

ผลของการไหลแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด
สำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF PULSATING FLOW ON HYDRODYNAMICS AND CHEMICAL REACTION IN RISER
OF FLUIDIZED BED REACTOR FOR OIL VAPOR CRACKING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการไหลแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมี ไนโรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัว ของไอน้ำมัน
โดย	นายหาญณรงค์ ชิตเจริญอยู่
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย บำรุงศรี)

หาญณรงค์ ชิตเจริญอยู่ : ผลของการไหลแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีใน
 ไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน. (EFFECT OF
 PULSATING FLOW ON HYDRODYNAMICS AND CHEMICAL REACTION IN RISER
 OF FLUIDIZED BED REACTOR FOR OIL VAPOR CRACKING) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ.
 ดร.เบญจพล เถลิมนิสินสุวรรณ

ปัจจุบัน ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจโลก หน่วย
 เพิ่มคุณภาพน้ำมันโดยการแปลงสภาพผลิตภัณฑ์มูลค่าต่ำไปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงผ่านปฏิกิริยาเคมีการ
 แตกตัวของไอน้ำมันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจึงกำลังได้รับความสนใจ ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวเกิดภายในเครื่อง
 ปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดที่เรียกว่า ไรเซอร์ ซึ่งรูปแบบการไหลของของไหลและของแข็งจะส่งผลต่ออุทก
 พลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการ งานวิจัยนี้ ศึกษาผลของรูปแบบการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ต่อ
 อุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไ
 น้ำมันโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สมการอนุกรมมวล โมเมนตัม พลังงาน และ
 องค์ประกอบ จะถูกแก้ร่วมกับทฤษฎีจลนการไหลของของแข็ง และ สมการปฏิกิริยาเคมีการแตกตัวของไ
 น้ำมัน มีตัวแปรที่สนใจสี่ตัวแปร คือ แอมพลิจูด ความถี่ รูปคลื่น และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ของ
 การไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ ผลที่ได้ พบว่า ความถี่ รูปคลื่น และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด มีผลต่อ
 อุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไ
 น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าตัวแปรดำเนินการความถี่ 0.5 เฮิร์ตซ์ คลื่นรูปไซน์ ความสม่ำเสมอของแอม
 พลิจูด 1:0.5 ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่สูงที่สุด และได้
 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด และผลการเปรียบเทียบ พบว่า
 การไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่
 สูงกว่าการไหลป้อนเข้าแบบคงที่

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต
 เมอร์
 ปีการศึกษา 2561 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5972406223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Fluid catalytic cracking, Pulsating flow, Hydrodynamics and chemical reaction, Fluidized bed reactor, Computational fluid dynamics

Hannarong Chitcharoenyoo : EFFECT OF PULSATING FLOW ON HYDRODYNAMICS AND CHEMICAL REACTION IN RISER OF FLUIDIZED BED REACTOR FOR OIL VAPOR CRACKING. Advisor: Assoc. Prof. Benjapon Chalermnsinsuwan, Ph.D.

Nowadays, oil demand continues growing as the global economics expands. The fluid catalytic cracking (FCC) units, which convert the products from low market value to the more valuable products, are being interested. The mentioned reaction is occurred inside the riser of fluidized bed reactor. The flow patterns of fluids and solids have an effect on hydrodynamics and chemical reaction in this process. The present study investigates the effects of pulsating flow on hydrodynamics and chemical reaction in riser of fluidized bed reactor for oil vapor cracking by using computational fluid dynamics. The mass, momentum, energy and species conservation equations are solved along with the kinetic theory of granular flow and chemical reactions of oil vapor cracking. There are four interested operating parameters, amplitude, frequency, waveform and continuity of amplitude of pulsating flow. It can be concluded that frequency, waveform, and continuity of amplitude have significant effects on hydrodynamics and chemical reaction in riser of fluidized bed reactor for oil vapor cracking. The operating parameters of the frequency of 0.5 hertz, sine waveform, and continuity of amplitude of 1:0.5 gives the highest conversion percentage, the highest yield percentage and the lowest standard deviation of volume fraction of solid. For comparison, pulsating flow gives higher conversion percentage and higher yield percentage than steady flow.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature

Academic Year: 2018 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ผลของการไหลแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันฉบับนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาช่วยเหลือ ให้คำแนะนำด้านวิชาการ ข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ดวงกมล ตุงคะสมิต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย บำรุงศรี ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขปรับปรุงข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้ง คณาจารย์ นิสิตระดับดุขุฎีบัณฑิต ที่คอยช่วยเหลือรวมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิจัยชิ้นนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

หาญณรงค์ ชิตเจริญอยู่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.1.1 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหล (Fluid catalytic cracking).....	6
2.1.2 ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization).....	8
2.1.3 การไหลแบบพัลส์ (Pulsating flow).....	23
2.1.4 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics).....	28
2.1.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental design).....	34

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	41
3.1 แบบจำลองการไหล.....	41
3.2 การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม GAMBIT.....	41
3.3 การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT	44
3.4 สมมติฐานสำหรับการจำลอง.....	44
3.5 สมการอนุรักษ์	45
3.6 ปฏิบัติการแตกตัวไอน้ำมัน.....	49
3.7 การจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์.....	50
3.7 ขั้นตอนการทดลอง	51
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	55
4.1 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	56
4.2 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์ เบตสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์.....	60
4.3 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดซ์เบตสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์.....	74
4.4 ผลเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของ การไหลแบบพัลส์กับการไหลแบบคงที่ภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบต สำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน	108
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	109
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	109
5.2 ข้อเสนอแนะ	112
บรรณานุกรม.....	113
ภาคผนวก ก.....	116
ภาคผนวก ข.....	117

ประวัติผู้เขียน..... 120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1 ผังกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของหน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะของไหล [8]	8
รูปที่ 2. 2 รูปแบบการไหลในฟลูอิดไอเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง [9].....	10
รูปที่ 2. 3 ระบบฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียน [9]	14
รูปที่ 2. 4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster [12]	15
รูปที่ 2. 5 ขอบเขตของ Fast fluidization [12]	16
รูปที่ 2. 6 แผนผังแสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียนและการขนส่งของแข็งภายในไรเซอร์เมื่อลดความเร็วแก๊ส [2]	18
รูปที่ 2. 7 การทดลองหา Saturation carrying capacity [12].....	19
รูปที่ 2. 8 รูปแบบการกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแกนแนว [12].....	21
รูปที่ 2. 9 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีระบบ Fast bed [12].....	21
รูปที่ 2. 10 การจำแนกกลุ่มของของแข็ง [9]	22
รูปที่ 2. 11 ลักษณะรูปแบบของความเร็วของของไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อ [15]	23
รูปที่ 2. 12 การไหลแบบราบเรียบผ่านท่อกลม [16].....	23
รูปที่ 2. 13 ลักษณะ Periodic waveform	24
รูปที่ 2. 14 ลักษณะ Aperiodic waveform	24
รูปที่ 2. 15 ลักษณะ Transient waveform.....	24
รูปที่ 2. 16 ลักษณะคลื่นรูปไซน์	25
รูปที่ 2. 17 ลักษณะคลื่นรูปสี่เหลี่ยม	25
รูปที่ 2. 18 ลักษณะคลื่นรูปสามเหลี่ยม	25
รูปที่ 2. 19 องค์ประกอบของคลื่น	26
รูปที่ 2. 20 การแปรผันของความเร็วในการไหลแบบพัลส์ [17]	28
รูปที่ 2. 21 ปริมาตรควบคุมแสดงวิธีการแบ่งช่วงของสมการควบคุม [18]	29
รูปที่ 2. 22 แผนผังวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE.....	33

รูปที่ 3. 1 รูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายของท่อไรเซอร์	42
รูปที่ 3. 2 (ก) ภาพวาดการคำนวณในระบบสามมิติของท่อไรเซอร์ (ข) ภาพขยายแสดงรายละเอียด พื้นที่การคำนวณในระบบสามมิติของท่อไรเซอร์	43
รูปที่ 4. 1 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณขนาดต่างๆ ของร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์	57
รูปที่ 4. 2 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณขนาดต่างๆ ของร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	57
รูปที่ 4. 3 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น VGO ต่อเวลา ที่ความสูง 33 เมตร และ 25 เมตรท่อไรเซอร์ 58	
รูปที่ 4. 4 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์กับ งานวิจัยที่ผ่านมา	59
รูปที่ 4. 5 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์	66
รูปที่ 4. 6 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความถี่ (B) และรูปคลื่น (C) ที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง สารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์	66
รูปที่ 4. 7 พื้นผิวตอบสนองของค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์เมื่อค่าความถี่ และ รูปคลื่นแตกต่างกัน	67
รูปที่ 4. 8 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์.....	73
รูปที่ 4. 9 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความถี่ (B) และรูปคลื่น (C) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	73
รูปที่ 4. 10 พื้นผิวตอบสนองของค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์เมื่อค่าความถี่ และรูปคลื่นแตกต่างกัน	74
รูปที่ 4. 11 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของ ของแข็ง.....	81
รูปที่ 4. 12 ผลของอันตรกิริยาระหว่างรูปคลื่น (C) และความถี่ของแอมพลิจูด (D) ที่มีต่อค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง.....	81
รูปที่ 4. 13 พื้นผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อ รูปคลื่นและความถี่ของแอมพลิจูดแตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้ความถี่ค่าสูง (B+)	82

รูปที่ 4. 14	พื้นผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อรูปคลื่นและความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดแตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้ความถี่ค่าต่ำ (B-).....	82
รูปที่ 4. 15	ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน กรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12	83
รูปที่ 4. 16	คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน (ก) กรณีศึกษาที่ 12 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 6 ที่ความสูงของท่อไรเซอร์ 25 ถึง 30 เมตร	84
รูปที่ 4. 17	ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ในทิศทาง x.....	85
รูปที่ 4. 18	ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ในทิศทาง z.....	86
รูปที่ 4. 19	ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวรัศมีกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ในทิศทาง x.....	88
รูปที่ 4. 20	ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวรัศมีกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ในทิศทาง z.....	89
รูปที่ 4. 21	ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกนกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12.....	91
รูปที่ 4. 22	คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกน (ก) กรณีศึกษาที่ 12 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 20 วินาที.....	93
รูปที่ 4. 23	ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกนกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12.....	94
รูปที่ 4. 24	คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกน (ก) กรณีศึกษาที่ 12 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 20 วินาที.....	97
รูปที่ 4. 25	คอนทัวร์ค่าความเร็วของแก๊สในท่อไรเซอร์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที กรณีศึกษาที่ 6.....	98
รูปที่ 4. 26	คอนทัวร์ค่าความเร็วของแก๊สในท่อไรเซอร์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที กรณีศึกษาที่ 12....	99
รูปที่ 4. 27	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแก๊สในแนวแกนกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12.....	101
รูปที่ 4. 28	คอนทัวร์ค่าอุณหภูมิของแก๊สภายในท่อไรเซอร์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที กรณีศึกษาที่ 6	102
รูปที่ 4. 29	คอนทัวร์ค่าอุณหภูมิของแก๊สภายในท่อไรเซอร์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที กรณีศึกษาที่ 12	103

รูปที่ 4. 30 ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็น ผลิตภัณฑ์.....	106
รูปที่ 4. 31 ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	107
รูปที่ 4. 32 ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง	107



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1 ช่วงของความเร็วแก๊สในการเกิดขอบเขตพลูอิดไฮเซนต่างๆ	13
ตารางที่ 2. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ของคลื่น	27
ตารางที่ 2. 3 แสดงการทดลองจากการออกแบบด้วยวิธีแฟคตอเรียล 2^k	36
ตารางที่ 3. 1 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบพัลส์ในท่อไรเซอร์	42
ตารางที่ 3. 2 สมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบ	45
ตารางที่ 3. 3 สมการการแตกตัวของไอน้ำร้อน และข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาเคมี	49
ตารางที่ 3. 4 การออกแบบการทดลองของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ	53
ตารางที่ 3. 5 การออกแบบการทดลองของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ (ส่วนที่ศึกษาเพิ่มเติม).....	54
ตารางที่ 4. 1 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์	64
ตารางที่ 4. 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์	65
ตารางที่ 4. 3 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	71
ตารางที่ 4. 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์	72
ตารางที่ 4. 5 ผลของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง	79
ตารางที่ 4. 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง	80
ตารางที่ 4. 7 ผลการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลป้อนเข้าแบบคงที่ที่ความเร็วเฉลี่ย 10.35 เมตรต่อวินาที กับการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์กรณีศึกษาที่ 6.....	96
ตารางที่ 4. 8 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (ส่วนที่ศึกษาเพิ่มเติม).....	105
ตารางที่ 4. 9 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ (ส่วนที่ศึกษาเพิ่มเติม)	105

ตารางที่ 4. 10 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของ ของแข็ง (ส่วนที่ศึกษาเพิ่มเติม).....	106
ตารางที่ 4. 11 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ระหว่างการไหลแบบคงที่และ การไหลแบบพัลส์.....	108



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันในตลาดโลกยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจโลก หน่วยเพิ่มคุณภาพน้ำมันโดยการแปลงสภาพผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าต่ำเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงผ่านปฏิกิริยาเคมีจึงมีความจำเป็นอย่างมากในโรงกลั่นน้ำมัน หนึ่งในกระบวนการที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย คือ การแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะของไหล ซึ่งเป็นกระบวนการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ซีโอไลต์ ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบด กระบวนการนี้เป็นกระบวนการหนึ่งในโรงกลั่นน้ำมันที่สามารถเพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้แก่ผลิตภัณฑ์ เช่น เปลี่ยนน้ำมันเตาให้เป็นน้ำมันเบนซินและดีเซล

กระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันเริ่มต้นจากไอของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหนักและตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดทางด้านล่าง กระบวนการ ผ่านส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ที่เรียกว่า ไรเซอร์ (Riser) และเกิดการสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงก่อนที่จะออกจากไรเซอร์และเข้าไปในไซโคลน (Cyclone) เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกกลั่นแยกในหอกลั่นเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนกลั่นที่มีจุดเดือดต่างๆ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วจะมีคาร์บอนเกาะสะสมอยู่บนพื้นผิวในรูปถ่านโค้กทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงต้องกำจัดถ่านโค้กออกโดยอาศัยการเผาไหม้กับอากาศ (Coke burning) ในเครื่องฟื้นฟูสภาพ (Regenerator) แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาไล่ถ่านโค้กออกกลับมาใช้ในกระบวนการต่อไป

อุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดซึ่งเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีจะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การเคลื่อนที่ของของไหลและอนุภาคของแข็งภายในท่อไรเซอร์จึงถูกศึกษาโดยการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบการไหล ทำนายร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์หรือร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ได้ถูกต้องแม่นยำ จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบปัญหาที่เกี่ยวกับอุทกพลศาสตร์หรือรูปแบบ

การไหลภายในท่อไรเซอร์ เช่น ลักษณะการไหลแบบรูปทรง S (S-shape) ที่ทำให้ของแข็งมีการกระจายตัวหนาแน่นที่ด้านล่างและบางเบาที่บริเวณด้านบน การไหลแบบแกนใน-วงนอก ที่ทำให้เกิดการผสมที่ไม่ดีจากการจับกลุ่มกันของอนุภาคของแข็ง (Aggregates) ที่บริเวณผนังท่อ ลักษณะการไหลทั้งสองจะทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่สม่ำเสมอภายในเครื่องปฏิกรณ์

จากปัญหาดังกล่าว จึงมีผู้ทำวิจัยพัฒนาความเหมาะสมของรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันเพื่อเพิ่มความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ลักษณะการไหลแบบพัลส์ เช่น รูปแบบการไหลแบบพัลส์ที่มีความถี่ต่ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบสะเป่าตั้งเบดทำให้เกิดการผสมที่สูงกว่ารูปแบบการไหลแบบปกติในเครื่องปฏิกรณ์แบบสะเป่าตั้งเบด [1] การใช้รูปแบบการไหลแบบพัลส์ให้ประสิทธิภาพที่สูงในการอบแห้ง [2] การไหลแบบพัลส์ช่วยลดความเร็วต่ำสุดที่ใช้ในการเกิดฟลูอิดเซชันและทำให้การผสมภายในเบดสูงขึ้น [3] การไหลแบบพัลส์ที่มีความถี่สูงทำให้ปริมาณฟองแก๊ส สัดส่วนการขยายตัวของเบด การกวัดแกว่งของความดันและความเร็วสูงสุดในแนวแกนของของแข็งลดลงซึ่งเป็นผลดีต่อระบบ [4] การไหลแบบพัลส์ช่วยปรับปรุงการผสมโดยลดการจับกลุ่มของอนุภาคและการรวมกันของฟองแก๊ส [5] การไหลแบบพัลส์ในการอบแห้งชีวมวลทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนและอัตราการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้น [6] การไหลแบบพัลส์ในท่อไรเซอร์ที่ใช้ในการแตกตัวของไอน้ำมันทำให้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น [7] อย่างไรก็ตาม พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมาการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์เพียงบางตัวแปรเท่านั้น ยังมีตัวแปรดำเนินการอีกหลายตัวที่คาดว่าจะส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมี อาทิเช่น ความถี่แอมพลิจูด รูปคลื่น และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ซึ่งจำเป็นจะต้องศึกษาและพิจารณาอย่างเป็นระบบ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ที่จะศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเบด โดยการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งจะสามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์สำหรับกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงกลั่นน้ำมันเพื่อเพิ่มศักยภาพของเครื่องปฏิกรณ์ให้สูงขึ้น และจะนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้แก่ผลิตภัณฑ์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างแบบจำลองการไหลแบบพัลส์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามมิติ

2. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปร่าง และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด สำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล
3. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปร่าง และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด สำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างแบบจำลองการไหลแบบพัลส์ภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามมิติ
2. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปร่าง และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด สำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล
3. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปร่าง และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด สำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา การไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ อุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมี เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองการไหลแบบพัลส์ภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน

2. ได้ผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่สามารถปรับปรุงอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำร้อนที่มีการไหลแบบพัลส์

1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟลูอิด์เบด รูปแบบการไหลแบบพัลส์ และ วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ รวมถึงวิธีการใช้งานโปรแกรม GAMBIT และ ANSYS FLUENT
2. สร้างแบบจำลองการไหลภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำร้อนด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามมิติด้วยโปรแกรม GAMBIT และ ANSYS FLUENT ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร และสูง 33 เมตร ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับผลจากงานวิจัยของ Shah และ Utikar (2017) เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม
3. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปร่าง และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำร้อนที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล
4. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปร่าง และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำร้อนที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล
5. วิเคราะห์ผล สรุปผล เขียนรายงาน และ วิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีการดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

บทที่ 2 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะของไหล ฟลูอิด์เบด การไหลแบบพัลส์ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การออกแบบการทดลอง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 แบบจำลองการไหล การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม GAMBIT การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT สมมติฐานสำหรับการจำลอง สมการอนุรักษ์ ปฏิกริยาการแตกตัวไอน้ำมัน การจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ ขั้นตอนการทดลอง

บทที่ 4 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อปฏิกริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ผลเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลแบบพัลส์กับการไหลแบบคงที่ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหล (Fluid catalytic cracking)

หน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหล (Fluid catalytic cracking) หรือ FCC เป็นกระบวนการสำคัญในการแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กในฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed) เป็นกระบวนการในโรงกลั่นน้ำมันที่เพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้ผลิตภัณฑ์ เช่น เปลี่ยนน้ำมันเตา (Fuel oil) ให้เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) และ ดีเซล (Diesel) โดยที่ไอของไฮโดรคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยาจะไหลขึ้นจากด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่เรียกว่าทอไรเซอร์ (Riser) เกิดการสัมผัสกันจนเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงแล้วออกจากเครื่องปฏิกรณ์เข้าไปในถังแยกเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ออกจากกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกใช้งานแล้วมักจะมีถ่านโค้ก (Coke) อุดตันบนบริเวณพื้นผิวทำให้ความสามารถเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงต้องกำจัดถ่านโค้กที่ติดอยู่โดยการเผาไหม้กับอากาศ หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถ่านโค้กถูกเผาไล่แล้วจะถูกนำกลับมาใช้ในกระบวนการต่อไป

โดยทั่วไปกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหล ประกอบไปด้วย หน่วยปฏิบัติการที่สำคัญ คือ เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) และหน่วยฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา (Regenerator) ผังกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของหน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหล (Fluid catalytic cracking) หรือ FCC ดังแสดงในรูปที่ 2.1

การทำงานของหน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหล (Fluid catalytic cracking) จะเริ่มจากการป้อนสารตั้งต้น เช่น แก๊สออยล์ (Gas oil) ที่ผ่านการเพิ่มอุณหภูมิด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงจากกระบวนการอื่น หรือเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้เตาเผา (Preheater) เข้าที่ด้านล่างของทอไรเซอร์ (Riser) พร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยาร้อนซึ่งผ่านการฟื้นฟูสภาพ (Regenerated catalyst) โดยการเผาไหม้โค้กที่เกาะอยู่บนผิวหน้าออกไป โดยแก๊สออยล์ (Gas oil) ที่ถูกพ่นเป็นฝอยละอองขนาดเล็ก (Atomized) สัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิสูงจะระเหย และเกิดปฏิกิริยาแตกโมเลกุล (Catalytic cracking reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้การระเหยของแก๊สออยล์ (Gas oil) และปริมาณแก๊สที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาแตกโมเลกุลจะทำให้เกิดการขยายตัวของแก๊ส ทำให้อุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกพาให้เคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนตามแนวทอไรเซอร์ ในทางอุดมคติแล้ว ปฏิกิริยาแตกโมเลกุลจะเกิดขึ้น

ตลอดแนวท่อของไรเซอร์ และจะสิ้นสุดเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สถูกแยกออกจากกันด้วยไซโคลน (Cyclone) ที่บริเวณด้านบนของไรเซอร์ ทั้งนี้ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาแตกโมเลกุลนั้นจะเกิดโค้ก (Coke) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงด้วย โค้กที่เกิดขึ้นจะเกาะอยู่บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากโค้ก จะถูกนำไปกำจัดโค้กโดยการออกซิไดซ์กับออกซิเจนหรือเผาไหม้ การเผาไหม้โค้กนั้นนอกจากจะเป็นการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนยังเป็นแหล่งความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการระเหย การเพิ่มอุณหภูมิ และใช้สำหรับปฏิกิริยาแตกโมเลกุลซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน โดยความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในส่วนของไรเซอร์นั้นจะถูกส่งจากหน่วยฟื้นฟูสภาพไปยังไรเซอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวพาความร้อน ในส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ที่บริเวณด้านบนของไรเซอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพเนื่องจากโค้ก หรืออาจเรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent catalyst) และแก๊สซึ่งประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่ไม่เกิดปฏิกิริยา จะถูกแยกออกจากกันโดยใช้ไซโคลน แก๊สจะถูกส่งไปยังหอกลั่น (Fractionator) และโรงแยกแก๊สต่อไป ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วจะตกลงสู่สตริปเปอร์ (Stripper) ซึ่งในสตริปเปอร์นี้จะมีการใช้น้ำเพื่อไล่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ติดไปกับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป เพื่อเป็นการป้องกันการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่านอกเหนือจากโค้ก

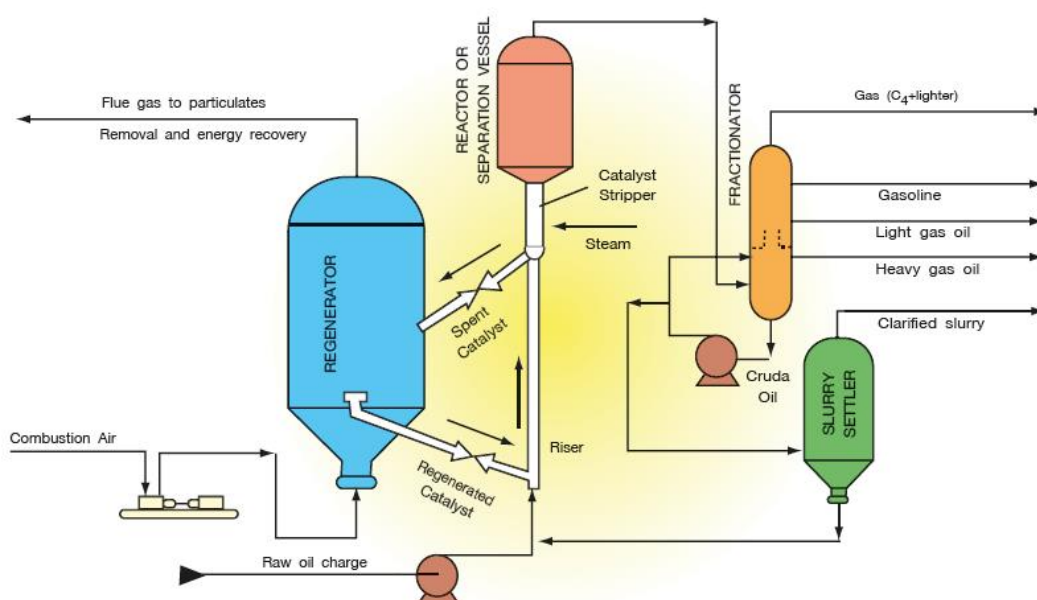
หน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหลสามารถแบ่งประเภทตามการใช้งานออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) การแตกโมเลกุลของแก๊สออยล์ (Gas oil cracking) ที่ใช้แก๊สออยล์ที่ได้จากหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum gas oil) เป็นสายป้อนและเมื่อผ่านหน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหลแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็น แก๊สโซลีน (Gasoline) ไลท์ไซเคิลออยล์ (Light cycle oil, LCO) และแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, LPG)

2) การแตกโมเลกุลจากน้ำมัน (Residues cracking) ที่ใช้กากน้ำมันที่ได้จากหอกลั่นปกติ (Atmospheric residues) และหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum residues) และแก๊สออยล์ที่ได้จากหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum gas oil) เป็นสายป้อนและเมื่อผ่านหน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหลแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) ไลท์ไซเคิลออยล์ (Light cycle oil, LCO) และแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, LPG)

3) การแตกโมเลกุลเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Cracking for petrochemical products) ที่ใช้แก๊สออยล์ที่ได้จากหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum gas oil) และกากน้ำมัน (Residues oil) เป็นสายป้อนและเมื่อผ่านหน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะของไหลแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินส์ (Olefin) และสารอะโรมาติก (Aromatic)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะของไหลเกิดขึ้นในรูปแบบปฏิกิริยาปฐมภูมิ (Primary reactions) และปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Secondary reaction) โดยปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปฐมภูมิจะเกิดจากการแตกตัวของสารตั้งต้นแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, LPG) แก๊สโซลีน (Gasoline) และไลท์ไซเคิลออยล์ (Light cycle oil, LCO) ส่วนปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบทุติยภูมิ จะเกิดจากการแตกตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาแบบปฐมภูมิแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็น โค้ก (Coke) มีเทน (Methane) อีเทน (Ethane) เอทิลีน (Ethylene) โพรเพน (Propane) และโพรพิลีน (Propylene) เป็นต้น



รูปที่ 2. 1 ผังกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของหน่วยการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะของไหล [8]

2.1.2 ฟลูอิดเซชัน (Fluidization)

กระบวนการฟลูอิดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ของแข็งมีลักษณะการประพฤติตัวคล้ายกับของไหล โดยเกิดจากการที่มีแรงลอยตัว (Buoyancy force) ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากของไหลที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งอาจจะเป็นของเหลวหรือแก๊ส ในขั้นแรกเมื่อป้อนของไหลเข้าสู่ระบบที่ความเร็วต่ำของแข็งที่อยู่ภายในระบบจะยังไม่มีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น เนื่องจากแรงต้านทางการเคลื่อนที่ (Drag force) มีมากกว่าแรงซึ่งเกิดจากความเร็ของของไหล เมื่อของไหลไหลผ่านของแข็งที่ความเร็วค่าหนึ่งของแข็งจะมีการเคลื่อนที่แต่ของแข็งยังไม่เป็นอิสระต่อกัน แต่เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นของแข็งจะค่อยๆเคลื่อนที่ผสานตัวไปกับของไหลจนกระทั่งของแข็งเป็นอิสระต่อกัน การสัมผัสกัน

ระหว่างของแข็งกับของไหลแต่ละชนิด จะส่งผลต่อลักษณะของฟลูอิดเซชัน คือ ฟลูอิดเซชันแบบที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบตเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบตแบบนี้ว่า เบตสม่ำเสมอ หรือเบตที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิดเซชันแบบที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะเบตที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวเพราะเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็ง อีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองแก๊ส ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแทรกตัวขึ้นไปยังบริเวณผิวหน้าเบตและแตกตัว แต่ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมากจะทำให้เม็ดของแข็งติดฟองแก๊สขึ้นมาด้วย

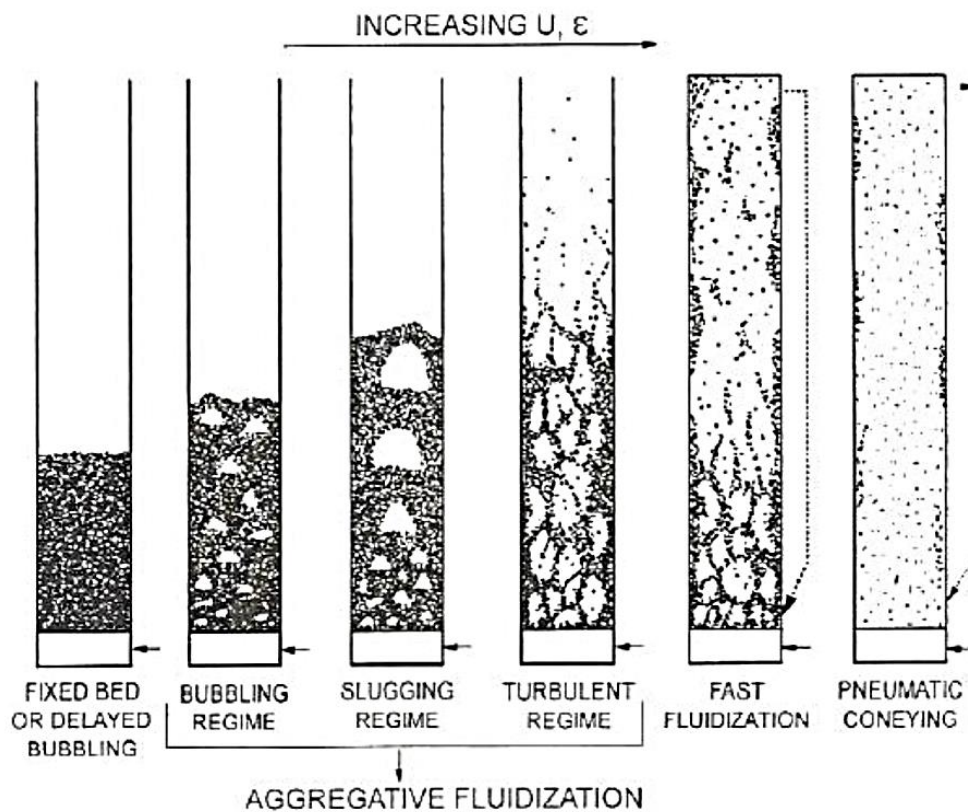
2.1.2.1 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน (Regime of fluidization)

ลักษณะของฟลูอิดเซชันที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกันระหว่างแก๊สและของแข็งนั้นมีความซับซ้อน โดยถ้าของแข็งวางบนตัวกระจายแก๊สและมีแก๊สเคลื่อนที่ผ่าน จากนั้นค่อยๆ เพิ่มความเร็วของแก๊ส จะทำให้เกิดช่วงการไหล ดังรูปที่ 2.2

เมื่อแก๊สไหลผ่านของแข็งขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะอยู่นิ่ง ไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลผ่านไปตามช่องว่างของของแข็งภายในเบต แต่ไม่ทำให้ของแข็งภายในเบตเคลื่อนที่ เรียกลักษณะรูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชันแบบนี้ว่า เบตนิ่ง (Fixed bed) เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านของแข็งที่วางนิ่ง จะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag force) ซึ่งก่อให้เกิดความดันลด (Pressure drop) ตกคร่อมเบตไว้ ความดันลดตกคร่อมเบตตลอดความสูงของเบตนิ่งที่เกิดขึ้นนั้นจะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่งของแก๊สเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ซึ่งความเร็วจุดนี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) และเรียกเบต ณ จุดนี้ว่า Minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่ของแข็งประทุติตัวคล้ายกับของไหล โดยเมื่อความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กจำนวนมากทางด้านล่างของเบต เรียกเบตที่สภาวะดังกล่าวว่าเบตแบบฟองแก๊ส (Bubbling bed) และเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟอง (Minimum bubbling velocity, U_{mb}) โดยความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟองขึ้นกับสมบัติของของแข็ง โดยของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม A จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ส่วนของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม B และ D จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดแก๊สเท่ากับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ดังนั้นรูปแบบการเกิดฟลูอิดเซชันแบบสม่ำเสมอ หรือแบบไม่มีฟองแก๊ส (Bubble-free fluidization) จะเกิดในกรณีที่อนุภาคของแข็งอยู่ใน Geldart กลุ่ม A เท่านั้น

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบตขึ้นไป ซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบตอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่า บริเวณอิสระ (Freeboard) อย่างไรก็ตาม อาจจะมีของแข็งบางส่วนที่มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วยทำให้ไม่ตกย้อนกลับลงมาในเบตอีก ณ ความสูงค่าหนึ่งใน Freeboard ซึ่งของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลง

มายังเบตจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหยุดลอยส่งผ่าน หรือ Transport Disengaged Height (THD) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับแก๊สด้วยอัตราการลอยออกที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า Elutriation Rate



รูปที่ 2. 2 รูปแบบการไหลในฟลูอิดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง [9]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$-Re_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{150 \mu} g \left(\frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right) \quad (2.1)$$

$$-Re_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \epsilon_{mf}^3 \quad (2.2)$$

เมื่อเพิ่มความเร็วแก๊สในเบตแบบฟองแก๊ส ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นมาของแข็งจะถูกฟองแก๊สผลักขึ้นไปและอนุภาคของแข็งจะตกกลับลงมาอีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สลักกิ้ง (Slugging) เรียกความเร็วแก๊สนี้ว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสลักกิ้ง (U_{ms}) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความความเร็วของแก๊สและความสูงของเบต ถ้าเบตมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่เกือบ

เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด ซึ่งจะทำให้เกิดความแปรปรวนของความดันภายในเบดอย่างมาก เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของของแข็งกับแก๊สซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว จนอาจจะดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส เรียกว่า เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed)

การเคลื่อนไหวภายในเบดเป็นแบบปั่นป่วนลักษณะภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ Dense Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีของแข็งอยู่นานแน่น และ Dilute Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีของแข็งอยู่เบาบาง โดยช่วงในการเปลี่ยนจากเบดแบบฟองแก๊สเป็นเบดแบบปั่นป่วนไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใดที่ความเร็วแก๊สค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงความเร็วแก๊สในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆท่าน พบว่า การเปลี่ยนจากขอบเขตเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วแก๊สจนถึงค่าๆหนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบดแบบฟองแก๊ส ที่บริเวณผิวหน้าเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบดแบบปั่นป่วน

Terminal Velocity, U_t คือ ความเร็วตกอิสระของของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอคดลองไป โดยค่า Terminal Velocity สามารถหาได้จากสมการของ Haider และ Levenspiel [10] โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามรูปร่างของของแข็ง

กรณีของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } \text{Rep} < 0.4 \quad (2.3)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{\frac{1}{3}} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 \leq \text{Rep} < 500 \quad (2.4)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ } 500 \leq \text{Rep} < 20,000 \quad (2.5)$$

กรณีของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{\frac{1}{2}}} \right]^{-1} \quad (2.6)$$

โดยที่

$$U_t^* = U_t \left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.7)$$

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.8)$$

เมื่อเพิ่มความเร็วแก๊สในเบดแบบปั่นป่วนจนกระทั่งไม่สามารถระบุผิวด้านบนของเบดได้ เรียกเบด สภาวะนี้ว่า เบดที่ความเร็วสูง (Fast Bed) หรือฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง (Fast Fluidization) โดยความเร็วแก๊สต่ำสุดที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากเบดแบบปั่นป่วนเป็นฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูงเรียกความเร็วนี้ว่า Transport Velocity หรือ U_{tr} ในขอบเขตฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง ซึ่งมีการเคลื่อนที่ออกของอนุภาคของแข็งทางด้านบนของเบด เพื่อไม่ให้ปริมาณของแข็งในเบดหมดไป จำเป็นต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างของเบด ของแข็งจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผนังของเบด โดยที่แก๊สและของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านในจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของแข็งในเบดเจือจางมากขึ้น ในภาวะที่เบดเป็นฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของเบดระบบแบบนี้เรียกว่า ฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB)

เมื่อความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจนมากกว่า U_{tr} พบว่าความหนาแน่นของแข็งภายในเบดเบาบางมากเนื่องจากความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นมากจนเกิดการขนส่งของแข็งด้วยแก๊ส ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่มีความเร่ง และของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผนังของเบด เรียกเบดที่สภาวะนี้ว่า การขนส่งแบบเจือจาง (Dilute phase transport regime) หรือ การขนส่งด้วยลม (Pneumatic conveying) ความเร็วแก๊สที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดแบบเจือจางเป็นเบดแบบหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดช็อกกิ้ง (Choking Velocity) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทดลองโดยการปรับลดความเร็วแก๊สในระบบที่เป็นเบดแบบเจือจางและมีปริมาณของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว เปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่นซึ่งความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือ ความเร็วในการเกิดช็อกกิ้ง

