

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของอุทกพลศาสตร์และปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็น  
โอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขึ้น



นายจักรพงษ์ ผู้พานิช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF HYDRODYNAMICS AND  
METHANOL TO OLEFINS REACTION IN STAGE FLUIDIZED BED REACTOR

Mr. Jakkrapong Phupanit



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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของอุทกพลศาสตร์และปฏิบัติการการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบขั้น

โดย

นายจักรพงษ์ ผู้พานิช

สาขาวิชา

ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดารา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

จักรพงษ์ ผู้พานิช : การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของอุทกพลศาสตร์และ  
 ปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้น  
 (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF HYDRODYNAMICS  
 AND METHANOL TO OLEFINS REACTION IN STAGE FLUIDIZED BED  
 REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่  
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์, 134 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้จำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์  
 ฟลูอิด์เบดแบบดั้งเดิม และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้น เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ และ  
 ปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ โดยใช้วิธีออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัย  
 ต่างๆ ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ และปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ จากการจำลองพบว่า  
 จำนวนชั้น และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบน  
 มาตรฐานสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวนอน จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และอุณหภูมิของ  
 ผงท่อไรเซอร์เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง จำนวนชั้นของท่อ  
 ไรเซอร์ และอันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์  
 เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแนวนอน อุณหภูมิของผงท่อ  
 ไรเซอร์ อันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้น และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ และอันตรกิริยา  
 ระหว่างความหนาของชั้น และอุณหภูมิของผงท่อไรเซอร์เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยเวลาของ  
 ของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์ พลั๊กซ์โดยมวลส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของของแข็ง พื้นที่เปิดของชั้น  
 ส่งผลต่อการกระจายตัวของของแข็งเพียงเล็กน้อย ร้อยละการเปลี่ยนเมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่า  
 ร้อยละ 100 ในทุกกรณีศึกษา จำนวนชั้น และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ส่งผลต่อปฏิริยา  
 การเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ โดยมีร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบาสูง  
 ที่สุด คือ ร้อยละ 74.81 โดยแบ่งเป็นเอทิลีน และโพรพิลีน คือ ร้อยละ 29.31 และ 45.50  
 ตามลำดับ

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ	ลายมือชื่อนิสิต	.....
	เมอร์	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	.....
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	.....

# # 5772401923 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: STAGE FLUIDIZED BED / METHANOL TO OLEFINS / CFD SIMULATION

JAKKRAPONG PHUPANIT: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS  
SIMULATION OF HYDRODYNAMICS AND METHANOL TO OLEFINS  
REACTION IN STAGE FLUIDIZED BED REACTOR. ADVISOR: ASSOC. PROF.  
DR. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, CO-ADVISOR: PROF. DR. PORNPOTE  
PIUMSOMBOON, 134 pp.

In this research, the risers of a conventional fluidized bed reactor and a stage fluidized bed reactor were simulated to study hydrodynamics and methanol to olefins reaction by using computational fluid dynamics simulation and to examine factor effects by using design of experimental method. The results showed that stage and thickness of stage of risers were the parameters that affected standard deviation of solid volume fraction in radial direction. Stage and temperature of the risers affected on average solid volume fraction. Standard deviation of gas temperature in radial direction was affected by stage of the risers and interaction between stage and thickness of stage while temperature in the risers, interaction between stage and thickness of stage and interaction between thickness of stage and temperature in the risers affected on average holding time of solid particle in the riser. Mass flux affected density of solid particle and stage opening area slightly affected solid particle distribution. All the case studies showed complete conversion of methanol. Stage and thickness of stage were the parameters that affected methanol to olefins reaction. The yield and selectivity of light olefins were 74.81% which can be split into 29.31% ethylene and 45.50% propylene.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Academic Year: 2015

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของอุทกพลศาสตร์ และ ปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบขั้นฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลาย ๆ ฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ คำแนะนำด้านวิชาการและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้ สมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช ประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คุณชลาธารา และ ดร. บุญรอด สัจ จกุลนุกิจ ที่กรุณาเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ทูตการศึกษาจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในสาขาวิชาปิโตรเคมี และ วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในสาขาวิชาปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด(มหาชน) ที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษาและ เป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณพระคุณบิดา มารดา ผู้อยู่เบื้องหลังที่เป็นกำลังใจ ให้ คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นแรงผลักดันจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฅ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย .....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	4
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย.....	5
บทที่ 2.....	7
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน.....	7
2.1.1 ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ แบบเบดนิ่ง.....	7

2.1.2 ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง .....	8
2.1.3 ช่วงการไหล (Regime) .....	10
2.1.3.1 เบดนิ่ง (Packed bed หรือ Fixed bed).....	10
2.1.3.2 เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) .....	10
2.1.3.3 เบดแบบสลัก (Slugging bed) .....	12
2.1.3.4 เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent bed).....	13
2.1.3.5 เบดแบบฟลูอิดไคซ์ขั้นความเร็วสูง (Fast fluidization bed).....	13
2.1.3.6 เบดแบบเบาบาง (Dilute phase transport) .....	13
2.1.4 การจัดหมวดหมู่ของอนุภาคของ Geldart .....	13
2.2 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขั้น .....	15
2.3 ปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ (Methanol to olefins, MTO).....	15
2.4 การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD).....	17
2.4.1 ระเบียบวิธี (Methodology) .....	18
2.4.2 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method) .....	18
2.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental design).....	23
2.5.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$ .....	23
2.5.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^3$ .....	24
2.5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA).....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	28
บทที่ 3.....	32
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	32



3.1 การศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย .....	34
3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical model).....	34
3.1.1.1 สมการอนุรักษ์ (Conservation equations) .....	34
3.1.1.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation) .....	34
3.1.1.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation) .....	35
3.1.1.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของวิ ภาคของแข็ง (Fluctuating kinetic energy conservation equation) .....	36
3.1.1.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation) .....	36
3.1.1.1.5 สมการอนุรักษ์การไหลและสปีชีส์ .....	37
3.1.1.2 สมการเสริม (Constitutive equation) .....	37
3.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขึ้น .....	40
3.2.1 กรณีพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ร้อยละ 40 .....	40
3.2.2 กรณีพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ร้อยละ 10 และ 60.....	44
3.3 การศึกษาปฏิบัติการการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด แบบขึ้น.....	45
บทที่ 4.....	49
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....	49
4.1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย .....	49
4.2 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ที่ฟลักซ์โดยมวล 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	53
4.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	53

4.2.2 อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics).....	68
4.2.2.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ ฟลูอิด์เบดแบบชั้นในตัวแปรความดันลดต่อความยาว.....	68
4.2.2.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ ฟลูอิด์เบดแบบชั้นในตัวแปรสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง .....	68
4.2.2.3 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ ฟลูอิด์เบดแบบชั้นในตัวแปรความเร็วในแนวรัศมี และแนวแกน .....	69
4.2.2.4 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ ฟลูอิด์เบดแบบชั้นในตัวแปรอุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมี และ แนวแกน .....	82
4.3 การศึกษาผลของฟลักซ์โดยมวลที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ .....	84
4.4 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ที่ฟลักซ์โดยมวล 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	88
4.5 การศึกษาผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด แบบชั้น.....	91
4.6 การหาแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็น โอเลฟินส์ .....	92
4.7 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็น โอเลฟินส์ที่ฟลักซ์โดยมวล 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	93
4.8 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็น โอเลฟินส์ที่ฟลักซ์โดยมวล 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	110
4.9 การศึกษาผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด แบบชั้นที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ .....	111
4.10 การประยุกต์ใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้น.....	112
บทที่ 5.....	114

