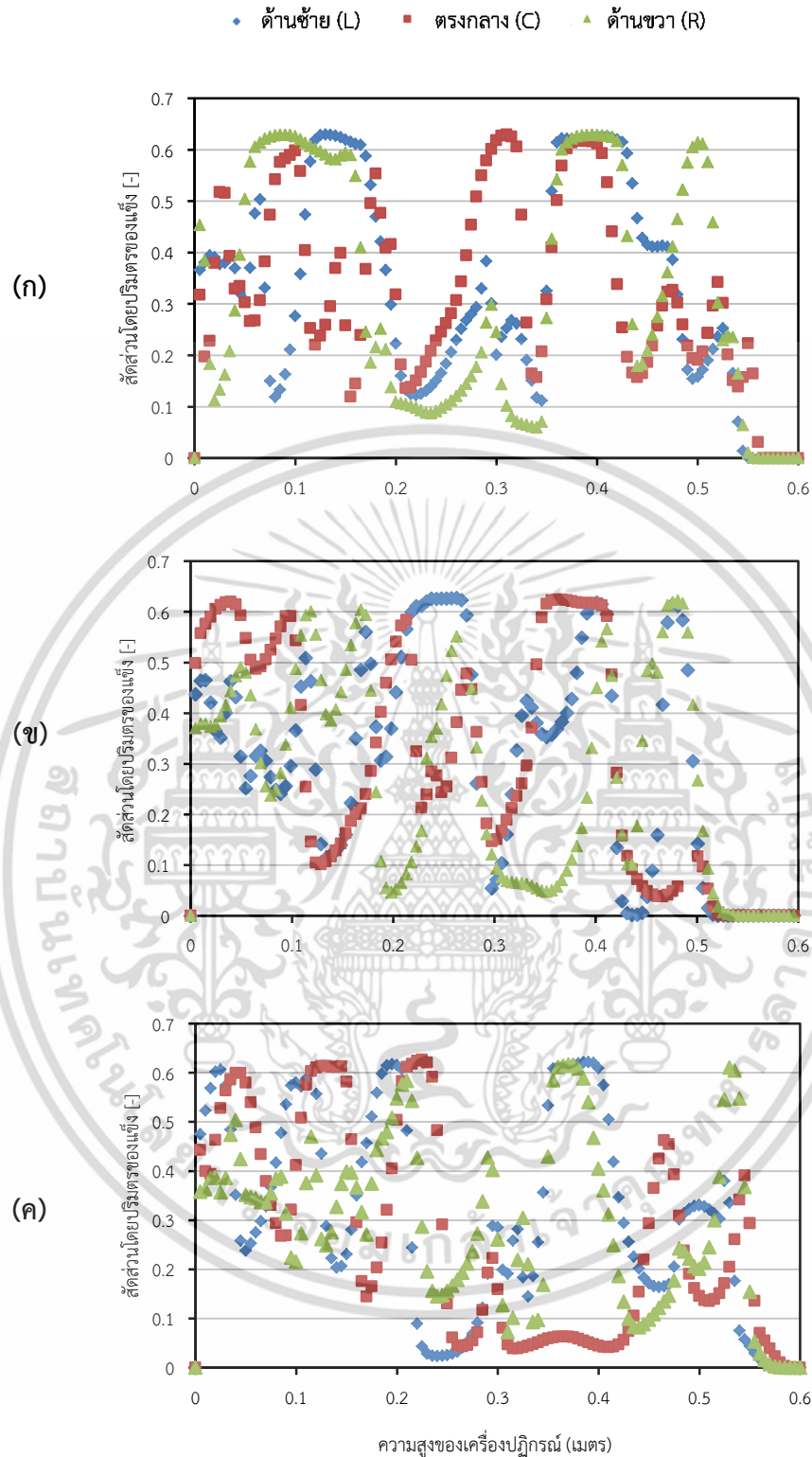
รูปที่ 4.7 ภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ติดตั้งวงแหวน 3 ตัว

ความสูงของวงแหวน 0.05 เมตร ความกว้างของวงแหวน (ก) 0.2r (ข) 0.1r และ (ค) 0.4r

4.2.3 ผลของจำนวนวงแหวนที่มีต่อการกระจายตัวของเบต

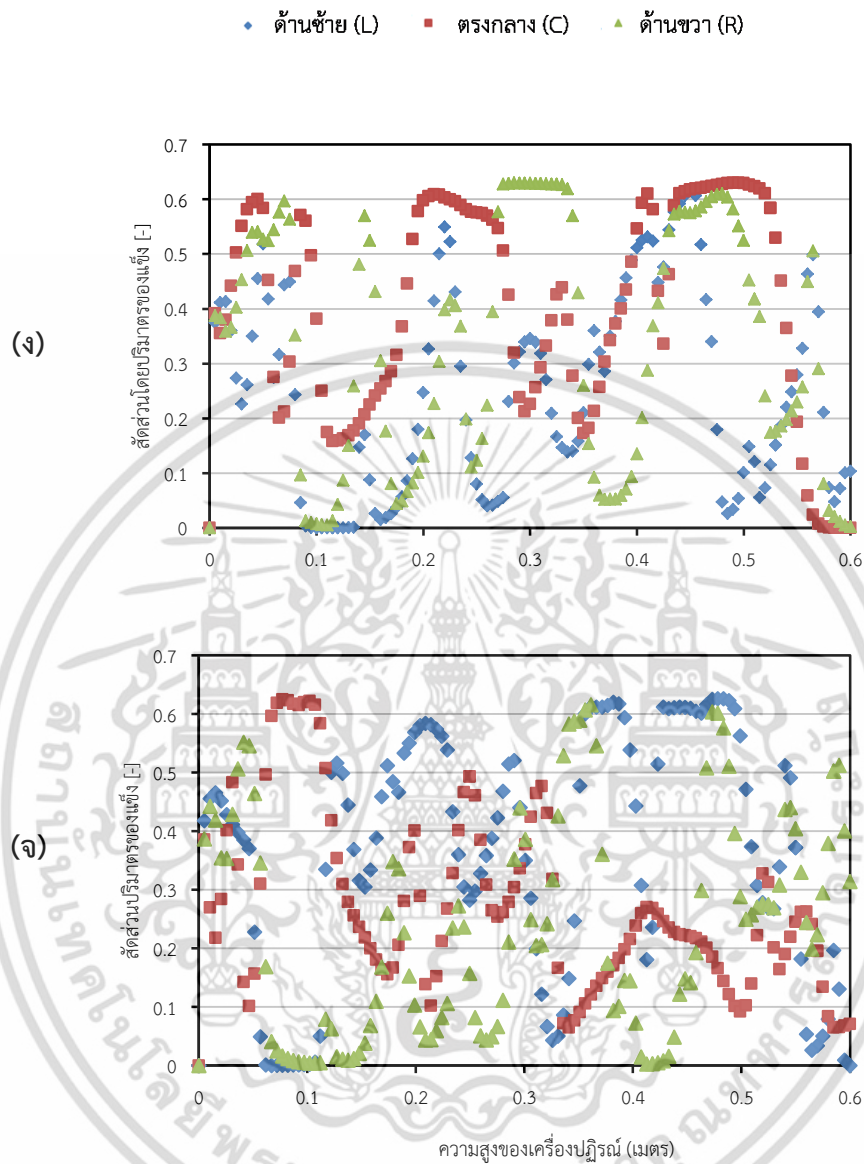
การศึกษาผลของจำนวนวงแหวนที่มีต่อการกระจายตัวของเบตได้ทำการศึกษาโดยติดตั้งวงแหวนจำนวน 1 2 3 4 และ 5 ตัว และดูผลการกระจายตัวของเบตจากกราฟ LCR (รูปที่ 4.8) และภาพคอนทัวร์ (รูปที่ 4.9) ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งวงแหวนเพียงจำนวน 1 ตัว สามารถส่งผลให้เบตมีการกระจายตัวได้ดีกว่าการไม่ติดตั้งวงแหวน สังเกตจากกราฟ CLR จะเห็นว่าจุดที่แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งของการติดตั้งวงแหวนจำนวน 1 ตัว จะมีระยะห่างออกจากกันมากขึ้น มีบริเวณที่ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งมีค่าต่ำลงถึง 0.1 สำหรับการติดตั้งวงแหวนจำนวน 2 และ 3 ตัว พบว่าที่ระยะความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ช่วงแรกๆ (0-0.1 เมตร) จุดที่แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งจะอยู่ที่ค่าสูงกว่า 0.2 เมตร ส่วนที่การติดตั้งวงแหวนจำนวน 4 และ 5 ตัว จุดที่แสดงค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งบริเวณเดียวกันนี้จะมีค่าต่ำลง และจุดจะกระจายกันมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าที่การติดตั้งวงแหวนจำนวน 4 และ 5 ตัว จะทำให้เบตกระจายตัวในช่วงที่ 0-0.1 เมตร ของเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีกว่าที่การติดตั้ง ring จำนวน 1 และ 2 ตัว ส่วนบริเวณความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่ระดับสูงกว่า 0.1 เมตร นั้น กราฟ CLR แสดงการกระจายตัวของเบตได้ดีใกล้เคียงกัน คือ มีจุดของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งค่าต่ำๆ ใกล้เคียงศูนย์เป็นระยะๆ ตลอดช่วงความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟ LCR แสดงการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีวงแหวนกว้าง 0.4r สูง 0.05 เมตร และจำนวนวงแหวน (ก) 1 ตัว (ข) 2 ตัว และ (ค) 3 ตัว