โดยความเร็วช็อกกิ้งแบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่ A, B และ C โดยความเร็วแก๊สที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากขอบเขตการขนส่งแบบเจือจางเป็นเบดแบบฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง เรียกความเร็วแก๊สนี้ว่า ความเร็วช็อกกิ้ง ชนิด A (Type A Choking Velocity, U_{CA}) [11] ดังนั้นสามารถสรุปช่วงของความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดขอบเขตฟลูอิดิเซชันต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2. 1 ช่วงของความเร็วแก๊สในการเกิดขอบเขตฟลูอิดเซชันต่างๆ

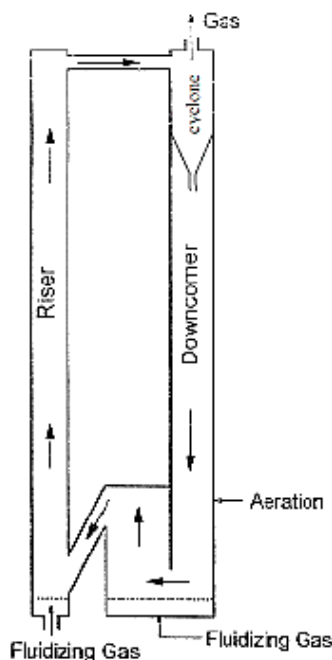
ช่วงความเร็วแก๊ส	ขอบเขต
$0 < U < U_{mf}$	เบตนิ่ง (Fix bed)
$U_{mf} < U < U_{mb}$	เบตแบบไม่มีฟองแก๊ส (Bubble-free fluidization)
$U_{mb} < U < U_{ms}$	เบตแบบฟองแก๊ส (Bubble fluidized bed)
$U_{ms} < U < U_t$	เบตแบบสลักกิ้ง (Slugging bed)
$U_t < U < U_{tr}$	เบตแบบปั่นป่วน (Turbulent bed)
$U_{tr} < U < U_{CA}$	เบตแบบฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง (Fast fluidization)
$U > U_{CA}$	การขนส่งแบบเบตเบาบาง (Dilute phase transport) หรือการขนส่งด้วยลม (Pneumatic conveying)

U คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (Superficial gas velocity, เมตรต่อวินาที)

2.1.2.2 ฟลูอิดเซชันเบตแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized bed, CFB)

กระบวนการฟลูอิดเซชันเบตแบบหมุนเวียนเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีการสัมผัสกันระหว่างแก๊สและของแข็ง ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกโดย Winkler และถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี คริสตศักราช 1930 โดยปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการต่างๆ โดยเฉพาะกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking, FCC) เนื่องจากเทคนิคฟลูอิดเซชันเบตแบบหมุนเวียนมีข้อดีคือ มีอัตราการถ่ายโอนของมวลและความร้อนระหว่างแก๊สและของแข็งสูง มีการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ และเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่อง เหมาะกับการใช้งานในระบบอุตสาหกรรม

ระบบฟลูอิดเซชันเบตแบบหมุนเวียน เป็นระบบซึ่งอาศัยเทคนิคทางฟลูอิดเซชันมาประยุกต์ ระบบจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2. 3 ระบบฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียน [9]

1) ไรเซอร์ (Riser) เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาในกระบวนการต่างๆ โดยในกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking) ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นภายในท่อไรเซอร์ที่มีความยาวประมาณ 30 เมตร ในส่วนนี้จะมีการป้อนเข้าของอนุภาคของแข็งและของไหลที่ด้านล่างของไรเซอร์ และหลังจากเกิดปฏิกิริยาของไหลจะออกที่ด้านบน ภายในท่อไรเซอร์จะเกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลและเกิดปฏิกิริยาเคมีในส่วนนี้

2) Gas-solid Separator ทำหน้าที่แยกแก๊สและอนุภาคของแข็งออกจากกัน ซึ่งในระบบฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียนนิยมใช้ไซโคลนในการแยกแก๊สและอนุภาคของแข็งออกจากกัน โดยอาศัยหลักการเหวี่ยง ซึ่งจะใช้แรงเหวี่ยงในแนวรัศมีในการเหวี่ยงอนุภาคของแข็งให้กระทบกับผนังของไซโคลนแล้วจากนั้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปสู่ส่วนล่างของไซโคลน เพื่อผ่านท่อป้อนกลับต่อไป ส่วนแก๊สและอนุภาคขนาดเล็กๆ จะถูกแยกออกสู่ด้านบนของไซโคลน

3) ท่อป้อนกลับ (Downcomer) ทำหน้าที่ป้อนกลับของแข็งที่ถูกดักจับจากไซโคลนไปยังด้านล่างของไรเซอร์

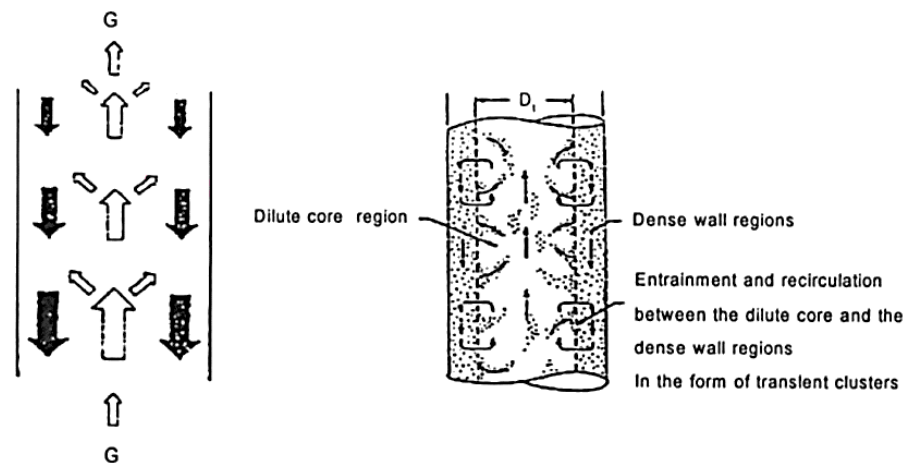
ฟลูอิดไคซ์ชันความเร็วสูงเป็นลักษณะหนึ่งของการสัมผัสระหว่างแก๊สกับของแข็ง ซึ่งแก๊สจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของอนุภาคของแข็งที่อยู่เหนือตัวกระจายแก๊ส โดยแก๊สจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ของอนุภาคทำให้อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน

1) Cluster phase อนุภาคของแข็งเกาะอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มๆ เคลื่อนที่ขึ้นลงมีการสลายตัวและรวมตัวใหม่ภายในไรเซอร์

2) Disperse phase อนุภาคของแข็งมีเบาบางกระจายกันออกไป (อยู่ห่างกัน) และเคลื่อนที่ขึ้นไปยังท่อป้อนกลับ

อนุภาคของแข็งที่เกาะตัวกันต่อเนื่องและรวมตัวกันเป็นกลุ่มภายใน cluster phase จะเรียกว่า cluster หรือ strand หรือ streamer ซึ่งกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอและเคลื่อนที่ขึ้นๆลงๆ อยู่ภายใน disperse phase ซึ่งประกอบด้วย แก๊สซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นและเม็ดของแข็งเบาบาง (ปริมาณน้อยกว่าใน cluster phase) เคลื่อนที่ไปพร้อมกับแก๊ส

เม็ดของแข็งภายในเบตส่วนใหญ่จะอยู่ใน cluster phase และมีการเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแกนกลาง (ขณะเคลื่อนที่ขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้น) จนเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งก็จะตกกลับลงมาตามผนังของท่อไรเซอร์ เมื่อเคลื่อนที่ตกกลับมาถึงจุดๆ หนึ่ง cluster ก็แตกสลายตัวออกจากกัน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไปอีกครั้ง โดยการรวมตัวกันเป็น cluster และการสลายตัวออกจากกันจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2. 4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster [12]

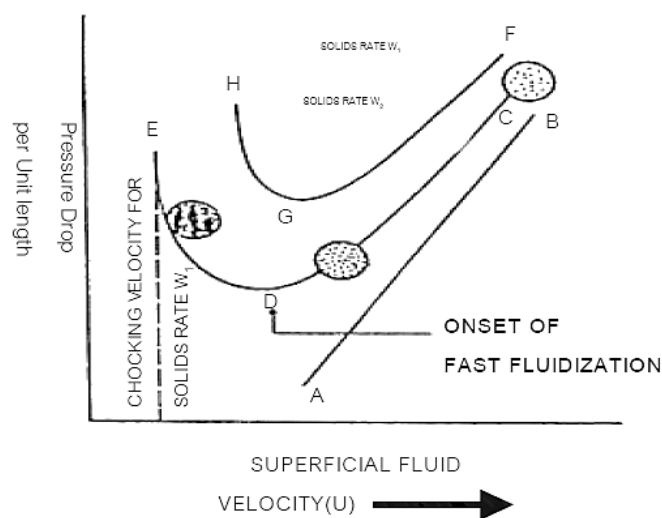
เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของแก๊สและของแข็ง และความหนาแน่นของของแข็งตลอดความยาวของท่อไรเซอร์ จะเห็นรูปแบบการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) บริเวณที่ของแข็งเกิดการรวมตัวเป็น cluster และสลายตัวอยู่ตลอดเวลาจะเกิดที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ การกระจายตัวหรือความเข้มข้นของของแข็งมีค่าสูงเรียกว่า Dense Bed

2) บริเวณที่ของแข็งมีการกระจายตัวหรือมีความเข้มข้นน้อย ซึ่งเกิดบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์ เรียกว่า Dilute Bed

2.1.2.3 ขอบเขตในระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

ระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนส่วนใหญ่จะทำงานอยู่ในขอบเขตของฟลูอิด์เบดที่ความเร็วสูง จากการทดลองเพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดฟลูอิด์เบดที่ความเร็วสูง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดต่อหนึ่งหน่วยความยาวกับความเร็วแก๊สที่ใช้ สามารถสรุปผลขอบเขตในการเกิด fast bed ดังแสดงในรูป 2.5 โดยพบว่าสำหรับการไหลของของผสมแก๊สกับของแข็งที่มีความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) หรือ Suspension Density มีค่าต่ำในแนวตั้งโดยอัตราการป้อนของแข็งเท่ากับ W_1 เมื่อลดความเร็วแก๊สลงจากจุด C ซึ่งเป็นจุดที่มีความเร็วแก๊สสูง การกระจายตัวของเม็ดของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วแก๊สสูงขึ้นไป เมื่อลดความเร็วลงจนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับจุด D ค่าความดันเนื่องจากน้ำหนักเม็ดของแข็ง Static Head กับความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานในการไหลของของผสมจะมีค่าต่ำที่สุด เรียกจุด D นี้ว่าจุดเริ่มเกิดเบดแบบความเร็วสูง Fast Bed (Onset of fast Fluidization) หรือจุดที่เปลี่ยนจากเบดแบบส่งผ่าน (Pneumatic Transport) ไปเป็นเบดแบบความเร็วสูง (Fast Bed) เมื่อความเร็วแก๊สยังคงลดลงต่อไป (จากจุด D ไป E) การกระจายตัวของเม็ดของแข็งลดลงมีความหนาแน่นมากขึ้นทำให้ความดันลดรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วแก๊สลดลงจนถึงค่าหนึ่ง (ที่จุด E) แก๊สจะไม่สามารถพัดพาของแข็งออกไปจากคอลัมน์ได้อีก ของแข็งเริ่มที่จะสะสมตัวอยู่ในคอลัมน์ ทำให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นที่จุด E จึงเปลี่ยนจากภาวะ Fast Bed ไปเป็น Captive Fluidized Bed (Turbulent Bed) ยกเว้นกรณีที่คอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเบดจะกลายเป็น สลัดกิ้ง (Slugging) ภาวะที่จุด E จะเรียก Choking Condition (เป็นจุดที่แก๊สอึดตัวด้วยของแข็ง) และความเร็วที่จุด E จะเรียกว่าความเร็วช็อคกิ้ง (Choking Velocity)



รูปที่ 2.5 ขอบเขตของ Fast fluidization [12]

การเปลี่ยนแปลงขอบเขตไปเป็นขอบเขตฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูงมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วแก๊สและอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง โดยการเปลี่ยนแปลงขอบเขตเนื่องจากการลดความเร็วแก๊ส ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งคงที่ แสดงดังรูปที่ 2.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงขอบเขตในระบบฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียนสัมพันธ์กับความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง (Choking velocity) ซึ่งความเร็วช็อคกิ้งแบ่งได้ 3 ชนิด คือ A B และ C โดยสภาวะช็อคกิ้ง (Choking condition) คือสภาวะที่อิมพัลส์ไปด้วยของแข็ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากเบดแบบเฉื่อยจางเป็นเบดแบบหนาแน่นโดยความเร็วแก๊สที่สภาวะนี้เรียกว่าความเร็วช็อคกิ้ง จากแผนผังพบว่าที่ความเร็วแก๊สสูงมาก โดยความเร็วแก๊สสูงกว่า U_{mp} การขนส่งภายในโรเตอร์เป็นการไหลแบบเบดเบาบางที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous dilute-phase flow) ซึ่งที่ความเร็วนี้ความดันของแก๊สภายในคอลัมน์จะเท่ากันตลอดทั้งคอลัมน์ โดยเมื่อความเร็วแก๊สลดลงพบว่าการไหลภายในคอลัมน์จะเปลี่ยนเป็นการไหลแบบเบดเบาบางที่เป็นการไหลในลักษณะแกนใน-วงนอก (Core-Annular dilute-phase flow) เมื่อความเร็วแก๊สลดลงจนกระทั่งมีการแขวนลอยของแข็งภายในแก๊สอย่างหนาแน่น แต่ยังมีการหลุดออกของของแข็งออกจากคอลัมน์ ที่สภาวะนี้ต้องการความเร็วแก๊สและอัตราการป้อนการไหลป้อนกลับของแข็งที่สูง ซึ่งเรียกความเร็วแก๊สที่เปลี่ยนจากการขนส่งแบบเบดเบาบางไปเป็นการขนส่งแบบเบดหนาแน่นนี้ว่าความเร็วช็อคกิ้งชนิด A (Type A choking velocity, U_{CA}) ซึ่งที่ความเร็วช็อคกิ้งชนิด A อาจเกิดการขนส่งแบบเบดหนาแน่นชนิดเบดแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) หรืออาจเป็นเบดแบบฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง (Fast Fluidization) และเมื่อความเร็วแก๊สลดลงจนกระทั่งแก๊สไม่สามารถนำพาของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ พบว่าของแข็งเริ่มสะสมอยู่ทางด้านล่างของคอลัมน์ ซึ่งทำให้การขนส่งแบบเบดหนาแน่นสลายไป เรียกว่าความเร็วแก๊สนี้ว่าความเร็วช็อคกิ้งชนิด B (Type B choking velocity, U_{CB}) และในกรณีที่ความเร็วแก๊สที่ลดลงยังสูงพอที่จะนำพาของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ และยังมีอัตราการป้อนของแข็งเข้าสู่คอลัมน์ แต่ไม่สามารถที่เกิดการขนส่งแบบเบดหนาแน่นได้เนื่องจากสลักกิ้งภายในคอลัมน์ เรียกความเร็วแก๊สช็อคกิ้งชนิด C (Type C choking velocity, U_{CC}) จากแผนผังพบว่า การที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูงต้องให้ความเร็วแก๊สต่ำกว่า U_{CA} โดย Bi และ Fan ได้ประมาณค่า U_{CA} ไว้ดังนี้

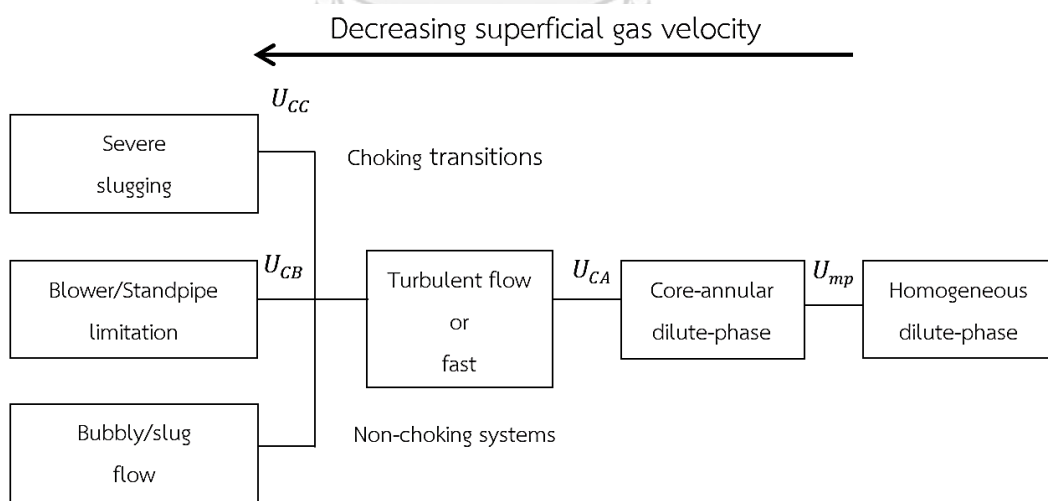
$$\left(\frac{U_{CA}}{\sqrt{gd_p}}\right) = 21.6Ar^{0.105} \left(\frac{G}{\rho_g U_{CA}}\right)^{0.542} \quad (2.9)$$

เมื่อ Ar คือ เลขอาร์คิมิดีส ($\text{Archimedes number} = \frac{\rho_g(\rho_p - \rho_g)gd_p^3}{\mu^2}$)
 G คือ อัตราการหมุนเวียนของของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)

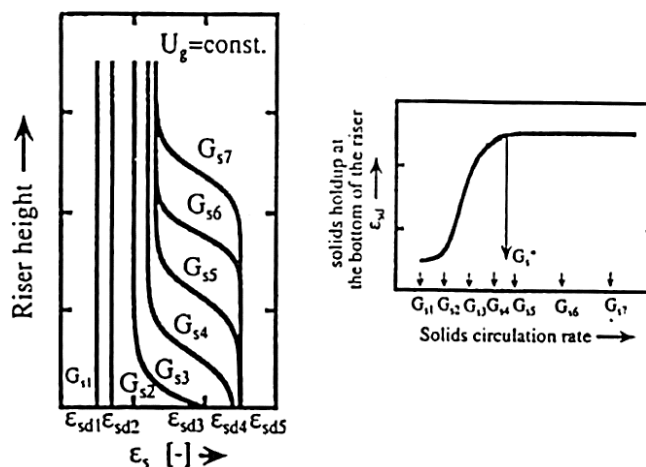
ในระบบฟลูอิดซ์เบดหมุนเวียนพบว่าอัตราการหมุนเวียนของของแข็งเป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง เนื่องจากอัตราการหมุนเวียนของแข็งในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนต้องมากกว่า Saturation carrying capacity หรือ G_s^* ถึงจะรักษาสถานะเบดแบบความเร็วสูงให้คงตัวได้ [13] การทดลองเพื่อหาค่า G_s^* ดังแสดงในรูปที่ 2.7 พบว่า G_s^* คือ อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปริมาณของแข็งที่อยู่ทางด้านล่างโรเซอร์มีค่ามากที่สุด โดยที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่มากกว่า G_s^* พบว่าสัดส่วนของแข็งที่สะสมอยู่ทางด้านล่างโรเซอร์จะคงที่เมื่ออัตราการหมุนเวียนหรือปริมาณของของแข็งเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไป และจะสังเกตเห็นลักษณะของการกระจายตัวของแข็งตลอดทั้งโรเซอร์มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S-Shape) แสดงดังเส้นกราฟ $G_{s3} - G_{s7}$ โดยสามารถแบ่งเบดเป็น 2 ส่วนได้แก่ เบดหนาแน่นทางด้านล่างคอลัมน์ และเบดเบาบางทางด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของขอบเขตฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง [13] แต่ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อยกว่า G_s^* พบว่าสัดส่วนของแข็งเท่ากันตลอดทั้งโรเซอร์ดังเส้นกราฟ $G_{s1} - G_{s2}$ โดนสามารถคำนวณค่า G_s^* ได้ดังสมการที่ 2.10

$$\frac{G_s^* d_p}{\mu} = 0.125 Fr^{1.85} Ar^{0.63} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{-0.44} \quad (2.10)$$

โดย Fr คือ Froude number ($= U/(gD)^{0.5}$)



รูปที่ 2. 6 แผนผังแสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนและการขนส่งของแข็งภายในโรเซอร์เมื่อลดความเร็วแก๊ส [2]



รูปที่ 2. 7 การทดลองหา Saturation carrying capacity [12]

2.1.2.4 โครงสร้างของเบดที่ความเร็วสูง (Structure of fast beds)

ในระบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งจะไม่สม่ำเสมอทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบและการถ่ายเทพลังงานที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการศึกษาโครงสร้างของเบดจึงสามารถศึกษาได้จากตัวแปรดังต่อไปนี้

1) รูปแบบของสัดส่วนช่องว่างในแนวแกน (Axial voidage profile)

การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ ดังแสดงรูปที่ 2.8 โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการหมุนเวียนของแข็งที่ความเร็วแก๊สคงที่ค่าหนึ่ง รูปแบบสัดส่วนช่องว่างจะเปลี่ยนจากขอบเขตการขนส่งแบบเบดเจือจาง (Dilute phase transport regime) ไปเป็น ฟลูอิดไรซ์เบดที่สภาวะความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed) และรูปแบบการขนส่งแบบเบดหนาแน่น (Dense phase transport regime) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราการหมุนเวียนของแข็งต่ำที่สุดพบว่าสัดส่วนช่องว่างของแก๊สภายในคอลัมน์มากที่สุด โดยมีรูปแบบของสัดส่วนช่องว่างคงที่ตลอดทั้งแนวแกนแสดงดังเส้นกราฟที่ a-b ซึ่งเป็นรูปแบบการขนส่งแบบเบดเจือจาง โดยเมื่ออัตราการหมุนเวียนของแข็งเพิ่มขึ้นพบว่ารูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดแนวแกนเปลี่ยนเป็นรูปตัวเอส (S-Shape) ซึ่งเป็นรูปแบบพิเศษในระบบฟลูอิดไรซ์เบดที่ความเร็วสูง แสดงดังเส้นกราฟ c-g โดยสามารถแบ่งเบดออกเป็น 2 ส่วน คือ เบดหนาแน่น (Dense Bed) บริเวณด้านล่าง และเบดเบาบาง (Dilute Bed) บริเวณด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจุดเปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่นไปเป็นเบดแบบเบาบางอยู่สูงขึ้นไปเมื่ออัตราการหมุนเวียนของแข็งเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือบริเวณที่เป็นเบดหนาแน่นจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออัตราการหมุนเวียนของแข็งเพิ่มขึ้นค่าสัดส่วนช่องว่างจะลดลงเนื่องจากมีปริมาณของแข็งสะสมเพิ่มมากขึ้น และลักษณะของกราฟเปลี่ยนจากรูปตัวเอสที่เบดมีการแบ่งชั้นเป็นเบดหนาแน่น

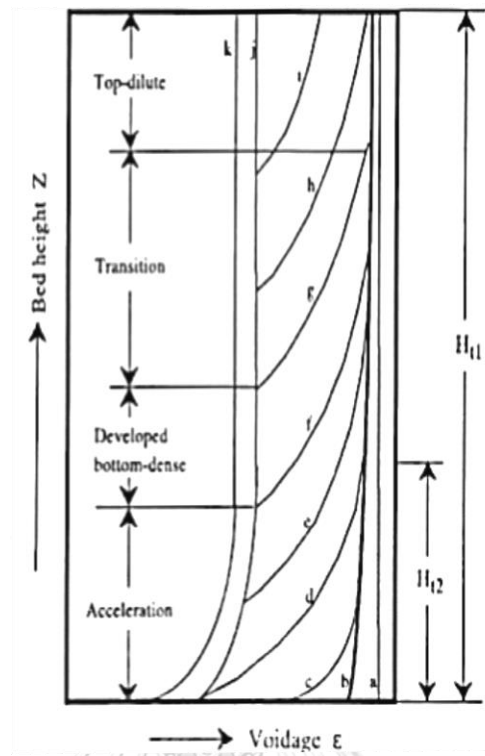
และเบดเบาบางอย่างชัดเจน จนรูปแบบสัดส่วนช่องว่างเกือบเป็นเส้นตรง นั่นคือ สัดส่วนช่องว่างเท่ากันตลอดทั้งคอลัมน์ แสดงดังเส้นกราฟ j-k แสดงถึงรูปแบบการขนส่งแบบหนาแน่น

2) รูปแบบของสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี (Radial voidage profiles)

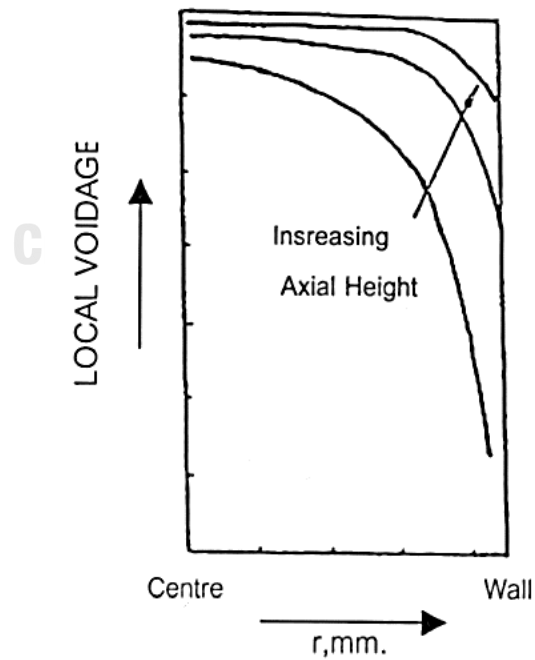
สำหรับการกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial Distribution) ได้ทำการศึกษาและสรุปได้ว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเม็ดของแข็งที่พื้นที่หน้าตัดเดียวกัน (Local Volume Fraction of Solid) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกึ่งกลางของคอลัมน์ไปยังผนังโดยจะมีค่ามากที่สุดผนัง และมีค่าต่ำที่สุดกึ่งกลางของคอลัมน์ หรือสัดส่วนช่องว่างมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางท่อ และมีค่าต่ำสุดที่ผนัง และการกระจายตัวในแนวรัศมีจะมีน้อย เมื่ออัตราการป้อนของแข็งมีค่าต่ำลง หรือความเร็วแก๊สลดต่ำลง นอกจากนี้แล้วที่บริเวณด้านบนของคอลัมน์การกระจายตัวก็มีน้อยลงเช่นกัน ดังรูปที่ 2.9 และ Fraser S.A. เสนอว่าการกระจายตัวในแนวรัศมีหรือสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีจะขึ้นอยู่กับระยะในแนวรัศมี (r) จากแกนกลาง และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด (ϵ_{av}) ที่พิจารณาเท่านั้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี $\epsilon(r)$ ได้ดังนี้ [12]

$$\epsilon(r) = \epsilon_{av} [3.6(r/R)^{6.47} + 0.191] \quad (2.11)$$

โดยที่ ϵ_{av} คือ สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ
 r คือ ระยะทางในแนวรัศมีที่ต้องการวัดสัดส่วนช่องว่าง, เมตร
 R คือ รัศมีของท่อไรเซอร์, เมตร



รูปที่ 2. 8 รูปแบบการกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแกนแนว [12]



รูปที่ 2. 9 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีระบบ Fast bed [12]

2.1.1.5 การจำแนกชนิดของของแข็ง

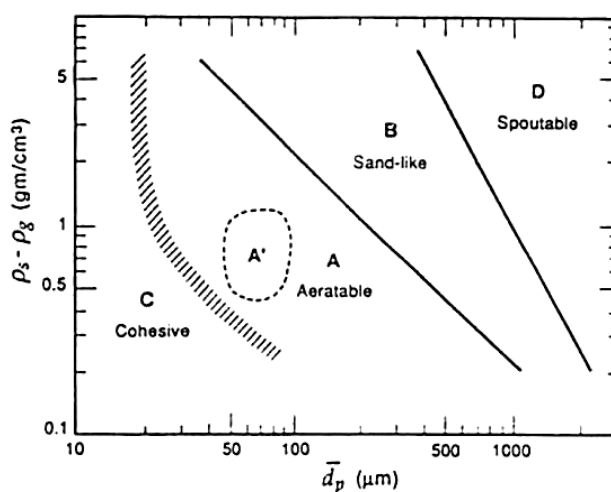
ในระบบฟลูอิดเซชัน คุณสมบัติของของแข็ง เช่น ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่น มีผลต่อการแขวนลอยของของแข็งในแก๊ส หรือการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างของแข็งและแก๊ส จึงได้มีการศึกษาผลของสมบัติของของแข็ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบหรือปฏิบัติการในเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [14] โดยทั่วไปของแข็งในระบบ[14]ฟลูอิดเซชันสามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่มตามวิธีของ Geldart (Geldart Powder Classification) โดยวิเคราะห์ผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับแก๊สและขนาดของของแข็งเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.10 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้

Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายเป็นฟลูอิดเซชันแบบสม่ำเสมอ (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วแก๊สต่ำๆ และที่ความเร็วแก๊สสูงๆ ก็สามารถควบคุมการเกิดฟองแก๊สได้ โดยการเกิดฟลูอิดเซชันที่ไม่เกิดฟองแก๊ส เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมัน (FCC) เป็นต้น

Group B คือ Sandlike เป็นของแข็งที่มีขนาด อยู่ในช่วง $50 < d_p < 500$ ไมโครเมตร และความหนาแน่นในช่วง $1.4 < \rho_s < 4$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การเกิดฟลูอิดเซชันยังเกิดได้ง่ายแต่อิทธิพลของฟองแก๊สจะสูงขึ้น และฟองจะมีการโต เช่น ททราย เป็นต้น

Group C คือ Cohesive เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก น้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะสูงมากและมักจะจับตัวกันเป็นก้อน เช่น ผงแป้ง หรือ ซีเมนต์ เป็นต้น

Group D คือ Spoutable เป็นของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหรือความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก และมักจะเกิดปรากฏการณ์ Spouting หรือเกิดช่องว่างของทางไหลแก๊สซึ่งจะเกิดที่บริเวณทางด้านล่างของเบต เช่น เม็ด กาแฟ หรือเม็ดถั่วเขียว เป็นต้น



รูปที่ 2. 10 การจำแนกกลุ่มของของแข็ง [9]

2.1.3 การไหลแบบพัลส์ (Pulsating flow)

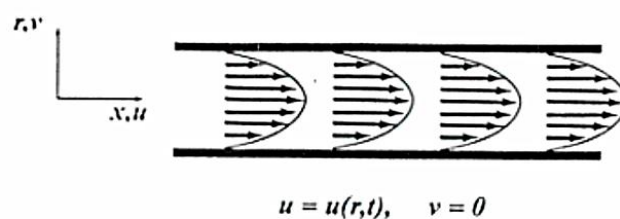
ปรากฏการณ์ของการไหลแบบพัลส์สามารถพบได้ในระบบต่างๆ มากมายในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การไหลของเลือดภายในเส้นเลือด และการไหลเวียนของเลือดภายในหัวใจ โดยการไหลแบบพัลส์ (Pulsating flow) คือ การไหลที่ถูกทำให้เกิดความเร่งและความหน่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการศึกษาการไหลแบบพัลส์ต้องใช้พลศาสตร์ของไหล และการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างผนังและของไหลที่ไหลอยู่ภายใน รวมถึงการแปรผันของความเร็วในการไหลของของไหลระหว่างการกวัดแกว่ง (Oscillation) จึงแสดงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวกับการไหลที่เกี่ยวข้องเพื่อทำความเข้าใจลักษณะการไหลแบบพัลส์ดังนี้

2.1.3.1 การไหลภายในท่อ

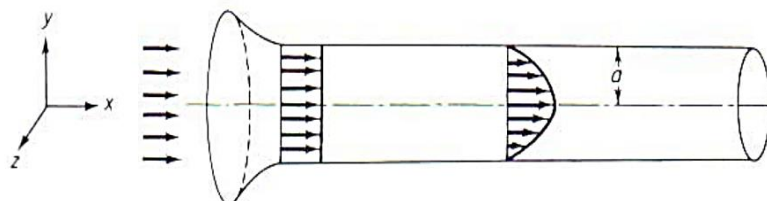
การไหลที่เกิดภายในท่อที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มี 2 แบบคือ การไหลแบบคงตัวและการไหลแบบออสซิลลาทอรี

การไหลแบบคงตัว (Steady Flow)

การไหลแบบราบเรียบและคงตัวภายในท่อของไหลจะมีลักษณะการไหลที่แบ่งออกเป็นชั้นๆ และมีการไหลขนานกันไปตลอดทั้งชั้นโดยไม่มีการไหลข้ามชั้นกัน ลักษณะรูปร่างความเร็วในแต่ละพื้นที่หน้าตัดจะเป็นแบบพาราโบลาที่มีความเร็วสูงสุดเกิดขึ้น ณ จุดกึ่งกลางของท่อดังแสดงในรูป 2.11 และ 2.12



รูปที่ 2. 11 ลักษณะรูปแบบของความเร็วของของไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อ [15]

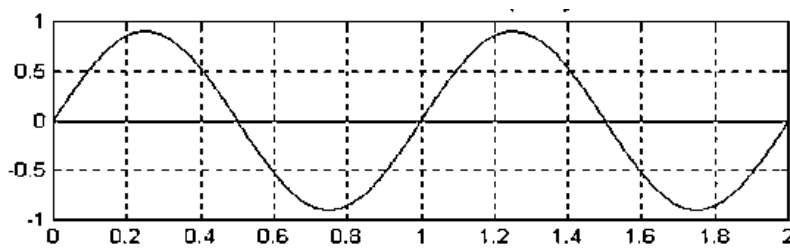


รูปที่ 2. 12 การไหลแบบราบเรียบผ่านท่อกลม [16]

2.1.3.2 คลื่น (Wave)

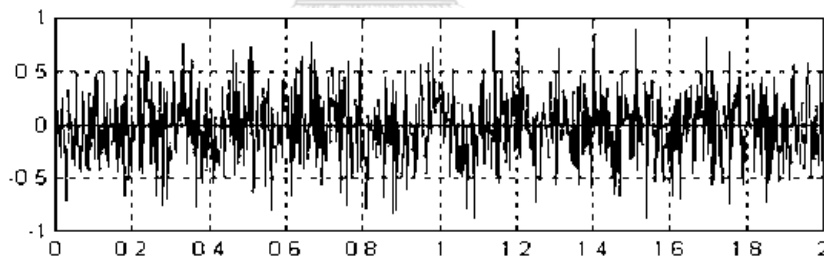
รูปคลื่น (Waveform) คือ ภาพที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของกระแส ความดัน หรือ ความเร็วเทียบกับเวลา มี 3 ลักษณะหลัก คือ

Periodic waveform หมายถึง รูปคลื่นใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแส แรงดัน หรือ ความเร็ว ที่มีปรากฏการณ์สม่ำเสมอจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย ดังแสดงในรูป 2.13



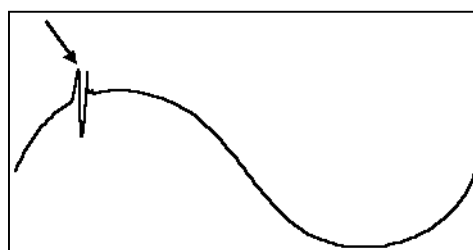
รูปที่ 2.13 ลักษณะ Periodic waveform

Aperiodic waveform หมายถึง รูปคลื่นใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแส แรงดัน หรือ ความเร็ว ที่มีปรากฏการณ์ไม่สม่ำเสมอ ไม่สามารถคาดเดาได้ว่ารูปคลื่นต่อไปจะมีลักษณะอย่างไร ดังแสดงในรูป 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะ Aperiodic waveform

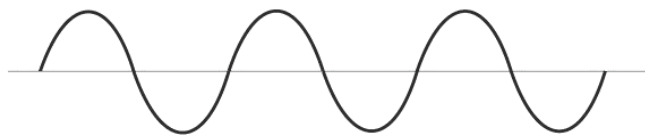
Transient waveform หมายถึง รูปคลื่นใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแส แรงดัน หรือ ความเร็ว เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวและจะเกิดเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ ชั่วขณะ ดังแสดงในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะ Transient waveform

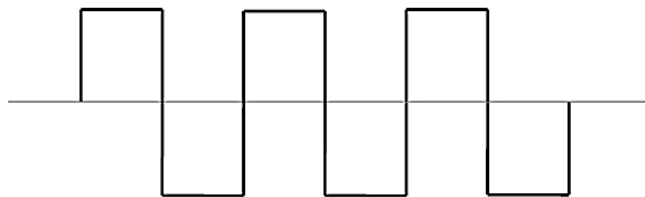
ชนิดของรูปคลื่นแบบต่างๆ

คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal waveform) เป็นรูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิต เหมือนกับกราฟของฟังก์ชันไซน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2. 16 ลักษณะคลื่นรูปไซน์

คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square waveform) เป็นรูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดขึ้นและขั้นบันไดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.17



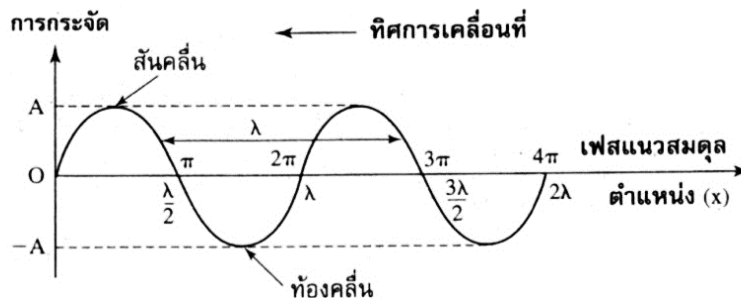
รูปที่ 2. 17 ลักษณะคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