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	114
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	114
5.1.1 การหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัย .....	114
5.1.2 อุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบขึ้น .....	115
5.1.3 ปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบ ขึ้น .....	116
5.1.4 แนวทางการปรับปรุงอุทกพลศาสตร์ และปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็น โอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบขึ้น .....	117
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	117
รายการอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก.....	121
ภาคผนวก ก .....	122
การวิเคราะห์ทางสถิติ .....	122
ภาคผนวก ข .....	126
โปรแกรมเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการจำลองภาวะบนโปรแกรม ANSYS FLUENT 6.3.26 .....	126
ภาคผนวก ค .....	130
การคำนวณผลที่ได้จากปฏิริยาเคมีการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ .....	130
ภาคผนวก ง.....	132
ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิริยาเคมีการเปลี่ยนเมทานอลเป็น โอเลฟินส์.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	134

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การออกแบบเชิงแพททอเรียล $2^3$ .....	24
ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบ $2^3$ ของการทดลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	43
ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองแบบเปรียบเทียบฟลักซ์โดยมวล 100 200 300 400 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที .....	43
ตารางที่ 4 การออกแบบการทดลองแบบ $2^3$ ของการทดลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	44
ตารางที่ 5 การจำลองอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เปิดของชั้น โดยที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที .....	44
ตารางที่ 6 สมการเคมี และค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเปลี่ยนเมทานอลเป็น โอเลฟินส์.....	45
ตารางที่ 7 การออกแบบการทดลองแบบ $2^3$ ของการทดลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาทีโดยเพิ่มปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์.....	47
ตารางที่ 8 การออกแบบการทดลองแบบ $2^3$ ของการทดลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาทีโดยเพิ่มปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์.....	47
ตารางที่ 9 การจำลองปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในท่อไรเซอร์ที่มีการ เปลี่ยนแปลงพื้นที่เปิดของชั้น โดยที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	48
ตารางที่ 10 ตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการหาแบบจำลองการไหล .....	50
ตารางที่ 11 การออกแบบการทดลองแบบ $2^3$ ของการศึกษาผลของตัวแปรติดตั้ง และค่าตัว แปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง.....	54
ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี.....	55

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตร ของของแข็ง .....	55
ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน อุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมี .....	56
ตารางที่ 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่ อยู่ในท่อไรเซอร์ .....	56
ตารางที่ 16 การศึกษาผลของฟลักซ์โดยมวลที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ .....	85
ตารางที่ 17 การออกแบบการทดลองแบบ 2 <sup>3</sup> ของการศึกษาผลของตัวแปรติดตั้ง และค่าตัว แปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง .....	89
ตารางที่ 18 การศึกษาผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดเบดแบบชั้น และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง .....	91
ตารางที่ 19 ตารางเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอล เป็นโอเลฟินส์ .....	93
ตารางที่ 20 ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการ เปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบด และเครื่อง ปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบชั้นที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที .....	95
ตารางที่ 21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดเอทิลีน .....	96
ตารางที่ 22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดโพรพิลีน .....	96
ตารางที่ 23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดบิวทีน .....	97
ตารางที่ 24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดเพนทีน .....	97
ตารางที่ 25 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดเฮกซีน .....	98
ตารางที่ 26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดไค้ก .....	98
ตารางที่ 27 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดโอเลฟินส์เบา ..	98

ตารางที่ 28 ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิบัติการ เปลี่ยน เมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด และเครื่อง ปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นที่ฟลักซ์เชิงมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	111
ตารางที่ 29 ผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และร้อยละ เลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ .....	112



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน .....	9
รูปที่ 2 รูปแบบการไหลของสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแก๊ส และของแข็ง .....	11
รูปที่ 3 แผนผังการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart .....	14
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ .....	17
รูปที่ 5 ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม .....	19
รูปที่ 6 แผนภาพเค้าร่างของท่อไรเซอร์ที่จะใช้จำลอง (ก) แบบยังไม่ได้รับการปรับปรุง .....	33
รูปที่ 7 แสดงการแบ่งเซลล์คำนวณ (ก) 3000 (ข) 6000 (ค) 12000 และ (ง) 18000 เซลล์คำนวณ .....	42
รูปที่ 8 สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่ความสูงต่างๆ ในช่วงเวลา 0-40 วินาที .....	51
รูปที่ 9 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณในตัวแปรสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน .....	51
รูปที่ 10 การกระจายตัวในแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกนที่การจำลอง ต่างๆ .....	52
รูปที่ 11 เปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างระหว่างงานวิจัยปัจจุบันกับงานวิจัยที่ผ่านมา .....	52
รูปที่ 12 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของ ของแข็งในแนวรัศมี .....	61
รูปที่ 13 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ .....	62
รูปที่ 14 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอนุกรมของแก๊สในแนวรัศมี .....	62
รูปที่ 15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ (A) และความหนาของชั้นภายใน ..	63
รูปที่ 16 คอนทัวร์แสดงอนุกรมของแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบชั้นของการ จำลองที่ (ก) 1 (ข) 2 (ค) 3 (ง) 4 (จ) 5 (ฉ) 6 (ช) 7 และ (ช) 8 .....	64

รูปที่ 17 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซออร์ .....	65
รูปที่ 18 ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซออร์ .....	65
รูปที่ 19 พื้นผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมี เมื่อใช้จำนวนชั้นของท่อไรเซออร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซออร์ต่างๆ กัน .....	66
รูปที่ 20 พื้นผิวตอบสนองของค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซออร์ (ก) เมื่อใช้จำนวนท่อไรเซออร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซออร์ต่างๆ กัน (ข) เมื่อใช้ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซออร์ และอุณหภูมิของผนังท่อไรเซออร์ต่างๆ กัน .....	67
รูปที่ 21 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความดันลดต่อความยาววินาทีที่ 20-40 .....	70
รูปที่ 22 การกระจายตัวตามแนวแกนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซออร์ .....	71
รูปที่ 23 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี .....	72
รูปที่ 24 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวรัศมี .....	73
รูปที่ 25 คอนทัวร์แสดง Granular Temperature ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดของการจำลองที่ (ก) 0 (ข) 1 (ค) 2 (ง) 3 (จ) 4 (ฉ) 5 (ช) 6 (ซ) 7 และ (ณ) 8 .....	74
รูปที่ 26 การกระจายตัวตามรัศมี (ก) ค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็งในแนวรัศมี (ข) ค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สในแนวรัศมี .....	76
รูปที่ 27 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกน .....	78
รูปที่ 28 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกน .....	79
รูปที่ 29 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (ก) ค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็งในแนวแกน (ข) ค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สในแนวแกน .....	80
รูปที่ 30 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกน (ก) ท่อไรเซออร์ที่ไม่ปรับปรุง (ข) ท่อไรเซออร์แบบ 2 ชั้น (ค) ท่อไรเซออร์แบบ 4 ชั้น .....	81
รูปที่ 31 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแก๊ส (ก) ตามแนวรัศมี (ข) ตามแนวแกน .....	83