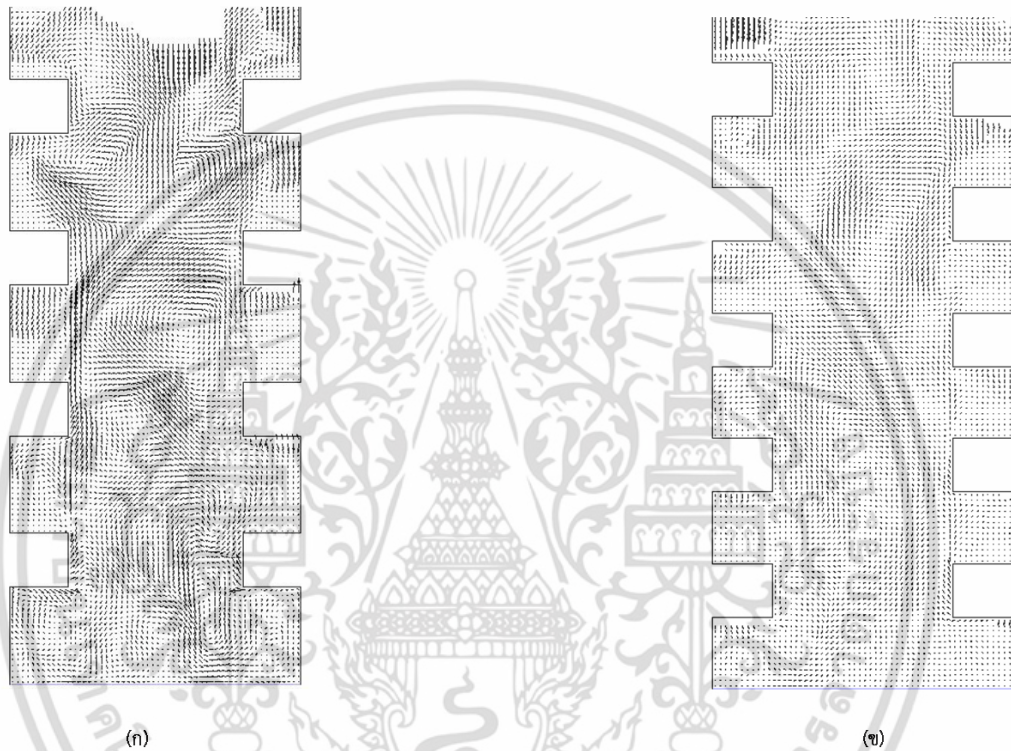
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ต่อ) กราฟ LCR แสดงการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีวงแหวนกว้าง 0.4r สูง 0.05 เมตร และจำนวนวงแหวน (ง) 4 ตัว และ (จ) 5 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อสรุปข้างต้น การติดตั้งวงแหวนจำนวน 4 และ 5 ตัว ให้การกระจายตัวของเบตดีกว่า การติดตั้งวงแหวนจำนวน 1 และ 2 ตัว ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งวงแหวนจำนวน 4 และ 5 ตัว โดยดูจากภาพคอนทราสต์พบว่าลักษณะของบริเวณที่เป็นสีแดงซึ่งแทนบริเวณที่มีเบตอยู่หนาแน่นนั้นส่วนใหญ่จะปรากฏบริเวณช่องระหว่างชั้นของวงแหวน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเบตนั้นอาจจะไปค้างอยู่บริเวณนั้น จึงได้ทำการตรวจสอบทิศทางการเคลื่อนที่ของเบตบริเวณนั้นของแบบจำลองการติดตั้งวงแหวนทั้ง 4 และ 5 ตัว ในรูปแบบเวกเตอร์ความเร็วของแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ทิศทางการไหลของเบตในเครื่องปฏิกรณ์บริเวณที่มีการติดตั้งวงแหวน

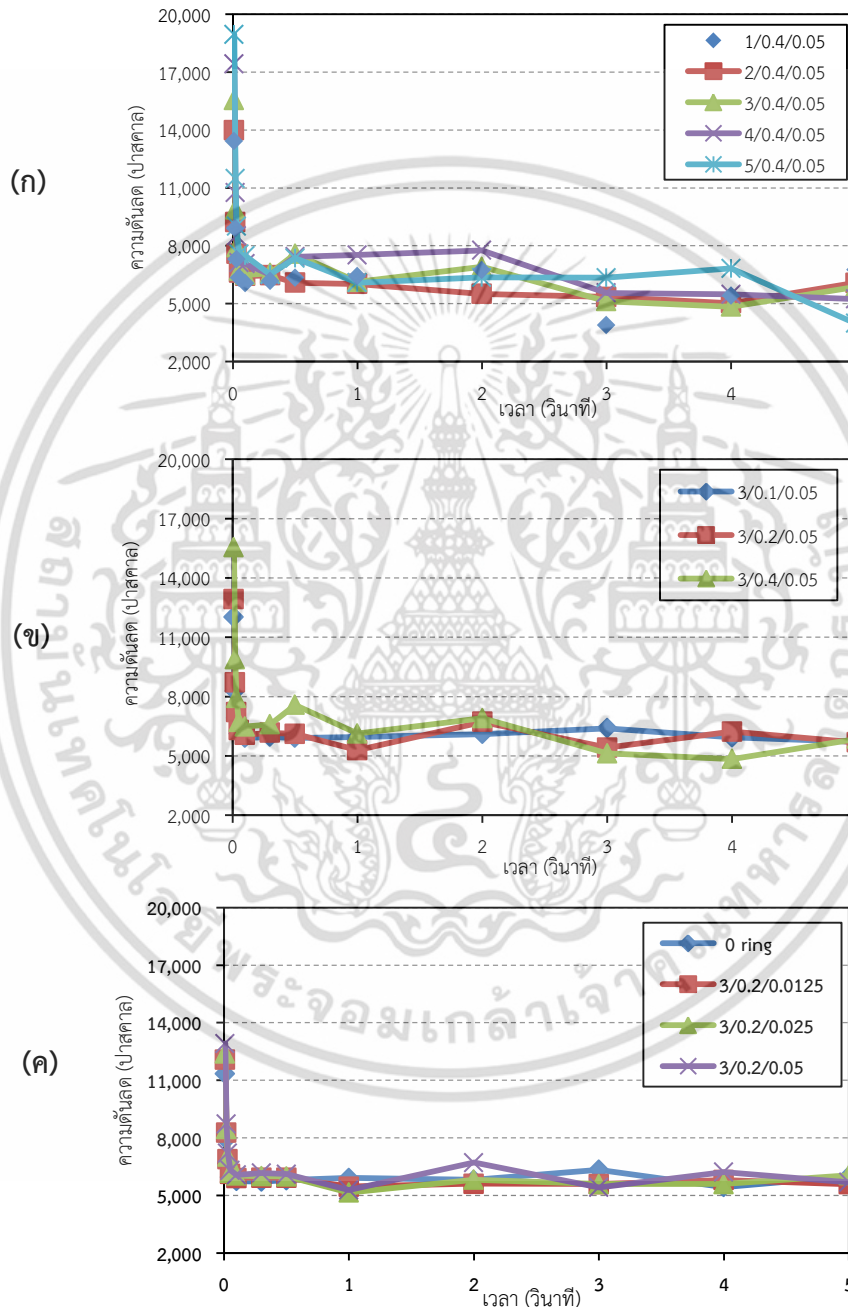
(ก) เครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งวงแหวน 4 ตัว และ (ข) เครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งวงแหวน 5 ตัว

จากรูปที่ 4.10 เวกเตอร์ที่แสดงค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของการติดตั้งวงแหวน จำนวน 5 ตัว บริเวณเดียวกับคอนทราสต์ที่มีเบตอยู่อย่างหนาแน่นนั้น แสดงให้เห็นว่าเบตมีการเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าการติดตั้งวงแหวน 4 ตัว หรือกล่าวได้ว่าเบตค้างอยู่บริเวณนั้น แต่การติดตั้งวงแหวน 4 ตัว เบตยังเคลื่อนที่ได้อยู่ สังเกตจากเวกเตอร์ได้แสดงทิศทางการไหลของเบตได้ชัดเจนกว่า การติดตั้งวงแหวน 5 ตัว ดังนั้นการติดตั้งจำนวนวงแหวนที่ทำให้เบตกระจายตัวได้ดีที่สุดคือการติดตั้งวงแหวน 4 ตัว การติดตั้งวงแหวน 5 ตัว ทำให้เบตเกิดลอยตัวไปค้างอยู่ข้างบนวงแหวน ส่งผลให้เบตเหล่านั้นไม่สัมผัสกับแก๊สที่ไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ความสำคัญของความสูงของวงแหวน ความกว้างของวงแหวน และจำนวนวงแหวนที่มีต่อความดันตกคร่อมของเครื่องปฏิกรณ์

จากการศึกษาผลของความสูงของวงแหวน ความกว้างของวงแหวน และจำนวนวงแหวน ที่มีผลต่อความดันตกในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด ได้แสดงผลการศึกษาดังรูปที่ 4.11



สัญลักษณ์ : จำนวนวงแหวน (ตัว) / ความกว้าง (จำนวนเท่าของรัศมีเครื่องปฏิกรณ์) / ความสูง (เมตร)

รูปที่ 4.11 อิทธิพลของ (ก) จำนวนวงแหวน (ข) ความกว้างของวงแหวน และ (ค) ความสูงของวงแหวน

ที่ส่งผลต่อความดันตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 ทำให้พบว่า การเพิ่มจำนวนวงแหวนจะทำให้ความดันลดของเครื่องปฏิกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดรองลงมาคือความกว้างของวงแหวน และความสูงของวงแหวนตามลำดับ ดังนั้นการติดตั้งวงแหวนจึงต้องคำนึงถึงผลของตัวแปรเหล่านี้ที่จะส่งผลต่อความดันลด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อการใช้พลังงานในการป้อนแก๊สที่ต้องสูญเสียเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยความดันลดที่จะเกิดขึ้น