คลื่นรูปสามเหลี่ยม (Triangular waveform) เป็นรูปคลื่นที่เกิดจากการรวมตัวของฟังก์ชันลาดเอียงแบบบวกกับแบบลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2. 18 ลักษณะคลื่นรูปสามเหลี่ยม

องค์ประกอบของคลื่น



รูปที่ 2. 19 องค์ประกอบของคลื่น

1. แอมพลิจูด คือ ระยะการกระจัดที่มีค่ามากที่สุดจากแนวสมดุลไปยังสันคลื่นหรือท้องคลื่น (ระยะ A)
2. ยอดคลื่นหรือสันคลื่นแต่ละลูก คือ ส่วนบนสุดของคลื่นแต่ละลูก
3. ท้องคลื่น คือ ส่วนล่างสุดของคลื่นแต่ละลูก
4. มุมเฟส คือ ตำแหน่งบนคลื่นซึ่งสัมพันธ์กับการกระจัดของการเคลื่อนที่ของคลื่น
5. ความยาวคลื่น (λ) คือ ความกว้างของคลื่นหนึ่งลูก ซึ่งเป็นระยะระหว่าง 2 จุด ที่อยู่ติดกัน ซึ่งมีลักษณะเหมือนกัน อาจเป็นระยะสันคลื่น-สันคลื่น หรือ ท้องคลื่น-ท้องคลื่น

คำนิยามเกี่ยวกับคลื่น

1. ความถี่ (Frequency) นิยมใช้สัญลักษณ์แทนด้วย "f" หมายถึงจำนวนรอบที่อนุภาคของตัวกลางสั่นกลับไปมาในหนึ่งวินาที ซึ่งมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz, Hz) หรือรอบต่อวินาที
2. ความเร็วคลื่น (velocity) นิยมใช้สัญลักษณ์แทนด้วย "V" หมายถึงระยะทางคลื่นเคลื่อนที่ไปได้ใน 1 หน่วยเวลา ซึ่งอาจจะมีหน่วยเป็นเมตร เมตรต่อวินาที หรือ กิโลเมตรต่อวินาที เป็นต้น ดังนั้นความเร็วคลื่น เท่ากับความถี่ (f) คูณกับค่าความยาวคลื่น (λ) โดยที่ $V = f\lambda$
3. เฟส (phase) เฟสของจุดใดจุดหนึ่งบนคลื่นหมายถึง มุมที่ทำเป็นองศาหรือเรเดียนส์บนแนวกึ่งกลางระหว่างท้องคลื่นกับยอดคลื่น
4. อัตราเร็วมุมเชิงมุม (Angular Frequency) คือ มุมที่คิดเป็นเรเดียนส์ในการเคลื่อนที่ไปกลับของอนุภาคในเวลาหนึ่งวินาที มีหน่วยเป็นเรเดียนส์ต่อวินาที ใช้สัญลักษณ์ " ω "
5. คาบ (period) คือ เวลาที่อนุภาคของตัวกลางสั่นไปมาครบหนึ่งรอบ ใช้สัญลักษณ์ "T"

ตารางที่ 2. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ของคลื่น

ตัวแปร	ความสัมพันธ์
คาบ, T	$T = 1/f = 2\pi/\omega$
ความถี่, f	$f = \frac{\omega}{2\pi} = v/\lambda$
ความยาวคลื่น, λ	$\lambda = \frac{v}{f} = 2\pi/k$
จำนวนลูกคลื่น, k	$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega/v$
ความเร็วคลื่น, v	$v = f\lambda = \omega/k$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal waveform) กับการไหลแบบพัลส์ [17] แสดงดังรูปที่ 2.20 จากกราฟจะเห็นถึงการแปรผันของความเร็วในการไหลแบบพัลส์ ซึ่งความเร็วที่เกิดจากการไหลแบบพัลส์ (V_x) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.12)

$$V_x = A \sin \omega t \quad (2.12)$$

หรือความเร็วรวม (Total velocity)

$$V_t = V_0 \pm V_x = V_0 \pm A \sin \omega t \quad (2.13)$$

$$V_t = V_0 \pm A \sin 2\pi f t \quad (2.14)$$

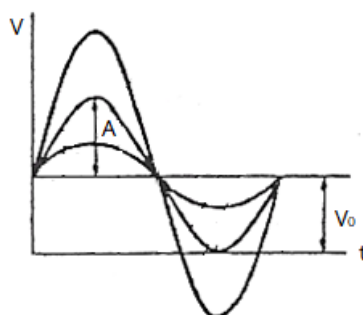
เมื่อ V_0 คือ ความเร็วคงตัว (Steady-state velocity) ของแก๊สที่ไหลผ่านท่อ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

V_x คือ กระแสความเร็ว (Current velocity) ที่เกิดจากการไหลแบบพัลส์ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

A คือ แอมพลิจูด (Amplitude) หน่วยเป็น เมตร

f คือ ความถี่ หน่วยเป็น เฮิรตซ์

t คือ เวลา มีหน่วยเป็น วินาที



รูปที่ 2. 20 การแปรผันของความเร็วในการไหลแบบพัลส์ [17]

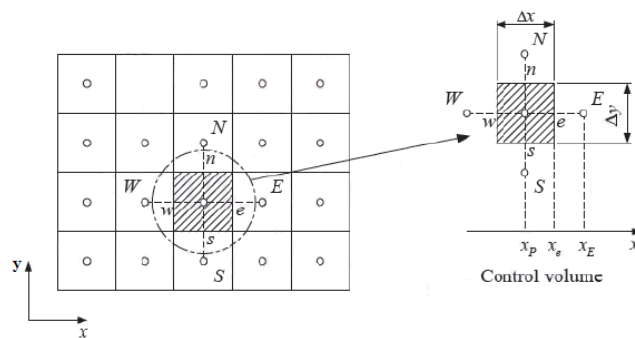
2.1.4 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics)

2.1.4.1 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD modeling)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) เป็นแขนงหนึ่งของวิชากลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) ที่ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical) และขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่ได้รับความนิยมในขณะนี้ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมที่ใช้มีราคาที่ถูกกว่าในอดีต นอกจากนี้การใช้งานแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นยังมีความซับซ้อนในการใช้งานที่ลดน้อยลง โดยแบบจำลองจะถูกใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับพฤติกรรมของการไหล การถ่ายโอนความร้อนรวมถึงปฏิกิริยาเคมี การแก้ปัญหาจะถูกพิจารณาผ่านสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) 3 สมการ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation) ชุดสมการเหล่านี้จะถูกแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ โดยการจำลองนั้นสามารถทำได้ทั้งในระบบสองมิติและสามมิติ เพื่อที่จะเข้าใจพฤติกรรมของการไหลมากยิ่งขึ้น จึงมีการนำทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็ง (Kinetic theory granular flow, KTGF) มาใช้ โดยทฤษฎีนี้มาจากพื้นฐานของทฤษฎีจลน์ของแก๊สควบรวมกับทฤษฎีพลังงานจลน์ของการกวัดแกว่งของของแข็ง (Solid fluctuating kinetic energy) และการชนกันของอนุภาคของแข็ง (Solid collision)

2.1.4.2 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method)

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการปริมาตรควบคุม (Control volume method) ถูกนำมาใช้เพื่อการเปลี่ยนสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) เป็นสมการพีชคณิต (Arithmetic equations) เพื่อแก้ปัญหา โดยวิธีการปริมาตรควบคุมนั้นจะเป็นบริเวณที่เราสนใจซึ่งจะมีภาวะขอบเขต (Boundary condition) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมวล โมเมนตัม และพลังงาน รูปที่ 2.21 แสดงปริมาตรควบคุมของบริเวณที่เราสนใจ



รูปที่ 2. 21 ปริมาตรควบคุมแสดงวิธีการแบ่งช่วงของสมการควบคุม [18]

การพิจารณาสำหรับระเบียบการแบ่งช่วงสำหรับของไหลจะแบ่งออกเป็นเทอมของการพา (Convective) และการแพร่ (Diffusion) โดยทำการแก้สมการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุมที่ถูกแบ่งสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) ในรูปของตัวแปร ϕ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\phi\mathbf{v}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S_\phi \quad (2.15)$$

สมการ (2.15) คือ สมการการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปตัวแปร ϕ ซึ่งเทอมทางฝั่งซ้ายจะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาและเทอมของการพา ขณะที่เทอมทางขวามือเทอมของการแพร่และเทอมที่เหลืออื่น (Source term) โดยสมการนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นในการคำนวณเมื่อทำการอินทิเกรตปริมาตรควบคุมทั้งหมดจะแสดงได้ดังสมการ (2.16)

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{cv} \text{div}(\rho\phi\mathbf{v}) dV = \int_{cv} \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) dV + \int_{cv} S_\phi dV \quad (2.16)$$

ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการไหลที่ภาวะไม่คงตัว สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{cv} \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} dV + \int_{cv} \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} dV = \int_{cv} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) dV + \int_{cv} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) dV + \int_{cv} S_\phi dV \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) วิเคราะห์แยกทีละเทอม กำหนดให้ $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ และ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ นำตัวแปรดังกล่าวแทนค่ากลับไปในเทอมต่างๆ

แทนกลับในเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาแสดงได้ดังนี้

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) dV = \rho^0 \phi_p \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.18)$$

แทนกลับในเทอมของการพาแสดงได้ดังนี้

$$\int_{cv} \frac{\partial (\rho u \phi)}{\partial x} dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.19)$$

$$\int_{cv} \frac{\partial (\rho u \phi)}{\partial y} dV = (\rho u A)_n \phi_n - (\rho u A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (2.20)$$

แทนกลับในเทอมของการแพร่แสดงได้ดังนี้

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e (\phi_e - \phi_p) - D_w (\phi_p - \phi_w) \quad (2.21)$$

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_s = D_n (\phi_n - \phi_p) - D_s (\phi_p - \phi_s) \quad (2.22)$$

และแทนกลับในเทอมที่เหลืออื่น (Source term) แสดงได้ดังนี้

$$\int_{cv} S_\phi dV = S_\phi V \quad (2.23)$$

เมื่อ F คือ สัมประสิทธิ์ของการพา ($\rho \mu A$) และ D คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่ ($\tau A / \delta$)

จากสมการที่แสดงมานั้นเราสามารถหาค่า ϕ บนปริมาตรควบคุมได้จาก Discretization scheme แบบต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Upwind differencing scheme วิธีการดังกล่าวนี้ จะพิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลทำให้มีความแม่นยำและความถูกต้อง

ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ First order upwind differencing scheme และ Second order upwind differencing scheme

1. First order upwind differencing scheme

เนื่องจากวิธีการแบบ Center differencing scheme มีตัวแปรบางตัวที่ทำให้ค่าเป็นลบ ส่งผลให้ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณนั้นไม่ลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง วิธีการนี้จึงแก้ไขโดยไม่คิดเทอมของการแพร่ ในขณะที่เทอมของการพานั้นจะคำนวณค่า ϕ จาก Interface ให้มีค่าเท่ากับที่จุดของ Grid

point ของผิวปริมาตรควบคุมต้นทางของกระแสการไหล (Upstream) ข้อดีคือ มีการลู่อเข้าของคำตอบที่มากกว่า แสดงได้ดังสมการ

$$\phi_e = \phi_p \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0$$

$$\phi_e = \phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0$$

$$\phi_w = \phi_w \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0$$

$$\phi_w = \phi_p \quad \text{เมื่อ} \quad F_w < 0$$

โดยที่ค่าตัวแปร ϕ_n และ ϕ_s สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_\phi V \quad (2.24)$$

$$\text{เมื่อ} \quad a_N = \max[-F_n, 0]$$

$$a_S = \max[-F_s, 0]$$

$$a_E = \max[-F_e, 0]$$

$$a_W = \max[-F_w, 0]$$

ที่ $\max[A, B]$ คือ ค่าสูงสุดของการเปรียบเทียบระหว่างค่า A และ B

2. Second order upwind differencing scheme

ใช้หลักการเช่นเดียวกับวิธี First order upwind differencing scheme คือ

$$\phi_e = \frac{3}{2} \phi_P - \frac{1}{2} \phi_W \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0$$

$$\phi_e = \frac{3}{2} \phi_E - \frac{1}{2} \phi_{EE} \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{2} \phi_W - \frac{1}{2} \phi_{WW} \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{2} \phi_P - \frac{1}{2} \phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_w < 0$$

2.1.4.3 วิธีแก้ปัญหาด้วยวิธีการ SIMPLE

การแก้ปัญหแบบนี้ SIMPLE หรือ Semi-implicit Method for Pressure-Linked Equations นั้นมีลำดับขั้นตอนการคิดดังแสดงรูปที่ 2.22 ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการนี้จะช่วยให้ค่า

ความเร็วและความดันนั้นมีความสัมพันธ์กันตามสมการอนุกรมและโมเมนต์ ในระหว่างการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาเราสามารถเลือกความเร็วในการเร่งอัตราการลู่เข้าหาคำตอบจาก Iteration ถึง Iteration ด้วยเทคนิค Relaxation โดยเทคนิคดังกล่าวนั้นถูกใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการลู่ออก (Divergence) ระหว่าง Iteration สมการแสดงค่าตัวแปร Relaxation แสดงดังนี้

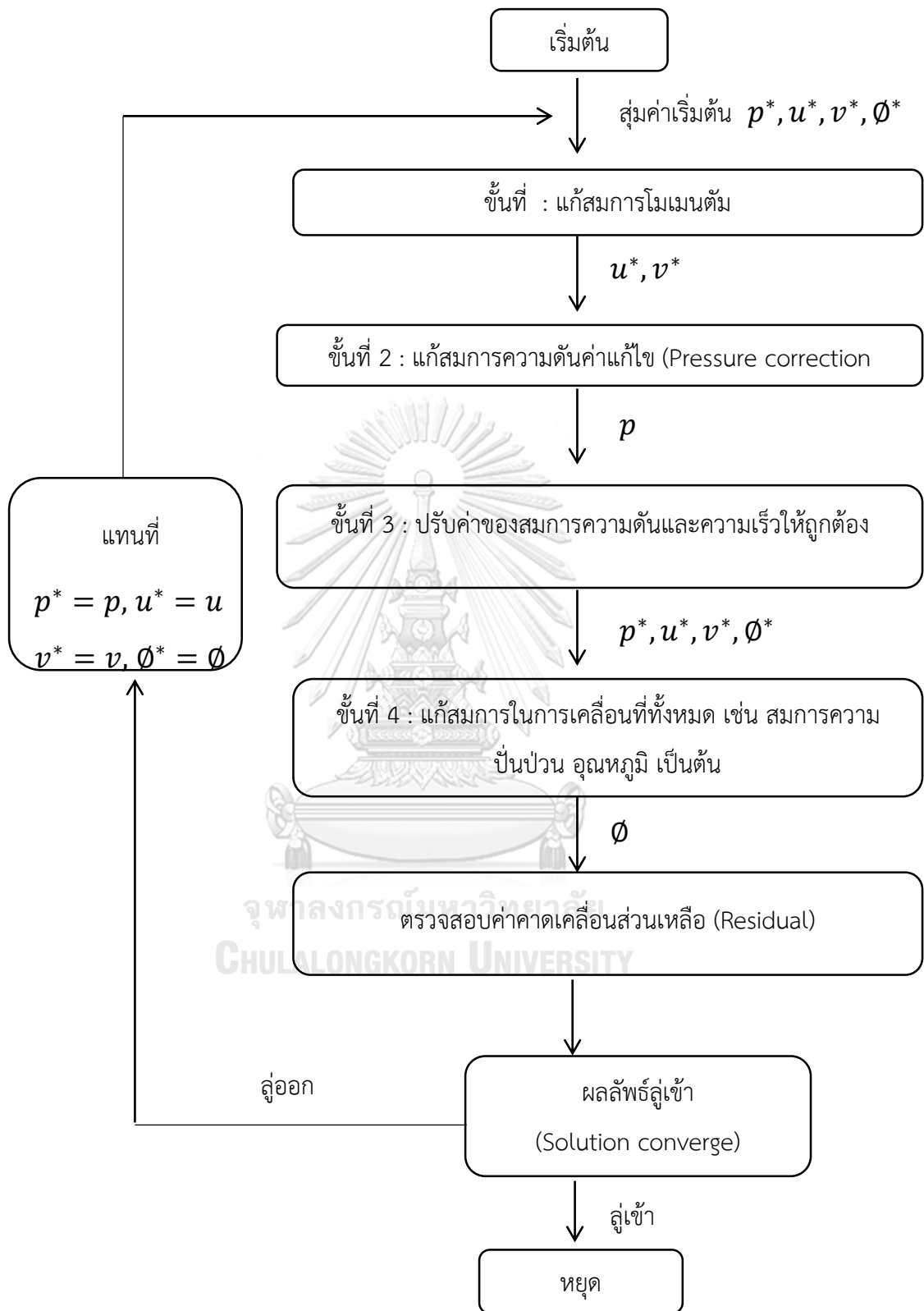
$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (2.25)$$

เมื่อ ϕ_{old} คือ ตัวแปรจากการคำนวณในครั้งที่แล้ว

α คือ Relaxation factor ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

โดยทั่วไปการแก้สมการนั้นจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ ϕ ในแต่ละครั้งของการ Iteration ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดค่า Relaxation factor เพื่อให้ผลลัพธ์นั้นเกิดการลู่เข้า (Convergence)





รูปที่ 2. 22 แผนผังวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE

2.1.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

2.5.1.1 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคตอเรียลแบบ 2^k

วิธีแฟคตอเรียลถูกนำมาใช้ออกแบบการทดลองที่ต้องการศึกษาผลของตัวแปรที่สนใจหลายๆ ตัว การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคตอเรียลแบบ 2^k นั้นจะเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่เราสนใจหรือผลของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย (k) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์เป็นตัวอักษรแทนปัจจัยแต่ละตัว เช่น A B C D เป็นต้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้ตัวแปรแต่ละตัวนั้นมีค่าอยู่ที่ 2 ระดับ (นิยมกำหนดเป็นค่าสูง-ต่ำของปัจจัยแต่ละตัว) เช่น a1 และ a2 สำหรับปัจจัย A และ b1 และ b2 สำหรับปัจจัย B ซึ่งจะทำให้การจัดกลุ่มให้อยู่ในรูปของทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment combination) การทดลองทั้งหมดนั้นจะคำนวณจาก $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อดีของการออกแบบด้วยวิธีแฟคตอเรียล คือ จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัย (Main effect) และอิทธิพลร่วมของแต่ละตัวแปร (Interaction effect) ได้

2.5.1.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคตอเรียลแบบ 2^k

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบทดลองแฟคตอเรียลแบบ 2^k หรือ 16 การทดลองประกอบไปด้วยปัจจัยของ แอมพลิจูด (A) ความถี่ (B) รูปลิ้น (C) และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D) โดยแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วยค่าสูงและค่าต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ค่าคอนทราสต์ (Contrast) คือ ค่าที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่เราสนใจหรือปัจจัยหลัก โดยที่ค่านั้นจะมีเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลงทั้งบวกและลบซึ่งถูกกำหนดไว้เนื่องจากการคูณของเครื่องหมายในคอลัมน์ A และ B คูณกันของแต่ละแถวและค่าคอนทราสต์สามารถคำนวณออกมาได้

ตัวอย่างการประมาณค่าปัจจัยหลักหรือตัวแปรที่สนใจ

$$A = \frac{1}{8n} [a - 1 - b + ab - c + ac - bc + abc - d + ad - bd + abd - cd + acd - bcd + abcd] \quad (2.26)$$

ตัวอย่างการประมาณค่าอิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัยหลักหรืออันตรกิริยา

$$AB = \frac{1}{8n} [-a - 1 - b + ab - c - ac - bc + abc - d - ad - bd + abd - cd - acd - bcd + abcd] \quad (2.27)$$

จากตัวอย่างข้างต้นสามารถสรุปเป็นสูตรทั่วไป ดังนี้

$$AB \dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{contrast}_{AB \dots K}) \quad (2.28)$$

ค่าผลรวมกำลังสองของตัวแปรแต่ละตัว

$$SS_{AB \dots K} = \frac{1}{n2^k} (\text{contrast}_{AB \dots K})^2 \quad (2.29)$$

2.5.1.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป โดยทำการวิเคราะห์ผลรวมกำลังสองของความต่างระหว่างค่าต่างๆ กับค่าเฉลี่ย หรือที่เรียกว่าผลรวมกำลังสอง (Sum of squares) โดยกำหนดให้

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.30)$$

เมื่อ

SS_T = ผลรวมของความแปรปรวนทั้งหมด (Total sum of squares)

$SS_{Treatment}$ = ผลรวมความแปรปรวนกำลังสองระหว่างกลุ่ม (Treatment sum of square)

SS_E = ผลรวมความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน (Error sum of squares)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y} \dots)^2 \quad (2.31)$$

$$SS_{Treatment} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y} \dots)^2 \quad (2.32)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y} \dots)^2 \quad (2.33)$$

จากสมการที่กล่าวไปข้างต้นเพื่อทำการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนของแต่ละระดับจะคำนวณหาค่า F_0 หรือ F-test แสดงได้ดังนี้

$$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_E} \quad (2.34)$$

เมื่อ

$MS_{Treatment}$ = ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean squares between treatment)

MS_E = ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน (Mean squares error)

N = จำนวนข้อมูลที่ทำกรวิเคราะห์

a = จำนวนปัจจัย

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a-1} \quad (2.35)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{N-a} \quad (2.36)$$

การพิจารณาค่า F_0 ที่ได้จากค่าคำนวณ ถ้า $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$ แสดงว่าค่าที่ได้นั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติหรือกล่าวได้ว่าจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Null hypothesis, H_0) นำไปสู่การยอมรับสมมติฐานแย้ง (Alternative hypothesis, H_2) ในทางตรงกันข้ามถ้า $F_0 < F_{\alpha, a-1, N-a}$ แสดงว่าค่าที่คำนวณนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติหรือจะยอมรับสมมติฐานหลัก นอกจากนี้การวิเคราะห์ยังสามารถใช้ค่า P-value ได้เช่นเดียวกัน โดยทั่วไปค่านั้นจะถูกกำหนดให้มีค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้น ถ้า $p\text{-value} < 0.05$ จะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2. 3 แสดงการทดลองจากการออกแบบด้วยวิธีแฟคตอเรียล 2^k

--	--	--	--	--	--

Factor level Run	A	B	C	D	Combination
1	-	-	-	-	1
2	+	+	-	-	A
3	-	+	-	-	B
4	+	+	-	-	AB
5	-	-	+	-	C
6	+	-	+	-	AC
7	-	+	+	-	BC
8	+	+	+	-	ABC
9	-	-	-	+	D
10	+	-	-	+	AD
11	-	+	-	+	BD
12	+	+	-	+	ABD
13	-	-	+	+	CD
14	+	-	+	+	ACD
15	-	+	+	+	BCD
16	+	+	+	+	ABCD

หมายเหตุ เครื่องหมายบวก (+) หมายถึง ค่าสูง เครื่องหมายลบ (-) หมายถึงค่าต่ำ ของแต่ละปัจจัย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shah และ Utikar [7] พบว่า แก๊สและของแข็งในท่อโรเซออร์ของหน่วยแตกตัวน้ำมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการผสมที่ไม่ดีเนื่องจากรูปแบบการไหลแบบแกนใน-วงนอก และการที่ของแข็งมีการกระจายตัวหนาแน่นที่ด้านล่างและเบาบางที่บริเวณด้านบน เพื่อความเหมาะสมของการผสมจึงได้มีการศึกษาอุทกพลศาสตร์ด้านในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้การไหลของแก๊สเป็นแบบพัลส์ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการไหลแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเซออร์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ภายใต้ 2 ภาวะ คือ รูปแบบการไหลที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอากาศกับตัวเร่งปฏิกิริยาภายในท่อโรเซออร์ระดับห้องปฏิบัติการ และรูปแบบการไหลที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเซออร์ระดับอุตสาหกรรม พบว่า การไหลแบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเซออร์การไหลของอากาศแบบพัลส์ทำให้เกิดการสะสมของของแข็งเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น ส่วนรูปแบบการไหลที่เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเซออร์ระดับอุตสาหกรรม การไหลของอากาศแบบพัลส์ทำให้การไหลในแนวรัศมีสม่ำเสมอมากขึ้น โดยการไหลแบบพัลส์จะปรับปรุงร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ ในช่วงความสูงต่ำๆ โดยที่ความสูง 7 เมตร จะได้รับร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์เท่ากับ 59 เทียบกับการไหลแบบตั้งเดิมร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 44

Bizhaem และ Tabrizi [4] ศึกษาการไหลของแก๊สและของแข็งแบบพัลส์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไรซ์เบดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบออยเลอร์-ออยเลอร์ ทฤษฎีจลนการไหลของของแข็งถูกนำมาร่วมใช้จำลองศึกษาอุทกพลศาสตร์ของแก๊สและของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบด ผลกระทบจากการไหลแบบพัลส์ที่ช่วงความถี่ 1-10 เฮิร์ตซ์ ของขนาดอนุภาคของของแข็งกลุ่มเจลดาร์ต B และ A/B ที่มีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของอนุภาคได้ถูกพิจารณา ผลการจำลองจะถูกเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น ค่าเฉลี่ยความดันลดกับเวลา ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของของแข็ง พบว่า เมื่อเพิ่มความถี่ของการไหลแบบพัลส์ ปริมาณฟองแก๊ส สัดส่วนการขยายตัวของเบด การกวัดแกว่งของความดัน และความเร็วสูงสุดในแนวแกนของของแข็งลดลง

Saidi และ Tabrizi [19] ศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในสะเก็ดเป่าตั้งเบดด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้สมการ Navier-Stokes สำหรับวัฏภาคแก๊สร่วมกับวิธีการแบบดิสครีตอีลิเมนต์ (Discrete element method) และใช้กฎของนิวตันสำหรับวัฏภาคของแข็ง ผลที่ได้ พบว่า ความเร็วของอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไรซ์เพิ่มขึ้นในบริเวณ Dead zone อีกทั้งช่วยเพิ่มความสูงของเบดในการเกิดสะเก็ดเป่า การไหลของอากาศแบบพัลส์ในรูปแบบ Spouted-pulsed fluidized bed (SPFB) จะเพิ่มความเป็นระเบียบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบสะเก็ดเป่าตั้งเบด รูปแบบ Pulsed-spouted fluidized bed (PSFB) จะลดความเป็นระเบียบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบสะเก็ดเป่าตั้งเบด ค่าเฉลี่ยระยะเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเบดภายใต้การไหลของอากาศแบบพัลส์รูปแบบ Spouted pulsed-fluidized bed (SPFB) มี

ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 19 อันเป็นผลมาจากรูปแบบการไหลแบบพัลส์ช่วยเพิ่มการผสมกันของอนุภาคภายในสระเป่าตีงเบต และ ยังพบว่า การไหลของอากาศแบบพัลส์ในรูปแบบ Spouted pulsed-fluidized bed (SPFB) มีความไวกับความถี่ (Frequency)

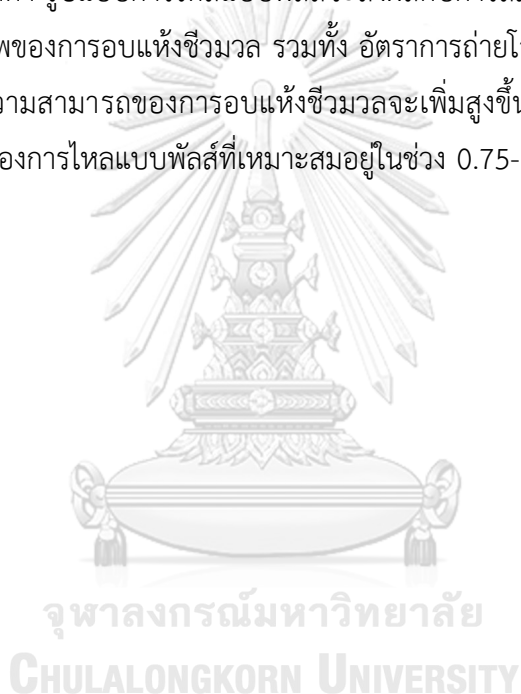
Wu และคณะ [20] สร้างรูปแบบการไหลแบบพัลส์ เพื่อศึกษาลักษณะของฟองแก๊สภายใต้รูปแบบการไหลแบบพัลส์ในระบบฟลูอิดไคซ์เบต ผลจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง โดยศึกษาที่ความถี่ 5 และ 7 เฮิรตซ์ พบว่า ขนาดฟองแก๊ส (Bubble size) และความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริง และ ลักษณะของฟองแก๊สจะเปลี่ยนไปตามมุมเฟส (Phase angle) ในหนึ่งคาบของการไหลแบบพัลส์ จึงทำให้สามารถเข้าใจโครงสร้างและขนาดของฟองแก๊สจากรูปแบบการไหลแบบพัลส์

Ireland และคณะ [5] ศึกษาปรากฏการณ์ฟลูอิดไคซ์ชันโดยใช้การไหลแบบพัลส์ของแก๊สที่ไหลผ่านของแข็งภายในเบต ช่วงการเกิดฟลูอิดไคซ์ชันจะขึ้นอยู่กับประเภทและความถี่ของการไหลแบบพัลส์ จากการศึกษาที่ผ่านมาการไหลแบบพัลส์ช่วยปรับปรุงการผสมและการถ่ายโอนความร้อนรวมถึงลดการจับกลุ่มของอนุภาค อย่างไรก็ตาม ผลกระทบต่างๆ มักขึ้นอยู่กับความถี่ของการไหลแบบพัลส์ ในงานนี้จึงศึกษารูปแบบการไหลแบบพัลส์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบต เพื่อปรับปรุงอัตราการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนของอนุภาคในกลุ่ม A และ B ลดการไหลแบบสลิค ลดการจับกลุ่มของอนุภาคที่ผนังท่อ ปรับปรุงอนุภาคในกลุ่ม C ซึ่งเกิดฟลูอิดไคซ์ชันได้ยาก และลดพลังงานที่ต้องใช้โดยการลดความเร็วน้อยที่สุดของการไหลแบบฟลูอิดไคซ์ชันภายใต้การไหลแบบพัลส์ พบว่า เมื่อเปรียบเทียบการไหลแบบต่อเนื่องและการไหลแบบพัลส์ การไหลแบบพัลส์ช่วยปรับปรุงการผสมให้ดีขึ้น ลดความเร็วน้อยที่สุดของการเกิดการไหลแบบฟลูอิดไคซ์ชัน ลดขนาดและการรวมกันของฟองแก๊ส ลดการจับกลุ่มของอนุภาค รวมทั้งเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อน

Chen และคณะ [21] พบว่า บริเวณป้อนเข้าของของไหลคือส่วนที่สำคัญสำหรับกระบวนการแตกตัวในท่อโรเซออร์ การออกแบบโดยทั่วไปของท่อโรเซออร์ที่ใช้กันทางการค้าของหน่วยแตกตัวน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี จะมีมุมของส่วนป้อนเข้าของของไหลเท่ากับ 30 องศา เอียงขึ้นไปตามแนวแกนของท่อโรเซออร์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการสัมผัสกันระหว่างน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เหมาะสม และยังเกิดการผสมย้อนกลับที่รุนแรงในบริเวณป้อนเข้า ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของมุมที่ใช้ป้อนเข้าวัตถุดิบจากการจำลอง 3 มิติ โดยกำหนด 7 มุมที่ใช้ในการป้อนเข้า แบ่งเป็น 3 มุมเอียงขึ้น 1 มุมตั้งฉาก และ 3 มุมเอียงลงจากแนวแกนของท่อโรเซออร์ จากนั้นศึกษารูปแบบการไหลของของแข็งและสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง รวมทั้งตัวแปรอื่น เช่น อัตราส่วนการไหลย้อนกลับ (Backflow ratio) ดัชนีความไม่สม่ำเสมอตามแนวรัศมี (Radial non-uniformity index) และเวลาที่สัมผัสกันของตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำมัน โดยพบว่า อุทกพลศาสตร์ที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับมุมที่

ป้อนเข้า การป้อนเข้าในรูปแบบเอียงลงจากแนวแกน ส่งผลให้มีการผสมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำมันสูงกว่าการทำมุมเอียงขึ้น โดยที่มุม 30 องศาเอียงลงจากแนวแกนจะเป็นมุมที่เหมาะสมของการกระจายของตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำมัน ลดเวลาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำมันสัมผัสกัน และลดผลกระทบของการผสมย้อนกลับที่รุนแรงใกล้ผนังของท่อโรเตอร์

Jia และคณะ [6] ศึกษาฟลูอิดไดนามิกส์ของอนุภาคชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้รูปแบบการไหลแบบพัลส์ร่วมกับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 0.33-6.67 เฮิร์ตซ์ พบว่า การไหลแบบพัลส์มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของลักษณะอนุภาคชีวมวล โดยจะช่วยลดความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ขณะที่การสั่นสะเทือนจะมีประสิทธิภาพเมื่อความถี่หรือแอมพลิจูดต่ำ รูปแบบการไหลแบบพัลส์จะส่งผลกับการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและแก๊ส ประสิทธิภาพของการอบแห้งชีวมวล รวมทั้ง อัตราการถ่ายโอนความร้อนและอัตราการถ่ายโอนมวลสาร อีกทั้งความสามารถของการอบแห้งชีวมวลจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและอัตราเร็วของแก๊ส โดยความถี่ของการไหลแบบพัลส์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.75-1.5 เฮิร์ตซ์



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การจำลองอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนในงานวิจัยนี้ เป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเตอร์โดยใช้การไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ ซึ่งในขั้นตอนแรกจะต้องทำการสร้างแบบจำลองการไหล โดยในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม GAMBIT เพื่อออกแบบท่อโรเตอร์ และ ใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ทำการทดลองโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองการไหล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด ได้มาจากข้อมูลการทดลองของ Shah และ Utikar [7] โดยสมการที่ใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ ทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง และสมการการเกิดปฏิกิริยาของการแตกตัวของไอน้ำมัน เพื่อใช้อธิบายอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม GAMBIT เพื่อออกแบบท่อโรเตอร์ และใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT สำหรับจำลองปรากฏการณ์โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

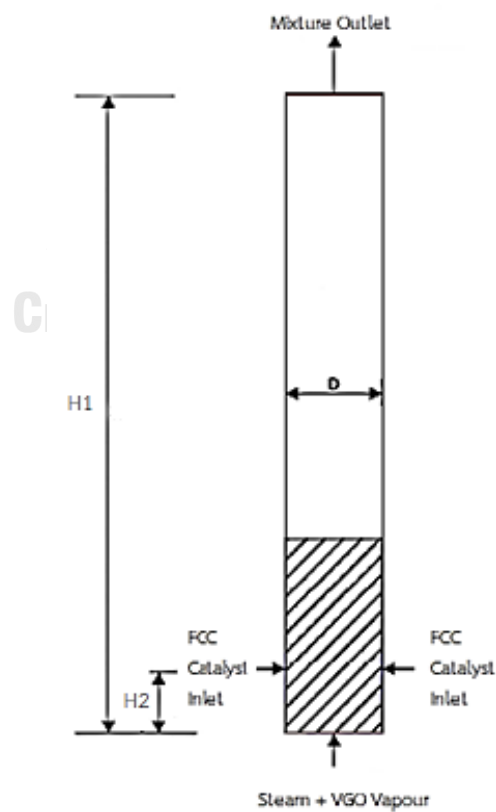
3.2 การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม GAMBIT

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม GAMBIT ในการสร้างแบบจำลองการไหลแบบพัลส์ในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด ในระบบ 3 มิติ โดยอ้างอิงจากข้อมูลงานวิจัยของ Shah และ Utikar [7] ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดในส่วนของท่อโรเตอร์ จากการผสมกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล ซึ่งท่อโรเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร และสูง 33 เมตร ไอน้ำมันและไอน้ำจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของท่อโรเตอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกป้อนเข้าทางบริเวณด้านข้างของท่อโรเตอร์ทางด้านซ้ายและขวา ซึ่งทั้งแก๊สและของแข็งจะออกที่ทางออกด้านบนของท่อโรเตอร์ การจำลองจะสร้างเซลล์คำนวณทั้งหมด 4 ขนาด ดังนี้ 5,000 10,000 20,000 และ 30,000 เซลล์ โดยไอน้ำมันและไอน้ำจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของท่อโรเตอร์ซึ่งมีขนาดทางเข้าเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ส่วนของแข็งจะถูกป้อนเข้าบริเวณด้านข้างของท่อโรเตอร์ทั้งด้านซ้ายและขวามีขนาดทางเข้า 0.25 เมตร และของผสมจะออกทางด้านบนของท่อโรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่

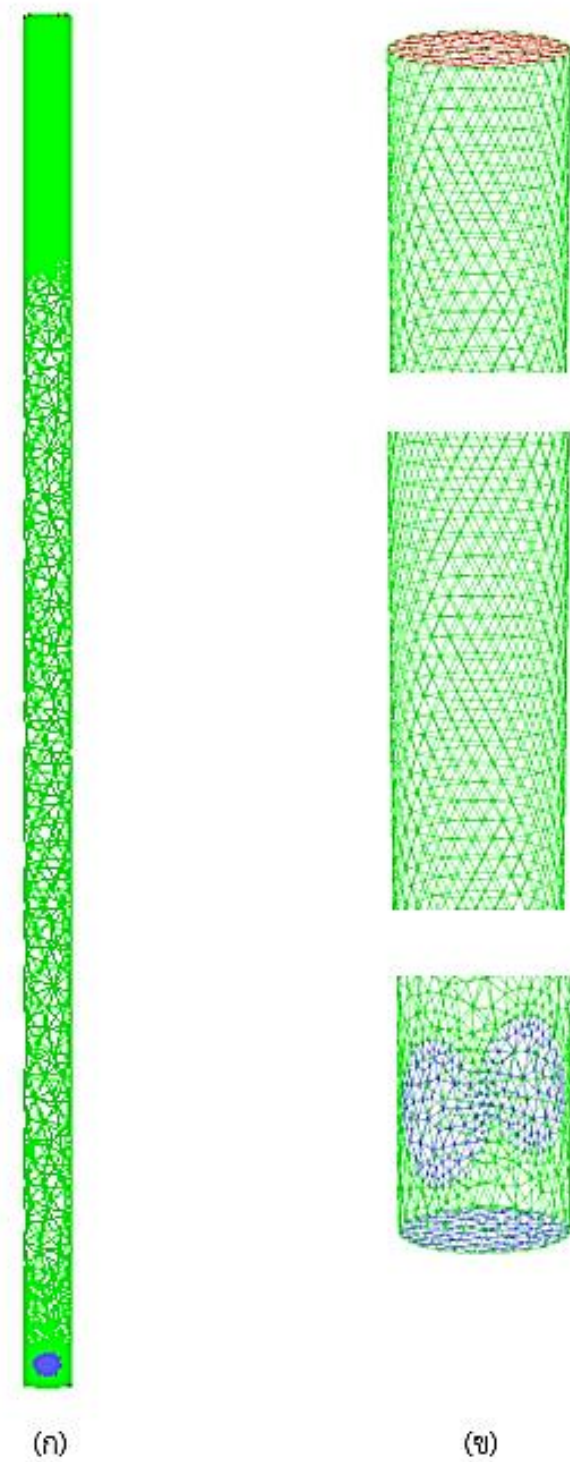
3.1 และรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการจำลองแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณใช้ลักษณะเซลล์การคำนวณแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3. 1 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบพัลส์ในท่อโรเซอรั