รูปที่ 32 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุง ที่เวลา 40 วินาทีที่ฟลักซ์โดยมวล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 และ (จ) 500 กิโลกรัมต่อ ตารางเมตรวินาที .....	86
รูปที่ 33 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์แบบ 4 ชั้นที่เวลา 40 วินาทีที่ฟลักซ์โดยมวล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 และ (จ) 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตร วินาที .....	87
รูปที่ 34 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเปรียบเทียบภายในท่อไรเซอร์ที่เวลา 40 วินาที (ก) กรณีศึกษาที่ 12 (ข) กรณีศึกษาที่ 17.....	90
รูปที่ 35 กราฟเปรียบเทียบผลได้จากการจำลองปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	92
รูปที่ 36 คอนทัวร์แสดงอัตราการเกิด (ก) เอทิลีน (ข) โพรพิลีน (ค) บิวทีน (ง) เพนทีน (จ) เฮกซีน และ (ฉ) ไค้ก.....	94
รูปที่ 37 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน	101
รูปที่ 38 ผลของอันตรกิริยา (AB, BC) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือก เกิดเอทิลีน.....	102
รูปที่ 39 ผลของอันตรกิริยา (BC) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิด เอทิลีน.....	102
รูปที่ 40 ผลของอันตรกิริยา (ABC) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือก เกิดเอทิลีน.....	103
รูปที่ 41 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดโพรพิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิด โพรพิลีน .....	103
รูปที่ 42 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดบิวทีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดบิวทีน..	106
รูปที่ 43 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเพนทีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิด เพนทีน .....	106
รูปที่ 44 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเฮกซีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเฮกซีน	107

รูปที่ 45 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดโค้ก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโค้ก .....	107
รูปที่ 46 ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดโค้ก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโค้ก .....	108
รูปที่ 47 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดโอเลฟินส์เบา หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา .....	108
รูปที่ 48 คอนทัวร์ของอุณหภูมิของแก๊สเปรียบเทียบภายในท่อไรเซอร์ที่เวลา 40 วินาที กรณีศึกษาที่ 29 (ข) กรณีศึกษาที่ 44 และ (ค) กรณีศึกษาที่ 45 .....	113
รูปที่ 49 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.1 .....	122
รูปที่ 50 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.2 .....	123
รูปที่ 51 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.3 .....	124
รูปที่ 52 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.4 .....	125
รูปที่ 53 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนเมทานอล .	127
รูปที่ 54 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนเมทานอล .	127
รูปที่ 55 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนเมทานอล .	128
รูปที่ 56 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนเมทานอล .	128
รูปที่ 57 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนเมทานอล .	129
รูปที่ 58 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนเมทานอล .	129

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โอเลฟินส์ คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัวที่ประกอบด้วยพันธะคู่ อย่างต่ำ 1 พันธะ โอเลฟินส์เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นที่สำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ได้แก่ เอทิลีน และโพรพิลีน เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่ได้สูงจากแหล่งปิโตรเลียม แต่แนวโน้มความต้องการ การใช้งานของเอทิลีน และโพรพิลีนมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้แหล่งปิโตรเลียมเพียงอย่าง เดียวอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการการใช้งานในอนาคต ดังนั้นจึงมีความสนใจในการหาแหล่ง วัตถุดิบอื่นนอกเหนือจากแหล่งปิโตรเลียม และมีการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์โอเลฟินส์ขึ้น หนึ่งในกระบวนการที่ได้รับความสนใจ คือ การเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิริยาประเภท ซีโอไลต์ ชนิด SAPO-34 เนื่องจากเมทานอลที่ใช้เป็นสารตั้งต้นนั้นหาได้ง่ายและ ราคาถูก

กระบวนการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์นี้ได้มีการศึกษาการเกิดปฏิริยาผ่าน เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และแบบฟลูอิไดซ์เบด โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเกิดปฏิริยา ผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด เนื่องจากเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายใน อุตสาหกรรม ซึ่งข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ คือ สามารถคืนสภาพให้แก่ตัวเร่งปฏิริยาได้อย่าง ต่อเนื่อง และ การถ่ายโอนความร้อนได้ดี เป็นต้น เครื่องปฏิกรณ์นี้จะเป็นระบบการไหลแบบ หลายวัฏภาค ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก คือ ท่อไรเซอร์ ท่อดาวเนอร์ ท่อป้อนกลับ และ ไฮโคลน โดยมีหลักการทำงาน คือ ของไหลที่สนใจในที่นี้ คือ แก๊สเมทานอลจะไหลผ่านของแข็ง ซึ่ง คือตัวเร่งปฏิริยา ที่มีพฤติกรรมคล้ายกับของไหลภายในท่อไรเซอร์ โดยส่วนใหญ่ปฏิริยาเคมีจะ เกิดขึ้นในบริเวณนี้ จากนั้น ของแข็งและแก๊สจะถูกแยกออกจากกันด้วยไฮโคลน ของแข็งหรือตัวเร่ง ปฏิริยาจะถูกคืนสภาพและถูกป้อนกลับเพื่อเกิดปฏิริยาอีกครั้งผ่านทางท่อดาวเนอร์และท่อ ป้อนกลับ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์มีค่าสูง ในขณะที่ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอทีเอ็น และโพรพิลีน ยังมีค่าที่ต่ำอยู่ ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในท่อไรเซอร์มีความไม่สม่ำเสมอ ทั้งในแนวแกน และแนวรัศมี ระยะเวลา ทำให้การสัมผัสระหว่างสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เต็มที่เท่าที่ควร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจการปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคด์เบด ในส่วนของท่อไรเซอร์ ซึ่งเป็นเสมือนหัวใจสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ โดยการออกแบบจำนวนชั้น ระยะห่างระหว่างชั้น เพื่อเพิ่มโอกาสและระยะเวลาการสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นให้สูงขึ้น รวมทั้งลดปรากฏการณ์ของแข็งไหลย้อนกลับ และการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิศาสตร์ของปฏิกิริยา โดยการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบชั้น
- 2) ศึกษาอุทกพลศาสตร์ และปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบชั้นด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
- 3) เสนอแนวทางการปรับปรุงอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบชั้น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) จำลองอุทกพลศาสตร์ และปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบที่ยังไม่ได้ปรับปรุง ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อหาแบบจำลองที่สามารถทำนายผลของอุทกพลศาสตร์ และปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา
- 2) นำแบบจำลองที่ได้จากข้อที่หนึ่งมาทำการปรับปรุงท่อไรเซอร์ โดยการทำให้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบชั้น ด้วยวิธีเพิ่มขึ้นภายในท่อไรเซอร์ที่ความหนา

และจำนวนต่างๆ กัน และติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์

- 3) จำลองอุทกพลศาสตร์ และปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้น เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงอุทกพลศาสตร์ และปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้น