4.2.5 สรุปค่าตัวแปรไร้หน่วยของการติดตั้งวงแหวน ที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของเบด

การศึกษาผลของความสูงของวงแหวน ความกว้างของวงแหวน และจำนวนวงแหวน ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเบด สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภายใต้ข้อกำหนดของขนาดเครื่องปฏิกรณ์ที่อ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้า ดังนั้นการนำเทคนิคการติดตั้งวงแหวนจากงานวิจัยนี้ไปใช้งานนั้น ต้องสร้างค่าตัวแปรไร้หน่วยขึ้นมาเพื่อสามารถนำค่าเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้งานกับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพการใช้งานจริง สามารถสรุปค่าตัวแปรไร้หน่วยได้ดังตารางที่ 4.2 สำหรับรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.2 และตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.2

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรในเทอมไร้หน่วย

ค่าตัวแปรไร้หน่วย	สัญลักษณ์	[-]
ความสูงของวงแหวน	θ^*	0.025
ความกว้างของวงแหวน	δ^*	0.4
ระยะห่างของวงแหวน	Z_R^*	0.125

โดยที่

$$\theta^* \equiv \frac{\theta}{H_{b,0}} \quad (4.1)$$

$$\delta^* \equiv \frac{\delta}{r} \quad (4.2)$$

$$Z_R^* \equiv \frac{Z_R}{H_{b,0}} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการติดตั้งวงแหวนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อนำมาแบบจำลองการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน การทดสอบแบบจำลองใช้แบบจำลองสำหรับของไหลหลายเฟสชนิด Eulerian-Eulerian ผสมผสานกับทฤษฎีจลน์สำหรับของอนุภาคของแข็ง ใช้แบบจำลองฟังก์ชันลากชนิด Syamlal-O'Brien เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถทำนายการเกิดฟลูอิดไดซ์ได้ โดยมีจำนวนกริดและค่าการคำนวณซ้ำที่เหมาะสมคือ 11,200 กริด และ 40 รอบ ตามลำดับ การศึกษาการกระจายตัวของเบตในเครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งวงแหวนในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเป็นการรบกวนการไหลของของไหล ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น ส่งผลดีคือทำให้เบตกระจายตัวได้ดีขึ้น ตัวแปรของวงแหวนที่ศึกษา คือ ความสูง ความกว้าง และจำนวนวงแหวน ที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของเบต ผลการศึกษาการกระจายตัวของเบตพบว่าการติดตั้งวงแหวนสามารถทำให้เบตกระจายตัวได้ดีขึ้น สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบตที่ใช้อ้างอิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.28 เมตร สูง 1 เมตร ใช้ลูกปัดแก้วทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 275 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การติดตั้งวงแหวนที่ทำให้เบตเกิดการกระจายตัวดีที่สุดคือ ติดตั้งวงแหวน จำนวน 4 ตัว กว้าง 0.056 เมตร สูง 0.05 เมตร ระยะห่างระหว่างวงแหวน 0.09 เมตร เพื่อให้การนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายกับขนาดเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใช้งานจริงสามารถแสดงค่าความกว้าง ความสูง และระยะห่างระหว่างวงแหวนในทอมไร์หน่วยเป็น 0.4 0.225 และ 0.125 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 แบบจำลองที่ใช้ทำนายพฤติกรรมกรรมการไหลในเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำนายพฤติกรรมกรรมการไหลในเชิงกายภาพได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของความแม่นยำทางการคำนวณนั้นยังมีค่าคลาดเคลื่อนจากการทดลองอยู่ ดังนั้นหากมีการนำแบบจำลองในงานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อ ควรมีการทดสอบแบบจำลองเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลการที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

5.2.1 การศึกษาการกระจายตัวของเบตได้ใช้การสร้างกราฟ LCR และภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเป็นหลักในการพิจารณาผลการกระจายตัวของเบต ในอนาคตควรมีใช้ผลการประเมินประสิทธิภาพการกระจายตัวของเบต โดยศึกษาผลของการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์และวัดผลจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าการติดตั้งวงแหวน ส่งผลดีต่อการกระจายตัวของเบต ทำให้แก๊สและของแข็งผสมผสานกันอย่างทั่วถึงมากขึ้น จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ดีขึ้นด้วย แต่ต้องคำนึงถึงผลของความดันลดที่อาจจะต้องมีมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาประสิทธิภาพการกระจายตัวไปพร้อมกับการใช้พลังงานที่มากขึ้นเพื่อชดเชยความดันที่สูญเสียไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ ตำรงค์เลิศ. **ฟลูอิดไดซ์เซชัน**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- [2] W.E. McCabe, J.C. Smith, and P.Harriott. **Unit Operations of Chemical Engineering**. McGraw Hill, New York, 2001.
- [3] D. Kunii and O. Levenspiel. **Fluidization Engineering**. 2nd ed., United state of America: Butterwoth – Heinemann, Boston, USA, 1991.
- [4] D. Gidaspow. **Multiphase flow and fluidization : continuum and kinetic theory descriptions**. Academic Press, Boston, 1994.
- [5] W.C. Yang. **Fluidization, solids handling and processing : industrial applications**. Westwood, N.J., Noyes, 1999.
- [6] H.K. Versteeg and W. Malalasekera. **An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method**, Prentice-Hall, U.K., 1995.
- [7] ANSYS, Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, U.S.A., 2011.
- [8] ANSYS, Inc., ANSYS FLUENT 13.0 User's Guide - **Modeling Uniform Fluidization in 2D Fluidized Bed**, 2011.
- [9] N.V. Brilliantov and T. Pöschel. **Kinetic Theory of Granular Gases**, Oxford University Press, Oxford, UK, 2004).
- [10] F. Taghipour, N. Ellis and C. Wong, “**Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics**” *Chemical Engineering Science*, vol. 60, 2005, pp. 6857- 6867.
- [11] I. Julian, J. Herguido and M. Menedez, “**CFD model prediction of the two-section two-zone fluidized bed reactor (TS-TZFBR) hydrodynamics**” *Chemical Engineering Journal*, vol. 248, 2014, pp. 352 - 362.
- [12] F. Battaglia, J. Bayandor and B. Y. Lattimer (2012). **A computational study of the hydrodynamics of gas-solid fluidized beds**, Thesis for the degree of Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [13] S. H. Hosseini, G. Ahmadi and M. Olazar, “**CFD simulation of cylindrical spouted beds by the kinetic theory of granular flow**” *Powder Technology*, vol. 246, 2013, pp. 303 - 316.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] M. Mostafazadeh, H. Rahimzadeh and M. Hamzei, “**Numerical analysis of the mixing process in a gas solid fluidized bed reactor**” Powder Technology, vol. 239, 2013, pp. 422 - 433.
- [15] C. Venier, S. M. Damian, D. Ramajo and N. Nigro, “**Numerical analysis of multiphase solid-gas flow with eulerian models and kinetic theory closure**” Asociacion Argentina de Mecanica Computacional, vol. 32, 2013, pp. 1849-1862.
- [16] M. Syamlal and Thomas J. O’Brien, “**Fluid dynamic simulation of O₃ decomposition in a bubbling fluidized bed**” AIChE Journal, vol. 49, no. 11, 2003, pp. 2793 – 2801.
- [17] Y. Che, Z. Tian, Z. Liu, R. Zhang, Y. Gao, E. Zou, S. Wang and B. Liu, “**CFD prediction of scale-up effect on the hydrodynamic behaviors of a pilot-Plant fluidized bed reactor and preliminary exploration of Its application for non-pelletizing polyethylene process**” Powder Technology, vol. 278, 2015, pp. 94-110.
- [18] H. Moon, H. S. Kim, J. Song, H. Lee, H. G. Kwon, Y.-sub Jung and H. H. Cho, “**Effect of extended single/multi-jet nozzles in a fluidized bed reactor on growth of granular polysilicon**” Chemical Engineering Journal, vol. 248, 2014, pp. 242 - 252.
- [19] S. Wanthamane, E. Bumrunghthaichachan and S. Wattananusorn, “**Influence of turbulence promoter geometry on flow pattern in cross-flow membrane ultrafiltration**” Ladkrabang Engineering Journal, vol. 29, 2012, pp. 48-53.



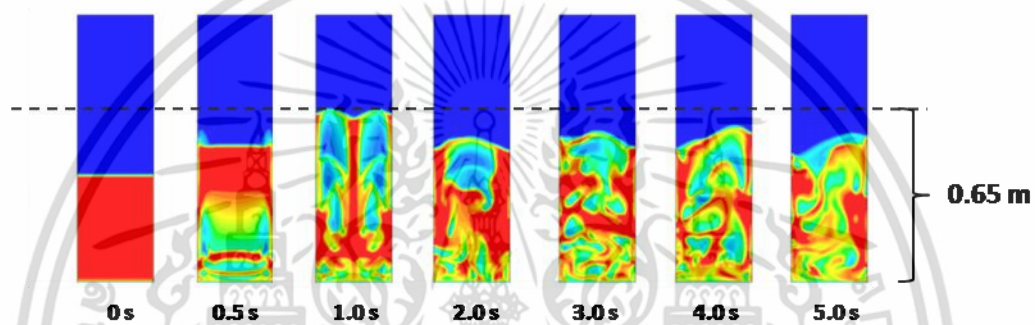
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณ

ก.1 การคำนวณตำแหน่งติดตั้งวงแหวน

สำหรับตำแหน่งที่ติดตั้งวงแหวนอ้างอิงจากตำแหน่งที่เบดลอยขึ้นไปสูงสุดในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีการติดตั้งวงแหวน คือ ที่วินาทีที่ 1 เบดลอยขึ้นไปได้สูงสุดที่ระยะ 0.65 เมตร แสดงดังรูป ก.1 การติดตั้งวงแหวน จะติดตั้งต่ำกว่าระยะสูงสุดที่เบดลอยขึ้นไปได้ และมีระยะห่างระหว่างวงแหวนเท่ากัน