ตัวแปรการจำลอง	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
H1 (m)	33
D (m)	1
H2 (m)	0.25
Solid	FCC
Gas	Steam (5%) + VGO
G_s (kg/m ² s)	470
U_g (m/s)	9
d_p (μm)	80
ρ_s	1,740



รูปที่ 3. 1 รูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายของท่อโรเซอรั



รูปที่ 3. 2 (ก) ภาพวาดการคำนวณในระบบสามมิติของท่อโรเซอร์ (ข) ภาพขยายแสดงรายละเอียด
พื้นที่การคำนวณในระบบสามมิติของท่อโรเซอร์

3.3 การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์แบบ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคแก๊สจะใช้เป็นแก๊สผสมระหว่าง ไอน้ำ และ ไอน้ำมัน และ ภูมิภาคของแข็งจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,740 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ภายในท่อโรเซออร์จะเกิดการแตกตัวของไอน้ำมันจากการผสมกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล โดยระบบจะป้อนแก๊สเข้าที่บริเวณด้านล่างของท่อโรเซออร์ และป้อนของแข็งเข้าที่บริเวณด้านข้างของท่อโรเซออร์ โดยความเร็วป้อนเข้าเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที ซึ่งสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบของแก๊สเข้าประกอบด้วยไอน้ำมัน (VGO) ร้อยละ 95 และไอน้ำ ร้อยละ 5 ของแข็ง และแก๊สผลิตภัณฑ์จะออกจากระบบทางด้านบนของท่อโรเซออร์ สำหรับการแก้ปัญหาจะเป็นการคำนวณแบบสามมิติ และการคำนวณจะต้องทำการกำหนดค่าสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบและภาวะขอบ รวมถึงค่าภาวะเริ่มต้น เพื่อเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณ จากนั้น โปรแกรมจะทำการแก้ปัญหาคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการการไหล และสมการอื่นๆ โดยรายละเอียดสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบที่ใช้ อ้างอิงจากงานของ Nayak และคณะ [22] แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

การจำลองเป็นแบบสามมิติแบบความถูกต้องสูง (3D Double Precision) การจำลองกระบวนการเป็นกระบวนการแบบอนุกรม และแบบจำลองความหนืดสำหรับการไหลเป็นแบบราบเรียบ

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองการไหลของสองภูมิภาค คือแก๊สและของแข็ง จะมีแนวคิดการคำนวณทางคณิตศาสตร์อยู่ 2 วิธี คือการคำนวณแบบ ออยเลอร์เรียน-ออยเลอร์เรียน และการคำนวณแบบลากรางเจียน-ออยเลอร์เรียน ซึ่งการจำลองในงานวิจัยนี้ใช้การคำนวณแบบ ออยเลอร์เรียน-ออยเลอร์เรียน ซึ่งเหมาะกับการไหลแบบฟลูอิดิซ์ การทำซ้ำ 40 ครั้งต่อหนึ่งเวลาคำนวณ ขั้นเวลาของการคำนวณ (Time step) เท่ากับ 0.001 วินาที โดยอาศัยข้อมูลการจำลองของ Ahsan [23] ที่ใช้ขั้นเวลาการคำนวณเท่ากับ 0.001 ผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ได้ให้ค่าใกล้เคียงกับการแตกตัวของไอน้ำมันในกระบวนการผลิตจริงและใกล้เคียงกับแบบจำลองอื่นๆ ที่ทำการเปรียบเทียบ โดยแต่ละการทดลองจะใช้เวลาในการจำลอง 168 ชั่วโมง

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม ANSYS FLUENT จะรายงานออกมาในรูปแบบ Area-Weighted Average Molar Concentration ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยใช้ผลลัพธ์ทุกๆ 1 เมตร ของความยาวท่อโรเซออร์ทั้งหมด 33 เมตร มาทำการคำนวณ

3.4 สมมติฐานสำหรับการจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ในระบบสามมิติของกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันในท่อโรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์แบบ มีสมมติฐานในการสร้างแบบจำลอง คือ

- แบบจำลองสามมิติ สำหรับปัญหาแบบไม่คงตัว (Transient)
- แก๊สในระบบประพุดิตัวเป็นแก๊สอุดมคติ
- อุณหภูมิของแข็งมีขนาดและความหนาแน่นคงที่
- เงื่อนไขขอบเขตของผนังท่อโรเซอร์ คือ ไม่มีการลื่นไถลสำหรับวิภูภาคแก๊ส และ ลื่นไถล

บางส่วนสำหรับวิภูภาคของแข็ง

ตารางที่ 3. 2 สมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบ

Component	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/(ms))	Molar mass (kg/kmol)	Specific heat (J/(kgK))	Thermal conductivity (W/(mK))
Gas mixture	Ideal gas	Mixing law		Ideal gas mixing law	Ideal gas mixing law
VGO	-	5.00×10^{-5}	400	1,040	0.0250
Gasoline	-	1.66×10^{-5}	100	1,040	0.0250
Gas	-	1.66×10^{-5}	50	1,040	0.0250
Coke	-	1.66×10^{-5}	400	1,040	0.0250
Steam	-	2.00×10^{-5}	18	1,000	0.0250
Catalyst	1,730	-	-	1,000	0.0454

3.5 สมการอนุรักษ์

สมการอนุรักษ์มวล

วิภูภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (3.1)$$

วิภูภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3.2)$$

$$\epsilon_g + \epsilon_s = 1 \quad (3.3)$$

เมื่อ

ϵ_s คือ สัดส่วนของปริมาตรวิภูภาคของแข็ง

ϵ_g คือ สัดส่วนของปริมาตรวิภูภาคแก๊ส

ρ_s คือ ความหนาแน่นของวิภูภาคของแข็ง

ρ_g คือ ความหนาแน่นของวิภูภาคแก๊ส

v_s คือ ความเร็วของวิภูภาคของแข็ง

v_g คือ ความเร็วของวิภูภาคของแก๊ส

t คือ เวลา
สมการอนุรักษ์โมเมนตัม
วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varepsilon_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} + \beta(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (3.4)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varepsilon_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_s - \nabla p_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} - \beta(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (3.5)$$

เมื่อ

$\bar{\tau}$ คือ ความเค้นเทนเซอร์
 β คือ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค
 p คือ ความดันของวัฏภาคแก๊ส
 p_s คือ ความดันของวัฏภาคของแข็ง
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

สมการอนุรักษ์พลังงาน
วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g h_g) = -\varepsilon_g \frac{\partial p}{\partial t} + \bar{\tau}_g : \nabla \vec{v}_g + Q_{gs} \quad (3.6)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s h_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s h_s) = -\varepsilon_s \frac{\partial p}{\partial t} + \bar{\tau}_s : \nabla \vec{v}_s + Q_{sg} \quad (3.7)$$

เมื่อ

h_s คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของของแข็ง
 h_g คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของแก๊ส
 Q_{gs} คือ ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาคแก๊สกับวัฏภาคของแข็ง
 Q_{sg} คือ ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาคของแข็งกับวัฏภาคแก๊ส

สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวัดแกว่งจากความปั่นป่วน (Turbulent Fluctuating Energy, θ_s)

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varepsilon_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \varepsilon_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = \tau_s : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (\kappa_s \nabla \theta_s) - \gamma_s + 3\beta \theta_s \quad (3.8)$$

เมื่อ

พจน์ทางซ้ายมือของสมการ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานกวัดแกว่งสุทธิ

พจน์แรกทางขวามือของสมการ คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากความเค้น

พจน์ที่สองทางขวามือของสมการ คือ พลังงานกวดแกว่งเนื่องจากการนำ

พจน์ที่สามทางขวามือของสมการ คือ พลังงานกวดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

พจน์ที่สี่ทางขวามือของสมการ คือ พลังงานกวดแกว่งเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของแข็งกับแก๊ส

$$\theta_s = \frac{1}{3}(v'_s)^2 \quad (3.9)$$

θ_s คือ อุณหภูมิแกรนูลาร์

v'_s คือ ความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ยหรือพลังงานกวดแกว่ง

สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ

แบบจำลองการแก้สมการอนุรักษ์องค์ประกอบจะถูกคำนวณในวิภูภาคแก๊สเท่านั้น

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g Y_i) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g Y_i) = -\nabla \cdot \varepsilon_g J_i + \varepsilon_g R_{i,ho} + R_{i,het} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$R_{i,ho}$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีรวมของสมการปฏิกิริยาเคมีแบบเอกพันธ์ขององค์ประกอบ i

$R_{i,het}$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีรวมของสมการปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์ขององค์ประกอบ i

Y_i คือ สัดส่วนโดยมวลของแต่ละองค์ประกอบ i

J_i คือ ฟลักซ์ของการแพร่ขององค์ประกอบ i

สมการเสริม

พลังงานของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับการชน และการเคลื่อนไหวเนื่องจากการกวดแกว่งของอนุภาคถูกนำมาอธิบายถึงพฤติกรรมของวิภูภาคของแข็งผ่านทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง ความเค้นเทนเซอร์ (Stress tensor)

วิภูภาคแก๊ส

$$\bar{\tau}_g = \varepsilon_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) - \varepsilon_g \left(\frac{2}{3} \mu_g\right) \nabla \cdot \vec{v}_g \bar{I} \quad (3.11)$$

วิภูภาคของแข็ง

$$\bar{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) - \varepsilon_s \left(\xi_s - \frac{2}{3} \mu_s\right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (3.12)$$

เมื่อ

ξ_s คือ ความหนืดรวม

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น

ความดันของอนุภาคจะประกอบด้วยสองพจน์ พจน์ที่หนึ่งเกี่ยวข้องกับการชนกันของอนุภาคซึ่งจะมีผลสูงในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง และพจน์ที่สองจะเกี่ยวข้องกับจลนศาสตร์ซึ่งจะมีผลสูงในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคต่ำ

$$p_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e) \varepsilon_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (3.13)$$

เมื่อ

g_0 คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมีซึ่งจะมีค่าสูง เมื่อสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าเข้าใกล้สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งขณะที่อัดตัวแน่น ($\varepsilon_{s,max} = 0.60$)

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.14)$$

e คือ Restitution Coefficient

ความหนืดเนื่องจากความเค้นจะประกอบด้วยพจน์ของจลนศาสตร์ การชน และ แรงเสียดทานซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคของแข็ง

$$\mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi} \frac{10 \rho_s d_p \sqrt{\theta \pi}}{96(1+e)g_0 \varepsilon_s}} \left[1 + \frac{4}{5} g_0 \varepsilon_s (1 + e) \right]^2 \quad (3.15)$$

เมื่อ

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง

สำหรับการบีบอัด และการขยายตัวของอนุภาคของแข็งจะใช้ความหนืดรวมของอนุภาคเป็นตัววัดความต้านทานของอนุภาค

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_s g_0 (1 + e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

พลังงานกวดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

$$\gamma_s = 3 \varepsilon_s^2 \rho_s g_0 \theta_s (1 - e^2) \left[\frac{4}{d_p} \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{1/2} \right] \quad (3.17)$$

พลังงานการกวดแกว่งเนื่องจากการนำ

$$\kappa_s = \frac{150 d_p \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384(1+e)g_0} \left[1 + \frac{6}{5} (1 + e) \varepsilon_s g_0 \right]^2 + 2 \rho_s \varepsilon_s^2 d_p (1 + e) g_0 \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

แบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบ EMMS (Energy Minimization Multi-Scale)

$$\text{สำหรับ } \varepsilon_g \geq 0.74 \text{ จะได้ว่า } K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \omega(\varepsilon) \quad (3.19)$$

$$\text{สำหรับ } \varepsilon_g < 0.74 \text{ จะได้ว่า } K_{gs} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_g \varepsilon_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad (3.20)$$

$$\text{เมื่อ } 0.74 \leq \varepsilon_g < 0.82; \omega(\varepsilon) = -0.5760 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044} \quad (3.21)$$

$$\text{เมื่อ } 0.82 \leq \varepsilon_g < 0.97; \omega(\varepsilon) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad (3.22)$$

$$\text{เมื่อ } \varepsilon_g > 0.97; \omega(\varepsilon) = -31.8295 + 32.8295 \varepsilon_g \quad (3.23)$$

$$\text{และที่ } Re_k < 1000; C_{DO} = \frac{24}{Re_k} (1 + 0.15Re_k^{0.687}); Re_k = \frac{\rho_g d_s \varepsilon_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (3.24)$$

$$Re_k \geq 1000; C_{DO} = 0.44 \quad (3.25)$$

โดยที่

C_{DO} คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่

Re_k คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์

3.6 ปฏิกิริยาการแตกตัวไอน้ำมัน

ในการจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ การศึกษาร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ ใช้ชุดสมการจากรูปแบบการแตกตัวของไอน้ำมันแบบ 4 lump ของ Lee และคณะ [24] โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการแตกตัวของ VGO ไปเป็นผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยวัฏภาคของแก๊ส คือ VGO แก๊สโซลีน แก๊ส ไอน้ำ และ โค้ก และ วัฏภาคของแข็ง ประกอบไปด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ปรับปรุงมาจากงานของ Pitault และคณะ [25] และ Han และ Chung [26] [27] ซึ่งจะถูกป้อนไปโปรแกรม ANSYS FLUENT เพื่อให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ ใกล้เคียงกับงานวิจัยดังกล่าว สมการการแตกตัวของไอน้ำมัน และข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาเคมี แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3. 3 สมการการแตกตัวของไอน้ำมัน และข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาเคมี

Reaction	Pre-exponential factor (m_r^3/m_{cat}^3s)	Activation energy (J/kmol)	Heat of reaction (kJ/kg)	Heat of formation (kJ/kmol)
1. VGO ---> gasoline	5.776×10^6	68.36×10^6	195	2.98×10^8
2. VGO ---> light gases	1.024×10^7	89.36×10^6	670	5.50×10^7
3. VGO ---> coke	2.732×10^4	64.68×10^6	745	3.75×10^6
4. Gasoline ---> light gases	0.889×10^2	52.8×10^6	512	0.0
5. Gasoline ---> coke	0.538×10^7	115.65×10^6	550	0.0

โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะถูกคำนวณด้วยสมการที่ (3.19) ถึง 3.(22)

$$r_{ij} = -k_{ij} \left(\frac{C_j}{C_{j0}} \right)^n C_j \phi \varepsilon_s \quad \text{เมื่อ } i = 1-5 \quad (3.26)$$

$$k_{ij} = Kr_i^0 \exp \left(\frac{-E_i}{RT} \right) \quad (3.27)$$

$$\frac{C_j}{C_{j0}} = \frac{m_\infty y_{VGO}}{m_\infty - m_{steam}} \quad (3.28)$$

$$\phi = \frac{B_c + 1}{B_c + \exp(A_c C_{coke})} \quad (3.29)$$

เมื่อ

r_{ij} คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสมการเคมี i และ องค์ประกอบ j

$\frac{C_j}{C_{j0}}$ คือ ค่า Correction factor

m_∞ และ m_{steam} คือ อัตราการไหลโดยมวลของไอน้ำมันและไอน้ำ

y_{VGO} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ VGO

k_{ij} คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

Kr_i^0 คือ Pre-exponential factor สำหรับปฏิกิริยาเคมี

E_i คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยา

ϕ คือ Coke deposited

C_{coke} คือ Coke concentration (ร้อยละโดยมวล)

T คือ อุณหภูมิ

A_c และ B_c คือ ค่าคงที่เท่ากับ 4.29 และ 10.4 ตามลำดับ

3.7 การจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์

ในการจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ต้องทำการเขียนฟังก์ชันการคำนวณด้วยภาษาซีเพิ่มเติม และทำการเพิ่มฟังก์ชันลงใน User define function (UDF) โดยเขียนฟังก์ชันเกี่ยวกับสมการคลื่นกลแบบไซน์ เพื่อกำหนดค่าความถี่และแอมพลิจูดเพิ่มเข้าไปในโปรแกรม ANSYS FLUENT

$$V = A \sin \omega t \quad (3.30)$$

เมื่อ

V คือ ความเร็วป้อนเข้ากระบวนกร (เมตรต่อวินาที)

A คือ แอมพลิจูด (เมตร)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม

3.7 ขั้นตอนการทดลอง

การจำลองการไหลภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันในระบบสามมิติใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการสำเร็จรูป ANSYS FLUENT เวอร์ชัน 18.2 ผลการจำลองที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Shah และ Utikar [7] โดยจะทำการเปรียบเทียบผลร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้มาจำลองการไหลแบบพัลส์โดยเพิ่มฟังก์ชัน User define function (UDF) โดยเขียนฟังก์ชันการไหลป้อนเข้าตามเงื่อนไขของตัวแปรดำเนินการที่จะศึกษา โดยส่วนแรกเป็นการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟคตอเรียล และค่ากลาง เพื่อให้ได้กรณีศึกษาที่ครอบคลุมมากที่สุด โดยตัวแปรดำเนินการที่ทำการศึกษาจะแบ่งเป็นระดับของตัวแปรขั้นต่ำ (-) ระดับของตัวแปรขั้นสูง (+) และค่ากลาง (0) ของการทดลอง ซึ่งจะแสดงตัวแปรดำเนินการดังต่อไปนี้

3.8.1 ตัวแปรดำเนินการ

3.8.1.1 แอมพลิจูด

- 1) 7 เมตร
- 2) 7.5 เมตร
- 3) 8 เมตร

3.8.1.2 ความถี่

- 1) 0.3 เฮิรตซ์
- 2) 0.4 เฮิรตซ์
- 3) 0.5 เฮิรตซ์

3.8.1.3 ผลของรูปคลื่น

- 1) คลื่นรูปไซน์
- 2) คลื่นรูปสามเหลี่ยม
- 3) คลื่นรูปสี่เหลี่ยม

3.8.1.4 ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด

- 1) 1:1
- 2) 1:0.75
- 3) 1:0.5

หลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อผลการทดลอง โดยตัวแปรตอบสนองมีดังนี้

3.8.2 ตัวแปรตอบสนอง

- 1) ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์

2) ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

3) ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

โดยการทดลองทุกกรณีศึกษาจะทำการทดลองทั้งหมด 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิภาวะเริ่มต้น 298 เคลวิน และที่อุณหภูมิภาวะเริ่มต้น 756 เคลวิน ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของการออกแบบการทดลองทั้งหมด 17 กรณีศึกษาโดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง และเพื่อการศึกษาอย่างครอบคลุมจะทำการทดลองเพิ่มอีกทั้งหมด 4 กรณีศึกษา แสดงดังตารางที่ 3.2 เพื่อแสดงผลความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อตัวแปรตอบสนองซึ่งในอนาคตจะสามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปปฏิบัติงานจริงในอุตสาหกรรมหรือการวิจัยในอนาคต โดยสรุปงานวิจัยนี้ทำการทดลองทั้งสิ้น 42 การทดลอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3. 4 การออกแบบการทดลองของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ

กรณีศึกษา	แอมพลิจูด (เมตร)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	รูปคลื่น	ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด
0	-	-	-	-
1	7	0.3	ไซน์	1:1
2	8	0.3	ไซน์	1:1
3	7	0.5	ไซน์	1:1
4	8	0.5	ไซน์	1:1
5	7	0.3	สี่เหลี่ยม	1:1
6	8	0.3	สี่เหลี่ยม	1:1
7	7	0.5	สี่เหลี่ยม	1:1
8	8	0.5	สี่เหลี่ยม	1:1
9	7	0.3	ไซน์	1:0.5
10	8	0.3	ไซน์	1:0.5
11	7	0.5	ไซน์	1:0.5
12	8	0.5	ไซน์	1:0.5
13	7	0.3	สี่เหลี่ยม	1:0.5
14	8	0.3	สี่เหลี่ยม	1:0.5
15	7	0.5	สี่เหลี่ยม	1:0.5
16	8	0.5	สี่เหลี่ยม	1:0.5
17 (mean)	7.5	0.4	สามเหลี่ยม	1:0.75

ตารางที่ 3. 5 การออกแบบการทดลองของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ (ส่วนที่ศึกษาเพิ่มเติม)

กรณีศึกษา	แอมพลิจูด (เมตร)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	รูปคลื่น	ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด
18	7.5	0.5	ไซน์	1:0.5
19	8	0.4	ไซน์	1:0.5
20	8	0.5	สามเหลี่ยม	1:0.5
21	8	0.5	ไซน์	1:0.75



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการไหลแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน โดยผลการทดลองเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1) ผลการจำลองการไหลภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามมิติ โดยเปรียบเทียบกับผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับผลจากงานวิจัยของ Shah และ Utikar [7] เพื่อหาขนาดพื้นที่การคำนวณ (Grid independency test) หาเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่มีความเหมาะสม (Time independency test) และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการจำลอง

2) ผลของตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปลิ้น และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล

3) ผลของตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปลิ้น และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล

4) ผลเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลแบบพัลส์กับการไหลแบบคงที่ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน

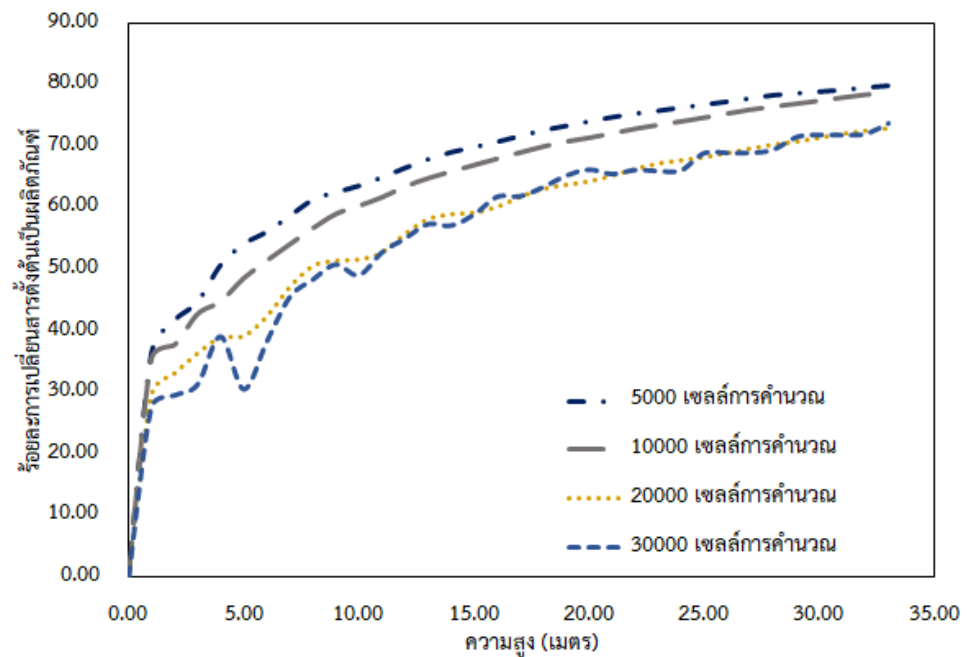
โดยจะแสดงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ก่อน หลังจากนั้นจะแสดงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์

4.1 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

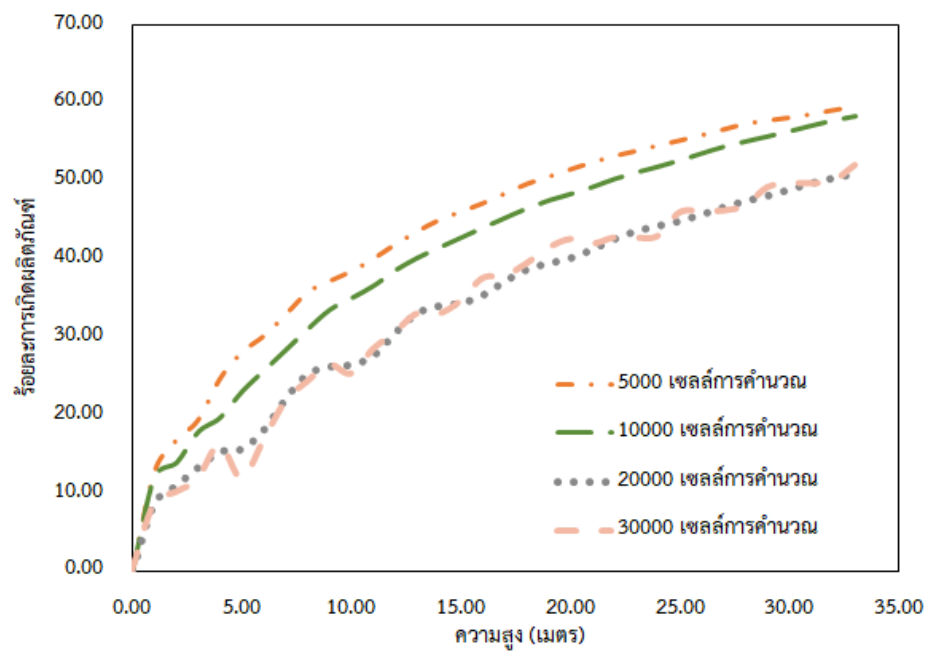
4.1.1 การหาขนาดพื้นที่คำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test)

ขนาดพื้นที่คำนวณหรือขนาดเซลล์คำนวณมีผลต่อการคำนวณในการจำลอง ขนาดเซลล์ที่มีความละเอียดแตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและแม่นยำ โดยถ้ากำหนดให้ขนาดเซลล์คำนวณมีความละเอียดน้อย ผลที่ได้จากการคำนวณจะลู่ออกจากคำตอบ (Divergence) หรือผลที่ได้จะไม่ละเอียด ทำให้ความถูกต้องและแม่นยำต่ำ แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดเซลล์คำนวณมีความละเอียดสูง ผลที่ได้จากการคำนวณจะลู่ออกเข้าหาคำตอบ (Convergence) หรือผลที่ได้จะละเอียดทำให้มีความถูกต้องและแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การใช้ขนาดเซลล์ที่มีความละเอียดสูง ระยะเวลาในการคำนวณก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาขนาดเซลล์คำนวณที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของเซลล์ที่คำนวณที่ใช้ในการจำลอง ทั้งหมด 4 ค่า คือ 5,000 10,000 20,000 และ 30,000 เซลล์ ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 แสดงผลการหาขนาดเซลล์คำนวณที่เหมาะสมที่ขนาดเซลล์การคำนวณต่างๆ โดยใช้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ความสูงต่างๆ ในท่อไรเซอร์ จากผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ที่เซลล์คำนวณ 5,000 และ 10,000 เซลล์ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างเมื่อเทียบกับเซลล์คำนวณ 20,000 และ 30,000 เซลล์ ดังนั้น เซลล์การคำนวณ 5,000 และ 10,000 เซลล์ ยังไม่เหมาะสมสำหรับการจำลองนี้ เนื่องจากเซลล์การคำนวณยังมีความละเอียดไม่เพียงพอ ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีความไม่ถูกต้อง หรือมีความแม่นยำต่ำ และเมื่อเพิ่มขนาดเซลล์คำนวณ 20,000 เซลล์ พบว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกับขนาดเซลล์ 30,000 เซลล์ ดังนั้นขนาดเซลล์คำนวณที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองคือ 20,000 เซลล์ เนื่องจากขนาดเซลล์ 20,000 เซลล์ ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า และผลที่ได้ใกล้เคียงกับขนาดเซลล์ 30,000 เซลล์ โดยเซลล์คำนวณ 30,000 เซลล์ ใช้เวลาในการคำนวณ 216 ชั่วโมง ขณะที่ถ้าเซลล์คำนวณ 20,000 เซลล์ ใช้เวลาในการคำนวณ 168 ชั่วโมง



รูปที่ 4. 1 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณขนาดต่างๆ ของร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์



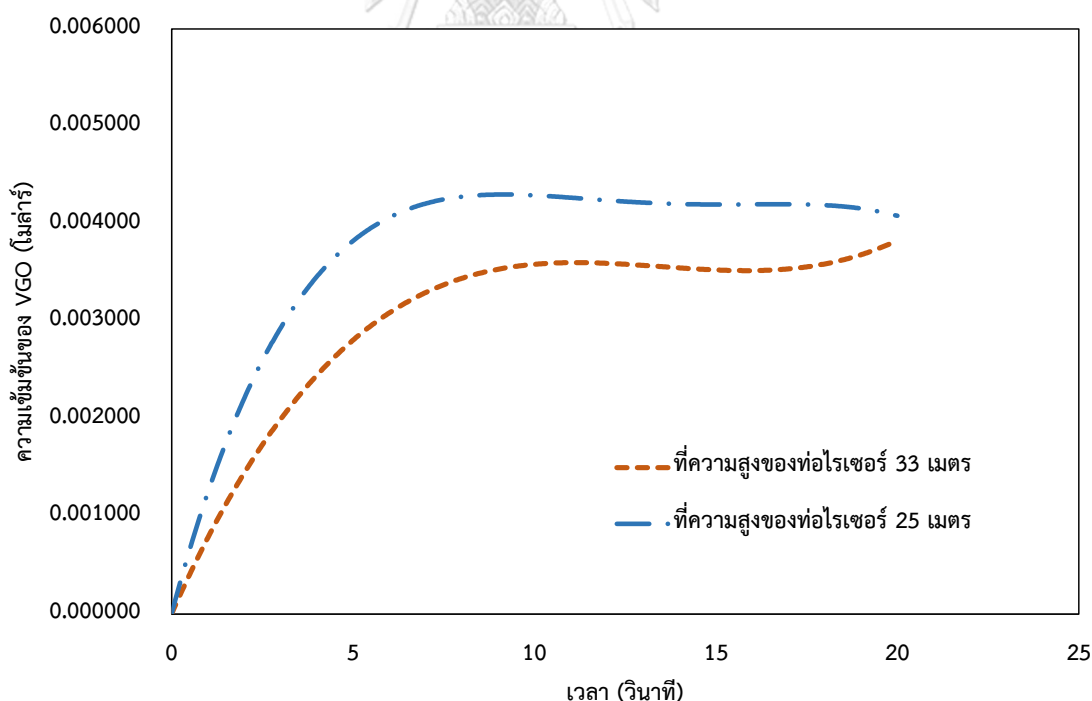
รูปที่ 4. 2 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณขนาดต่างๆ ของร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

4.1.2 การหาเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่มีความเหมาะสม (Time independency test)

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง จะต้องหาช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเฉลี่ยค่าที่ได้จากการจำลอง ซึ่งต้อง

เป็นช่วงที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียร (Quasi steady state) ซึ่งการจำลองเพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมเข้าสู่ภาวะเสถียรจะช่วยให้สามารถกำหนดช่วงเวลาที่จะศึกษาผลที่เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม เนื่องจาก หากระบบยังไม่เข้าสู่ภาวะเสถียร ผลของเวลาที่อยู่รูปสมการเชิงอนุพันธ์จะเข้ามามีบทบาทในการคำนวณทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนออกไปและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ไม่ถูกต้องและไม่แม่นยำ

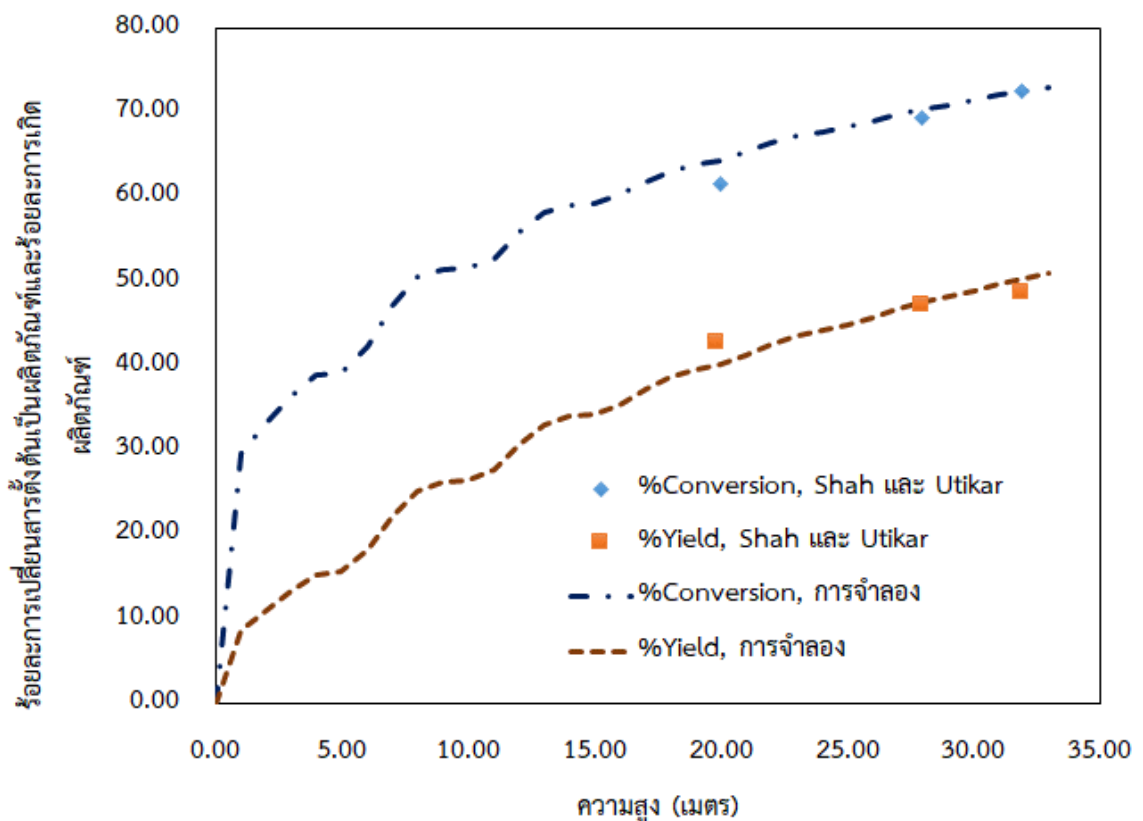
รูปที่ 4.3 แสดงถึงค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 วินาที จนกระทั่ง 20 วินาที โดยใช้ผลการจำลองที่ความสูง 25 เมตร และ 33 เมตร ที่ระดับความสูงที่แตกต่างกันให้ผลการจำลองสอดคล้องกัน คือ ที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 0 วินาทีถึง 10 วินาที ผลการจำลองจะแสดงให้เห็นถึงความไม่คงที่ที่เกิดขึ้นมากกว่าที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 10 วินาทีขึ้นไป ที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 10 วินาที ขึ้นไปนั้น ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ได้ถึงแม้จะมีความเปลี่ยนแปลงไปบ้างแต่เมื่อพิจารณาโดยรวมทุกตำแหน่งแล้วมีความใกล้เคียงกันมากกว่าที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 10 วินาที ที่มีความไม่คงที่มากกว่าในการจำลอง ดังนั้นในการจำลองนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที



รูปที่ 4. 3 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น VGO ต่อเวลา ที่ความสูง 33 เมตร และ 25 เมตรท่อไรเซอร์

4.1.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

หลังจากการหาขนาดพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม นำผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามมิติ มาเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Shah และ Utikar [7] ที่สภาวะในการดำเนินงานด้วยความเร็วแก๊สป้อนเข้าเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิป้อนเข้า เท่ากับ 756 องศาเซลวิน ฟลักซ์โดยมวลของแข็ง เท่ากับ 470 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที และความดัน เท่ากับ 1 บรรยากาศ ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงว่า แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความเหมาะสม สามารถทำนายอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำไปใช้ศึกษาผลของการไหลแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันได้



รูปที่ 4. 4 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์กับงานวิจัยที่ผ่านมา

4.2 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์

เมื่อได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามมิติที่มีความถูกต้องแล้ว แบบจำลองจะถูกนำมาใช้จำลองการไหลแบบพัลส์เพื่อศึกษาอัตราการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ โดยในส่วนี้จะเป็นการอภิปรายผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating Parameter) ที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล 2^4 แบบมีค่ากลาง โดยการทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งซึ่งตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย 4 ตัวแปร คือ แอมพลิจูด (Amplitude) ความถี่ (Frequency) รูปร่างคลื่น (Waveform) และ ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (Continuity of Amplitude) ตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion) และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ (%Yield)

4.2.1 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์

ในส่วนนี้จะแสดงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ โดยใช้ Vacuum Gas Oil (VGO) เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตที่มีการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่า กรณีศึกษาที่ 12 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์สูงที่สุด และกรณีศึกษาที่ 6 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด นั่นหมายความว่า ตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 12 ส่งผลให้ไอน้ำมันของสารตั้งต้น VGO สามารถเกิดการแตกตัวเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุด และตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 6 ทำให้ไอน้ำมันของสารตั้งต้น VGO เกิดการแตกตัวเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้น้อยที่สุด โดยค่าเฉลี่ยร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ของกรณีศึกษาที่ 12 เท่ากับ 75.3578 และกรณีศึกษาที่ 6 เท่ากับ 64.9415 แต่จากตารางที่ 4.1 ยังไม่เพียงพอต่อการสรุปว่าตัวแปรดำเนินการใดบ้างที่ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องนำผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรดำเนินการที่ได้มา