#### 1.4 ข้อกำหนดของงานวิจัย

- 1) แบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ 2 มิติ
- 2) แบบจำลองการไหลเป็นการไหลแบบ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคแก๊ส และภูมิภาคของแข็ง
- 3) อนุภาคของของแข็งที่ใช้ในการจำลองมีสมบัติทางกายภาพ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหมือนกันหมดทุกอนุภาค
- 4) ชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนในการจำลอง

#### 1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ (Methanol to Olefins, MTO) เป็นปฏิริยาเคมีที่ใช้สารตั้งต้นเป็นเมทานอล ซึ่งสามารถผลิตได้จากแก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน หรือชีวมวล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินส์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิริยาประเภท ซีโอไลต์ เทคโนโลยีนี้ได้เริ่มมีการศึกษาเมื่อปี 1970

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นวิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ โปรแกรมที่เป็นที่นิยมใช้ ได้แก่ โปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT และ ANSYS FLUENT ซึ่งโปรแกรมสามารถทำการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลได้ในระยะเวลาไม่นาน

ฟลูอิดส์เบดแบบชั้น คือ เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการแบ่งเป็นชั้น เพื่อลดการไหลย้อนกลับของของแข็ง เนื่องจากชั้นในแต่ละชั้นของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้แก๊สสัมผัสกับอนุภาคของแข็งใหม่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา

อุทกพลศาสตร์ คือ สาขาวิชาย่อยของวิชากลศาสตร์ของไหล ที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหลในพื้นที่ หรือปริมาตรที่สนใจ

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดแบบชั้นที่สามารถทำนายอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์
- 2) แนวทางการปรับปรุงอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดแบบชั้น

### 1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1) ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อดังนี้
  - ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
  - ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์
  - การจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหล และการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบด/เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน
  - การจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหล และการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดแบบชั้น
  - การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 2) จำลองภาวะท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสองมิติโดยใช้โปรแกรม **GAMBIT** และ **ANSYS FLUENT** โดยจำลองท่อไรเซอร์มีขนาดความกว้าง 0.2 เมตร ความสูง 10 เมตร และอนุภาคของแข็งคือ SAPO-34 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในการจำลองได้ทำการปรับพื้นที่การคำนวณ เพื่อหา

ขนาดพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม ปรับสัดส่วนความเร็วของแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ปรับค่าสัมประสิทธิ์การคืนสภาพ สัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (Volume fraction) เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบความเร็วของอนุภาคของแข็งในแนวแกน ค่าเฉลี่ยสัดส่วนช่องว่างของอนุภาคของแข็งในแนวแกน (Average axial voidage) กับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Chang และคณะ (Chang, 2013)

- 3) เสนอแนวทางการปรับปรุงอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคต์แบบขั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ จำนวนขั้นภายในท่อไรเซอร์ ความหนาของขั้นภายในท่อไรเซอร์ และอุณหภูมิผนังของท่อไรเซอร์
- 4) จำลองภาวะท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคต์แบบขั้นด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสองมิติโดยใช้ โปรแกรม GAMBIT และ ANSYS FLUENT เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบปกติ พิจารณาที่ตัวแปรหลักดังต่อไปนี้
  - ค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สและอนุภาคของแข็งในแนวแกน และแนวรัศมี
  - ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรในแนวแกนและแนวรัศมี
  - ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์
  - ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์
- 5) วิเคราะห์ผล สรุปผล เขียนบทความวิชาการ และวิทยานิพนธ์

## 1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

- บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

- บทที่ 2 ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบหมุนเวียน ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบขั้น ปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การออกแบบการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 การศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย การศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบขั้น และการศึกษาปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบขั้น
- บทที่ 4 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย การศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ที่ฟลักซ์โดยมวล 100 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที การศึกษาฟลักซ์โดยมวลที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ การศึกษาผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบขั้น การหาแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ การศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่อปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ที่ฟลักซ์โดยมวล 100 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที การศึกษาผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบขั้นที่มีต่อปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ การประยุกต์ใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบขั้น
- บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Center, 2011) เป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมีรูปแบบหนึ่ง ที่ภายในมีอนุภาคของแข็ง และของไหลซึ่งอาจจะเป็นแก๊ส หรือของเหลวก็ได้ ส่วนใหญ่ของไหลจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์แล้วสัมผัสกับอนุภาคของแข็ง ทำให้อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์ยังมีกลไกในการแยกอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่สมบูรณ์และป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง เครื่องปฏิกรณ์มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ท่อไรเซอร์ (Riser) เป็นท่อสูงก่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมี ไชโคลน (Cyclone) เป็นอุปกรณ์สำหรับทำหน้าที่แยกอนุภาคของแข็งออกจากของไหล โดยอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วง ท่อดาวเนอร์ (Downer หรือ Downcomer) และท่อป้อนกลับ (Return system) เป็นบริเวณที่ของแข็งซึ่งถูกแยกออกจากไชโคลนไหลผ่านและถูกป้อนกลับไปยังท่อไรเซอร์ ดังในรูปที่ 1

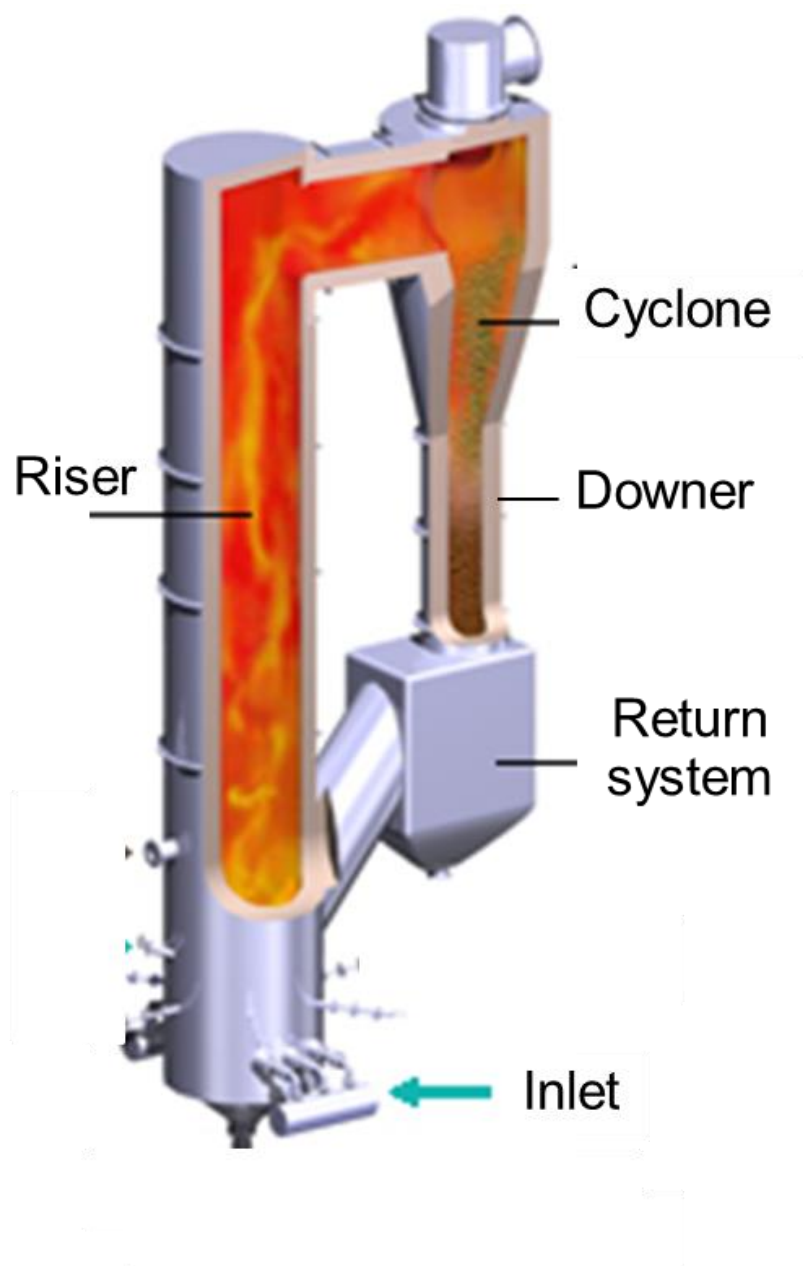
2.1.1 ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