รูปที่ ก.1 ตำแหน่งที่เบดลอยไปสูงที่สุดจากการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีการติดตั้งวงแหวน

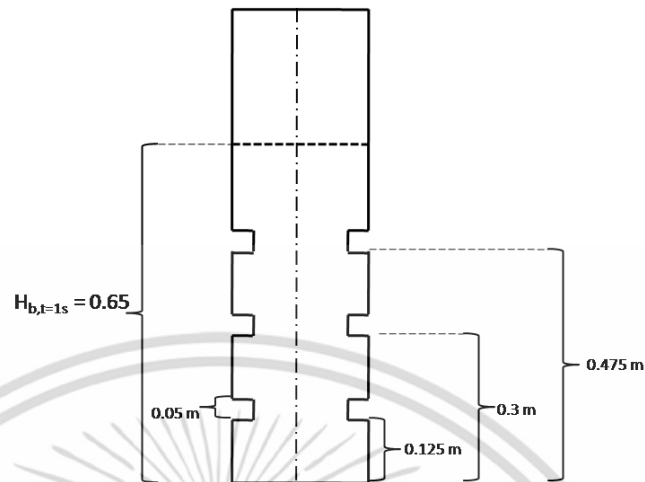
ตัวอย่างการคำนวณ

งานวิจัยเริ่มจากติดตั้งวงแหวน 3 ตัว กำหนดขนาดวงแหวน มีความกว้างคิดเป็น 20% ของรัศมีเครื่องปฏิกรณ์ มีค่าเท่ากับ 0.028 เมตร และศึกษาผลของความสูงของวงแหวน ที่ค่า 0.125 0.025 และ 0.05 เมตร ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณที่ความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.05 เมตร ดังนี้

ring 1 ตัว สูง	0.05 เมตร
ring 3 ตัว สูงรวม	$0.05 \times 3 = 0.15$ เมตร
ระยะห่างระหว่างวงแหวน ทั้ง 3 ตัว	$(0.65 - 0.15) / 4 = 0.125$ เมตร
จะได้ ring ตัวที่ 1 ติดตั้งที่ระดับ	0.125 เมตร
ring ตัวที่ 2 ติดตั้งที่ระดับ	$(0.125 \times 2) + 0.05 = 0.3$ เมตร
ring ตัวที่ 3 ติดตั้งที่ระดับ	$(0.125 \times 3) + (0.05 \times 2) = 0.475$ เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงระดับความสูงของวงแหวน ดังรูป ก.2



รูปที่ ก.2 ระดับความสูงของวงแหวน แต่ละตัว สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ติดตั้งวงแหวน 3 ตัว
ความสูงของวงแหวนเท่ากับ 0.05 เมตร

ก.2 การคำนวณค่าเทอมไร้หน่วย

ค่าตัวแปรในเทอมไร้หน่วยของแบบจำลองที่ทำให้การกระจายตัวของเบดดีที่สุดประกอบด้วย ค่าความสูงของวงแหวน (θ) เท่ากับ 0.05 เมตร ความกว้างของวงแหวน (δ) เท่ากับ 0.056 เมตร และระยะห่างระหว่างวงแหวน (Z_R) เท่ากับ 0.09 โดยกำหนดตัวแปรไร้หน่วยดังนี้

ค่าความสูงของวงแหวน

$$\theta^* \equiv \frac{\theta}{H_{b,0}} \quad \Rightarrow \quad \theta^* = \frac{0.05}{0.4} = 0.225$$

ค่าความกว้างของวงแหวน

$$\delta^* \equiv \frac{\delta}{r} \quad \Rightarrow \quad \delta^* = \frac{0.056}{0.14} = 0.4$$

ระยะห่างระหว่างวงแหวน

$$Z_R^* \equiv \frac{Z_R}{H_{b,0}} \quad \Rightarrow \quad Z_R^* = \frac{0.09}{0.4} = 0.125$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ ข.1 ความดันลดของเบตในเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับขั้นตอนการทดสอบแบบจำลอง

เวลา (s)	ความดันลดที่ได้จากการจำลอง (Pascal)					ความดันลด จากผลการทดลอง (Pascal)
	20 iterations			11,200 grid		
	11,200 grids	17,500 grids	31,110 grids	40 iterations	80 iterations	
0.1	5310.91	5289.62	5285.87	5310.44	5310.44	5789.47
0.5	3922.89	3886.94	3912.51	3931.34	3931.04	5394.74
1.0	4417.42	5230.65	5199.83	4447.79	4394.48	4912.28
1.5	5550.50	5686.36	4094.69	5289.44	5369.02	5482.46
2.0	4692.22	4966.64	4791.03	5071.28	4486.86	6403.51
2.5	4735.62	4876.92	4462.13	4955.79	4313.39	5219.30
3.0	4519.37	4591.82	4392.94	4939.48	4113.49	5789.47
3.5	4251.15	4425.07	4602.47	4677.24	4027.24	6008.77
4.0	4425.11	4689.17	4102.52	4453.66	4459.81	5482.46
4.5	5182.29	4628.34	5684.89	4714.41	4367.11	5482.46
5.0	4101.83	5585.08	4803.76	4813.08	4326.06	5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งที่แสดงในกราฟ LCR

ตารางที่ ข.2.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีการติดตั้งวงแหวน

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.005	0.384	0.005	0.339	0.005	0.436	0.160	0.446	0.160	0.557	0.160	0.590
0.010	0.366	0.010	0.368	0.010	0.444	0.165	0.616	0.165	0.580	0.165	0.592
0.015	0.362	0.015	0.373	0.015	0.442	0.170	0.627	0.170	0.593	0.170	0.592
0.020	0.376	0.020	0.366	0.020	0.433	0.175	0.627	0.175	0.596	0.175	0.591
0.025	0.393	0.025	0.366	0.025	0.423	0.180	0.619	0.180	0.590	0.180	0.587
0.030	0.408	0.030	0.376	0.030	0.404	0.185	0.608	0.185	0.578	0.185	0.582
0.035	0.419	0.035	0.388	0.035	0.336	0.190	0.601	0.190	0.563	0.190	0.573
0.040	0.428	0.040	0.397	0.040	0.232	0.195	0.595	0.195	0.547	0.195	0.563
0.045	0.435	0.045	0.402	0.045	0.170	0.200	0.595	0.200	0.534	0.200	0.553
0.050	0.441	0.050	0.407	0.050	0.258	0.205	0.598	0.205	0.523	0.205	0.545
0.055	0.443	0.055	0.415	0.055	0.489	0.210	0.595	0.210	0.515	0.210	0.537
0.060	0.445	0.060	0.425	0.060	0.622	0.215	0.566	0.215	0.510	0.215	0.531
0.065	0.448	0.065	0.433	0.065	0.610	0.220	0.475	0.220	0.508	0.220	0.528
0.070	0.454	0.070	0.426	0.070	0.584	0.225	0.329	0.225	0.508	0.225	0.528
0.075	0.464	0.075	0.396	0.075	0.548	0.230	0.213	0.230	0.511	0.230	0.532
0.080	0.477	0.080	0.354	0.080	0.505	0.235	0.178	0.235	0.516	0.235	0.538
0.085	0.488	0.085	0.320	0.085	0.475	0.240	0.183	0.240	0.521	0.240	0.546
0.090	0.495	0.090	0.305	0.090	0.463	0.700	0.000	0.245	0.522	0.245	0.556
0.095	0.496	0.095	0.311	0.095	0.462	0.695	0.000	0.250	0.513	0.250	0.566
0.100	0.495	0.100	0.332	0.100	0.467	0.690	0.000	0.255	0.491	0.255	0.575
0.105	0.491	0.105	0.366	0.105	0.477	0.685	0.000	0.260	0.462	0.535	0.535
0.110	0.485	0.110	0.419	0.110	0.490	0.680	0.000	0.265	0.435	0.540	0.457
0.115	0.477	0.115	0.486	0.115	0.505	0.675	0.000	0.270	0.414	0.545	0.266
0.120	0.466	0.120	0.539	0.120	0.520	0.670	0.000	0.700	0.000	0.550	0.076
0.125	0.455	0.125	0.542	0.125	0.534	0.665	0.000	0.695	0.000	0.555	0.005
0.130	0.452	0.130	0.499	0.130	0.547	0.660	0.000	0.690	0.000	0.560	0.000
0.135	0.455	0.135	0.454	0.135	0.557	0.655	0.000	0.685	0.000	0.565	0.000
0.140	0.448	0.140	0.443	0.140	0.567	0.650	0.000	0.680	0.000	0.570	0.000
0.145	0.405	0.145	0.460	0.145	0.575	0.645	0.000	0.675	0.000	0.575	0.000
0.150	0.319	0.150	0.491	0.150	0.582	0.640	0.000	0.670	0.000	0.580	0.000
0.155	0.276	0.155	0.525	0.155	0.587	0.635	0.000	0.665	0.000	0.585	0.000
0.160	0.446	0.160	0.557	0.160	0.590	0.630	0.000	0.660	0.000	0.590	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 1 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.225	0.125	0.225	0.167	0.000	0.000	0.060	0.476	0.060	0.267	0.165	0.410
0.220	0.123	0.220	0.151	0.005	0.453	0.055	0.370	0.055	0.266	0.170	0.245
0.215	0.124	0.215	0.139	0.010	0.384	0.050	0.307	0.050	0.303	0.175	0.185
0.210	0.133	0.210	0.136	0.015	0.183	0.045	0.321	0.045	0.335	0.180	0.216
0.205	0.160	0.205	0.182	0.020	0.112	0.040	0.369	0.040	0.329	0.185	0.252
0.200	0.223	0.200	0.318	0.025	0.133	0.035	0.392	0.035	0.393	0.190	0.211
0.195	0.299	0.195	0.416	0.030	0.162	0.030	0.380	0.030	0.515	0.195	0.138
0.190	0.366	0.190	0.409	0.035	0.208	0.025	0.377	0.025	0.517	0.200	0.109
0.185	0.421	0.185	0.477	0.040	0.287	0.020	0.391	0.020	0.380	0.205	0.106
0.180	0.470	0.180	0.554	0.045	0.396	0.015	0.394	0.015	0.228	0.210	0.105
0.175	0.532	0.175	0.496	0.050	0.504	0.010	0.381	0.010	0.197	0.215	0.102
0.170	0.588	0.170	0.368	0.055	0.577	0.005	0.366	0.005	0.317	0.220	0.098
0.165	0.609	0.165	0.239	0.060	0.605	0.000	0.000	0.000	0.000	0.225	0.093
0.160	0.611	0.160	0.145	0.065	0.614	0.535	0.165	0.225	0.167	0.230	0.088
0.155	0.615	0.155	0.120	0.070	0.621	0.530	0.236	0.230	0.187	0.235	0.087
0.150	0.620	0.150	0.258	0.075	0.626	0.525	0.253	0.235	0.209	0.240	0.091
0.145	0.624	0.145	0.399	0.080	0.628	0.520	0.236	0.240	0.229	0.245	0.098
0.140	0.627	0.140	0.369	0.085	0.629	0.515	0.212	0.245	0.246	0.250	0.104
0.135	0.629	0.135	0.295	0.090	0.629	0.510	0.190	0.250	0.262	0.255	0.112
0.130	0.629	0.130	0.259	0.095	0.628	0.505	0.172	0.255	0.281	0.260	0.121
0.125	0.629	0.125	0.238	0.100	0.626	0.500	0.159	0.260	0.307	0.265	0.131
0.120	0.619	0.120	0.220	0.105	0.620	0.495	0.154	0.265	0.343	0.485	0.522
0.115	0.577	0.115	0.253	0.110	0.613	0.490	0.172	0.270	0.394	0.480	0.465
0.110	0.474	0.110	0.404	0.115	0.607	0.485	0.231	0.275	0.454	0.475	0.411
0.105	0.358	0.105	0.558	0.120	0.602	0.480	0.319	0.280	0.509	0.470	0.361
0.100	0.277	0.100	0.598	0.125	0.597	0.475	0.386	0.285	0.550	0.465	0.315
0.095	0.211	0.095	0.590	0.130	0.591	0.470	0.411	0.290	0.579	0.460	0.275
0.090	0.163	0.090	0.583	0.135	0.583	0.465	0.413	0.295	0.602	0.455	0.239
0.085	0.133	0.085	0.576	0.140	0.581	0.460	0.411	0.300	0.618	0.450	0.209
0.080	0.119	0.080	0.542	0.145	0.588	0.455	0.411	0.305	0.627	0.445	0.183
0.075	0.150	0.075	0.473	0.150	0.594	0.450	0.415	0.310	0.629	0.440	0.179
0.070	0.331	0.070	0.383	0.155	0.590	0.445	0.428	0.315	0.625	0.435	0.261
0.065	0.503	0.065	0.307	0.160	0.549	0.440	0.467	0.320	0.606	0.430	0.432