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดำเนินการโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่า ความถี่ (B) และ รูปลิ้น (C) และ อันตรกิริยาระหว่างความถี่กับรูปลิ้น (BC) ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p-value ที่แสดงในตารางนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งตามทฤษฎีของการ ออกแบบการทดลองที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรใดที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตัวแปรนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง นั้นหมายความว่า แอมพลิจูด ความสม่ำเสมอของ แอมพลิจูด และ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการอื่นๆ ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 4.2 สามารถบอกได้เพียงว่าตัวแปรดำเนินการหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร ดำเนินการใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเท่านั้น โดยไม่สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการหรือ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ ส่งผลในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนองจึงต้องนำค่าที่ ได้ในแต่ละกรณีศึกษามาสร้างกราฟผลของตัวแปรดำเนินการจึงจะสามารถบอกได้ว่าตัวแปร ดำเนินการนั้น ให้ผลเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง

รูปที่ 4.5 แสดงผลของตัวแปรดำเนินการ แอมพลิจูด (A) ความถี่ (B) รูปลิ้น (C) และ ความ ต่อเนื่องของแอมพลิจูด (D) ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ โดยแกนนอน เลข 1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าสูง เลข -1 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ จากการศึกษาผลของ ตัวแปรดำเนินการ พบว่า ความชันของตัวแปรความถี่ (B) และ รูปลิ้น (C) มีค่าสูงกว่าตัวแปร แอมพลิจูด (A) และ ความต่อเนื่องของแอมพลิจูด (D) แสดงว่าความถี่และรูปลิ้นเป็นตัวแปรหลักที่มี อิทธิพลต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ แต่ตัวแปรความถี่ (B) และรูปลิ้น (C) มีผลต่อ ค่าตอบสนองแตกต่างกัน โดยตัวแปรความถี่ (B) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงบวก ตัวแปรรูปลิ้น (C) มี ผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ หมายความว่า เมื่อเพิ่มความถี่ (B) ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็น ผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนตัวแปรรูปลิ้น (C) จากรูปลิ้นแบบไซน์ (Sine wave) ซึ่ง ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ (-1) เป็นรูปลิ้นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ซึ่งถูก กำหนดให้เป็นตัวแปรดำเนินการค่าสูง (1) ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์จะลดลง โดย สาเหตุที่ตัวแปรความถี่ (B) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงบวก เนื่องจาก การเพิ่มความถี่ ทำให้เกิดความ บั่นป่วนในแก๊สและของไหลภายในท่อไรเซอร์อย่างเหมาะสม เป็นการเพิ่มโอกาสการสัมผัสกันระหว่าง ไขมันและตัวเร่งปฏิกิริยาในท่อไรเซอร์ เมื่อเพิ่มค่าความถี่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็น

ผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ขณะที่ตัวแปรรูปคลื่น (C) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ เป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนรูปคลื่นจากรูปคลื่นแบบไซน์ (Sine wave) ไปเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) รูปคลื่นทั้งสองแบบให้ผลของการไหลแบบพัลส์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในการจำลองกำหนดให้ความเร็วเฉลี่ยป้อนเข้าของทุกกรณีศึกษาเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที แต่เมื่อใช้ตัวแปรดำเนินการเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ค่าความเร็วที่เวลาใดเวลาหนึ่งของแก๊สในระบบจะมีค่าคงที่ โดยตัวแปรดำเนินการเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) จะให้ค่าความเร็วที่เวลาใดเวลาหนึ่งของของไหลภายในระบบคงที่กว่ารูปคลื่นแบบไซน์ (Sine wave) จึงทำให้แก๊สและตัวเร่งปฏิกิริยามีการผสมกันลดลง ส่งผลให้การเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ลดลงตามไปด้วย

รูปที่ 4.6 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรความถี่ (B) และ ตัวแปรรูปคลื่น (C) ที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่า ไม่ว่าจะรูปคลื่นจะเป็นค่าสูง (C+) หรือ ค่าต่ำ (C-) เมื่อเพิ่มความถี่ (B) จะส่งผลเชิงบวกต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ หมายความว่า เมื่อใช้รูปคลื่นแบบไซน์ (Sine wave) หรือ รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) และเพิ่มความถี่ (B) จะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยถ้าตัวแปรรูปคลื่นเป็นค่าสูง (C+) จะให้ผลเชิงบวกสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรรูปคลื่นที่เป็นค่าต่ำ (C-) เพราะตัวแปรรูปคลื่นที่เป็นค่าสูง (C+) มีความชันของกราฟสูงกว่าตัวแปรรูปคลื่นที่เป็นค่าต่ำ (C-) เมื่อเพิ่มความถี่ (B) ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ของตัวแปรรูปคลื่นที่เป็นค่าสูง (C+) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มความถี่ช่วยลดค่าความเร็วที่เวลาใดเวลาหนึ่งของของไหลที่มีค่าคงที่ภายในท่อไรเซอร์และเพิ่มความปั่นป่วนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของการไหลแบบพัลส์ที่ใช้ตัวแปรดำเนินการรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม โอกาสการสัมผัสกันระหว่างไอน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาในท่อไรเซอร์จึงมีมากขึ้น ส่งผลให้การเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์สูงขึ้นตามไปด้วย

เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริงต่อไป จึงได้ทำการหาแบบจำลองการถดถอย (Regression model) และนำมาสร้างกราฟคอนทัวร์สามมิติ สมการแบบจำลองการถดถอยของร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงในสมการที่ 4.1

$$Y = 72.52041 - 0.4739X_A + 1.82725X_B - 1.37923X_C + 0.31945X_D + 0.34102X_A X_D + 1.08983X_B X_C - 0.01615X_B X_D + 0.3109X_C X_D - 0.48155X_B X_C X_D \quad (4.1)$$

และสมการแบบจำลองการถดถอยของร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์เฉพาะตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงในสมการที่ 4.2

$$Y = 72.52041 + 1.82725X_B - 1.37923X_C + 1.08983X_BX_C \quad (4.2)$$

เมื่อ	Y	คือ ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์
	X_A	คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A
	X_B	คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร B
	X_C	คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร C
	X_D	คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร D

เมื่อนำสมการแบบจำลองการถดถอยมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงถึงพื้นผิวตอบสนองของร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ความถี่กับรูปคลื่นที่แตกต่างกัน พบว่า ถ้าต้องการให้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น จะต้องกำหนดตัวแปรดำเนินการความถี่ให้มีค่าสูงที่สุด และรูปคลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์จึงจะได้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์สูงที่สุด

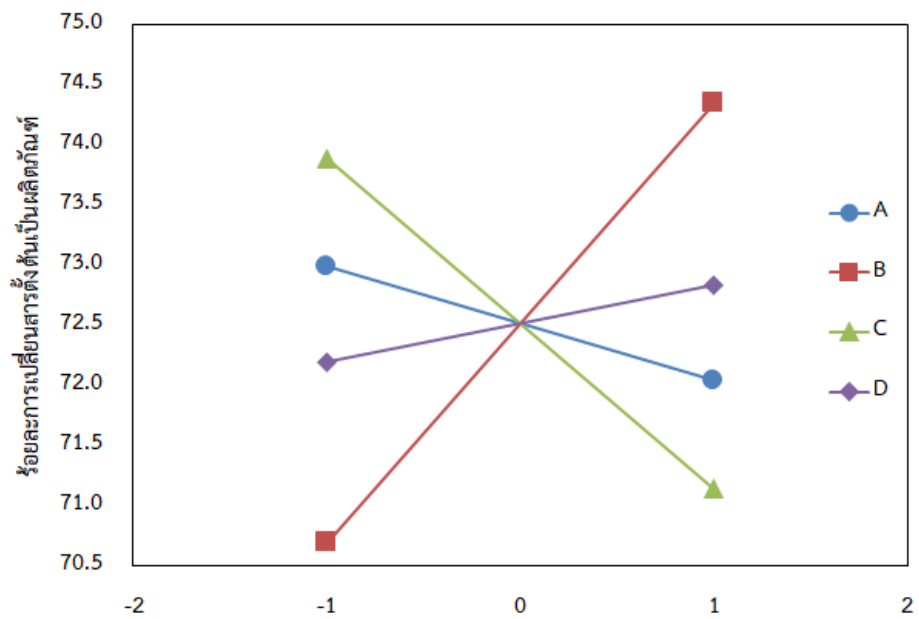
ตารางที่ 4. 1 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์

กรณีศึกษา	ตัวแปรดำเนินการ				ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion)
	แอมพลิจูด (เมตร) (A)	ความถี่ (เฮิรตซ์) (B)	รูปคลื่น (C)	ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D)	
1	7	0.3	ไซน์	1:1	74.6068 74.6285
2	8	0.3	ไซน์	1:1	73.9125 71.3284
3	7	0.5	ไซน์	1:1	74.6884 74.5726
4	8	0.5	ไซน์	1:1	74.0611 73.3304
5	7	0.3	สี่เหลี่ยม	1:1	68.8169 69.6844
6	8	0.3	สี่เหลี่ยม	1:1	64.5567 65.3263
7	7	0.5	สี่เหลี่ยม	1:1	74.0180 73.1119
8	8	0.5	สี่เหลี่ยม	1:1	73.9782 74.5944
9	7	0.3	ไซน์	1:0.5	72.9092 72.5602
10	8	0.3	ไซน์	1:0.5	72.8268 72.5252
11	7	0.5	ไซน์	1:0.5	72.4603 75.2681
12	8	0.5	ไซน์	1:0.5	74.6116 76.1041
13	7	0.3	สี่เหลี่ยม	1:0.5	70.4157 69.4817
14	8	0.3	สี่เหลี่ยม	1:0.5	68.3192 69.1920
15	7	0.5	สี่เหลี่ยม	1:0.5	74.7114 73.9758
16	8	0.5	สี่เหลี่ยม	1:0.5	73.8818 74.1947
17 (mean)	7.5	0.4	สามเหลี่ยม	1:0.75	71.8954 69.6153

ตารางที่ 4. 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์

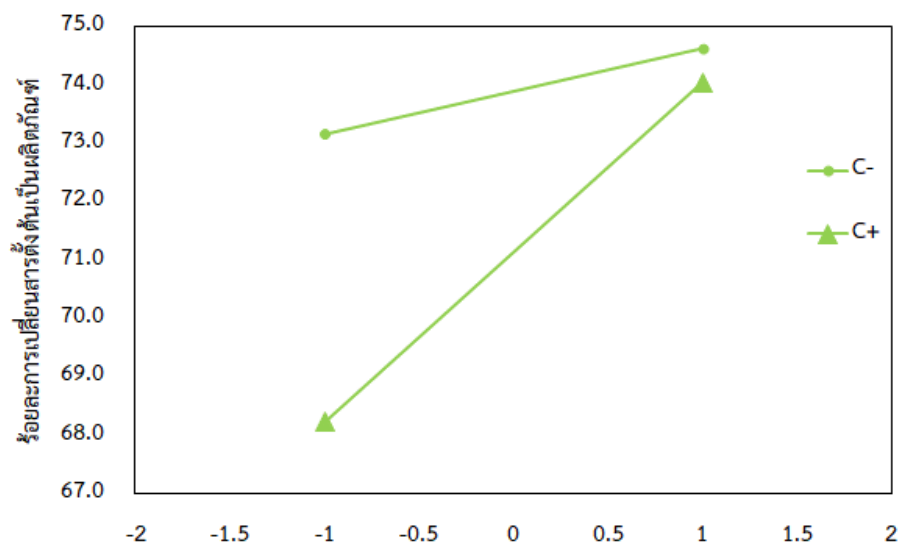
(A คือ แอมพลิจูด B คือ ความถี่ C คือ รูปลิ้น และ D คือ ความต่อเนื่องของแอมพลิจูด)

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F- Value	Prob > F
A	3.59	1	3.59	2.91	0.1387
B	53.42	1	53.42	43.3	0.0006
C	30.44	1	30.44	24.67	0.0025
D	1.63	1	1.63	1.32	0.2938
AD	1.86	1	1.86	1.51	0.2654
BC	19	1	19	15.4	0.0078
BD	4.17E-03	1	4.17E-03	3.38E-03	0.9555
CD	1.55	1	1.55	1.25	0.3057
BCD	3.71	1	3.71	3.01	0.1336
Curvature	2.93	1	2.93	2.38	0.1741
Residual	7.4	6	1.23		
Cor Total	125.55	16			



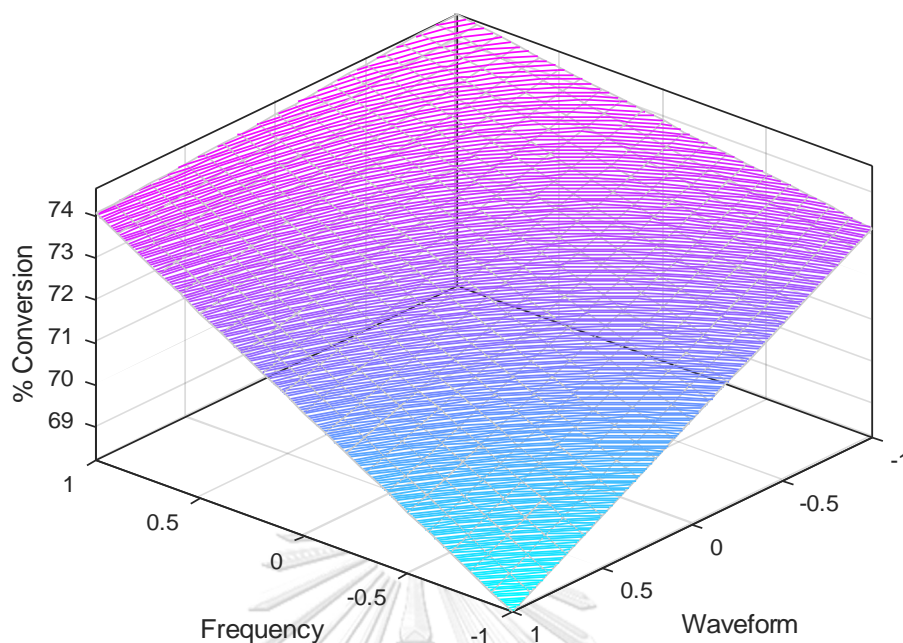
แอมพลิจูด (A) ความถี่ (B) รูปคลื่น (C) และ ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D)

รูปที่ 4. 5 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์



ความถี่ (B)

รูปที่ 4. 6 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความถี่ (B) และรูปคลื่น (C) ที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4. 7 พื้นผิวตอบสนองของค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์เมื่อค่าความถี่ และรูปคลื่นแตกต่างกัน

4.2.2 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

ในส่วนนี้จะแสดงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่สนใจศึกษาคือแก๊สโซลีน (Gasoline) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของไอน้ำมันภายในท่อโรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ พบว่า กรณีศึกษาที่ 12 มีค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์สูงที่สุด และกรณีศึกษาที่ 6 มีค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด นั่นหมายความว่า ตัวแปรดำเนินการที่ใช้กรณีศึกษาที่ 12 ส่งผลให้การแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สโซลีนมากที่สุด และตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 6 ส่งผลให้การแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สโซลีนน้อยที่สุด โดยค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของกรณีศึกษาที่ 12 เท่ากับ 54.0844 และกรณีศึกษาที่ 6 เท่ากับ 42.3688 แต่จากตารางที่ 4.3 ยังไม่เพียงพอต่อการสรุปว่าตัวแปรดำเนินการใดบ้างที่ส่งผลต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องนำผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรดำเนินการที่ได้มา

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดำเนินการโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ พบว่า ความถี่ (B) และ รูปคลื่น (C) และอันตรกิริยาระหว่าง ความถี่กับรูปคลื่น (BC) ส่งผลต่อค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p-value ที่แสดงในตารางนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรใดที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตัวแปรนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง นั้นหมายความว่า แอมพลิจูด ความต่อเนื่องของแอมพลิจูด และ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการอื่นๆ ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 4.4 สามารถบอกได้เพียงว่าตัวแปรดำเนินการหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเท่านั้น โดยไม่สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ ส่งผลในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนองจึงต้องนำค่าที่ได้ในแต่ละกรณีศึกษามา สร้างกราฟผลของตัวแปรดำเนินการจึงจะสามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการนั้น ให้ผลเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง

รูปที่ 4.8 แสดงผลของตัวแปรดำเนินการ แอมพลิจูด (A) ความถี่ (B) รูปคลื่น (C) และ ความต่อเนื่องของแอมพลิจูด (D) ต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ โดยแกนนอน เลข 1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าสูง เลข -1 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ จากการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ พบว่า ความชันของตัวแปรความถี่ (B) และ รูปคลื่น (C) มีค่าสูงกว่าตัวแปรแอมพลิจูด (A) และ ความต่อเนื่องของแอมพลิจูด (D) แสดงว่าความถี่และรูปคลื่นเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ แต่ตัวแปรความถี่ (B) และรูปคลื่น (C) มีผลต่อค่าตอบสนองแตกต่างกัน โดยตัวแปรความถี่ (B) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงบวก ตัวแปรรูปคลื่น (C) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ หมายความว่า เมื่อเพิ่มความถี่ (B) ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนตัวแปรรูปคลื่น (C) จากรูปคลื่นแบบไซน์ (Sine wave) ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ (-1) เป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรดำเนินการค่าสูง (1) ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์จะลดลง โดยสาเหตุที่ตัวแปรความถี่ (B) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงบวก เนื่องจาก การเพิ่มความถี่ ทำให้เกิดความปั่นป่วนในแก๊สและของไหลภายในท่อไรเซอร์อย่างเหมาะสม เป็นการเพิ่มโอกาสการสัมผัสกันระหว่างไอน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาในท่อไรเซอร์ เมื่อเพิ่มค่าความถี่ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ขณะที่ตัวแปรรูปคลื่น (C) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ เป็นผล

เนื่องจากการเปลี่ยนรูปคลื่นจากรูปคลื่นแบบไซน์ (Sine wave) ไปเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) รูปคลื่นทั้งสองแบบให้ผลของการไหลแบบพัลส์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในการจำลอง กำหนดให้ความเร็วเฉลี่ยป้อนเข้าของทุกกรณีศึกษาเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที แต่เมื่อใช้ตัวแปร ดำเนินการเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ค่าความเร็วที่เวลาใดเวลาหนึ่งของแก๊สในระบบ จะมีค่าคงที่ โดยตัวแปรดำเนินการเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) จะให้ค่าความเร็วที่เวลาใดเวลาหนึ่งของของไหลภายในระบบคงที่กว่ารูปคลื่นแบบไซน์ (Sine wave) จึงทำให้แก๊สและตัวเร่งปฏิกิริยามีการผสมกันลดลง ส่งผลให้การเกิดผลิตภัณฑ์ลดลงตามไปด้วย

รูปที่ 4.9 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรความถี่ (B) และ ตัวแปรรูปคลื่น (C) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ พบว่า ไม่ว่าจะรูปคลื่นจะเป็นค่าสูง (C+) หรือ ค่าต่ำ (C-) เมื่อเพิ่มความถี่ (B) จะส่งผลเชิงบวกต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ หมายความว่า เมื่อใช้รูปคลื่นแบบไซน์ (Sine wave) หรือ รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) และเพิ่มความถี่ (B) จะทำให้ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยถ้าตัวแปรรูปคลื่นเป็นค่าสูง (C+) จะให้ผลเชิงบวกสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปร รูปคลื่นที่เป็นค่าต่ำ (C-) เพราะตัวแปรรูปคลื่นที่เป็นค่าสูง (C+) มีความชันของกราฟสูงกว่าตัวแปร รูปคลื่นที่เป็นค่าต่ำ (C-) เมื่อเพิ่มความถี่ (B) ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวแปรรูปคลื่นที่เป็นค่า สูง (C+) จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มความถี่ช่วยลดค่าความเร็วที่เวลาใดเวลา หนึ่งของของไหลที่มีค่าคงที่ภายในท่อไรเซอร์และเพิ่มความปั่นป่วนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของการ ไหลแบบพัลส์ที่ใช้ตัวแปรดำเนินการรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม โอกาสการสัมผัสกันระหว่างไอน้ำมันและ ตัวเร่งปฏิกิริยาในท่อไรเซอร์จึงมีมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดผลิตภัณฑ์สูงขึ้นตามไปด้วย

เพื่อการนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริงต่อไป จึงได้ทำการหา แบบจำลองการถดถอย (Regression model) และนำมาสร้างกราฟคอนทัวร์สามมิติ สมการ แบบจำลองการถดถอยของร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ แสดงในสมการที่ 4.3

$$Y = 50.70903 - 0.52946X_A + 2.074634X_B - 1.62446X_C + 0.268639X_D + 1.141331X_BX_C + 0.0818492X_BX_D + 0.0361017X_CX_D - 0.55234X_BX_CX_D \quad (4.3)$$

และสมการแบบจำลองการถดถอยของร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์เฉพาะตัวแปรดำเนินการที่มี ผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงในสมการที่ 4.4

$$Y = 50.70903 + 2.074634X_B - 1.62446X_C + 1.141331X_BX_C \quad (4.4)$$

เมื่อ Y คือ ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

- X_A คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A
 X_B คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร B
 X_C คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร C
 X_D คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร D

เมื่อนำสมการแบบจำลองการถดถอยมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ดังแสดง ในรูปที่ 4.10 แสดงถึงพื้นผิวตอบสนองของร้อยละการเปลี่ยนสารเกิดผลิตภัณฑ์ที่ความถี่กับรูปคลื่นที่แตกต่างกัน พบว่า ถ้าต้องการให้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น จะต้องกำหนดตัวแปรดำเนินการความถี่ให้มีค่าสูงที่สุด และรูปคลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์จึงจะได้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์สูงที่สุด

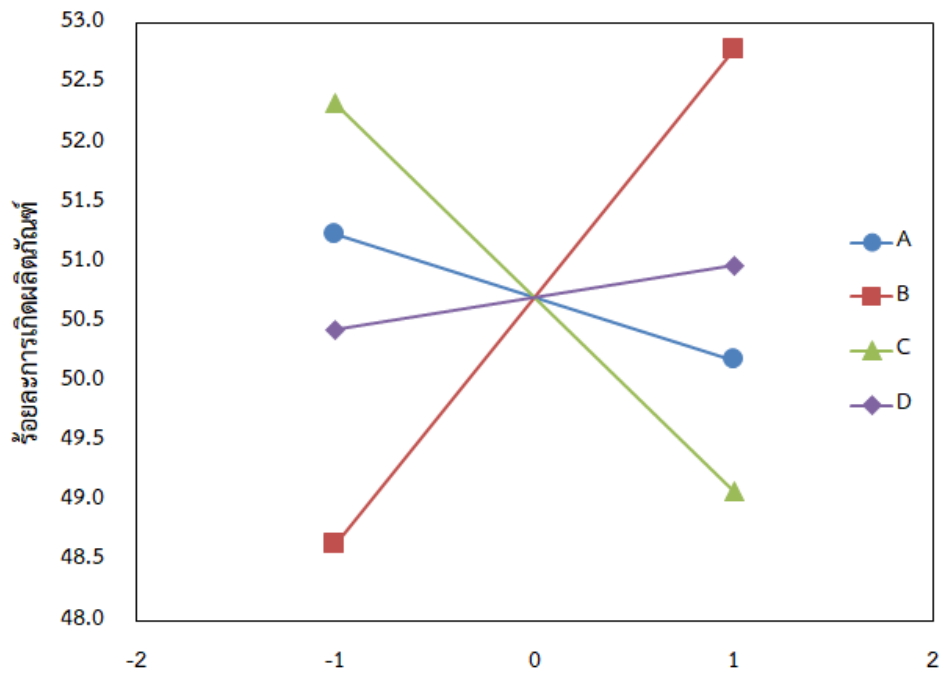


ตารางที่ 4. 3 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

กรณีศึกษา	ตัวแปรดำเนินการ				ร้อยละการเกิด ผลิตภัณฑ์ (%Yield)
	แอมพลิจูด (เมตร) (A)	ความถี่ (เฮิรตซ์) (B)	รูปคลื่น (C)	ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D)	
1	7	0.3	ไซน์	1:1	53.1678 53.1532
2	8	0.3	ไซน์	1:1	52.5383 49.3943
3	7	0.5	ไซน์	1:1	53.2786 53.1138
4	8	0.5	ไซน์	1:1	52.7264 52.0346
5	7	0.3	สี่เหลี่ยม	1:1	46.6401 47.4427
6	8	0.3	สี่เหลี่ยม	1:1	41.7728 42.9648
7	7	0.5	สี่เหลี่ยม	1:1	52.5906 51.2493
8	8	0.5	สี่เหลี่ยม	1:1	51.9703 53.0088
9	7	0.3	ไซน์	1:0.5	50.9483 50.5274
10	8	0.3	ไซน์	1:0.5	50.9206 50.5517
11	7	0.5	ไซน์	1:0.5	52.9110 53.9012
12	8	0.5	ไซน์	1:0.5	53.2219 54.9469
13	7	0.3	สี่เหลี่ยม	1:0.5	48.2006 47.0023
14	8	0.3	สี่เหลี่ยม	1:0.5	45.9141 47.0115
15	7	0.5	สี่เหลี่ยม	1:0.5	53.2724 52.4167
16	8	0.5	สี่เหลี่ยม	1:0.5	51.5746 52.3217
17 (mean)	7.5	0.4	สามเหลี่ยม	1:0.75	49.6234 46.9904

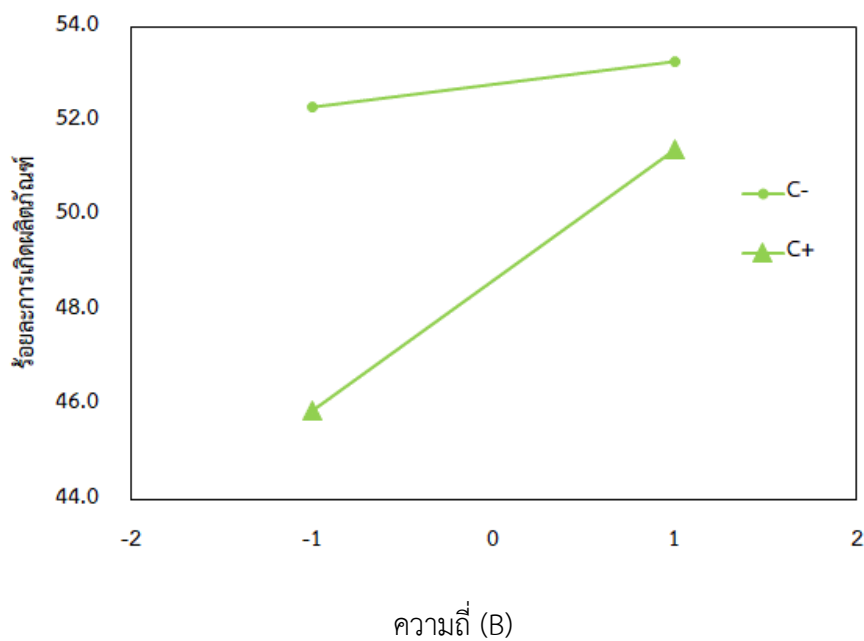
ตารางที่ 4. 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์
(A คือ แอมพลิจูด B คือ ความถี่ C คือ รูปคลื่น และ D คือ ความต่อเนื่องของแอมพลิจูด)

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F- Value	Prob > F
A	4.485315	1	4.485315	2.958158	0.1291
B	68.86571	1	68.86571	45.41836	0.0003
C	42.22208	1	42.22208	27.84634	0.0012
D	1.154673	1	1.154673	0.761531	0.4118
BC	20.84219	1	20.84219	13.74585	0.0076
BD	0.005471	1	0.005471	0.003608	0.9538
CD	2.085329	1	2.085329	1.375318	0.2793
BCD	4.881285	1	4.881285	3.219309	0.1159
Curvature	5.430811	1	5.430811	3.581732	0.1003
Residual	10.61377	7	1.516253		
Cor Total	160.5866	16			

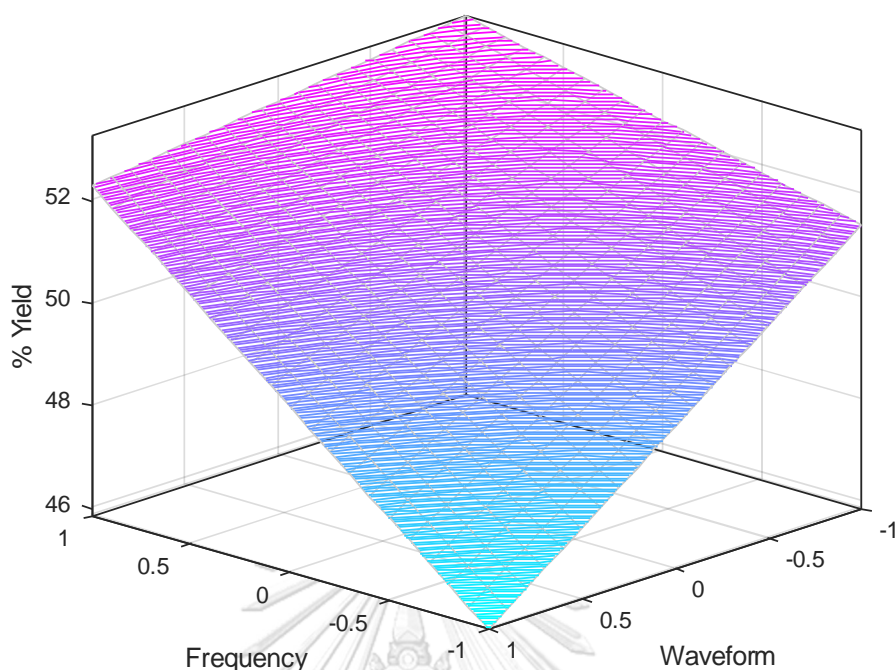


แอมพลิจูด (A) ความถี่ (B) รูปคลื่น (C) และ ความต่อเนื่องของแอมพลิจูด (D)

รูปที่ 4. 8 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4. 9 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความถี่ (B) และรูปคลื่น (C) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4. 10 พื้นผิวตอบสนองของค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์เมื่อค่าความถี่ และรูปคลื่นแตกต่างกัน

4.3 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำร้อนที่มีการไหลแบบพัลส์

การอภิปรายผลในส่วนของอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด สำหรับการแตกตัวของไอน้ำร้อนที่มีการไหลแบบพัลส์ จะแบ่งกรณีศึกษาเป็น 3 ส่วน

ส่วนแรกจะอภิปรายผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำร้อนที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล 2^4 แบบมีค่ากลาง โดยการทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย ซึ่งตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย 4 ตัวแปร คือ แอมพลิจูด (Amplitude) ความถี่ (Frequency) รูปคลื่น (Waveform) และ ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (Continuity of Amplitude) ตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

ส่วนที่สองจะอภิปรายผลในส่วนอุทกพลศาสตร์ โดยเลือกเฉพาะกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ซึ่งให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์สูง

ที่สุด และต่ำที่สุด จากทั้งหมด 17 กรณีศึกษา ส่วนกรณีศึกษาที่ 17 ซึ่งเป็นค่ากลางของการทดลอง ให้ผลต่ออุทกพลศาสตร์ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับกรณีศึกษาที่ 12 และให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ในช่วงปานกลาง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.3 จึงจะไม่ขอกล่าวถึงแต่สามารถดูผลเทียบเคียงกับกรณีศึกษาที่ 12 ได้ เพราะลักษณะของรูปคลื่นสามเหลี่ยมมีลักษณะคล้ายคลึงกับคลื่นรูปไซน์ กล่าวคือ ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ตามลักษณะของรูปคลื่น และไม่มีช่วงที่ความเร็วคงที่ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งเหมือนกับคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

ส่วนที่สามจะอภิปรายผลของกรณีศึกษาที่ทำการศึกษาเพิ่มเติม คือ กรณีศึกษา 18 ถึง 21 โดยจะแสดงผลของการศึกษากระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic relationship) กล่าวคือ เมื่อตัวแปรดำเนินการตัวหนึ่งเพิ่มหรือลด ค่าตัวแปรตอบสนองอาจเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่จะมีลักษณะที่เป็นเส้นโค้งแทน ซึ่งสามารถนำผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ออกแบบการดำเนินการในกระบวนการทางเคมีได้ ซึ่งผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งของกรณีศึกษาที่ 18 ถึง 21

4.3.1 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล

ส่วนนี้จะอภิปรายผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล โดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง ซึ่งถ้าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าสูง หมายความว่า อนุภาคของแข็งมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้การผสมภายในระบบเกิดขึ้นไม่ดี ในทางกลับกันถ้าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีต่ำ หมายความว่า อนุภาคของแข็งมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลดีต่อการผสมภายในระบบ

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง พบว่า กรณีศึกษาที่ 6 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของ

ของแข็งสูงที่สุด และกรณีศึกษาที่ 12 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุดนั้นหมายความว่า ตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 6 ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของของแข็งสูงขึ้น ส่วนตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 12 ส่งผลให้การกระจายตัวของของแข็งมีความสม่ำเสมอ โดยค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งของกรณีศึกษาที่ 6 เท่ากับ 0.012080 และกรณีศึกษาที่ 12 เท่ากับ 0.004413 แต่จากตารางที่ 4.5 ยังไม่เพียงพอต่อการสรุปว่าตัวแปรดำเนินการใดบ้างที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งอย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องนำผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรดำเนินการที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดำเนินการโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งพบว่า ความถี่ (B) รูปคลื่น (C) ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D) และอันตรกิริยาระหว่างรูปคลื่นกับความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (CD) ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p-value ที่แสดงในตารางนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรใดที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตัวแปรนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง นั้นหมายความว่า แอมพลิจูดและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการอื่นๆ ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 4.6 สามารถบอกได้เพียงว่าตัวแปรดำเนินการหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเท่านั้น โดยไม่สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ ส่งผลในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง จึงต้องนำค่าที่ได้ในแต่ละกรณีศึกษามาสร้างกราฟผลของตัวแปรดำเนินการจึงจะสามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการนั้น ให้ผลเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง

รูปที่ 4.11 แสดงผลของตัวแปรหลักต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง โดยแกนนอน เลข 1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าสูง เลข -1 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการค่าต่ำจากการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ พบว่า ความถี่ (B) และ ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ หมายความว่า เมื่อเพิ่ม ความถี่ (B) หรือเพิ่มความไม่สม่ำเสมอของแอมพลิจูด จะส่งผลให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งลดลงซึ่งเป็นผลดีต่อระบบ อันเป็นผลมาจากการเพิ่มความถี่ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคของแข็ง

สมำเสมอ และการใช้ค่าตัวแปรดำเนินการความสมำเสมอของแอมพลิจูดที่ 1:0.5 ทำให้เกิดการผสมที่ดีขึ้นภายในท่อไรเซอร์เนื่องจากความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้น ส่วนรูปคลื่น (C) มีผลต่อค่าตอบสนองเชิงบวกหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงการดำเนินการจากคลื่นรูปไซน์เป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมจะทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเพิ่มสูง อันเนื่องมาจากการดำเนินการที่คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) ค่าความเร็วที่เวลาใดเวลาหนึ่งของแก๊สในระบบจะมีค่าคงที่ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อระบบ เพราะค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงของแข็งภายในท่อไรเซอร์ กระจายตัวอย่างไม่สมำเสมอทำให้เกิดการผสมของของไหลที่ไม่ดี ส่งผลให้การสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลลดลงทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำภายในท่อไรเซอร์เกิดขึ้นไม่ดีตามไปด้วย

รูปที่ 4.12 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างรูปคลื่น (C) และความสมำเสมอของแอมพลิจูด (D) ที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง พบว่า ไม่ว่าจะความสมำเสมอของแอมพลิจูดจะเป็นค่าสูง (D+) หรือ ค่าต่ำ (D-) เมื่อเปลี่ยนรูปคลื่นจากคลื่นรูปไซน์เป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม จะทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเพิ่มขึ้น โดยถ้า ตัวแปรความสมำเสมอของแอมพลิจูดเป็นค่าต่ำ (D-) จะให้ผลเชิงบวกสูงกว่าตัวแปรความสมำเสมอของแอมพลิจูดค่าสูง (D+) อันเป็นผลมาจากการดำเนินการด้วยตัวแปรความสมำเสมอของแอมพลิจูดค่าต่ำ (D-) มีความปั่นป่วนภายในระบบน้อยกว่าการดำเนินการด้วยตัวแปรความสมำเสมอของแอมพลิจูดค่าสูง (D+) จึงทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าสูงซึ่งไม่เป็นผลดีต่อระบบ

เพื่อการนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริงต่อไป จึงได้ทำการหาแบบจำลองการถดถอย (Regression model) และนำมาสร้างกราฟคอนทัวร์สามมิติ สมการแบบจำลองการถดถอยของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง แสดงในสมการที่ 4.5

$$Y = 0.006229 + 0.000308X_A - 0.00091X_B + 0.000839X_C - 0.00111X_D + 0.000326X_A X_C - 0.00026X_A X_D + 0.00033X_B X_D - 0.0007X_C X_D - 0.00033X_A X_C X_D \quad (4.5)$$

และสมการแบบจำลองการถดถอยของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉพาะตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงในสมการที่ 4.6

$$Y = 0.006229 - 0.00091X_B + 0.000839X_C - 0.00111X_D - 0.0007X_C X_D \quad (4.6)$$

เมื่อ	Y	คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง
	X_A	คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A
	X_B	คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร B
	X_C	คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร C
	X_D	คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร D