1. เกิดการสัมผัสกันระหว่างของอนุภาคของแข็งและของไหลสูง ส่งผลให้ช่องว่างอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง
2. สามารถใช้ทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง เพราะสามารถคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาได้
3. มีการกระจายตัวของความร้อนสม่ำเสมอทั้งในแนวความสูงและแนวรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์
4. มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานกับของแข็งหลายชนิดหรือของแข็งผสม

5. สามารถเติมของแข็งเข้าไป หรือปล่อยของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์โดยไม่ต้องหยุดระบบ ทำให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง
6. มีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งดีกว่า ทำให้มีปริมาณของแข็งสูงตลอดแนวความสูง

#### 2.1.2 ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบหมุนเวียน เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

1. มีการสึกกร่อนของผนังเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเกิดการชนกัน และเสียดสีของอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่กับผนังของเครื่องปฏิกรณ์
2. มีการแตกหัก หรือลดขนาดอนุภาคของของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากการชนกันเองของอนุภาคของแข็ง
3. มีการตกกลับของอนุภาคของแข็งบริเวณผนัง ทำให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊ส หรือของเหลว กับอนุภาคของแข็งลดลง
4. ในกรณีที่ความเร็วของของไหลมีค่าสูง อาจทำให้อนุภาคของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์เร็วเกินไป ทำให้เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งมีค่าต่ำ



รูปที่ 1 องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

([www.mhiec.co.jp/en/products/water/sludge/contents/images/circulating\\_images01.jpg](http://www.mhiec.co.jp/en/products/water/sludge/contents/images/circulating_images01.jpg))

### 2.1.3 ช่วงการไหล (Regime)

ช่วงการไหลเกิดจากการที่อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน (Grace, 1997) การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วของของไหล ซึ่งอาจเป็นแก๊ส หรือของเหลวที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ แต่ในงานวิจัยนี้ของไหลที่ใช้ คือ แก๊ส ซึ่งรูปแบบของช่วงการไหลสามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 2

#### 2.1.3.1 เบดนิ่ง (Packed bed หรือ Fixed bed)

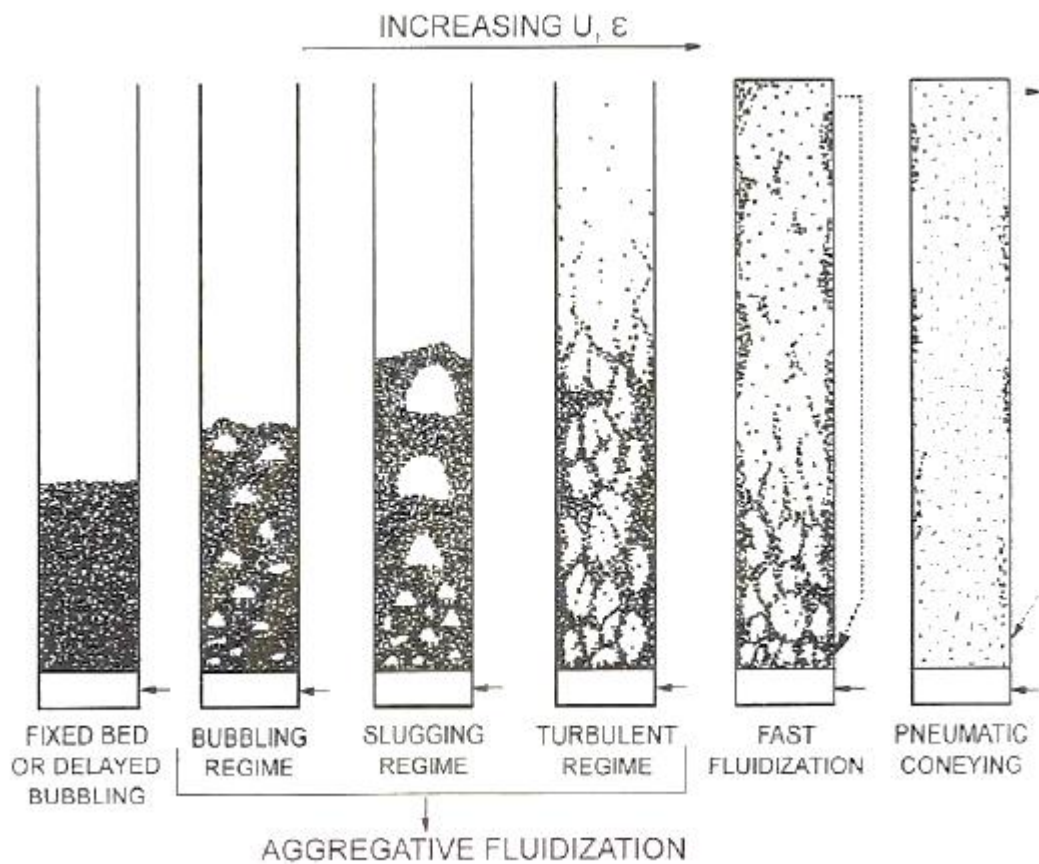
เกิดขึ้นเมื่อแก๊สไหลผ่านเบดของของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สด้วยความเร็วต่ำ อนุภาคของแข็งไม่เกิดการเคลื่อนที่ แก๊สจะไหลไปตามช่องว่างของเบด หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ แต่อนุภาคของแข็งภายในเบดไม่ได้เคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งจะเกิดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag force) ในทิศทางของการไหล ซึ่งจะทำให้เกิดความดันลด (Pressure drop) ตกคร่อมเบด ซึ่งขึ้นกับความเร็วของแก๊ส สามารถคำนวณได้จาก Ergun equation ดังนี้ (Kunii, 1991)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U(1-\varepsilon)^2}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g U^2(1-\varepsilon)}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} \quad (2.1)$$