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.3 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 2 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.282	0.261	0.000	0.000	0.263	0.551	0.119	0.462	0.163	0.200	0.099	0.410
0.278	0.476	0.005	0.498	0.258	0.522	0.114	0.508	0.168	0.211	0.094	0.338
0.273	0.593	0.010	0.557	0.253	0.473	0.109	0.452	0.173	0.240	0.089	0.281
0.268	0.622	0.015	0.576	0.248	0.417	0.104	0.365	0.178	0.285	0.084	0.247
0.263	0.627	0.020	0.590	0.243	0.369	0.099	0.295	0.183	0.342	0.079	0.237
0.258	0.626	0.025	0.605	0.238	0.353	0.094	0.255	0.188	0.402	0.074	0.254
0.253	0.626	0.030	0.613	0.233	0.310	0.089	0.241	0.193	0.459	0.069	0.301
0.248	0.625	0.035	0.618	0.228	0.167	0.084	0.248	0.198	0.506	0.064	0.368
0.243	0.625	0.040	0.619	0.223	0.136	0.079	0.274	0.203	0.541	0.059	0.435
0.238	0.625	0.045	0.614	0.218	0.105	0.074	0.306	0.208	0.572	0.054	0.479
0.233	0.620	0.049	0.593	0.213	0.081	0.069	0.326	0.213	0.584	0.049	0.490
0.228	0.612	0.054	0.548	0.208	0.064	0.064	0.315	0.218	0.505	0.045	0.472
0.223	0.611	0.059	0.505	0.203	0.052	0.059	0.276	0.223	0.324	0.040	0.443
0.218	0.599	0.064	0.487	0.198	0.045	0.054	0.251	0.228	0.213	0.035	0.415
0.213	0.565	0.069	0.491	0.193	0.054	0.049	0.314	0.233	0.239	0.030	0.393
0.208	0.510	0.074	0.506	0.188	0.107	0.045	0.431	0.238	0.285	0.025	0.377
0.203	0.441	0.079	0.525	0.183	0.243	0.040	0.462	0.243	0.276	0.020	0.372
0.198	0.369	0.084	0.547	0.178	0.444	0.035	0.400	0.248	0.243	0.015	0.379
0.193	0.313	0.089	0.571	0.173	0.593	0.030	0.351	0.253	0.255	0.010	0.379
0.188	0.306	0.094	0.591	0.168	0.604	0.025	0.364	0.258	0.311	0.005	0.370
0.183	0.373	0.099	0.591	0.163	0.577	0.020	0.421	0.263	0.382	0.000	0.000
0.178	0.497	0.104	0.543	0.158	0.533	0.015	0.465	0.268	0.446	0.526	0.007
0.173	0.560	0.109	0.416	0.153	0.485	0.010	0.464	0.700	0.000	0.531	0.003
0.168	0.485	0.114	0.254	0.148	0.441	0.005	0.436	0.696	0.000	0.536	0.001
0.163	0.349	0.119	0.146	0.143	0.407	0.000	0.000	0.691	0.000	0.541	0.000
0.158	0.222	0.124	0.105	0.138	0.385	0.700	0.000	0.686	0.000	0.546	0.000
0.153	0.159	0.129	0.101	0.134	0.397	0.696	0.000	0.681	0.000	0.551	0.000
0.148	0.139	0.134	0.107	0.129	0.465	0.691	0.000	0.676	0.000	0.556	0.000
0.143	0.128	0.138	0.117	0.124	0.555	0.686	0.000	0.671	0.000	0.561	0.000
0.138	0.120	0.143	0.129	0.119	0.600	0.681	0.000	0.666	0.000	0.566	0.000
0.134	0.113	0.148	0.142	0.114	0.593	0.676	0.000	0.661	0.000	0.571	0.000
0.129	0.141	0.153	0.162	0.109	0.553	0.671	0.000	0.656	0.000	0.576	0.000
0.124	0.288	0.158	0.187	0.104	0.487	0.666	0.000	0.651	0.000	0.581	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.4 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.028 และ 0.0125 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.245	0.361	0.235	0.358	0.264	0.202	0.084	0.456	0.074	0.342	0.104	0.445
0.240	0.372	0.230	0.349	0.259	0.328	0.079	0.436	0.069	0.370	0.099	0.499
0.235	0.416	0.225	0.333	0.255	0.371	0.074	0.411	0.064	0.398	0.094	0.475
0.230	0.489	0.220	0.317	0.250	0.439	0.069	0.396	0.059	0.415	0.089	0.397
0.225	0.555	0.215	0.307	0.245	0.537	0.064	0.388	0.054	0.424	0.084	0.307
0.220	0.592	0.210	0.306	0.240	0.580	0.059	0.376	0.049	0.428	0.079	0.236
0.215	0.609	0.205	0.313	0.235	0.569	0.054	0.355	0.044	0.437	0.074	0.189
0.210	0.619	0.200	0.328	0.230	0.533	0.049	0.328	0.040	0.454	0.069	0.158
0.205	0.623	0.195	0.355	0.225	0.489	0.044	0.307	0.035	0.466	0.064	0.138
0.200	0.624	0.190	0.384	0.220	0.453	0.040	0.302	0.030	0.447	0.059	0.126
0.195	0.624	0.185	0.406	0.215	0.439	0.035	0.313	0.025	0.398	0.054	0.125
0.190	0.622	0.180	0.458	0.210	0.448	0.030	0.319	0.020	0.352	0.049	0.146
0.185	0.618	0.176	0.554	0.205	0.493	0.025	0.316	0.015	0.352	0.044	0.225
0.180	0.610	0.171	0.609	0.200	0.565	0.020	0.317	0.010	0.381	0.040	0.347
0.176	0.580	0.166	0.618	0.195	0.611	0.015	0.336	0.005	0.378	0.035	0.446
0.171	0.496	0.161	0.623	0.190	0.623	0.010	0.392	0.000	0.000	0.030	0.491
0.166	0.295	0.157	0.621	0.185	0.625	0.005	0.416	0.512	0.187	0.025	0.501
0.161	0.057	0.153	0.615	0.180	0.624	0.000	0.000	0.507	0.122	0.020	0.520
0.157	0.056	0.148	0.603	0.176	0.619	0.430	0.360	0.502	0.056	0.015	0.557
0.153	0.052	0.143	0.545	0.171	0.603	0.425	0.471	0.497	0.082	0.010	0.572
0.148	0.137	0.138	0.454	0.166	0.452	0.420	0.553	0.493	0.231	0.005	0.528
0.143	0.290	0.133	0.398	0.161	0.212	0.415	0.597	0.489	0.441	0.000	0.000
0.138	0.348	0.128	0.369	0.157	0.138	0.410	0.615	0.484	0.578	0.601	0.000
0.133	0.329	0.123	0.378	0.153	0.060	0.405	0.622	0.479	0.623	0.597	0.000
0.128	0.314	0.119	0.444	0.148	0.020	0.400	0.623	0.474	0.629	0.592	0.000
0.123	0.310	0.114	0.511	0.143	0.063	0.395	0.623	0.470	0.629	0.587	0.000
0.119	0.315	0.109	0.528	0.138	0.257	0.391	0.623	0.465	0.626	0.582	0.000
0.114	0.329	0.104	0.493	0.133	0.404	0.386	0.624	0.460	0.617	0.577	0.000
0.109	0.351	0.099	0.429	0.128	0.361	0.381	0.626	0.455	0.599	0.572	0.000
0.104	0.382	0.094	0.369	0.123	0.297	0.376	0.626	0.450	0.568	0.567	0.000
0.099	0.417	0.089	0.337	0.119	0.271	0.371	0.625	0.445	0.518	0.562	0.000
0.094	0.446	0.084	0.326	0.114	0.282	0.366	0.622	0.440	0.448	0.557	0.000
0.089	0.460	0.079	0.326	0.109	0.348	0.361	0.615	0.435	0.368	0.552	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.5 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.028 และ 0.025 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		Right (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.248	0.628	0.233	0.180	0.258	0.282	0.084	0.528	0.069	0.159	0.094	0.548
0.243	0.628	0.228	0.183	0.253	0.258	0.079	0.503	0.064	0.177	0.089	0.469
0.238	0.628	0.223	0.203	0.248	0.243	0.074	0.400	0.059	0.216	0.084	0.385
0.233	0.628	0.218	0.264	0.243	0.248	0.069	0.288	0.055	0.234	0.079	0.348
0.228	0.628	0.213	0.389	0.238	0.353	0.064	0.226	0.050	0.241	0.074	0.371
0.223	0.628	0.208	0.527	0.233	0.518	0.059	0.206	0.045	0.257	0.069	0.392
0.218	0.628	0.203	0.593	0.228	0.596	0.055	0.241	0.040	0.273	0.064	0.390
0.213	0.628	0.198	0.588	0.223	0.602	0.050	0.354	0.035	0.256	0.059	0.426
0.208	0.628	0.194	0.558	0.218	0.599	0.045	0.480	0.030	0.215	0.055	0.474
0.203	0.627	0.189	0.521	0.213	0.592	0.040	0.519	0.025	0.278	0.050	0.435
0.198	0.626	0.184	0.482	0.208	0.571	0.035	0.472	0.020	0.418	0.045	0.335
0.194	0.625	0.179	0.438	0.203	0.521	0.030	0.403	0.015	0.432	0.040	0.256
0.189	0.624	0.174	0.391	0.198	0.437	0.025	0.354	0.010	0.352	0.035	0.224
0.184	0.624	0.169	0.340	0.194	0.342	0.020	0.334	0.005	0.341	0.030	0.236
0.179	0.622	0.164	0.290	0.189	0.270	0.015	0.332	0.000	0.000	0.025	0.279
0.174	0.616	0.159	0.244	0.184	0.266	0.010	0.348	0.233	0.180	0.020	0.317
0.169	0.502	0.154	0.211	0.179	0.316	0.005	0.391	0.238	0.184	0.015	0.323
0.164	0.306	0.149	0.198	0.174	0.350	0.000	0.000	0.243	0.192	0.010	0.323
0.159	0.316	0.144	0.202	0.169	0.297	0.541	0.000	0.248	0.204	0.005	0.342
0.154	0.304	0.139	0.207	0.164	0.152	0.536	0.000	0.253	0.220	0.000	0.000
0.149	0.228	0.134	0.210	0.159	0.214	0.531	0.000	0.258	0.240	0.481	0.567
0.144	0.112	0.129	0.215	0.154	0.295	0.526	0.009	0.263	0.264	0.476	0.602
0.139	0.115	0.124	0.214	0.149	0.368	0.521	0.104	0.268	0.293	0.471	0.597
0.134	0.252	0.119	0.205	0.144	0.417	0.516	0.346	0.273	0.329	0.466	0.592
0.129	0.437	0.114	0.190	0.139	0.449	0.511	0.542	0.278	0.394	0.461	0.577
0.124	0.568	0.109	0.184	0.134	0.503	0.506	0.443	0.283	0.495	0.456	0.552
0.119	0.610	0.104	0.269	0.129	0.575	0.501	0.154	0.288	0.579	0.452	0.520
0.114	0.612	0.099	0.438	0.124	0.609	0.496	0.081	0.293	0.611	0.447	0.483
0.109	0.594	0.094	0.516	0.119	0.614	0.491	0.052	0.298	0.619	0.442	0.444
0.104	0.558	0.089	0.457	0.114	0.616	0.486	0.036	0.303	0.622	0.437	0.406
0.099	0.516	0.084	0.357	0.109	0.613	0.481	0.019	0.308	0.624	0.432	0.376
0.094	0.488	0.079	0.265	0.104	0.609	0.476	0.010	0.313	0.624	0.427	0.352
0.089	0.499	0.074	0.196	0.099	0.594	0.471	0.007	0.318	0.625	0.422	0.335