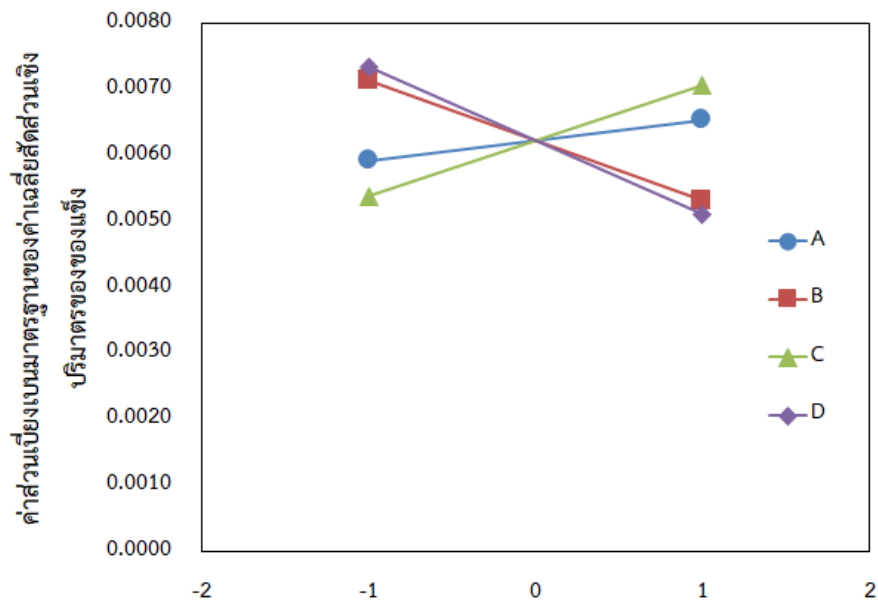
เมื่อนำสมการแบบจำลองการถดถอยมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ดังแสดงในรูป 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงถึงพื้นผิวตอบสนองของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่รูปคลื่นกับความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน พบว่า ถ้าต้องการให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าต่ำที่สุด จะต้องกำหนดตัวแปรดำเนินการรูปคลื่นให้เป็นคลื่นรูปไซน์ และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดเป็นแบบไม่ต่อเนื่องคือ อัตราส่วน 1:0.5 จึงจะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าต่ำที่สุด โดยถ้าตัวแปรความถี่เป็นค่าสูง (B+) กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงดังรูปที่ 4.13 และถ้าตัวแปรความถี่เป็นค่าต่ำ กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4. 5 ผลของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

กรณีศึกษา	ตัวแปรดำเนินการ				ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของสัดส่วน เชิงปริมาตรของ ของแข็ง
	แอมพลิจูด (เมตร) (A)	ความถี่ (เฮิรตซ์) (B)	รูปคลื่น (C)	ความสม่ำเสมอของ แอมพลิจูด (D)	
1	7	0.3	ไซน์	1:1	0.006727 0.006355
2	8	0.3	ไซน์	1:1	0.006333 0.007135
3	7	0.5	ไซน์	1:1	0.005287 0.005183
4	8	0.5	ไซน์	1:1	0.004602 0.004796
5	7	0.3	สี่เหลี่ยม	1:1	0.008918 0.009018
6	8	0.3	สี่เหลี่ยม	1:1	0.012521 0.011639
7	7	0.5	สี่เหลี่ยม	1:1	0.005986 0.006698
8	8	0.5	สี่เหลี่ยม	1:1	0.008080 0.008213
9	7	0.3	ไซน์	1:0.5	0.005362 0.005147
10	8	0.3	ไซน์	1:0.5	0.005559 0.005564
11	7	0.5	ไซน์	1:0.5	0.004663 0.004540
12	8	0.5	ไซน์	1:0.5	0.004367 0.004459
13	7	0.3	สี่เหลี่ยม	1:0.5	0.005906 0.005855
14	8	0.3	สี่เหลี่ยม	1:0.5	0.006478 0.005663
15	7	0.5	สี่เหลี่ยม	1:0.5	0.004633 0.004615
16	8	0.5	สี่เหลี่ยม	1:0.5	0.004435 0.004580
17 (mean)	7.5	0.4	สามเหลี่ยม	1:0.75	0.004865 0.005395

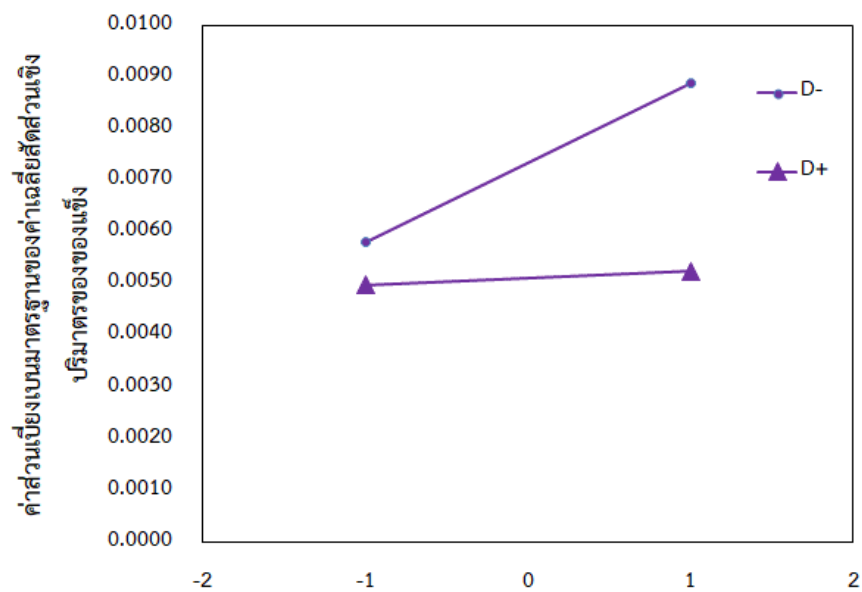
ตารางที่ 4. 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ
ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง
(A คือ แอมพลิจูด B คือ ความถี่ C คือ รูปคลื่น และ D คือ ความต่อเนื่องของแอมพลิจูด)

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F- Value	Prob > F
Model	6E-05	9	6.67E-06	19.20642	0.0009
A	1.51E-06	1	1.51E-06	4.357853	0.0819
B	1.32E-05	1	1.32E-05	37.94386	0.0008
C	1.13E-05	1	1.13E-05	32.42632	0.0013
D	1.99E-05	1	1.99E-05	57.23579	0.0003
AC	1.7E-06	1	1.7E-06	4.893297	0.0689
AD	1.12E-06	1	1.12E-06	3.214182	0.1232
BD	1.74E-06	1	1.74E-06	5.015318	0.0664
CD	7.88E-06	1	7.88E-06	22.70485	0.0031
ACD	1.76E-06	1	1.76E-06	5.066279	0.0654
Curvature	1.23E-06	1	1.23E-06	3.546183	0.1087
Residual	2.08E-06	6	3.47E-07		
Cor Total	6.33E-05	16			



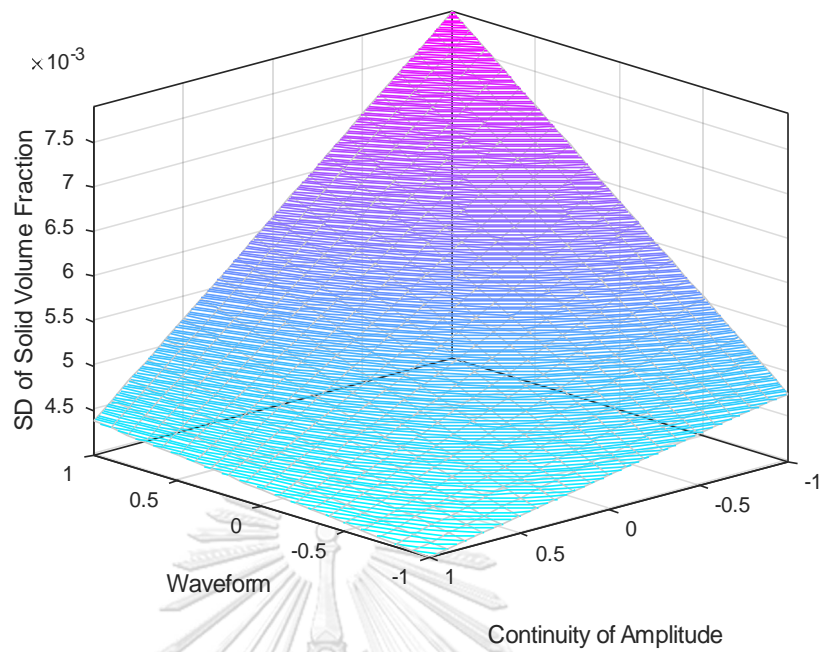
แอมพลิฟิวด์ (A) ความถี่ (B) รูปคลื่น (C) และ ความต่อเนื่องของแอมพลิฟิวด์ (D)

รูปที่ 4. 11 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

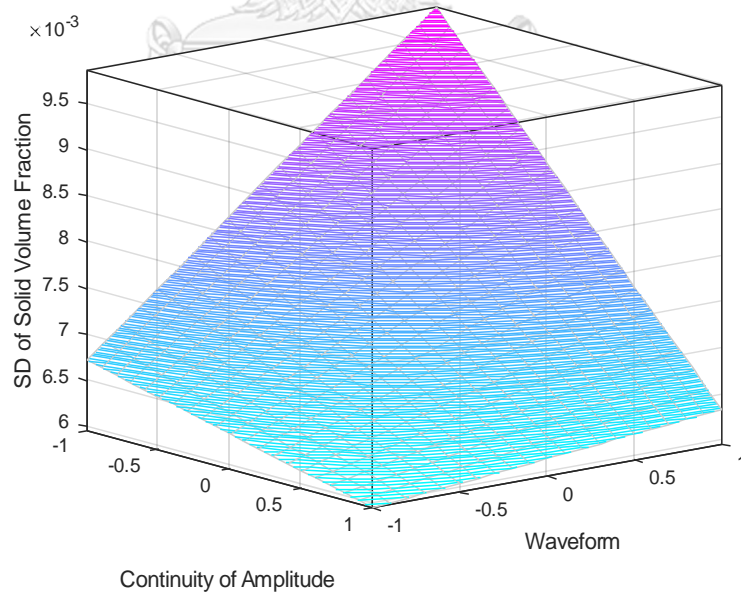


รูปคลื่น (C)

รูปที่ 4. 12 ผลของอันตรกิริยาระหว่างรูปคลื่น (C) และความต่อเนื่องของแอมพลิฟิวด์ (D) ที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

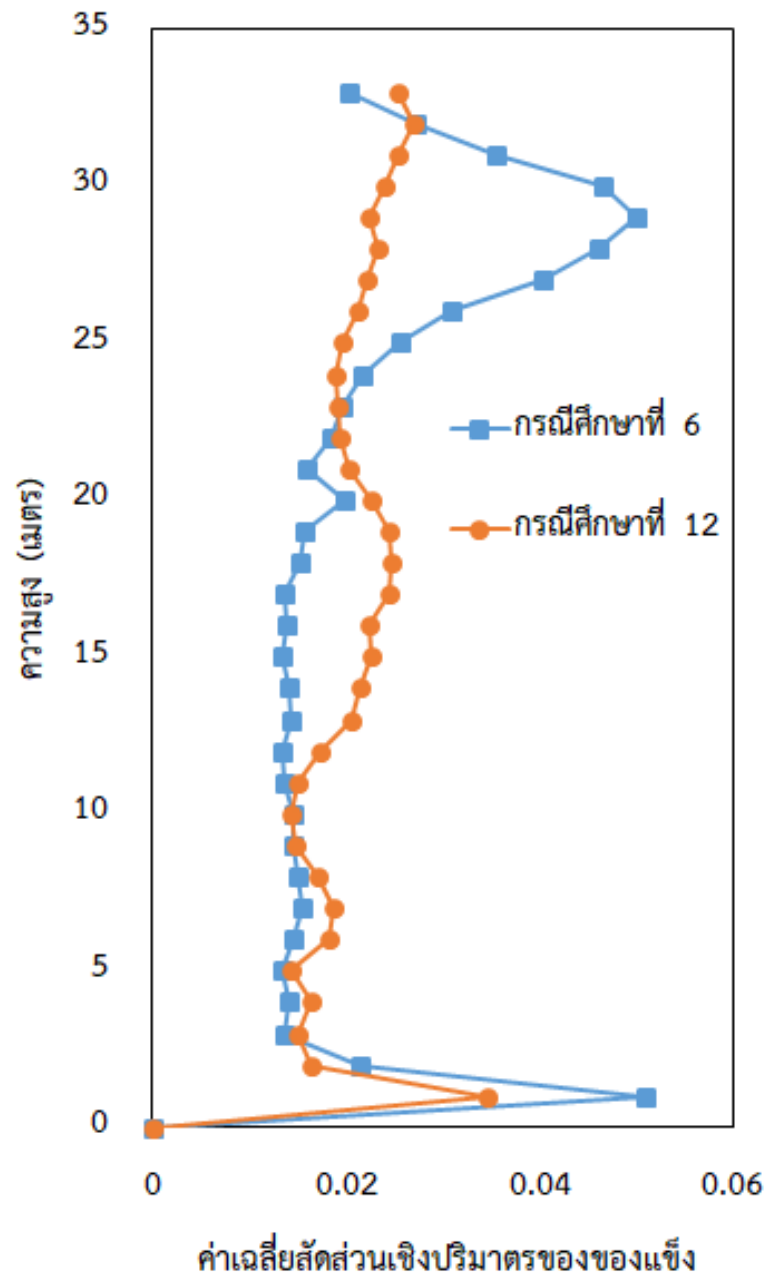


รูปที่ 4. 13 พื้นผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อรูปคลื่นและความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดแตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้ความถี่ค่าสูง (B+)



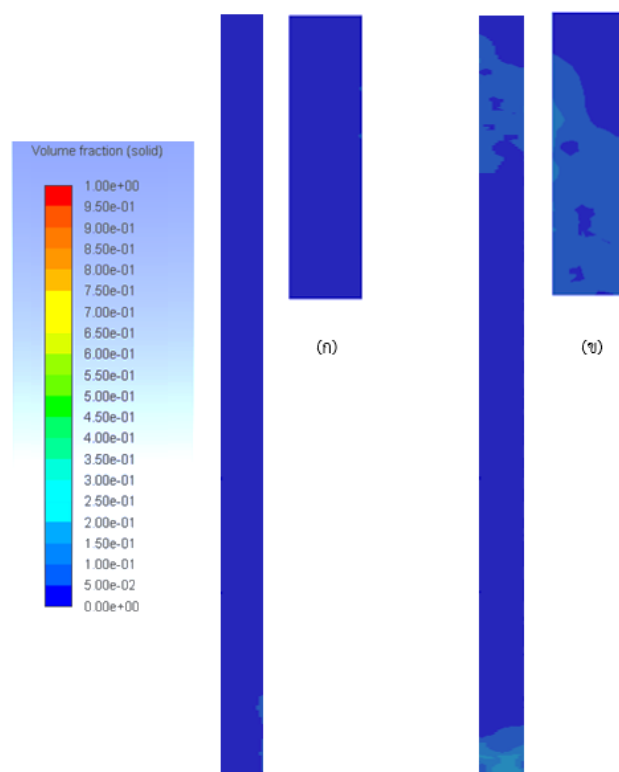
รูปที่ 4. 14 พื้นผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อรูปคลื่นและความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดแตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้ความถี่ค่าต่ำ (B-)

4.3.2 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำร้อนที่มีการไหลแบบพัลส์ของกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12

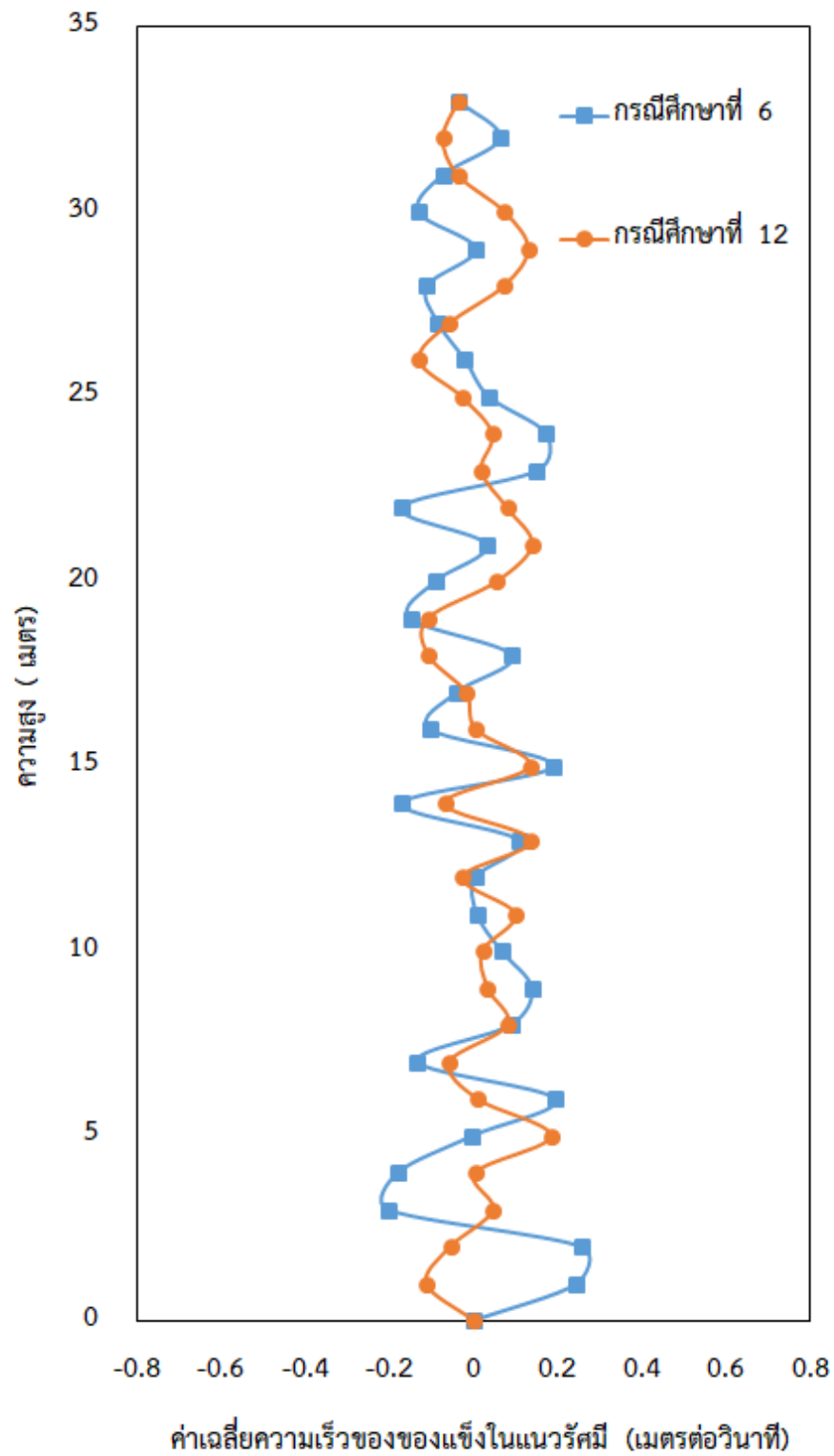


รูปที่ 4. 15 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน กรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12

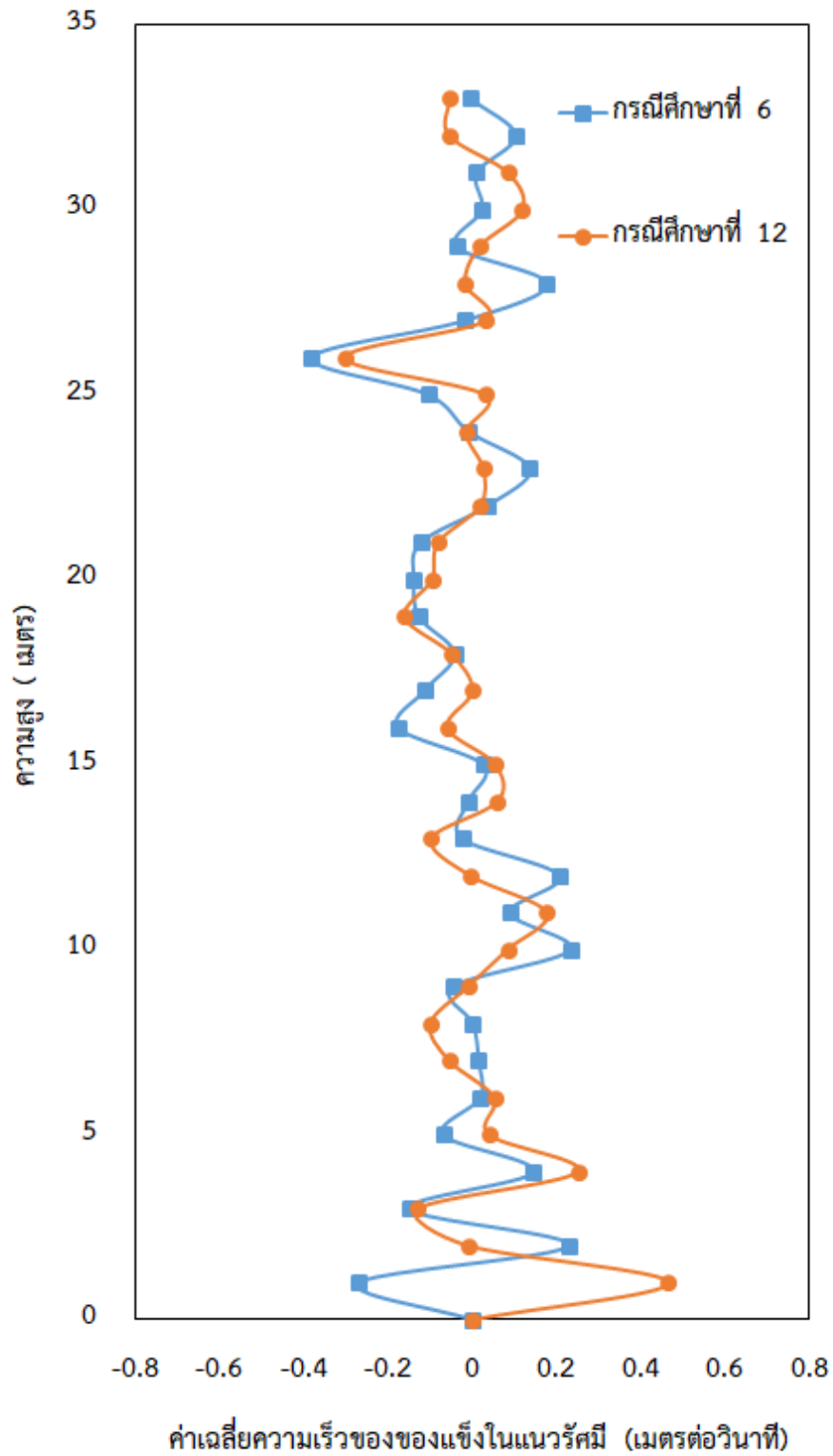
รูปที่ 4.15 แสดงผลค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกนของท่อโรเซออร์ที่ความสูงต่างๆ พบว่า ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกนของกรณีศึกษาที่ 12 ซึ่งดำเนินการด้วยคลื่นรูปไซน์ ที่ความถี่สูง มีค่าสม่ำเสมอใกล้เคียงกันตลอดแนวความสูงของท่อโรเซออร์ แสดงว่าอนุภาคของแข็งมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ส่งผลให้การสัมผัสกัน ระหว่างไอน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ทั่วทั้งท่อโรเซออร์ ปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันจึงเกิดขึ้นได้ดี ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าสูง แตกต่างกับ กรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งดำเนินการด้วยคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ต่ำ พบว่า ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่ ความสูง 25 ถึง 30 เมตร มีค่าสูง ซึ่งน่าจะมาจากอนุภาคของแข็งมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและรวมตัวกัน เป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ทำให้การสัมผัสกันของไอน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่ดี ซึ่งเป็นสาเหตุของค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต่ำลง โดยผลที่ได้สอดคล้องกับรูปคอนทัวร์ที่ 4.16 (ข) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคของแข็งภายในท่อโรเซออร์



รูปที่ 4. 16 คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน (ก) กรณีศึกษาที่ 12 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 6 ที่ความสูงของท่อโรเซออร์ 25 ถึง 30 เมตร

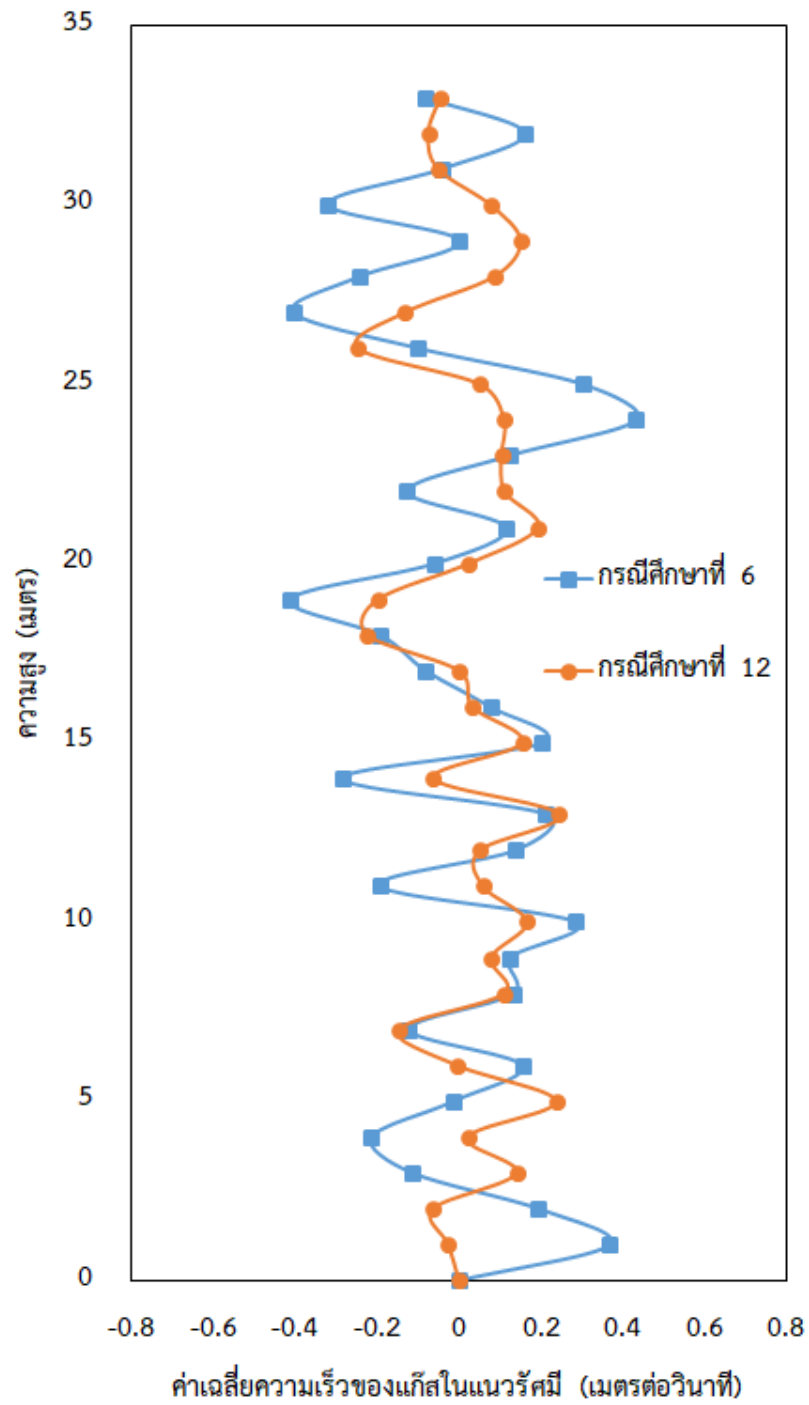


รูปที่ 4. 17 ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวนอนกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ในทิศทาง

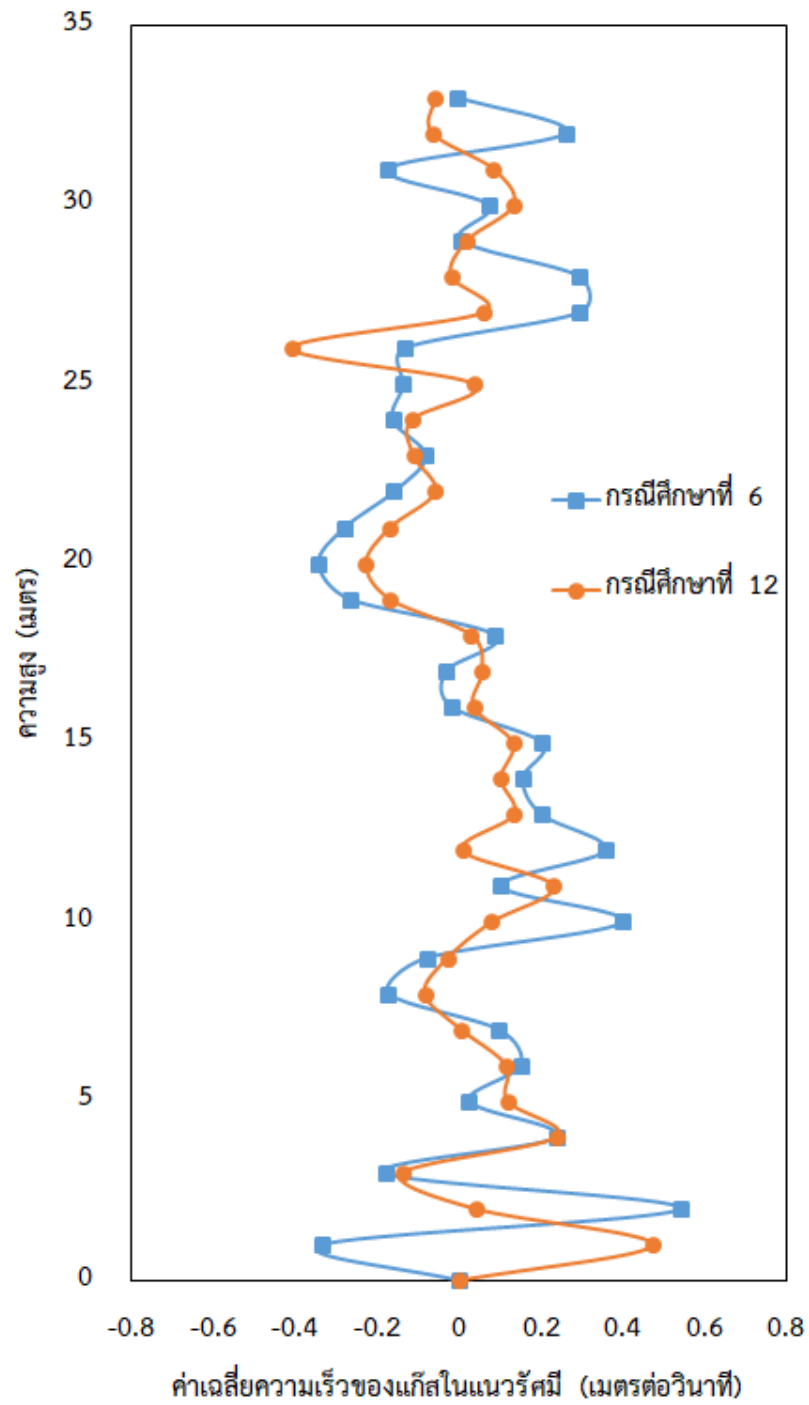


รูปที่ 4. 18 ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ในทิศทาง

รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีของท่อโรเตอร์ที่ ความสูงต่างๆ ในทิศทาง x และทิศทาง z พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีของทุก ทัศนศึกษาที่ทั้งเครื่องหมายบวกและเครื่องหมายลบ โดยค่าความเร็วที่เป็นบวก (+) หมายถึง ของแข็ง มีการเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา และ ค่าความเร็วที่เป็นลบ (-) หมายถึง ของแข็งมีการเคลื่อนที่ ไป ทางด้านซ้าย จะเห็นได้ว่าการทัศนศึกษาที่ 6 ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีมีลักษณะไม่ สมมาตร แสดงว่าของแข็งมีพฤติกรรมที่จะเคลื่อนที่เข้าหาผนังท่อ และพบว่า ความเร็วในแนวรัศมีของ ของแข็งในหลายช่วงมีเฉพาะค่าความเร็วที่เป็นบวกและลบอย่างเดียวซึ่งแสดงว่าของแข็งเคลื่อนที่ ทิศทางเดียว ทำให้อุณหภูมิของแข็งมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่ง สาเหตุเกิดจากการดำเนินการด้วยคลื่นรูปสี่เหลี่ยมค่าความเร็วที่เวลาใดเวลาหนึ่งของแก๊สในระบบจะ มีค่าคงที่ เป็นผลทำให้การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นไม่ดี ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างไอน้ำมันและ ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อย ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงต่ำ ส่วนค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีทัศนศึกษาที่ 12 พบว่า ค่าเฉลี่ย ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าความเร็วที่เป็นทั้งบวกและลบสลับกันไปอย่างต่อเนื่อง แสดงว่า ของแข็งวิ่งเข้าหากันที่กลางท่อ ซึ่งการวิ่งเข้าหากันของของแข็งภายในท่อโรเตอร์จะทำให้เกิดการผสม ในแนวรัศมีมากขึ้น และลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคของแข็ง ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นผล จากการดำเนินการด้วยคลื่นรูปไซน์ซึ่งค่าความเร็วจะค่อยๆลด และเพิ่มขึ้นตามเฟสการเคลื่อนที่อย่าง ต่อเนื่อง ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงสูง



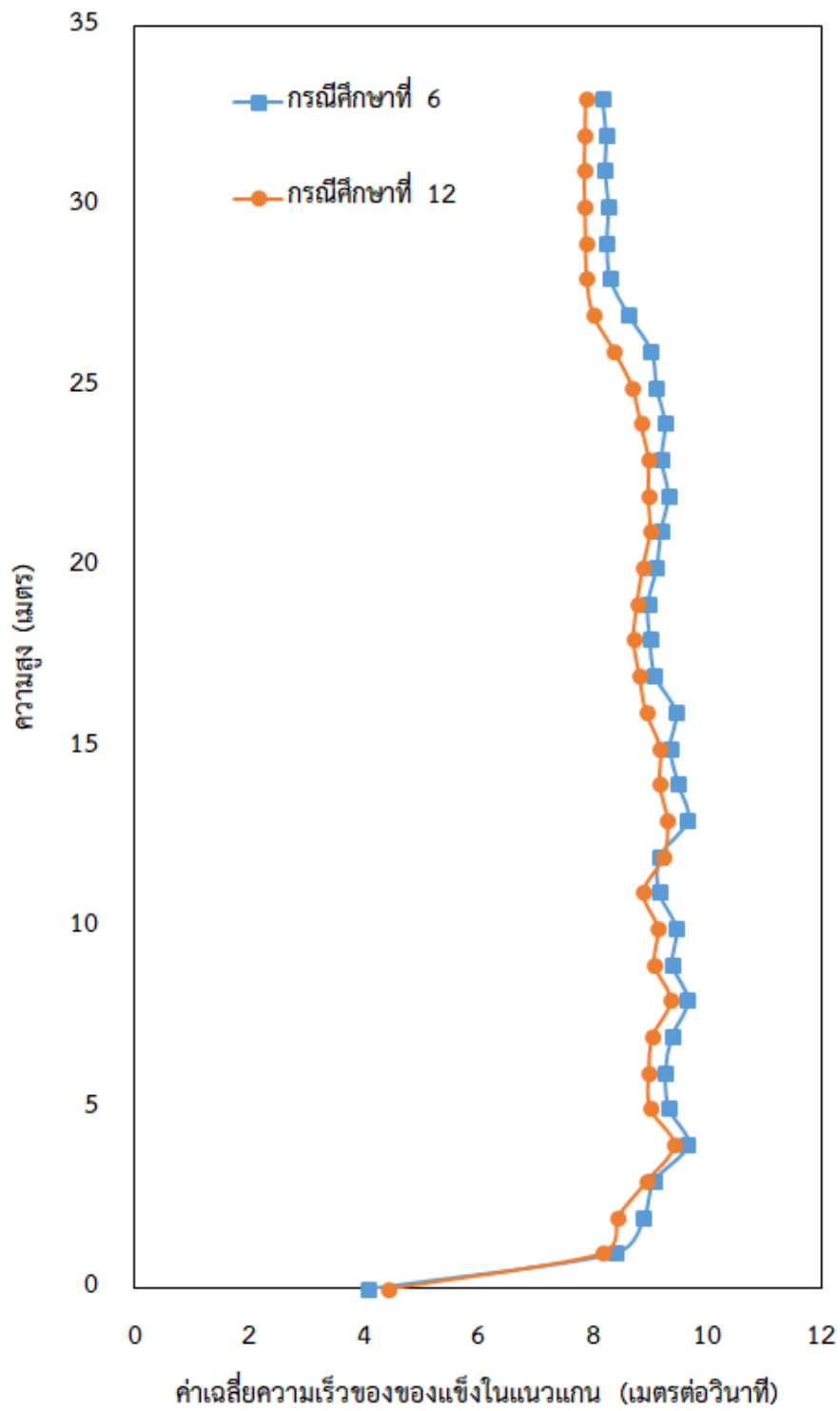
รูปที่ 4. 19 ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวรัศมีกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ในทิศทาง x



รูปที่ 4. 20 ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวรัศมีกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12 ในทิศทาง z

รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอนของท่อโรเซออร์ที่ความสูงต่างๆ ในทิศทาง x และทิศทาง z พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอนมีค่ากว้างสูงกว่าค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอนของแก๊สในแนวนอน เนื่องจากแก๊สเป็นตัวพาของแก๊สเคลื่อนที่ ซึ่งค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอนของทุกกรณีศึกษามีทั้งเครื่องหมายบวกและเครื่องหมายลบ โดยค่าความเร็วที่เป็นบวก (+) หมายถึง แก๊สมีการเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา และ ค่าความเร็วที่เป็นลบ (-) หมายถึง แก๊สมีการเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย จะเห็นได้ว่ากรณีศึกษาที่ 6 ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอนมีลักษณะไม่สมมาตร แสดงว่าแก๊สมีพฤติกรรมที่จะเคลื่อนที่เข้าหาผนังท่อ และพบว่าความเร็วในแนวนอนของแก๊สในหลายช่วงมีเฉพาะค่าความเร็วที่เป็นบวกและลบอย่างเดียวซึ่งแสดงว่าแก๊สเคลื่อนที่ทิศทางเดียว และเนื่องจากแก๊สเป็นตัวพาของแก๊สเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของแก๊สในลักษณะดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของแก๊สกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งเกิดจากการดำเนินการด้วยคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ค่าความเร็วที่เวลาใดเวลาหนึ่งของแก๊สในระบบจะมีค่าคงที่ เป็นผลทำให้การผสมในแนวนอนเกิดขึ้นไม่ดี ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างไอน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อย ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงต่ำ ส่วนค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอนกรณีศึกษาที่ 12 พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอนมีค่าความเร็วที่เป็นทั้งบวกและลบสลับกันไปอย่างต่อเนื่อง แสดงว่าแก๊สวิ่งเข้าหากันที่กลางท่อ ซึ่งการวิ่งเข้าหากันของแก๊สภายในท่อโรเซออร์จะทำให้เกิดการผสมในแนวนอนมากขึ้น และไปช่วยลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคของแก๊ส ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นผลจากการดำเนินการด้วยคลื่นรูปไซน์ซึ่งค่าความเร็วจะค่อยๆลด และเพิ่มขึ้นตามเฟสการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงสูง

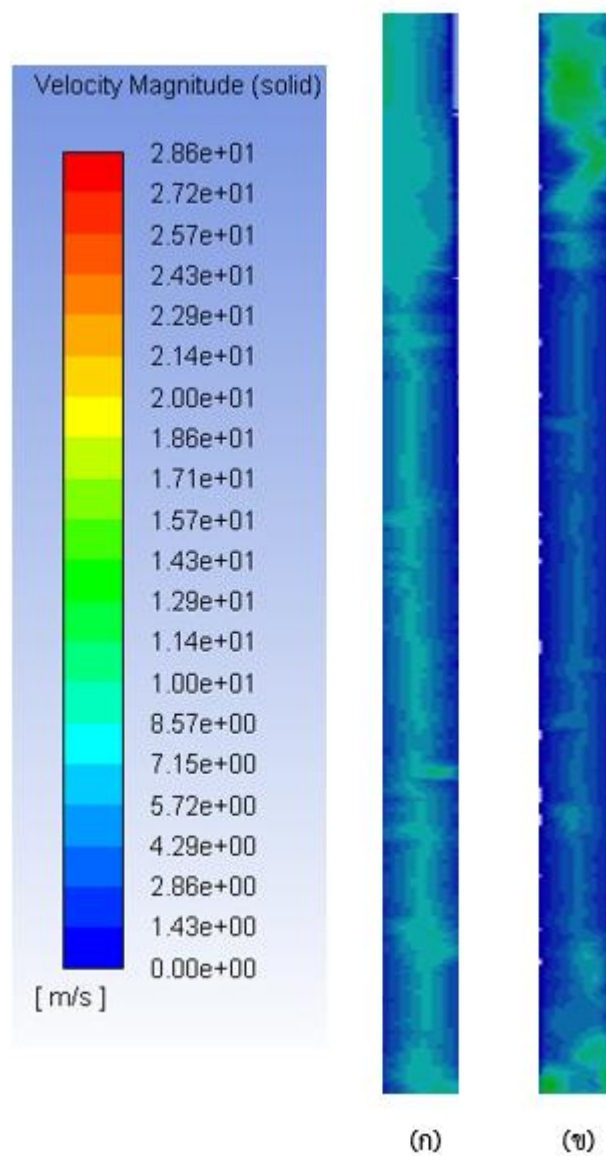
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สและค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอน พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สจะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวนอน เพราะแก๊สเป็นตัวพาในระบบฟลูอิดไดซ์เบด



รูปที่ 4. 21 ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกนกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12

รูปที่ 4.21 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกนของท่อไรเซอร์ที่ความสูงต่างๆ ที่ถูกป้อนเข้าด้วยความเร็วเฉลี่ยเท่ากันคือ 9 เมตรต่อวินาที พบว่า กรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งดำเนินการด้วยคลื่นรูปสี่เหลี่ยมให้ค่าความเร็ว ณ เวลาใดเวลาหนึ่งสูงทำให้มีค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกนสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 12 การที่ค่าความเร็ว ณ เวลาใดเวลาหนึ่งของของแข็งในแนวแกนสูงจะทำให้อนุภาคของของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์เร็ว เป็นการลดเวลาในการการสัมผัสกัน (Residence time) ของอนุภาคของแข็งและสารตั้งต้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต่ำลงในทางกลับกันถ้าดำเนินการด้วยคลื่นรูปไซน์ ค่าความเร็วของของแข็งจะเปลี่ยนแปลงตามเฟสการเคลื่อนที่ ทำให้อนุภาคของของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์ช้า เป็นการเพิ่มเวลาในการการสัมผัสกัน (Residence time) ของอนุภาคของแข็งและสารตั้งต้น การแตกตัวของไอน้ำมันจึงเกิดขึ้นได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับรูปคอนทัวร์ที่ 4.22 ซึ่งพบว่ากรณีศึกษาที่ 6 (ข) ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งที่ทางออกของท่อไรเซอร์มีค่าสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 12

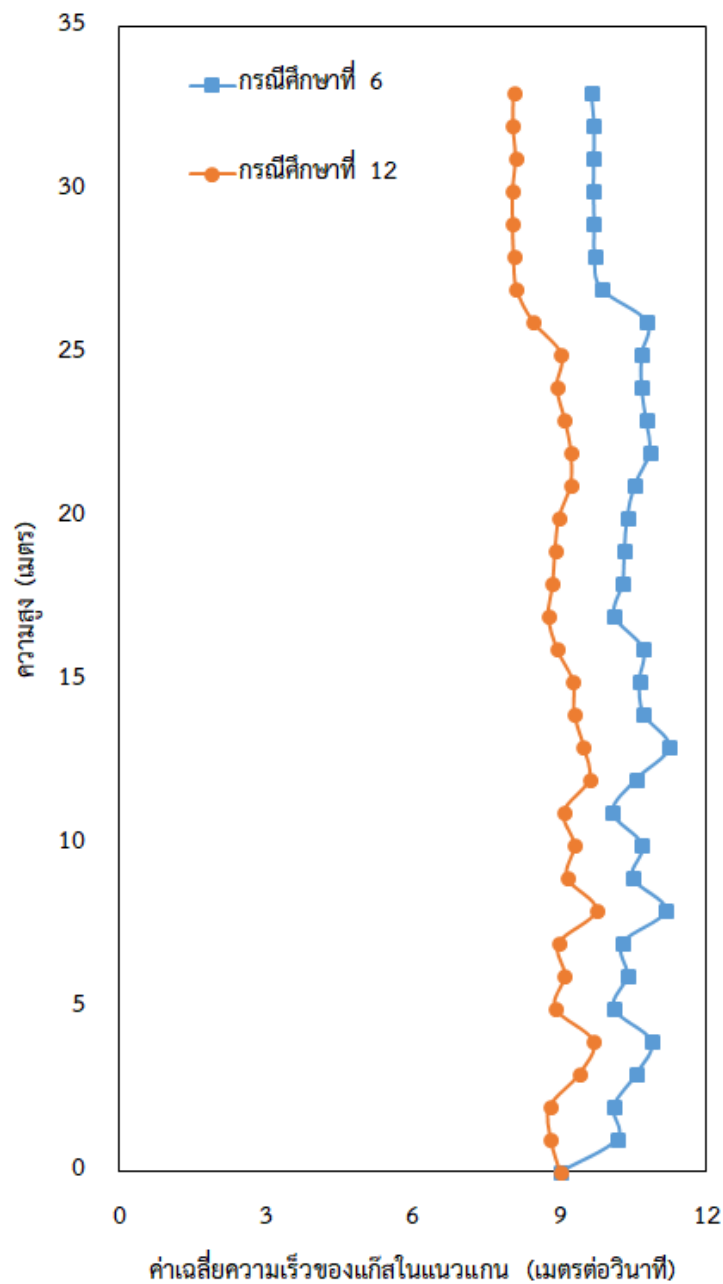




รูปที่ 4. 22 คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกน (ก) กรณีศึกษาที่ 12 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 20 วินาที

รูปที่ 4.22 แสดงคอนทัวร์ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกนของท่อโรเซออร์ที่ความสูงต่างๆ พบว่ารูปแบบการไหลเป็นฟลูอิดเบดแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed) และพบลักษณะการไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus) คือที่บริเวณกลางท่อโรเซออร์อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางและจะเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหล แต่ที่บริเวณผนังของท่อโรเซออร์อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วย

ความเร็วต่ำเนื่องจากเกิดการเสียดสีของอนุภาคของแข็งกับผนังทำให้สูญเสียความเร็วปริมาณของอนุภาคของแข็งจึงหนาแน่นและจะเคลื่อนที่ลงสวนทิศทางการไหลของของไหล และจากคอนทัวร์รูปที่ 4.22 (ข) พบว่าที่บริเวณทางออกของท่อโรเตอร์ความเร็วของของแข็งมีค่าสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่ของแข็งเคลื่อนที่หลุดออกจากท่อโรเตอร์ ซึ่งส่งผลให้กรณีศึกษาที่ 6 จะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้น้อยเนื่องจากเวลาในการสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งกับแก๊สลดลง



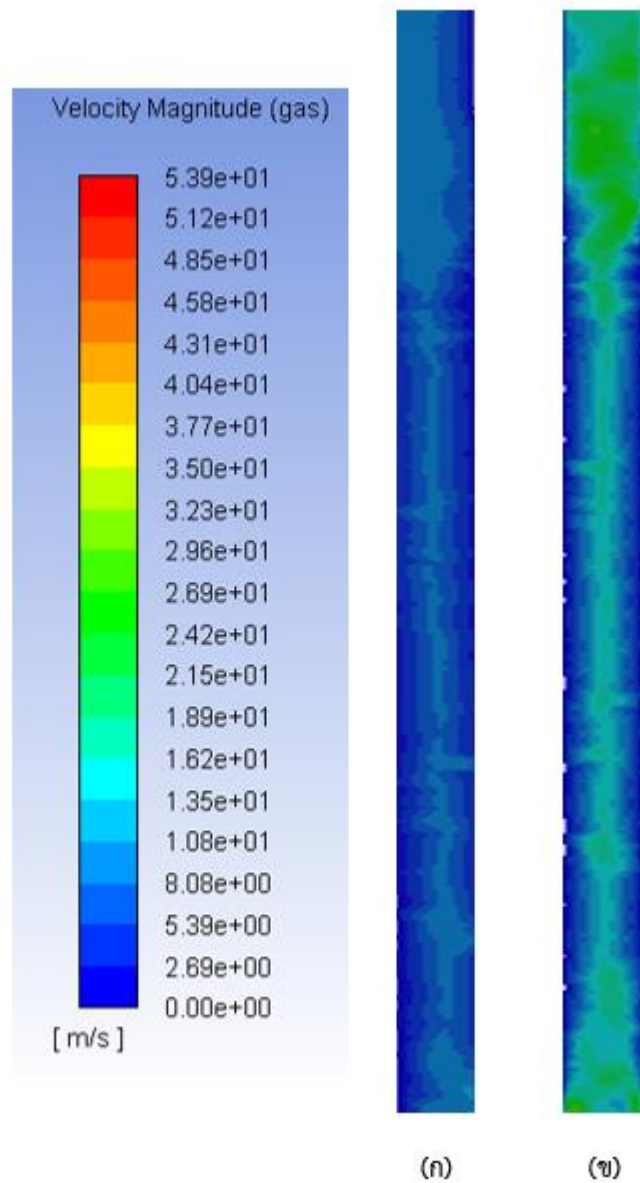
รูปที่ 4. 23 ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกนกรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 12

รูปที่ 4.23 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกนของท่อไรเซอร์ที่ความสูงต่างๆ ที่ถูกป้อนเข้าด้วยความเร็วเฉลี่ยเท่ากันคือ 9 เมตรต่อวินาที พบว่า กรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งดำเนินการด้วยคลื่นรูปสี่เหลี่ยมให้ค่าความเร็ว ณ เวลาใดเวลาหนึ่งสูงทำให้มีค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกนสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 12 โดยความเร็วเฉลี่ยของแก๊สในกรณีศึกษาที่ 6 เท่ากับ 10.35 เมตรต่อวินาที การที่ค่าความเร็ว ณ เวลาใดเวลาหนึ่งของแก๊สในแนวแกนสูงจะทำให้อนุภาคของของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์เร็วเพราะแก๊สเป็นตัวพา เป็นการลดเวลาในการการสัมผัสกัน (Residence time) ของอนุภาคของแข็งและสารตั้งต้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต่ำลง เมื่อทำการจำลองเพิ่มเติมดังแสดงผลในตารางที่ 4.7 พบว่า ถ้ากำหนดให้ความเร็วเฉลี่ยในการป้อนเข้าเท่ากันคือ 10.35 เมตรต่อวินาที ทั้งกรณีการไหลแบบคงที่และกรณีการไหลแบบพัลส์ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลแบบพัลส์กรณีศึกษาที่ 6 ที่มีการดำเนินการที่แอมพลิจูด 8 เมตร ความถี่ 0.3 เฮิรตซ์ รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด 1:1 มีค่าต่ำกว่ากรณีการไหลป้อนเข้าแบบคงที่ ซึ่งเป็นการยืนยันว่า สภาวะดำเนินการในกรณีศึกษาที่ 6 ลดเวลาในการสัมผัสกัน (Residence time) ของอนุภาคของแข็งและสารตั้งต้น ในทางกลับกันถ้าดำเนินการด้วยคลื่นรูปไซน์ ค่าความเร็วของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงตามเฟสการเคลื่อนที่ ทำให้อนุภาคของของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์ช้า เป็นการเพิ่มเวลาในการการสัมผัสกัน (Residence time) ของอนุภาคของแข็งและสารตั้งต้น การแตกตัวของไอน้ำมันจึงเกิดขึ้นได้ดี โดยจากตารางที่ 4.11 ซึ่งแสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลป้อนเข้าแบบคงที่ที่ความเร็ว 9 เมตรต่อวินาที และการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์กรณีศึกษาที่ 12 ที่สภาวะการดำเนินการ แอมพลิจูด 8 เมตร ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ รูปคลื่นแบบไซน์ ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด 1:0.5 และความเร็วเฉลี่ย 9 เมตรต่อวินาที พบว่ากรณีศึกษาที่ 12 ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่า เป็นการยืนยันว่าค่าตัวแปรดำเนินการดำเนินการที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 12 ส่งผลให้เวลาในการการสัมผัสกัน (Residence time) ของอนุภาคของแข็งและสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปคอนทัวร์ที่ 4.24 ซึ่งพบว่ากรณีศึกษาที่ 6 (ข) ค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งที่ทางออกของท่อไรเซอร์มีค่าสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 12 (ก)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สและค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนว แกน พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สจะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็ง เพราะแก๊สเป็นตัวพา ในระบบฟลูอิด์เบด

ตารางที่ 4. 7 ผลการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลป้อนเข้าแบบคงที่ที่ความเร็วเฉลี่ย 10.35 เมตรต่อวินาที กับการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์กรณีศึกษาที่ 6

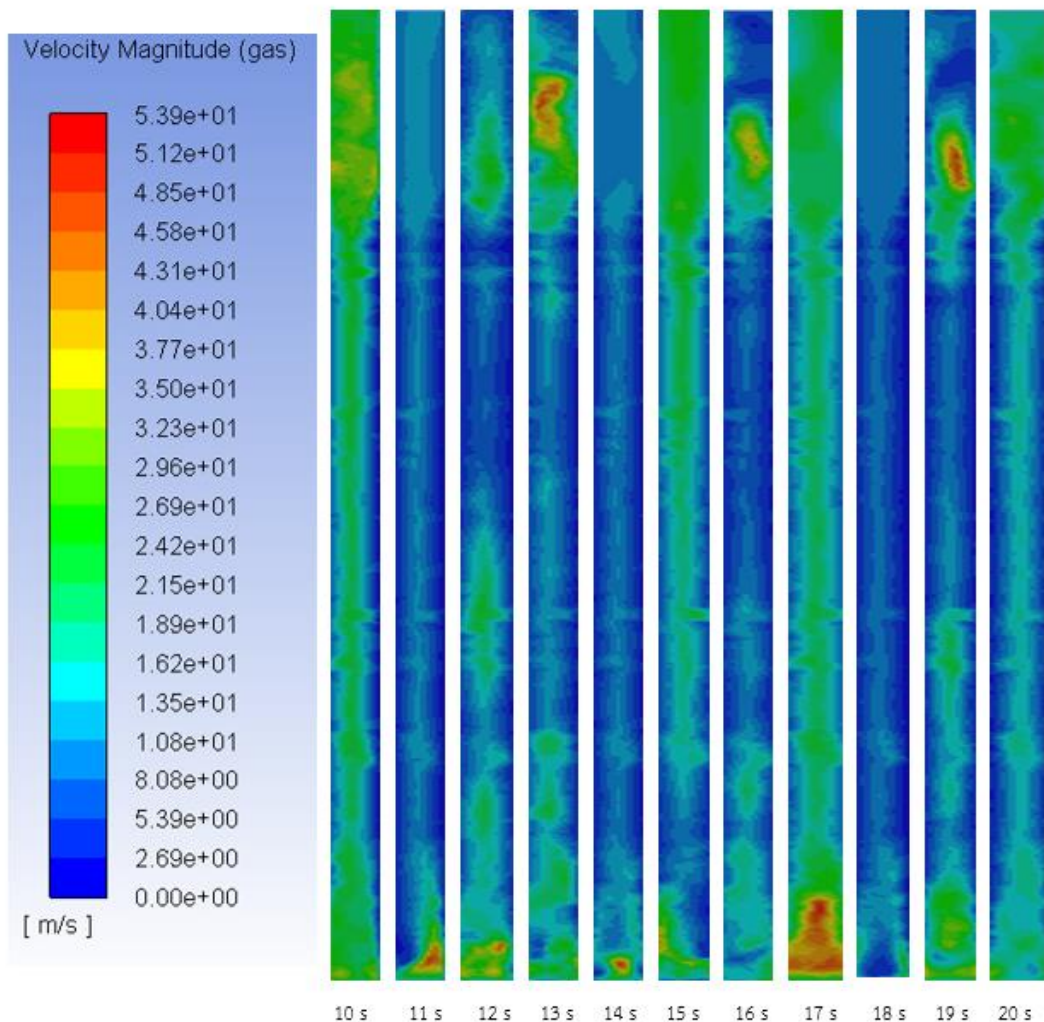
ความสูงของท่อไรเซอร์ (เมตร)	ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์กรณีการไหลป้อนเข้าแบบคงที่ที่ความเร็วเฉลี่ย 10.35 เมตรต่อวินาที	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์กรณีการไหลป้อนเข้าแบบคงที่ที่ความเร็วเฉลี่ย 10.35 เมตรต่อวินาที	ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์กรณีการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์กรณีศึกษาที่ 6	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์กรณีการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์กรณีศึกษาที่ 6
33	68.8542	45.9236	64.9415	42.3688



รูปที่ 4. 24 คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกน (ก) กรณีศึกษาที่ 12 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 20 วินาที

รูปที่ 4.24 แสดงคอนทัวร์ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกนของท่อโรเซออร์ที่ความสูงต่างๆ พบว่ารูปแบบการไหลเป็นฟลูอิดเบดแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed) และพบลักษณะการไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus) คือที่บริเวณกลางท่อโรเซออร์อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางและจะเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหล แต่ที่บริเวณผนังของท่อโรเซออร์อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำเนื่องจากเกิดการเสียดสีของอนุภาคของแข็งกับผนังทำให้สูญเสียความเร็วปริมาณของ

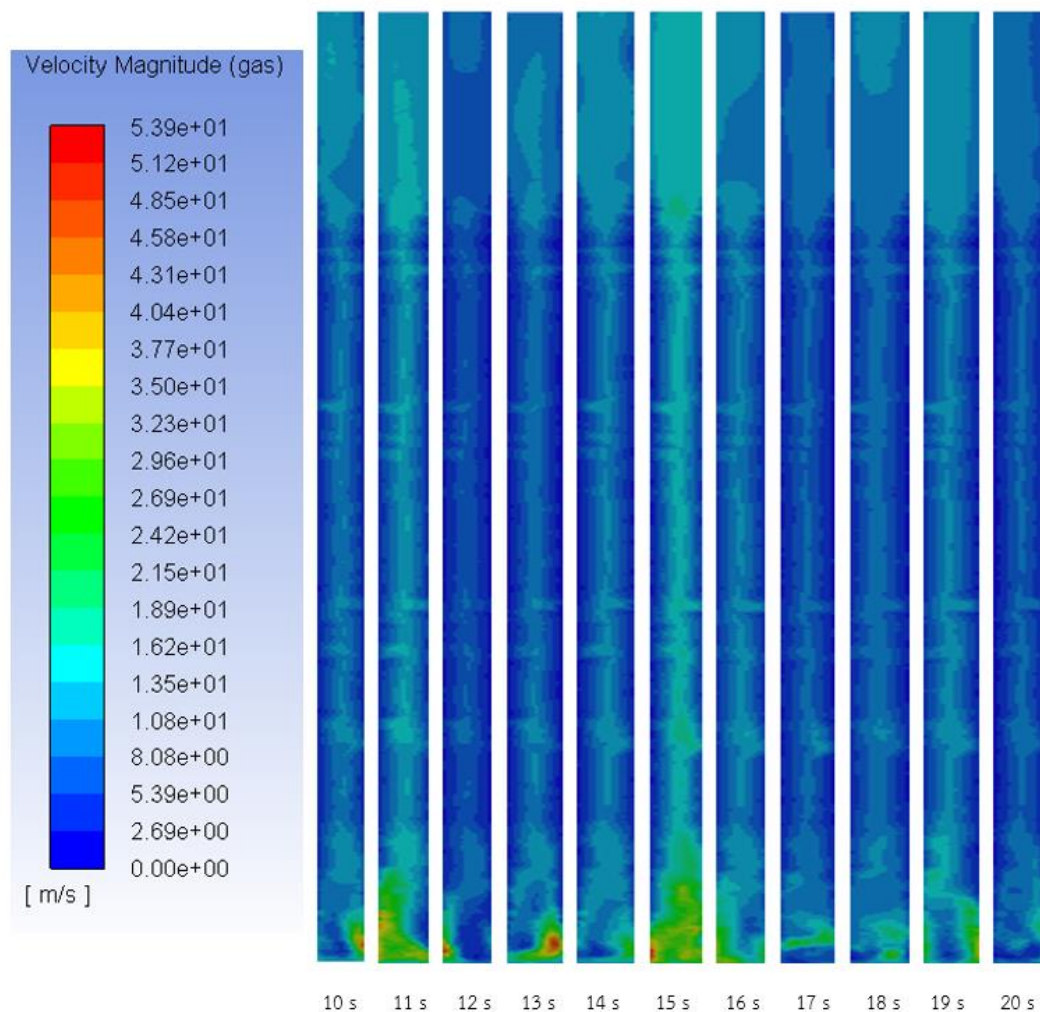
อนุภาคของแข็งจึงหนาแน่นและจะเคลื่อนที่ลงสวนทิศทางการไหลของของไหล และจากคอนทัวร์รูปที่ 4.24 (ข) พบว่าที่บริเวณทางออกของท่อโรเซอร์ความเร็วของแก๊สมีค่าสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่แก๊สเคลื่อนที่หลุดออกจากท่อโรเซอร์ ซึ่งส่งผลให้กรณีศึกษาที่ 6 จะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้น้อยเนื่องจากเวลาในการสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งกับแก๊สลดลง ส่วนรูปที่ 4.24 (ก) พบว่า ความเร็วของแก๊สที่ความสูงต่างๆของท่อโรเซอร์มีความเร็วใกล้เคียงกันแสดงถึงตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 12 ช่วยลดลักษณะการไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus) ทำให้การสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งกับแก๊สเกิดขึ้นได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วย



รูปที่ 4. 25 คอนทัวร์ค่าความเร็วของแก๊สในท่อโรเซอร์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที กรณีศึกษาที่ 6

รูปที่ 4.25 แสดงคอนทัวร์ค่าความเร็วของแก๊สในท่อโรเซอร์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที ของกรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งดำเนินการที่ค่าแอมพลิจูด 8 เมตร ความถี่ 0.3 เฮิรตซ์ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม และความ

สม่าเสมอของแอมพลิจูด 1:1 พบว่า ความเร็วของแก๊สมีค่าสูงที่ทางเข้าเนื่องจากอิทธิพลของบริเวณป้อนเข้า และแก๊สมีความเร็วไม่สม่าเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับที่เวลาต่างๆ และพบว่าทุก 1 วินาที ความเร็วของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการไหลด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะสูงและต่ำสลับกันไปมา ซึ่งลักษณะความเร็วของแก๊สที่มีความเร่งและความหน่วงดังกล่าวเป็นลักษณะที่เกิดจากผลของการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์โดยใช้คลื่นรูปสี่เหลี่ยม

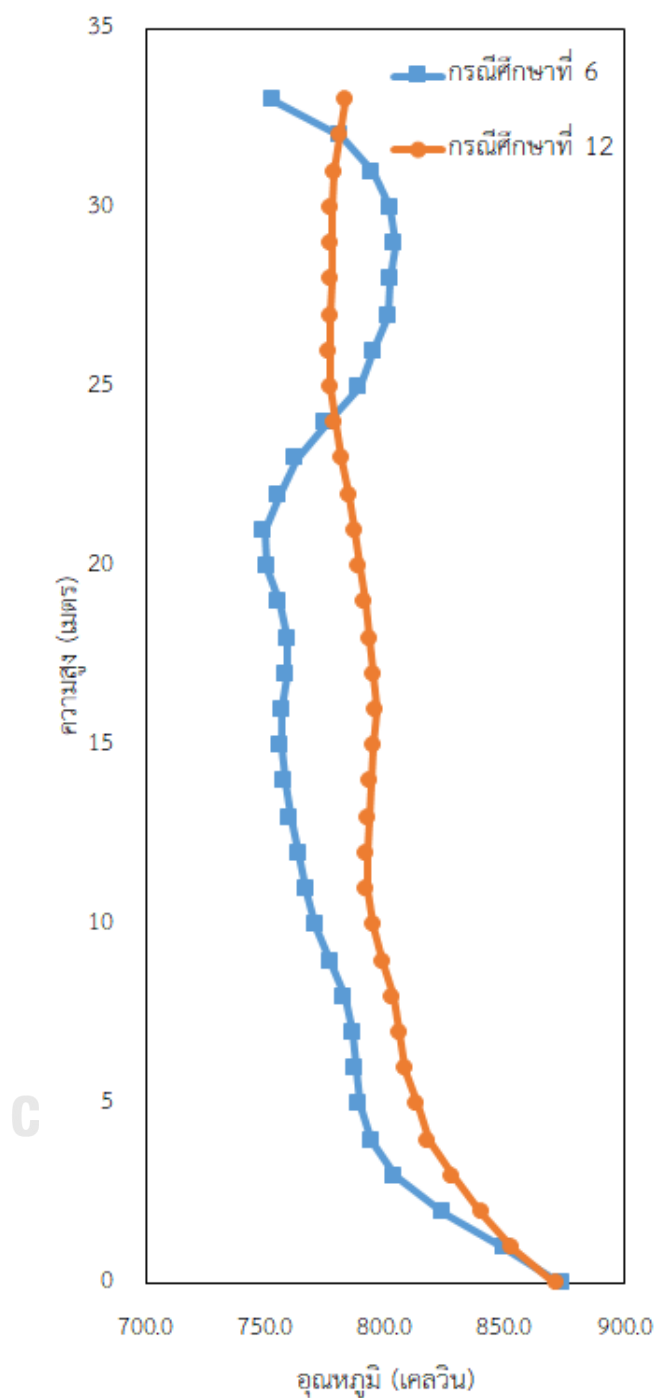


รูปที่ 4. 26 คอนทัวร์ค่าความเร็วของแก๊สในท่อโรเซอ์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที กรณีศึกษาที่ 12

รูปที่ 4.26 แสดงคอนทัวร์ค่าความเร็วของแก๊สในท่อโรเซอ์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที ของกรณีศึกษาที่ 12 ซึ่งดำเนินการที่ค่าแอมพลิจูด 8 เมตร ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ คลื่นรูปไซน์ และความสม่าเสมอของแอมพลิจูด 1:0.5 พบว่า ความเร็วของแก๊สมีค่าสูงที่ทางเข้าเนื่องจากอิทธิพลของบริเวณ

ป้อนเข้า และแก๊สมีความเร็วสม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาต่างๆ ที่ช่วงเวลา 10 ถึง 11 วินาที เป็นช่วงที่แก๊สมีค่าแอมพลิจูดสูงทำให้ความเร็วของแก๊สบริเวณกลางท่อไรเซอร์สูง ที่ช่วงเวลาที่ 12 ถึง 13 เป็นช่วงที่แก๊สเริ่มลดความเร็วจากการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดซึ่งขึ้นกับเฟสการเคลื่อนที่ ที่ช่วงเวลา 14 ถึง 15 ความเร็วของแก๊สกลับมาสูงอีกครั้งจากผลของค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นตามรอบการไหลของรูปคลื่นไซน์ ปรากฏการณ์เช่นนี้จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงวินาทีที่ 20 ซึ่งลักษณะความเร็วของแก๊สที่มีความเร่งและความหน่วงอย่างต่อเนื่องเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่เกิดจากผลของการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์โดยใช้คลื่นรูปไซน์

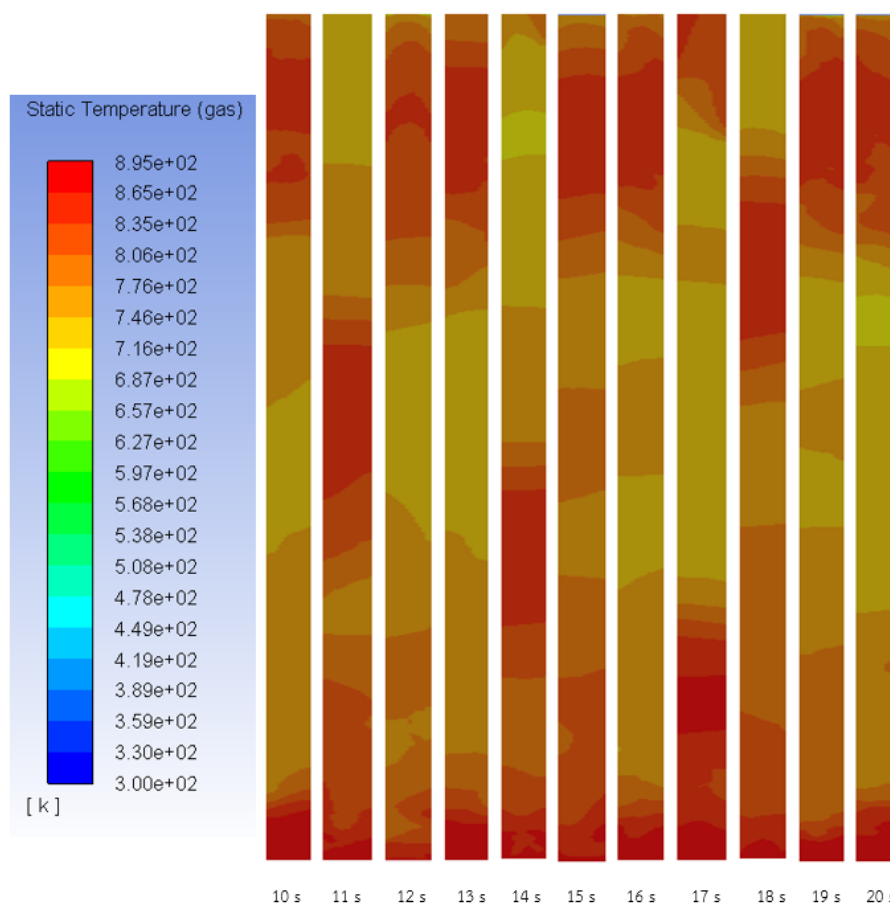




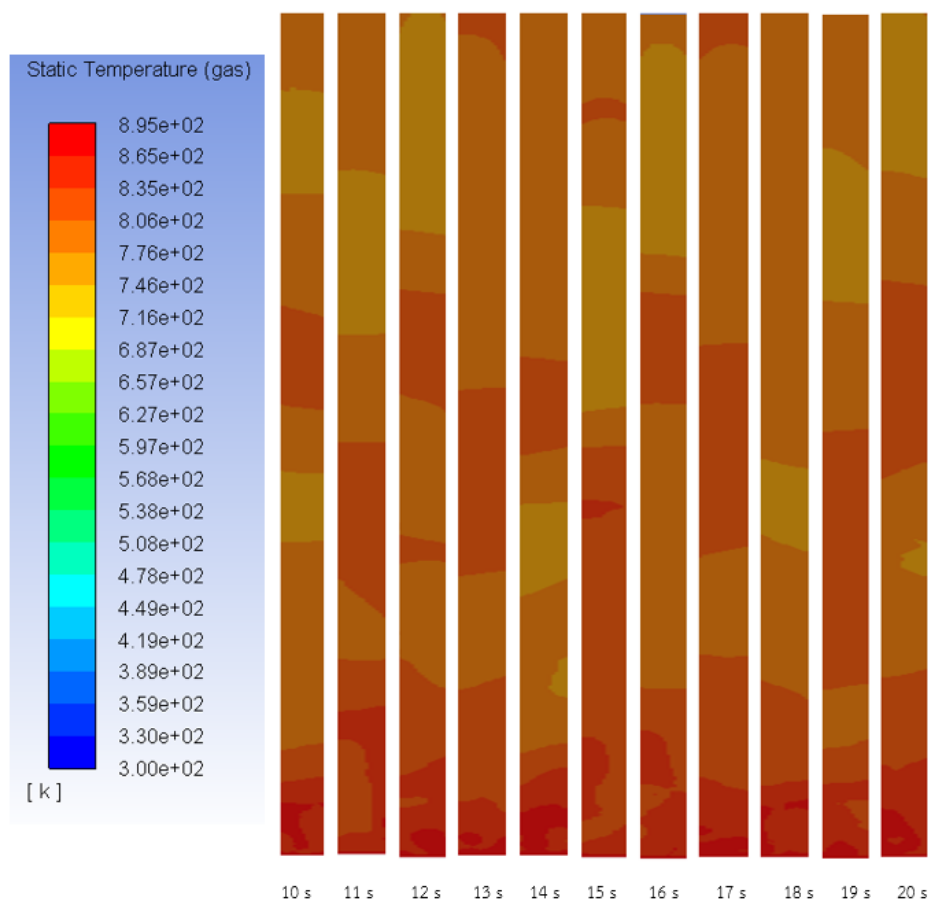
รูปที่ 4. 27 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแก๊สในแนวแกนกรณีสึกษาที่ 6 และกรณีสึกษาที่ 12

รูปที่ 4.27 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแก๊สในแนวแกนของท่อเซอร์ของกรณีสึกษาที่ 6 และกรณีสึกษาที่ 12 พบว่ากรณีสึกษาที่ 12 อุณหภูมิของแก๊สภายในระบบจะอยู่ในช่วง 777 ถึง 871 เคลวิน ส่วนกรณีสึกษาที่ 6 อุณหภูมิของแก๊สภายในระบบจะอยู่ในช่วง 749 ถึง 874 เคลวิน และจาก

กราฟจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแก๊สภายในท่อโรเซออร์ของกรณีศึกษาที่ 12 จะมีค่าสม่ำเสมอและคงที่มากกว่ากรณีศึกษาที่ 6 โดยที่บริเวณทางออกของท่อโรเซออร์ในกรณีศึกษาที่ 6 พบว่า อุณหภูมิของแก๊สมีค่าสูงซึ่งเกิดจากบริเวณดังกล่าวมีอนุภาคของแข็งสะสม ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับคอนทัวร์รูปที่ 4.28 ซึ่งพบว่าที่บริเวณทางออกของท่อโรเซออร์มีอุณหภูมิที่สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนทัวร์รูปที่ 4.29 จะเห็นว่า กรณีศึกษาที่ 12 คอนทัวร์อุณหภูมิของแก๊สมีความสม่ำเสมอมากกว่าซึ่งเป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี



รูปที่ 4. 28 คอนทัวร์ค่าอุณหภูมิของแก๊สภายในท่อโรเซออร์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที กรณีศึกษาที่ 6



รูปที่ 4. 29 คอนทัวร์ค่าอุณหภูมิของแก๊สภายในท่อโรเซอร์ที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที กรณีศึกษาที่ 12

4.3.3 ผลความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้น เป็นผลิตภัณฑ์ ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

ส่วนนี้จะแสดงผลของการศึกษากระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic relationship) โดยทำการจำลองเพิ่มอีก 4 กรณีศึกษา คือกรณีศึกษาที่ 18 ถึง กรณีศึกษาที่ 21 โดยนำผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีและอุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีการไหลแบบพัลส์ ที่แสดงในตารางที่ 4.8 ตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 ไปทำการวิเคราะห์ โดยกำหนดระดับการทดลองของตัวแปรดำเนินการที่ 3 ระดับ คือ -1 แสดงค่าระดับสูง 0 แสดงค่าระดับกลาง -1 แสดงค่าระดับต่ำ และตัว