#### 2.1.3.2 เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)

แก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ ค่าความเร็วที่จุดนี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์ไลเซชัน (Minimum fluidization velocity;  $U_{mf}$ ) ซึ่งจุดนี้เป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งเริ่มประพฤติตัวคล้ายของไหล ความดันตกคร่อมเบด ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักเบด แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag force;  $F_D$ ) ณ จุดนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$F_D = \Delta P A = AL(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.2)$$



รูปที่ 2 รูปแบบการไหลของสำหรับฟลูอิดไรซ์เบดแก๊ส และของแข็ง (Grace, 1997)

เมื่อ  $A$  = พื้นที่หน้าตัดของเบด

$L$  = ความสูงของเบด

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรซ์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

เมื่อ  $Re_p < 20$

$$U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \epsilon_{mf})} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $Re_p > 1000$

$$U_{mf} = \frac{\phi d_p (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g} = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.4)$$

สำหรับความเร็วของแก๊สที่ทำให้เริ่มเกิดฟองแก๊สในเบด (Minimum bubbling fluidization velocity;  $U_{mb}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$U_{mb} = 33 d_p \left( \frac{\rho_g}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2.5)$$

เมื่อเริ่มเกิดฟองแก๊ส เบดจะเริ่มแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นฟองแก๊ส เรียกว่า bubble phase อาจมีอนุภาคของแข็งอยู่บ้างแต่มีปริมาณที่ต่ำ และส่วนที่ไม่ใช่ฟองแก๊ส เรียกว่า Emulsion phase ซึ่งจะมีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกับ emulsion phase โดยอาจมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สจนกระทั่งถึงผิวด้านบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกแล้วแตกกระจายอยู่ด้านบนเหนือผิวเบด อนุภาคของแข็งทั้งหมดจะตกกลับมาบริเวณผิวเบดด้านบน

### 2.1.3.3 เบดแบบสลัก (Slugging bed)

เกิดเมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดแล้วทำให้เกิดฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่เกือบเท่าเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด เนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้น กรณีนี้จะสังเกตเห็นว่าฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบด และแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่า เกิดสลักกิ้ง ความเร็วของแก๊สที่ทำให้เริ่มเกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด (Minimum slugging velocity;  $U_{ms}$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07 \sqrt{gD} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อโรเตอร์

#### 2.1.3.4 เบดแบบปั่นป่วน (*Turbulent bed*)

เป็นช่วงการไหลที่อนุภาคของแข็งเริ่มเคลื่อนที่หลุดออกจากท่อโรเซออร์ โดยอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่จะเรียงตัวอยู่หนาแน่นบริเวณด้านล่างของท่อโรเซออร์ จะสังเกตเห็นหน้าเบดได้ชัดเจน มีอนุภาคของแข็งเพียงส่วนต่ำเท่านั้นที่หลุดออกจากท่อโรเซออร์

#### 2.1.3.5 เบดแบบฟลูอิไดเซชันความเร็วสูง (*Fast fluidization bed*)

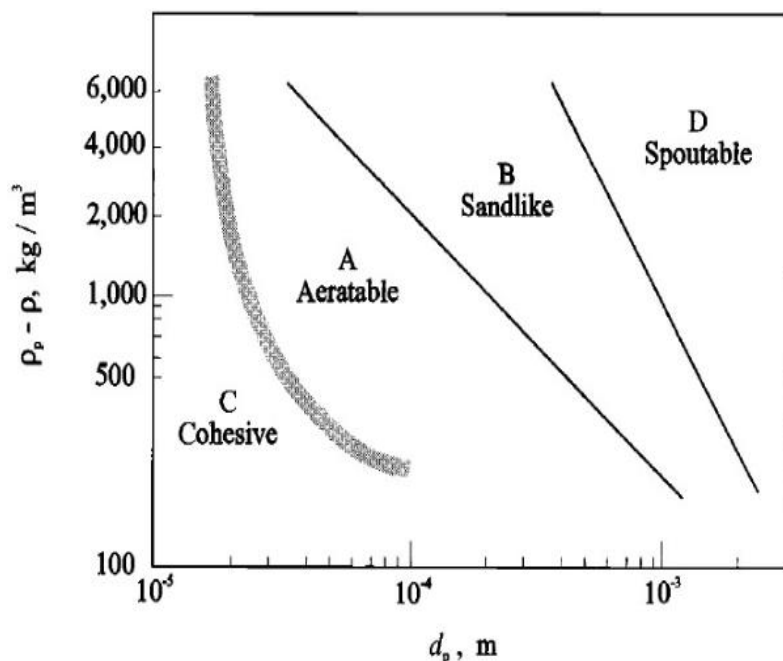
เป็นช่วงการไหลที่มีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งสม่ำเสมอตามแนวความสูงของท่อโรเซออร์ จึงไม่สามารถเห็นหน้าเบดได้อย่างชัดเจน โดยที่บริเวณผนังจะมีปริมาณของอนุภาคของแข็งสูง แต่บริเวณกึ่งกลางท่อจะพบปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ต่ำ

#### 2.1.3.6 เบดแบบเบาบาง (*Dilute phase transport*)

เป็นช่วงการไหลที่มีการปั่นแกว่งเข้าด้วยความเร็วที่สูงที่สุด อนุภาคของแข็งจะถูกแกว่งพาออกจากท่อโรเซออร์อย่างรวดเร็ว ทำให้อนุภาคของแข็งในช่วงการไหลนี้มีปริมาณที่ต่ำตลอดแนวความสูงของท่อโรเซออร์ ช่วงการไหลนี้เหมาะแก่การพาอนุภาคของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง

#### 2.1.4 การจัดหมวดหมู่ของอนุภาคของ Geldart

การจัดหมวดหมู่ของอนุภาคของแข็งของ Geldart (Grace, 1997) สามารถจำแนกโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่แตกต่างกัน จำแนกได้ทั้งหมด 4 กลุ่มที่แตกต่างกัน โดยเรียงจากเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคต่ำสุดไปยังอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart

กลุ่ม A อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็ก หรือมีความหนาแน่นต่ำ โดยที่ความหนาแน่นต่ำกว่า 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นกลุ่มอนุภาคที่อากาศสามารถทะลุผ่านอนุภาคได้ สามารถทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันได้ง่ายที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่ำ

กลุ่ม B เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีลักษณะคล้ายทราย อนุภาคของแข็งมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 40-500 ไมโครเมตร และความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งอยู่ในช่วง 1400-4000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้เคลื่อนที่ได้ดีในรูปแบบพองแก๊ส

กลุ่ม C เป็นกลุ่มอนุภาคของแข็งที่มีการยึดเกาะได้ดี และมีความละเอียดสูงที่สุด อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้เกิดฟลูอิไดเซชันได้ยาก เพราะแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคมีค่าสูงกว่าแรงดันจากของไหล

กลุ่ม D เป็นกลุ่มอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นสูง สำหรับอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้พองแก๊สจะเกิดขึ้นช้ากว่ากลุ่มอื่น และเกิดช่องว่างที่สามารถทำให้ของไหลพุ่งออกมาได้ง่าย