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.6 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.028 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.295	0.002	0.240	0.623	0.220	0.627	0.130	0.157	0.075	0.439	0.055	0.332
0.290	0.001	0.235	0.621	0.215	0.628	0.125	0.257	0.070	0.359	0.050	0.344
0.285	0.001	0.230	0.617	0.210	0.625	0.120	0.429	0.065	0.314	0.045	0.360
0.280	0.005	0.225	0.612	0.205	0.619	0.115	0.570	0.060	0.300	0.040	0.391
0.275	0.036	0.220	0.607	0.200	0.611	0.110	0.575	0.055	0.305	0.035	0.441
0.270	0.122	0.215	0.580	0.195	0.594	0.105	0.560	0.050	0.317	0.030	0.486
0.265	0.245	0.210	0.487	0.190	0.545	0.100	0.568	0.045	0.365	0.025	0.511
0.260	0.344	0.205	0.337	0.185	0.476	0.095	0.588	0.040	0.482	0.020	0.518
0.255	0.375	0.200	0.205	0.180	0.419	0.090	0.600	0.035	0.568	0.015	0.473
0.250	0.357	0.195	0.137	0.175	0.340	0.085	0.598	0.030	0.538	0.010	0.385
0.245	0.355	0.190	0.114	0.170	0.191	0.080	0.588	0.025	0.437	0.005	0.357
0.240	0.415	0.185	0.112	0.165	0.203	0.075	0.582	0.020	0.326	0.000	0.000
0.235	0.508	0.180	0.121	0.160	0.217	0.070	0.592	0.015	0.245	0.220	0.627
0.230	0.581	0.175	0.170	0.155	0.215	0.065	0.608	0.010	0.258	0.225	0.620
0.225	0.616	0.170	0.304	0.150	0.191	0.060	0.619	0.005	0.368	0.230	0.585
0.220	0.627	0.165	0.457	0.145	0.154	0.055	0.622	0.000	0.000	0.235	0.451
0.215	0.628	0.160	0.560	0.140	0.121	0.050	0.619	0.545	0.551	0.240	0.247
0.210	0.626	0.155	0.614	0.135	0.106	0.045	0.601	0.540	0.504	0.245	0.113
0.205	0.623	0.150	0.627	0.130	0.115	0.040	0.563	0.535	0.454	0.250	0.073
0.200	0.618	0.145	0.629	0.125	0.147	0.035	0.503	0.530	0.404	0.255	0.071
0.195	0.615	0.140	0.627	0.120	0.250	0.030	0.413	0.525	0.358	0.260	0.078
0.190	0.615	0.135	0.626	0.115	0.347	0.025	0.322	0.520	0.316	0.265	0.090
0.185	0.609	0.130	0.627	0.110	0.422	0.020	0.265	0.515	0.280	0.270	0.108
0.180	0.553	0.125	0.628	0.105	0.523	0.015	0.253	0.510	0.248	0.275	0.136
0.175	0.389	0.120	0.626	0.100	0.571	0.010	0.318	0.505	0.219	0.280	0.172
0.170	0.142	0.115	0.622	0.095	0.555	0.005	0.400	0.500	0.195	0.285	0.211
0.165	0.101	0.110	0.619	0.090	0.504	0.000	0.000	0.495	0.174	0.290	0.243
0.160	0.090	0.105	0.618	0.085	0.438	0.295	0.002	0.490	0.158	0.295	0.255
0.155	0.082	0.100	0.616	0.080	0.379	0.300	0.005	0.485	0.145	0.300	0.304
0.150	0.072	0.095	0.612	0.075	0.341	0.305	0.016	0.480	0.135	0.305	0.457
0.145	0.069	0.090	0.610	0.070	0.323	0.310	0.035	0.475	0.128	0.310	0.493
0.140	0.077	0.085	0.591	0.065	0.318	0.315	0.066	0.470	0.121	0.315	0.522
0.135	0.103	0.080	0.531	0.060	0.323	0.320	0.118	0.465	0.116	0.320	0.547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.7 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.014 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.220	0.604	0.265	0.097	0.270	0.548	0.055	0.357	0.100	0.301	0.105	0.214
0.215	0.616	0.260	0.093	0.265	0.520	0.050	0.401	0.095	0.336	0.100	0.174
0.210	0.624	0.255	0.092	0.260	0.508	0.045	0.450	0.090	0.352	0.095	0.160
0.205	0.627	0.250	0.098	0.255	0.508	0.040	0.453	0.085	0.329	0.090	0.179
0.200	0.628	0.245	0.126	0.250	0.526	0.035	0.414	0.080	0.271	0.085	0.240
0.195	0.628	0.240	0.197	0.245	0.560	0.030	0.397	0.075	0.248	0.080	0.336
0.190	0.628	0.235	0.300	0.240	0.594	0.025	0.436	0.070	0.269	0.075	0.444
0.185	0.622	0.230	0.386	0.235	0.616	0.020	0.480	0.065	0.277	0.070	0.525
0.180	0.609	0.225	0.424	0.230	0.626	0.015	0.487	0.060	0.316	0.065	0.552
0.175	0.466	0.220	0.419	0.225	0.629	0.010	0.487	0.055	0.446	0.060	0.546
0.170	0.178	0.215	0.387	0.220	0.629	0.005	0.490	0.050	0.535	0.055	0.527
0.165	0.095	0.210	0.348	0.215	0.628	0.000	0.000	0.045	0.449	0.050	0.498
0.160	0.087	0.205	0.311	0.210	0.628	0.220	0.604	0.040	0.273	0.045	0.471
0.155	0.121	0.200	0.282	0.205	0.628	0.225	0.579	0.035	0.168	0.040	0.467
0.150	0.187	0.195	0.268	0.200	0.627	0.230	0.520	0.030	0.164	0.035	0.469
0.145	0.250	0.190	0.275	0.195	0.626	0.235	0.464	0.025	0.210	0.030	0.434
0.140	0.286	0.185	0.305	0.190	0.624	0.240	0.440	0.020	0.277	0.025	0.353
0.135	0.298	0.180	0.352	0.185	0.619	0.245	0.422	0.015	0.344	0.020	0.289
0.130	0.295	0.175	0.403	0.180	0.614	0.250	0.413	0.010	0.400	0.015	0.343
0.125	0.281	0.170	0.434	0.175	0.499	0.255	0.433	0.005	0.389	0.010	0.427
0.120	0.238	0.165	0.430	0.170	0.273	0.260	0.476	0.000	0.000	0.005	0.410
0.115	0.161	0.160	0.392	0.165	0.239	0.265	0.537	0.265	0.097	0.000	0.000
0.110	0.104	0.155	0.339	0.160	0.208	0.270	0.591	0.270	0.101	0.270	0.548
0.105	0.088	0.150	0.289	0.155	0.132	0.275	0.617	0.275	0.106	0.275	0.591
0.100	0.138	0.145	0.255	0.150	0.080	0.280	0.622	0.280	0.111	0.280	0.615
0.095	0.318	0.140	0.238	0.145	0.055	0.285	0.619	0.285	0.117	0.285	0.594
0.090	0.479	0.135	0.231	0.140	0.043	0.290	0.616	0.290	0.125	0.290	0.462
0.085	0.500	0.130	0.228	0.135	0.053	0.295	0.510	0.295	0.138	0.295	0.258
0.080	0.476	0.125	0.228	0.130	0.117	0.300	0.353	0.300	0.155	0.300	0.208
0.075	0.453	0.120	0.232	0.125	0.295	0.305	0.175	0.305	0.177	0.305	0.334
0.070	0.430	0.115	0.239	0.120	0.384	0.310	0.040	0.310	0.204	0.310	0.387
0.065	0.400	0.110	0.252	0.115	0.357	0.315	0.052	0.315	0.234	0.315	0.435
0.060	0.364	0.105	0.271	0.110	0.279	0.320	0.085	0.320	0.266	0.320	0.454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.8 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 3 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		Right (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		Right (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.296	0.440	0.249	0.493	0.291	0.352	0.127	0.516	0.082	0.623	0.122	0.062
0.291	0.521	0.244	0.466	0.286	0.211	0.122	0.500	0.077	0.625	0.117	0.079
0.286	0.514	0.239	0.401	0.280	0.111	0.117	0.334	0.072	0.619	0.112	0.005
0.280	0.468	0.234	0.328	0.275	0.067	0.112	0.050	0.067	0.596	0.107	0.004
0.275	0.423	0.229	0.267	0.270	0.049	0.107	0.006	0.062	0.496	0.102	0.004
0.270	0.388	0.224	0.213	0.265	0.044	0.102	0.002	0.057	0.310	0.097	0.005
0.265	0.358	0.219	0.152	0.260	0.051	0.097	0.001	0.052	0.157	0.092	0.007
0.260	0.327	0.214	0.102	0.255	0.081	0.092	0.001	0.046	0.102	0.087	0.009
0.255	0.297	0.209	0.138	0.249	0.157	0.087	0.001	0.041	0.142	0.082	0.012
0.249	0.282	0.204	0.290	0.244	0.236	0.082	0.000	0.036	0.343	0.077	0.016
0.244	0.305	0.199	0.401	0.239	0.273	0.077	0.000	0.031	0.483	0.072	0.025
0.239	0.360	0.194	0.372	0.234	0.235	0.072	0.000	0.026	0.401	0.067	0.041
0.234	0.433	0.189	0.281	0.229	0.105	0.067	0.000	0.021	0.284	0.062	0.168
0.229	0.539	0.184	0.206	0.224	0.082	0.062	0.001	0.015	0.218	0.057	0.345
0.224	0.562	0.179	0.167	0.219	0.059	0.057	0.049	0.010	0.269	0.052	0.464
0.219	0.574	0.174	0.155	0.214	0.044	0.052	0.227	0.005	0.385	0.046	0.545
0.214	0.581	0.169	0.164	0.209	0.044	0.046	0.370	0.000	0.000	0.041	0.552
0.209	0.584	0.163	0.180	0.204	0.066	0.041	0.385	0.249	0.493	0.036	0.506
0.204	0.580	0.158	0.200	0.199	0.103	0.036	0.397	0.255	0.461	0.031	0.429
0.199	0.568	0.153	0.218	0.194	0.153	0.031	0.411	0.260	0.385	0.026	0.353
0.194	0.550	0.148	0.236	0.189	0.227	0.026	0.428	0.265	0.309	0.021	0.354
0.189	0.533	0.143	0.256	0.184	0.336	0.021	0.452	0.270	0.265	0.015	0.419
0.184	0.466	0.138	0.279	0.179	0.348	0.015	0.465	0.275	0.254	0.010	0.442
0.179	0.485	0.132	0.309	0.174	0.260	0.010	0.455	0.280	0.261	0.005	0.386
0.174	0.512	0.127	0.354	0.169	0.168	0.005	0.417	0.286	0.279	0.000	0.000
0.169	0.459	0.122	0.418	0.163	0.110	0.000	0.000	0.291	0.304	0.291	0.352
0.163	0.388	0.117	0.507	0.158	0.068	0.296	0.440	0.296	0.336	0.296	0.440
0.158	0.334	0.112	0.584	0.153	0.038	0.301	0.350	0.301	0.377	0.301	0.386
0.153	0.305	0.107	0.616	0.148	0.020	0.306	0.285	0.306	0.424	0.306	0.249
0.148	0.315	0.102	0.622	0.143	0.012	0.311	0.199	0.311	0.465	0.311	0.205
0.143	0.369	0.097	0.620	0.138	0.009	0.316	0.121	0.316	0.477	0.316	0.206
0.138	0.444	0.092	0.615	0.132	0.011	0.321	0.066	0.321	0.431	0.321	0.242
0.132	0.498	0.087	0.617	0.127	0.015	0.326	0.043	0.326	0.318	0.326	0.317