แปรตอบสนอง คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

รูปที่ 4.30 แสดงผลความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่าตัวแปรดำเนินการโดยเฉพาะอย่างยิ่งความถี่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง ซึ่งถ้าเราใช้การวิเคราะห์โดยทั่วไปจะให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเท่านั้น แต่ในบางกระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง ผลของตัวแปรดำเนินการในแต่ละช่วงสามารถใช้วิเคราะห์ได้ครอบคลุมกว่า เช่น จากรูปที่ 4.27 ถ้าต้องการสภาวะการดำเนินการที่ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์สูง ค่าตัวแปรดำเนินการที่เหมาะสม คือ ใช้ค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 8 เมตร ความถี่เท่ากับ 0.5 เฮิร์ตซ์ รูปคลื่นแบบไซน์ และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดอัตราส่วน 1:0.5 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่า ช่วงของความถี่มีความสำคัญมากกับค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ โดยแบ่งออกเป็นสองช่วงคือถ้าเพิ่มความถี่จาก 0.3 เฮิร์ตซ์ เป็น 0.4 เฮิร์ตซ์ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์จะลดลง แต่หลังจากนั้นถ้าเพิ่มความถี่จาก 0.4 เฮิร์ตซ์เป็น 0.5 เฮิร์ตซ์ ค่าตัวแปรตอบสนองจะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และอีกตัวแปรที่น่าสนใจคือ แอมพลิจูด จากกราฟจะเห็นว่าการปรับค่าแอมพลิจูดส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองน้อยมาก แสดงว่าในการปฏิบัติการจริงอาจจะใช้แอมพลิจูดไม่ต่องสูงมากนักก็สามารถให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่สูงได้ ซึ่งสามารถลดต้นทุนหรือพลังงานที่ใช้ในการปฏิบัติการในอุตสาหกรรมได้

รูปที่ 4.31 แสดงผลความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ พบว่าผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับแสดงผลความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งความถี่ที่ค่าต่างๆส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองที่แตกต่างกัน ถ้าต้องการให้ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์มีค่าสูงต้องดำเนินการในช่วงความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ ถึง 0.5 เฮิร์ตซ์ และจากรูปจะเห็นว่าการใช้รูปคลื่นแบบไซน์ให้ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์สูงสุดและค่าความต่อเนื่องของแอมพลิจูดที่เหมาะสมคือ 1:0.5

รูปที่ 4.32 แสดงผลความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง พบว่าความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดเป็นตัวแปรดำเนินการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง กล่าวคือ ถ้าดำเนินการที่ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดเท่ากับ 1:1 แล้วลดความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดไปที่ 1:0.75 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าลดความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดลงไปที่ 1:0.5 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งจะมีค่าลดลง ซึ่งถ้าต้องการให้การผสมของ

อนุภาคของแข็งและของไหลภายในระบบเกิดขึ้นดีสามารถใช้ช่วงความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดในช่วง 1:0.75 ถึง 1:0.5

ตารางที่ 4. 8 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (ส่วนที่ศึกษาเพิ่มเติม)

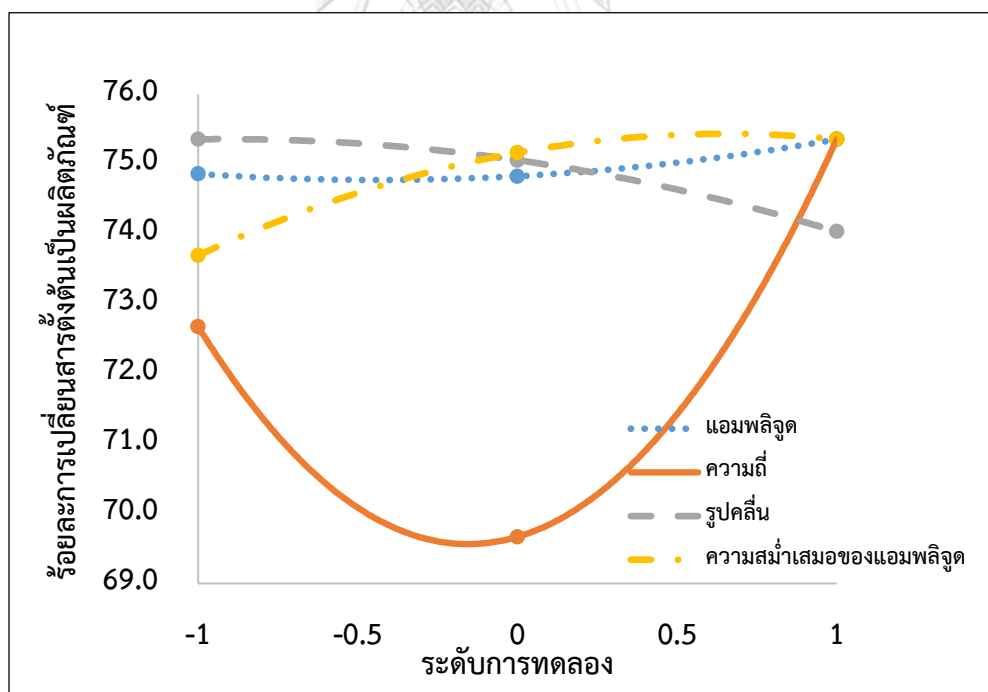
กรณีศึกษา	ตัวแปรดำเนินการ				ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion)
	แอมพลิจูด (เมตร) (A)	ความถี่ (เฮิรตซ์) (B)	รูปคลื่น (C)	ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D)	
18	7.5	0.5	ไซน์	1:0.5	75.3497 74.3112
19	8	0.4	ไซน์	1:0.5	68.9559 70.3803
20	7	0.5	สามเหลี่ยม	1:0.5	74.8085 75.3108
21	8	0.5	ไซน์	1:0.75	75.3556 74.9784

ตารางที่ 4. 9 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ (ส่วนที่ศึกษาเพิ่มเติม)

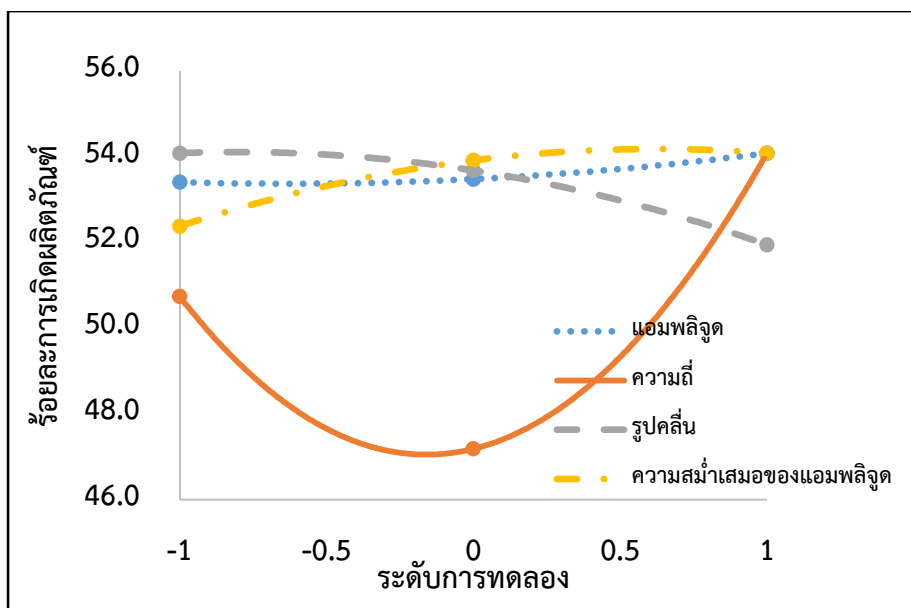
กรณีศึกษา	ตัวแปรดำเนินการ				ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ (%Yield)
	แอมพลิจูด (เมตร) (A)	ความถี่ (เฮิรตซ์) (B)	รูปคลื่น (C)	ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D)	
18	7.5	0.5	ไซน์	1:0.5	54.0493 52.9065
19	8	0.4	ไซน์	1:0.5	46.3807 47.9863
20	7	0.5	สามเหลี่ยม	1:0.5	53.4432 53.9203
21	8	0.5	ไซน์	1:0.75	54.1213 53.7117

ตารางที่ 4. 10 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง (ส่วนที่ศึกษาเพิ่มเติม)

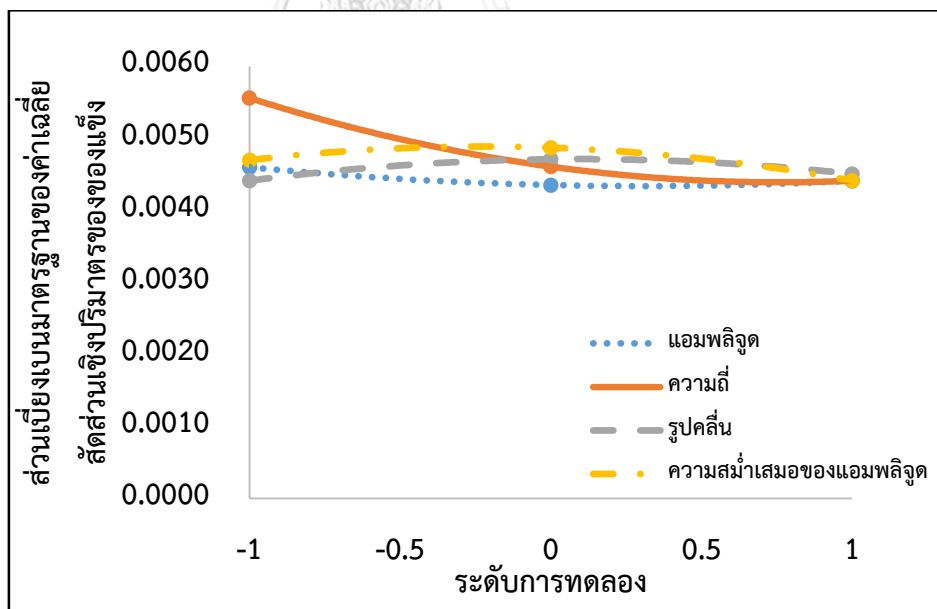
กรณีศึกษา	ตัวแปรดำเนินการ				ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง
	แอมพลิจูด (เมตร) (A)	ความถี่ (เฮิรตซ์) (B)	รูปคลื่น (C)	ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด (D)	
18	7.5	0.5	ไซน์	1:0.5	0.004457 0.004247
19	8	0.4	ไซน์	1:0.5	0.004640 0.004576
20	7	0.5	สามเหลี่ยม	1:0.5	0.004438 0.004983
21	8	0.5	ไซน์	1:0.75	0.005222 0.004519



รูปที่ 4. 30 ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4. 31 ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลผลิตกัญชง



รูปที่ 4. 32 ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

4.4 ผลเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลแบบพัลส์กับการไหลแบบคงที่ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน

ในส่วนนี้จะแสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการไหลแบบพัลส์กับการไหลแบบคงที่ โดยวัดประสิทธิภาพจากร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ จากตารางที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ พบว่า การไหลแบบพัลส์ของกรณีศึกษาที่ 12 ให้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์สูงกว่าการไหลแบบคงที่ โดยร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ของการไหลแบบคงที่เท่ากับ 73.0236 ส่วนร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ของการไหลแบบพัลส์เฉลี่ยเท่ากับ 75.3578 และ ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลแบบคงที่เท่ากับ 50.9905 ส่วนร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของการไหลแบบพัลส์เท่ากับ 54.0844

ตารางที่ 4. 11 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ระหว่างการไหลแบบคงที่และการไหลแบบพัลส์

ความสูงของท่อไรเซอร์ (เมตร)	ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์กรณีการไหลป้อนเข้าแบบคงที่ที่ความเร็วเฉลี่ย 9 เมตรต่อวินาที	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์กรณีการไหลแบบคงที่ที่ความเร็วเฉลี่ย 9 เมตรต่อวินาที	ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์กรณีการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์กรณีศึกษาที่ 12	ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์กรณีการไหลแบบพัลส์กรณีศึกษาที่ 12
33	73.0236	50.9905	75.3578	54.0844

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อคือ 1. การสร้างแบบจำลองการไหลแบบพัลส์ภายในท่อโรเซอ์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันที่เหมาะสม 2. การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเซอ์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน 3. การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อ อุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเซอ์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน 4. การศึกษาประสิทธิภาพของการไหลแบบพัลส์เทียบกับการไหลแบบคงที่

5.1.1 การสร้างแบบจำลองการไหลแบบพัลส์ภายในท่อโรเซอ์ของเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน

ในการสร้างแบบจำลองการไหลแบบพัลส์โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้น จะต้องหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมก่อนที่จะนำมาศึกษา โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นจะต้องผ่านการหาขนาดของเซลล์คำนวณที่เหมาะสม และเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสม จากผลการจำลอง พบว่า ขนาดของเซลล์การคำนวณที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้มีขนาด 20,000 เซลล์ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวอยู่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 10 ถึง 20 วินาที หลังจากนั้นนำผลการจำลองที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Shah และ Utikar โดยใช้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นตัวเปรียบเทียบ พบว่า แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมและให้ผลการจำลองที่แม่นยำ สามารถนำไปใช้จำลองการไหลแบบพัลส์ภายในท่อโรเซอ์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมันได้

5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อโรเซอ์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน

ในส่วนแรกจะกล่าวถึงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ โดยจากผลการจำลองตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปคลื่น และความ

สม่าเสมอของแอมพลิจูด ที่มีต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล พบว่า กรณีศึกษาที่ 12 ที่ใช้ค่าความถี่ 0.5 เฮิร์ตซ์ แอมพลิจูด 8 เมตร คลื่นรูปไซน์ และความสม่าเสมอของแอมพลิจูด 1:0.5 ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์สูงสุด และกรณีศึกษาที่ 6 ที่ใช้ค่าความถี่ 0.3 เฮิร์ตซ์ แอมพลิจูด 8 เมตร คลื่นรูปสี่เหลี่ยม และความสม่าเสมอของแอมพลิจูด 1:1 ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลของตัวแปรหลัก คือ ความถี่ รูปคลื่น และอันตรกิริยาระหว่างความถี่กับรูปคลื่น มีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยความถี่ให้ผลต่อค่าตอบสนองเชิงบวก แต่รูปคลื่นให้ผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ได้แบบจำลองการถดถอยซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริง และจากกราฟพื้นผิวตอบสนอง พบว่า ถ้าต้องการให้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์มีค่าสูงที่สุด จะต้องกำหนดตัวแปรดำเนินการความถี่ให้มีค่าสูง และรูปคลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์

และผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะถ้าสารตั้งต้นสามารถเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากโอกาสที่จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่สนใจคือ แก๊สโซลีน ก็จะมาตามไปด้วย โดยจากผลการจำลองตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปคลื่น และความสม่าเสมอของแอมพลิจูด ที่มีต่อปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล พบว่า กรณีศึกษาที่ 12 ที่ใช้ค่าความถี่ 0.5 เฮิร์ตซ์ แอมพลิจูด 8 เมตร คลื่นรูปไซน์ และความสม่าเสมอของแอมพลิจูด 1:0.5 ได้ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์สูงสุด และกรณีศึกษาที่ 6 ที่ใช้ค่าความถี่ 0.3 เฮิร์ตซ์ แอมพลิจูด 8 เมตร คลื่นรูปสี่เหลี่ยม และความสม่าเสมอของแอมพลิจูด 1:1 ได้ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลของตัวแปรหลัก คือ ความถี่ รูปคลื่น และอันตรกิริยาระหว่างความถี่กับรูปคลื่น มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยความถี่ให้ผลต่อค่าตอบสนองเชิงบวก แต่รูปคลื่นให้ผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ได้แบบจำลองการถดถอยซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริง และจากกราฟพื้นผิวตอบสนอง พบว่า ถ้าต้องการให้ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์มีค่าสูงที่สุด จะต้องกำหนดตัวแปรดำเนินการความถี่ให้มีค่าสูง และรูปคลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์

5.1.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน

จากผลการจำลองตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด รูปคลื่น และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับการแตกตัวของ ไอน้ำมัน ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล พบว่า กรณีศึกษาที่ 12 ที่ใช้ค่าความถี่ 0.5 เฮิร์ตซ์ แอมพลิจูด 8 เมตร คลื่นรูปไซน์ และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด 1:0.5 ได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลของตัวแปรหลัก คือ ความถี่ รูปคลื่น ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด และอันตรกิริยาระหว่างรูปคลื่นกับความสม่ำเสมอของแอมพลิจูด มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งอย่างมีนัยสำคัญ โดยความถี่และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดให้ผลต่อค่าตอบสนองเชิงลบ ส่วนรูปคลื่นให้ผลต่อค่าตอบสนองเชิงบวก จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ได้แบบจำลองการถดถอยซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริง และจากกราฟพื้นผิวตอบสนอง พบว่า ถ้าต้องการให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งมีค่าต่ำที่สุด การดำเนินการที่ความถี่ 0.3 เฮิร์ตซ์ และ 0.5 เฮิร์ตซ์ จะต้องกำหนดตัวแปรดำเนินการรูปคลื่นให้มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ ความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดเท่ากับ 1:0.5

ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อปฏิกิริยาเคมี โดยกรณีศึกษาที่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งต่ำที่สุดจะให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ที่สูงที่สุด อันเป็นผลมาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งต่ำแสดงว่าการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งภายในท่อโรเซอร์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอซึ่งส่งผลดีต่อการผสมระหว่างของแข็งกับของไหล ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ป้อนเข้าไปภายในท่อโรเซอร์สัมผัสกับไอของน้ำมันและเกิดการแตกตัวได้ดี อีกทั้งอุทกพลศาสตร์ภายในท่อโรเซอร์เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเพิ่มความถี่ของการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ช่วยให้เกิดความปั่นป่วนภายในท่อโรเซอร์ ทำให้อนุภาคของแข็งและแก๊สมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น และการป้อนเข้าด้วยแอมพลิจูดที่ไม่สม่ำเสมอทำให้อนุภาคของแข็งและไอน้ำมันภายในท่อโรเซอร์เกิดการผสมได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงการไหลป้อนเข้าแบบคลื่นรูปไซน์ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคของแข็งมีความสม่ำเสมอ จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้ดี

5.1.4 การศึกษาประสิทธิภาพของการไหลแบบพัลส์เทียบกับการไหลแบบคงที่

จากผลการจำลองการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ภายในท่อโรเซอ์เทียบกับการไหลป้อนเข้าแบบคงที่ พบว่า อุทกพลศาสตร์ที่ต่างกันส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมีการแตกตัวของไอน้ำมันที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์ช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ มีสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมคือการป้อนเข้าแบบพัลส์ที่ความถี่สูง ใช้การไหลแบบคลื่นรูปไซน์ และความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีเพื่อศึกษาผลของการไหลป้อนเข้าแบบพัลส์เท่านั้น แต่ยังมี การไหลป้อนเข้าในลักษณะอื่นๆ อีกมากมายที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและทำให้ปฏิกิริยาเคมีการแตกตัวของไอน้ำมันภายในท่อโรเซอ์เกิดขึ้นได้ดี ในอนาคตจึงจำเป็นต้องศึกษาลักษณะการไหลรูปแบบต่างๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อนำผลไปใช้ในอุตสาหกรรมและเพิ่มข้อได้เปรียบทางการแข่งขันทางธุรกิจต่อไป

บรรณานุกรม

1. Devahastin, S., & Mujumdar, A. S., *Some hydrodynamic and mixing characteristics of a pulsed spouted bed dryer*. Powder Technology, 2001. 117: p. 189-197.
2. Akhavan, A., van Ommen, J. R., Nijenhuis, J., Wang, X. S., Coppens, M.-O., & Rhodes, M. J., *Improved drying in a pulsation-assisted fluidized bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008. 48: p. 302-309.
3. Bizhaem, H.K., & Tabrizi, H. B., *Experimental study on hydrodynamic characteristics of gas-solid pulsed fluidized bed*. Powder Technology, 2013. 237: p. 14-23.
4. Bizhaem, H.K., Tabrizi, H. B., *Investigating effect of pulsed flow on hydrodynamics of gas-solid fluidized bed using two-fluid model simulation and experiment*. Powder Technology 2017. 311: p. 328-340.
5. Ireland, E., Pitt, K., Smith, R., *A review of pulsed flow fluidisation; the effects of intermittent gas flow on fluidised gas-solid bed behaviour*. Powder Technology 2016. 292: p. 108-121.
6. Jia, D., Cathary, O., Peng, J., Bi, X., Lim, C., Sokhansanj, S., Liu, Y., Wang, R., Tsutsumi, A., *Fluidization and drying of biomass particles in a vibrating fluidized bed with pulsed gas flow*, 2015. 138: p. 471-482.
7. Shah, M.T., Utikar, *Effect of pulsating flow on gas-solid hydrodynamics in FCC riser*. Particuology 2017. 31: p. 25-34.
8. Limited, P.P.C., *Petrochemical Encyclopedia*. 2553.
9. Grace, J.R.a.H.B., *Introduction to circulating fluidized beds, in Circulating fluidized beds*. Springer, 1997: p. 1-20.
10. Kunii, D.a.O.L., *Circulating fluidized-bed reactors*. Chemical Engineering Science. 52(15): p. 2471-2482.
11. Bi, H.a.J.G., *Effect of measurement method on the velocities used to demarcate the onset of turbulent fluidization*. The Chemical Engineering 1995.
12. Basu P., F.S.A., *Circulating Fluidized Bed Boiler*. Butterworthh-Heineman, 1991.

13. Smolders K., a.B.J., *Gas Fluidized Beds Operating at High Velocities: A Critical Review of Occurring Regimes*. Powder Technology, 2001. 119: p. 269-291
14. Mastellone M.L., a.A.U., *The Effect of Particle Size and Density on Solids Distribution Along The Riser of a Circulating Fluidized Bed*. Chemical Engineering Science, 1999. 54: p. 5383-5391
15. Zamir, M., *The physics of pulsatile flow*. 2000, New York: Springer-Verlag.
16. Fung, Y.C., *Biomechanics: Circulation*. 1996, New York: Spring-Verlag.
17. Linke, W. 1953: ZVDI. 1179.
18. Patankar, S.V., *Numerical heat transfer and fluid flow*. 1980, New York: Hemisphere.
19. Saidi, M., Tabrizi, H. B., *Influences of the fluidizing and spouting pulsation on particle motion in spout-fluid beds*. Particuology, 2017. 36: p. 139-148.
20. Wu, K., Martin, L. D., *Pattern formation in pulsed gas-solid fluidized beds – The role of granular solid mechanics*. Chemical Engineering Journal 2017. 329: p. 4–14.
21. Chen, S., Fan, Y., Wang, W., Liu, L., Lu, C., *CFD optimization of feedstock injection angle in a FCC riser*. Chemical Engineering Science 2016. 153: p. 58–74.
22. Nayak, S.V., Joshi, S. L., & Ranade, V. V., *Modeling of vaporization and cracking of liquid oil injected in a gas–solid riser*. Chemical Engineering Science, 2005. 60: p. 6049–6066.
23. Ahsan, M., *Prediction of gasoline yield in a fluid catalytic cracking (FCC) riser using k-epsilon turbulence and 4-lump kinetic models: A computational fluid dynamics (CFD) approach*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 2013. 27: p. 130–136.
24. Lee, L.S., Chen, Y. W., Huang, T. N., & Pan, W. Y. , *Four-lump kinetic model for fluid catalytic cracking process*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1989. 67: p. 615–619.
25. Pitault, I., Forissier, M., & Bernard, J.-R., *Détermination de constantes cinétiques du craquage catalytique par la modélisation du test de microactivité (MAT)*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1995. 73: p. 498–504.

26. Han, I.-S., & Chung, C.-B., *Dynamic modeling and simulation of a fluidizedcatalytic cracking process. Part II: Property estimation and simulation.* Chemical Engineering Science, 2001b. 56: p. 1973-1990.
27. Han, I.-S., & Chung, C.-B., *Dynamic modeling and simulation of a fluidizedcatalytic cracking process. Part I: Process modeling.* Chemical Engineering Science, 2001a. 56: p. 1951-1971.



ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ และ การคำนวณค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์หลักที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ แก๊สโซลีน ซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีมูลค่าทางการตลาดและมีความต้องการสูง ข้อมูลที่ได้จากการจำลองของโปรแกรม ANSYS FLUENT ได้มาในรูปแบบของความเข้มข้นของสารเคมีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีในหน่วยของโมลาร์ (M) คือ โมลต่อลิตร จึงต้องนำมาคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ จากสมการดังต่อไปนี้

การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้น (ไอน้ำมัน) เป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion)

$$\%Conversion = \frac{\text{Reactant in } \frac{(\text{mol})}{L} - \text{Reactant out } \frac{(\text{mol})}{L}}{\text{Reactant in } \frac{(\text{mol})}{L}} \times 100$$

เมื่อ

%Conversion คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์

Reactant in คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นขาเข้า (โมลต่อลิตร)

Reactant out คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นขาออก (โมลต่อลิตร)

การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)

$$\%Selectivity = \frac{\text{Product A } \frac{(\text{mol})}{L}}{\text{Total product } \frac{(\text{mol})}{L}} \times 100$$

เมื่อ

%Selectivity A คือ ค่าร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ A (แก๊สโซลีน)

Product A คือ ผลิตภัณฑ์ A ที่เกิดขึ้น (โมลต่อลิตร)

Total product คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด (โมลต่อลิตร)

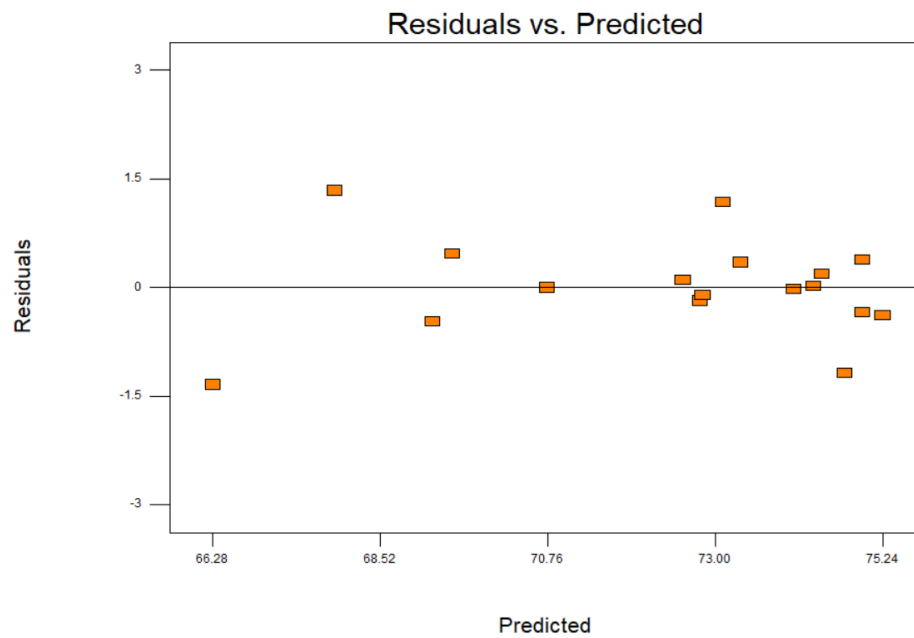
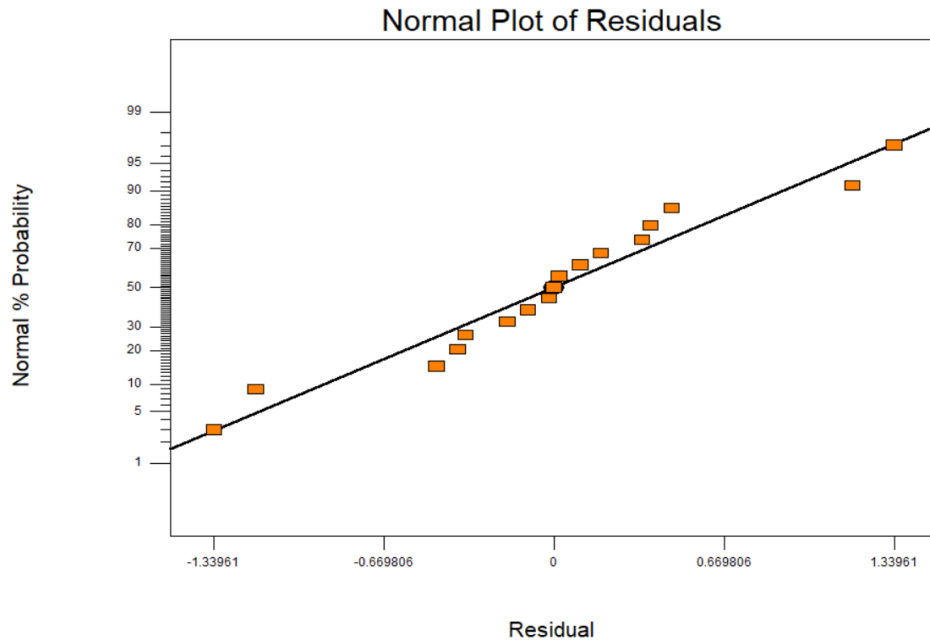
การคำนวณค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ (%Yield)

$$\%Yield A = \frac{\%Conversion \times \%Selectivity A}{100}$$

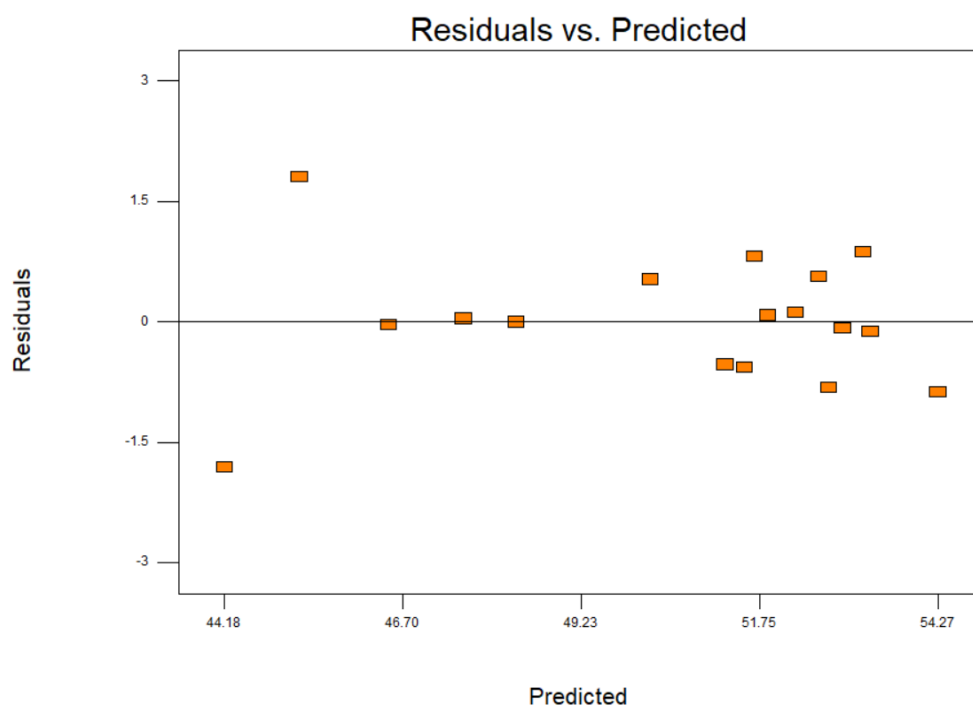
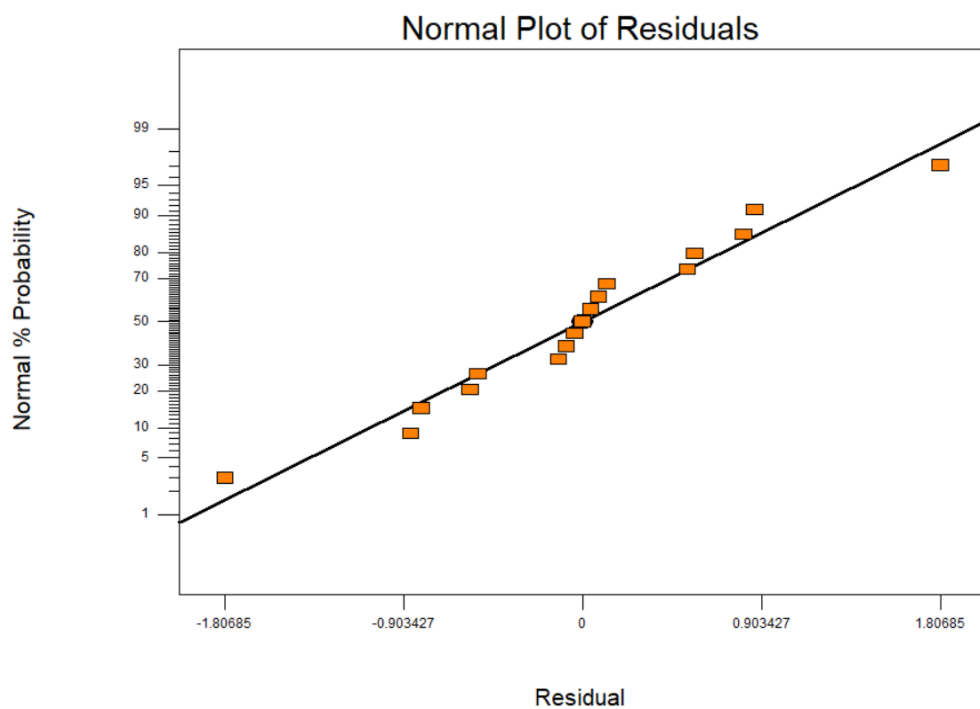
เมื่อ

%Yield A คือ ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ A (แก๊สโซลีน)

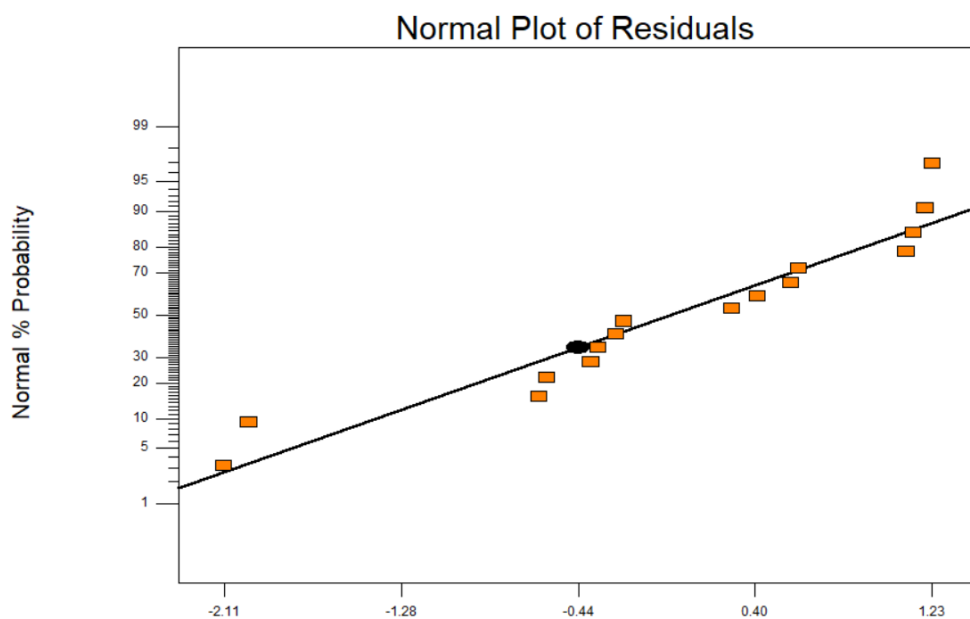
ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ทางสถิติ



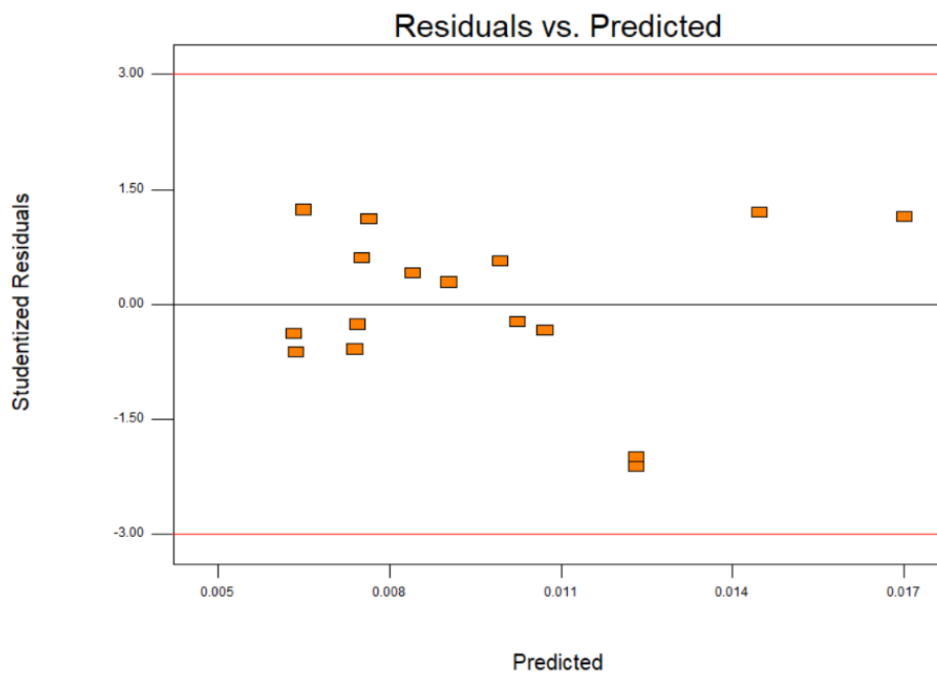
กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.1



กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.3



Studentized Residuals



กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.5

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	หาญณรงค์ ชิตเจริญอยู่
วัน เดือน ปี เกิด	22 พฤศจิกายน 2532
สถานที่เกิด	จันทบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเคมี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และเข้าศึกษาในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ภาคนอกเวลาราชการ ในปี พ.ศ. 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	55/12 หมู่ 6 ตำบลตาขัน อำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง รหัสไปรษณีย์ 21120
ผลงานตีพิมพ์	เข้าร่วมงานและนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมี ประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 ในบทความชื่อ "ผลของความถี่และแอม พลิจูดของการไหลปั่นเข้าแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีในไร เซอร์ ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน" ณ โรงแรม เอวัน เดอะ รอยัล ครุส พัทยา เมื่อวันที่ 8 ถึง 9 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561