## 2.2 ฟลูอิไดซ์เบดแบบขั้น

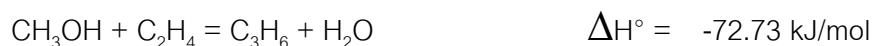
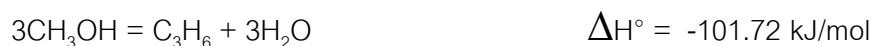
ฟลูอิไดซ์เบดแบบขั้น คือ เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการแบ่งเป็นชั้น เพื่อลดการไหลย้อนกลับของของแข็ง เนื่องจากชั้นในแต่ละชั้นของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้แก๊สสัมผัสกับอนุภาคของแข็งใหม่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา

## 2.3 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ (Methanol to olefins, MTO)

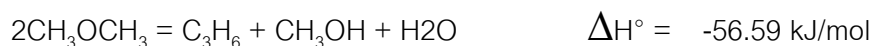
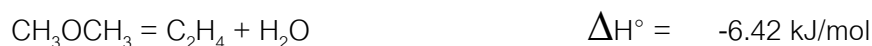
การเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ เป็นปฏิกิริยาเคมีที่ใช้สารตั้งต้นเป็นเมทานอล ซึ่งสามารถผลิตได้จากแก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน หรือชีวมวล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินส์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท ซีโอไลต์ เทคโนโลยีการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ได้เริ่มมีการศึกษาเมื่อปี 1970 โดยเริ่มสนใจจากการเปลี่ยนเมทานอลเป็นช่วงแก๊สโซลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และในระหว่างปี 1980 ทางบริษัท UOP ได้คิดค้น SAPO-34 ขึ้น ซึ่งให้ค่าการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา คือ เอทิลีน และโพรพิลีนที่สูง อันเนื่องมาจากรูพรุนของ SAPO-34 มีขนาดที่เล็กประมาณ 4 อาร์มสตอม ซึ่งจะลดการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบกิ่ง และแบบสายโซ่ยาว

ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์มีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องแบ่งออกได้เป็น 6 กลุ่มปฏิกิริยา ซึ่งแต่ละกลุ่มปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 4 (Aghamohammadi, 2014) แต่ในงานวิจัยนี้เลือกมาเพียงปฏิกิริยาหลักเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องเวลาในการจำลอง

ปฏิกิริยากลุ่มที่ 1 เมทานอลเป็นโอเลฟินส์เบา (Methanol to light olefins) ได้แก่



ปฏิกิริยากลุ่มที่ 2 ไดเมทิลอีเทอร์เป็นโอเลฟินส์เบา (DME to light olefins) ได้แก่



ปฏิกิริยากลุ่มที่ 3 การเปลี่ยนรูปของไดเมทิลอีเทอร์ (DME reforming reactions)



ปฏิกิริยากลุ่มที่ 4 การเกิดของมีเทน (Methane formation reactions)

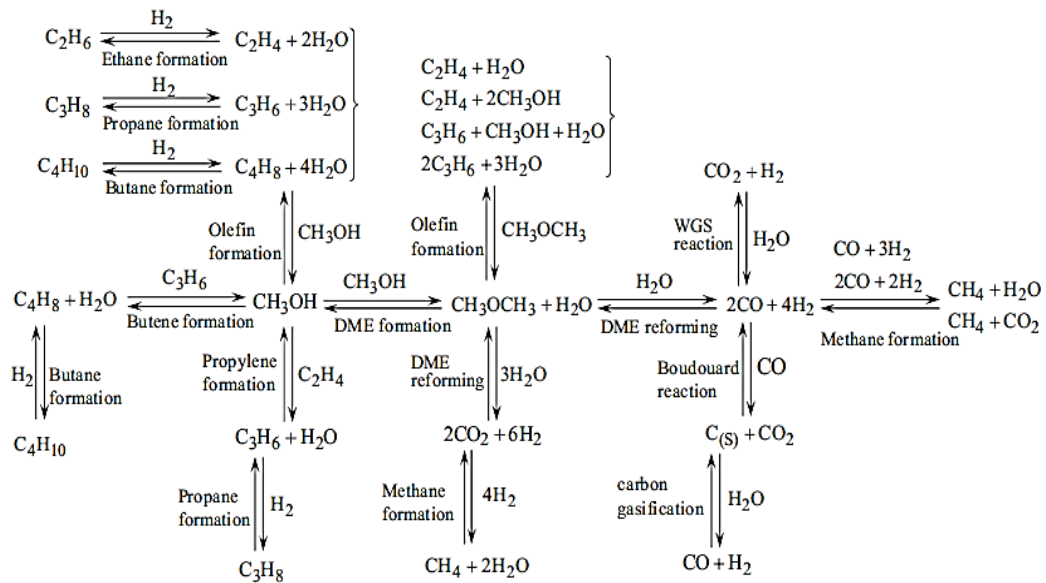


ปฏิกิริยากลุ่มที่ 5 การเกิดไค้ก การกำจัดไค้ก (Water-gas shift, carbon formation and consumption reaction)



ปฏิกิริยากลุ่มที่ 6 การเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (Saturated hydrocarbon formation reactions)





รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

(Aghamohammadi, 2014)

## 2.4 การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD)

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีวิเคราะห์กระบวนการด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ โปรแกรมที่เป็นที่นิยมใช้ได้แก่ โปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT และ ANSYS FLUENT ซึ่งโปรแกรม GAMBIT และ ANSYS FLUENT สามารถทำการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลได้ในระยะเวลาไม่นาน ทำให้กระบวนการออกแบบมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบดั้งเดิม ปัจจุบันการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันด้านวิศวกรรม เนื่องจากช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในการออกแบบ พัฒนา ปรับปรุง และทำให้เห็นภาพของการไหลชัดเจนขึ้นผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว และยังช่วยต่อการเรียนการศึกษา โดยลักษณะการไหลของของไหลแต่ละชนิดถูกกำหนดด้วยชุดสมการคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย 3 สมการหลัก คือ สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equations) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equations) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations)

#### 2.4.1 ระเบียบวิธี (Methodology)

สำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีระเบียบวิธีการพื้นฐานในการคำนวณดังต่อไปนี้