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.9 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 4 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		Righr (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		Righr (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.000	0.000	0.265	0.562	0.230	0.405	0.165	0.019	0.100	0.381	0.065	0.576
0.005	0.374	0.260	0.570	0.225	0.416	0.170	0.026	0.095	0.497	0.060	0.543
0.010	0.411	0.255	0.574	0.220	0.398	0.175	0.038	0.090	0.560	0.055	0.524
0.015	0.413	0.250	0.576	0.215	0.303	0.180	0.057	0.085	0.571	0.050	0.527
0.020	0.360	0.245	0.576	0.210	0.227	0.185	0.086	0.080	0.469	0.045	0.540
0.025	0.273	0.240	0.581	0.205	0.174	0.190	0.126	0.075	0.303	0.040	0.539
0.030	0.226	0.235	0.588	0.200	0.131	0.195	0.180	0.070	0.212	0.035	0.505
0.035	0.261	0.230	0.596	0.195	0.101	0.200	0.247	0.065	0.201	0.030	0.453
0.040	0.350	0.225	0.599	0.190	0.082	0.205	0.326	0.060	0.275	0.025	0.403
0.045	0.455	0.220	0.603	0.185	0.066	0.210	0.414	0.055	0.452	0.020	0.366
0.050	0.518	0.215	0.608	0.180	0.049	0.215	0.500	0.050	0.583	0.015	0.359
0.055	0.417	0.210	0.609	0.175	0.044	0.220	0.549	0.045	0.600	0.010	0.383
0.060	0.274	0.205	0.605	0.170	0.081	0.225	0.522	0.040	0.594	0.005	0.387
0.065	0.316	0.200	0.597	0.165	0.176	0.230	0.431	0.035	0.581	0.000	0.000
0.070	0.443	0.195	0.577	0.160	0.305	0.235	0.295	0.030	0.551	0.510	0.417
0.075	0.449	0.190	0.527	0.155	0.431	0.240	0.197	0.025	0.502	0.505	0.452
0.080	0.243	0.185	0.446	0.150	0.524	0.245	0.128	0.020	0.441	0.500	0.524
0.085	0.046	0.180	0.367	0.145	0.569	0.250	0.080	0.015	0.379	0.495	0.551
0.090	0.004	0.175	0.315	0.140	0.481	0.255	0.052	0.010	0.355	0.490	0.582
0.095	0.000	0.170	0.285	0.135	0.259	0.260	0.040	0.005	0.391	0.485	0.604
0.100	0.000	0.165	0.267	0.130	0.150	0.260	0.040	0.000	0.000	0.480	0.609
0.105	0.000	0.160	0.254	0.125	0.087	0.265	0.041	0.265	0.562	0.475	0.609
0.110	0.000	0.155	0.241	0.120	0.042	0.270	0.048	0.270	0.546	0.470	0.604
0.115	0.000	0.150	0.225	0.115	0.013	0.275	0.055	0.275	0.506	0.465	0.595
0.120	0.000	0.145	0.207	0.110	0.005	0.280	0.231	0.280	0.425	0.460	0.585
0.125	0.000	0.140	0.190	0.105	0.006	0.285	0.301	0.285	0.320	0.455	0.578
0.130	0.000	0.135	0.178	0.100	0.008	0.290	0.321	0.290	0.238	0.450	0.575
0.135	0.001	0.130	0.169	0.095	0.010	0.295	0.339	0.295	0.213	0.445	0.576
0.140	0.147	0.125	0.163	0.090	0.013	0.300	0.345	0.300	0.226	0.440	0.578
0.145	0.170	0.120	0.159	0.085	0.096	0.305	0.339	0.305	0.256	0.435	0.572
0.150	0.088	0.115	0.158	0.080	0.352	0.310	0.318	0.310	0.293	0.430	0.542
0.155	0.026	0.110	0.174	0.075	0.563	0.315	0.271	0.315	0.332	0.425	0.473
0.160	0.015	0.105	0.250	0.070	0.596	0.320	0.209	0.320	0.378	0.420	0.411

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.10 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งวงแหวน 5 ตัว ความกว้างและความสูงของวงแหวน เท่ากับ 0.056 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ

ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)		ด้านซ้าย (L)		ตรงกลาง (C)		ด้านขวา (R)	
H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void	H _R (m)	Void
0.296	0.440	0.249	0.493	0.291	0.352	0.127	0.516	0.082	0.623	0.122	0.062
0.291	0.521	0.244	0.466	0.286	0.211	0.122	0.500	0.077	0.625	0.117	0.079
0.286	0.514	0.239	0.401	0.280	0.111	0.117	0.334	0.072	0.619	0.112	0.005
0.280	0.468	0.234	0.328	0.275	0.067	0.112	0.050	0.067	0.596	0.107	0.004
0.275	0.423	0.229	0.267	0.270	0.049	0.107	0.006	0.062	0.496	0.102	0.004
0.270	0.388	0.224	0.213	0.265	0.044	0.102	0.002	0.057	0.310	0.097	0.005
0.265	0.358	0.219	0.152	0.260	0.051	0.097	0.001	0.052	0.157	0.092	0.007
0.260	0.327	0.214	0.102	0.255	0.081	0.092	0.001	0.046	0.102	0.087	0.009
0.255	0.297	0.209	0.138	0.249	0.157	0.087	0.001	0.041	0.142	0.082	0.012
0.249	0.282	0.204	0.290	0.244	0.236	0.082	0.000	0.036	0.343	0.077	0.016
0.244	0.305	0.199	0.401	0.239	0.273	0.077	0.000	0.031	0.483	0.072	0.025
0.239	0.360	0.194	0.372	0.234	0.235	0.072	0.000	0.026	0.401	0.067	0.041
0.234	0.433	0.189	0.281	0.229	0.105	0.067	0.000	0.021	0.284	0.062	0.168
0.229	0.539	0.184	0.206	0.224	0.082	0.062	0.001	0.015	0.218	0.057	0.345
0.224	0.562	0.179	0.167	0.219	0.059	0.057	0.049	0.010	0.269	0.052	0.464
0.219	0.574	0.174	0.155	0.214	0.044	0.052	0.227	0.005	0.385	0.046	0.545
0.214	0.581	0.169	0.164	0.209	0.044	0.046	0.370	0.000	0.000	0.041	0.552
0.209	0.584	0.163	0.180	0.204	0.066	0.041	0.385	0.249	0.493	0.036	0.506
0.204	0.580	0.158	0.200	0.199	0.103	0.036	0.397	0.255	0.461	0.031	0.429
0.199	0.568	0.153	0.218	0.194	0.153	0.031	0.411	0.260	0.385	0.026	0.353
0.194	0.550	0.148	0.236	0.189	0.227	0.026	0.428	0.265	0.309	0.021	0.354
0.189	0.533	0.143	0.256	0.184	0.336	0.021	0.452	0.270	0.265	0.015	0.419
0.184	0.466	0.138	0.279	0.179	0.348	0.015	0.465	0.275	0.254	0.010	0.442
0.179	0.485	0.132	0.309	0.174	0.260	0.010	0.455	0.280	0.261	0.005	0.386
0.174	0.512	0.127	0.354	0.169	0.168	0.005	0.417	0.286	0.279	0.000	0.000
0.169	0.459	0.122	0.418	0.163	0.110	0.000	0.000	0.291	0.304	0.291	0.352
0.163	0.388	0.117	0.507	0.158	0.068	0.296	0.440	0.296	0.336	0.296	0.440
0.158	0.334	0.112	0.584	0.153	0.038	0.301	0.350	0.301	0.377	0.301	0.386
0.153	0.305	0.107	0.616	0.148	0.020	0.306	0.285	0.306	0.424	0.306	0.249
0.148	0.315	0.102	0.622	0.143	0.012	0.311	0.199	0.311	0.465	0.311	0.205
0.143	0.369	0.097	0.620	0.138	0.009	0.316	0.121	0.316	0.477	0.316	0.206
0.138	0.444	0.092	0.615	0.132	0.011	0.321	0.066	0.321	0.431	0.321	0.242
0.132	0.498	0.087	0.617	0.127	0.015	0.326	0.043	0.326	0.318	0.326	0.317

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ความดันลดของเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับการพิจารณาความสำคัญของตัวแปรที่ศึกษา

เวลา (s)	ความดันลดของอากาศในเครื่องปฏิกรณ์, ปาสคาล (จำนวนวงแหวน/ความกว้าง/คามสูง)				
	0/0/0	3/0.028/0.0125	3/0.028/0.025	3/0.028/0.05	3/0.014/0.05
0.01	11348.49	12080.70	12399.36	12922.84	12011.44
0.02	7933.57	8273.57	8453.34	8721.11	8283.70
0.03	6673.45	6895.87	7018.98	7205.80	6918.84
0.05	5949.78	6119.60	6179.28	6310.94	6127.35
0.1	5752.08	5910.23	6037.84	6066.82	5911.11
0.3	5716.67	5929.57	6005.49	6172.71	5961.27
0.5	5791.51	5916.24	5994.27	6115.14	5912.65
1	5908.34	5465.36	5152.79	5285.34	5951.50
2	5809.89	5612.37	5820.41	6716.68	6102.96
3	6338.51	5598.01	5597.45	5419.40	6393.09
4	5435.54	5802.76	5595.03	6224.27	5932.85
5	5996.00	5590.19	6049.58	5687.01	5719.49

ตารางที่ ข.3 ความดันลดของเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับการพิจารณาความสำคัญของตัวแปรที่ศึกษา

เวลา (s)	ความดันลดของอากาศในเครื่องปฏิกรณ์, ปาสคาล (จำนวนวงแหวน/ความกว้าง/คามสูง)				
	3/0.056/0.05	1/0.056/0.05	2/0.056/0.05	4/0.056/0.05	5/0.056/0.05
0.01	15553.02	13423.50	13985.09	17425.16	18951.70
0.02	9878.30	8899.68	9223.22	10756.03	11477.61
0.03	7921.98	7304.03	7586.01	8510.46	9012.93
0.05	6713.76	6335.55	6600.18	7125.10	7569.59
0.1	6487.78	6059.85	6438.51	7069.71	7480.36
0.3	6589.08	6168.09	6472.45	6494.11	6512.96
0.5	7581.09	6348.48	6090.81	7428.38	7360.16
1	6131.27	6420.13	6024.34	7522.35	6089.63
2	6906.73	6744.17	5509.26	7762.16	6358.39
3	5122.91	3890.27	5347.82	5556.43	6343.39
4	4840.11	5413.18	5028.48	5484.92	6827.17
5	5859.97	6762.79	6080.48	5239.33	3977.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกษมาวรรณ เตารัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	15 กรกฎาคม 2530
ที่อยู่	694 หมู่ 4 ซอยบ้านสวนเรื่อนไม้ ตำบลหัวทะเล อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
ประวัติการศึกษา	- พ.ศ. 2550 - 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง - พ.ศ. 2546 - 2549 สายวิทย์ - คณิต ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสุนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา
ผลงานทางวิชาการ	Kasamawan Taorat Eakarach Bumrunghaichaichan and Santi Wattananusorn “Influence of Packing Limit on Gas-Solid Fluidized Bed Flow Pattern by Computational Fluid Dynamics” Ladkrabang Engineering Journal, vol. 33, No. 1, March 2016.
ประสบการณ์ฝึกงาน	เม.ย. - พ.ศ. 2553 ฝึกงานแผนก Production Engineer บริษัทโพลีเพ็ค (ประเทศไทย) จำกัด มหาชน จังหวัดระยอง
ประสบการณ์ทำงาน	- ม.ศ. 2559 - ปัจจุบัน ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย สำนักพัฒนาอู่ศูนย์มหาวิทยาลัย กรมอู่ศูนย์มหาวิทยาลัย - พ.ศ. 2557 - พ.ย. 2558 ตำแหน่ง เจ้าหน้าที่การเงิน โครงการพัฒนา นักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้