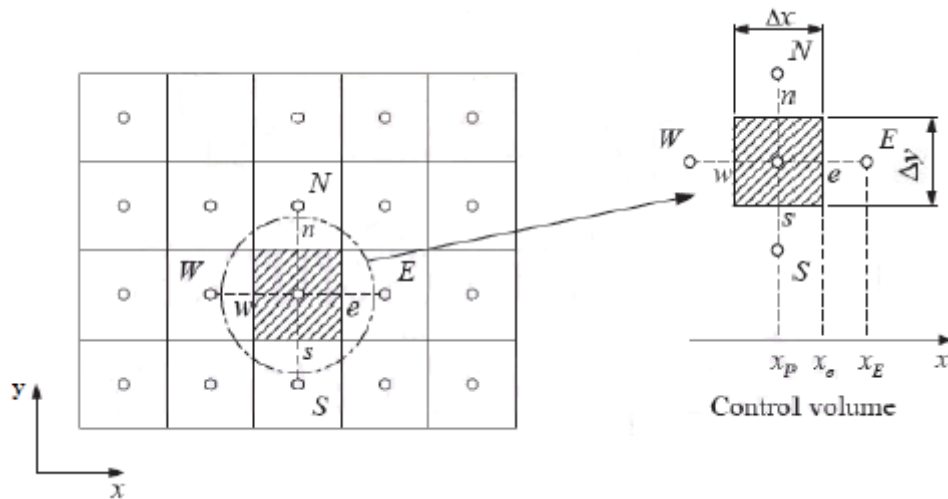
1. กำหนดปัญหาที่จะศึกษาเป็นรูปทรงหรือเรขาคณิต (ขอบเขตทางกายภาพ)
2. แบ่งปริมาตรของไหลออกเป็นเซลล์แบบโครงตาข่าย (Grid)
3. กำหนดสมการสำหรับการจำลองแบบกายภาพ เช่น สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน เป็นต้น
4. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) โดยจะเกี่ยวข้องกับสมบัติและพฤติกรรมการไหลของของไหล ณ ขอบเขตนั้นๆ ของปัญหาที่ทำการศึกษา สำหรับปัญหาแบบไม่คงตัว (Transient) จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) เช่น การกำหนดสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเริ่มต้น คุณสมบัติของผนัง เป็นต้น
5. แก้สมการอนุรักษ์โดยอาศัยระเบียบวิธีทำซ้ำ (Iteration) เพื่อให้ได้ผลเฉลยของระบบ
6. วิเคราะห์ผล และแสดงผลสำหรับผลเฉลยที่ได้ เช่น เวกเตอร์ความเร็วของไหล หรือ กราฟคอนทัวร์

#### 2.4.2 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method)

การเลือกใช้ระเบียบวิธีการแบ่งช่วงนั้นต้องระมัดระวังเรื่องเสถียรภาพเพื่อให้ได้ผลเฉลย ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) สูงกว่าการแก้สมการโดยอาศัยระเบียบวิธีวิเคราะห์ (Analytical methods) โดยวิธีที่นิยมใช้ในการแบ่งช่วงปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นได้แก่ ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่แบ่งของเขตปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ (Control volume) แล้วอินทิเกรตสมการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุมด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ดังรูปที่ 5 โดยในการแก้ปัญหาการพา (Convection) และการแพร่ (Diffusion) ของของไหลจะมีจุดเริ่มต้นจากสมการพื้นฐานของการไหล

ซึ่งสามารถแสดงสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) ในรูปทั่วไปของตัวแปร  $\phi$  ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (2.7)$$



รูปที่ 5 ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Patankar, 1980)

สมการนี้เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยพื้นฐานที่จะนำมาใช้ในการแก้สมการ โดยเทอมแรกเป็นเทอมที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เทอมที่สอง คือ เทอมจากการพา เทอมที่สาม คือ เทอมจากการแพร่กระจาย และเทอมสุดท้าย คือ เทอมที่เหลืออื่นๆ (Source term) ซึ่งสมการในรูปอนุพันธ์จะถูกเปลี่ยนรูปพีชคณิตที่สามารถคำนวณได้ง่ายขึ้น โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ด้วยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมได้เป็น

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\phi u) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.8)$$

ในกรณีของปัญหาในครั้งนี้นี้ การไหลแบบสภาวะไม่คงตัว 2 มิติ สมการจะลดรูปเหลือ

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (\rho \phi u) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} (\rho \phi v) dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.9)$$

จากนั้นทำการแยกพิจารณาการอินทิเกรตที่ละเทอม โดยกำหนดให้  $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$  และ  $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$  จะได้เทอมของการพาในสองแนวแกน คือ

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (\rho \phi u) dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.10)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} (\rho \phi v) dV = (\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (2.11)$$

เทอมของการแพร่กระจาย คือ

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (2.12)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV = \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_n - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_s = D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) \quad (2.13)$$

และเทอมที่เหลืออื่นๆ คือ

$$\int_{CV} S_\phi dV = S_\phi dV \quad (2.14)$$

เมื่อ  $F$  คือ สัมประสิทธิ์ของการพา ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\rho u A$

$D$  คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\Gamma A / \delta$

ค่าของตัวแปร  $\phi$  บนผิวปริมาตรควบคุมในเทอมของการพาที่อยู่ในสมการ จะสามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วย Discretization scheme ต่างๆ เช่น First order upwind differencing scheme Power-law differencing scheme และ Hybrid differencing scheme โดยรายละเอียดแต่ละวิธี Discretization มีดังต่อไปนี้

#### 1. First order upwind differencing scheme

เป็นการแก้ปัญหาที่เกิดจากการสมมติว่าค่าคงที่ของการพาที่ Interface ( $\phi_e$ ) เกิดจากค่าเฉลี่ยระหว่างค่าทั้งสองด้าน โดยคิดว่าเทอมการแพร่กระจายไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนใน

เทอมของการพาจะคำนวณโดยสมมติฐานว่า ค่าของตัวแปร  $\phi$  ที่ Interface มีค่าเท่ากับ Grid point ของผิวปริมาตรควบคุมด้านต้นกระแสน้ำไหล (Upstream) นั่นคือ

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

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

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

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

โดยค่า  $\phi_n$  และ  $\phi_s$  ก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นสามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปได้เป็น

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_E \phi_E + a_s \phi_s + a_N \phi_N + S_\phi V \quad (2.15)$$

$$a_N = \max[-F_n, 0]$$

$$a_s = \max[F_s, 0]$$

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

$$a_w = \max[F_w, 0]$$

$$a_p = a_N + a_E + a_s + a_w + (F_n - F_s + F_e - F_w) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\max[A, B]$  คือ ค่าสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าของ  $A$  กับ  $B$

จากสมการ จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จะไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าเป็นไปตามลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริง และทำให้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ได้ โดยที่ผลเฉลยลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

## 2. Second order upwind scheme

จะทำการประมาณค่าโดยใช้การประมาณแบบเชิงเส้นของค่าที่ต้นกระแสน้ำไหล โดยจะให้ความแม่นยำที่สูงกว่าแบบ First order upwind scheme และจะทำให้การลู่เข้าหาผลเฉลยดีกว่า เนื่องจากมีการใช้จุดของค่าที่นำมาคำนวณสูงขึ้น

$$\varnothing_e = \frac{3}{2}\varnothing_P - \frac{1}{2}\varnothing_w \quad \text{เมื่อ } F_e > 0 \quad (2.17)$$

$$\varnothing_e = \frac{3}{2}\varnothing_E - \frac{1}{2}\varnothing_{EE} \quad \text{เมื่อ } F_e < 0 \quad (2.18)$$

$$\varnothing_w = \frac{3}{2}\varnothing_w - \frac{1}{2}\varnothing_{ww} \quad \text{เมื่อ } F_w > 0 \quad (2.19)$$

$$\varnothing_w = \frac{3}{2}\varnothing_P - \frac{1}{2}\varnothing_E \quad \text{เมื่อ } F_w < 0 \quad (2.20)$$

### 3. Power-law differencing scheme

เป็นวิธีที่ให้ค่าผลเฉลยใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรง สำหรับปัญหาหนึ่งมิติสูงกว่าวิธีการอื่นๆ โดยเป็นการประมาณแบบโพลีโนเมียล สามารถเขียนสมการพีชคณิตได้เป็น

$$a_P\varnothing_P = a_w\varnothing_w + a_E\varnothing_E + a_s\varnothing_s + a_N\varnothing_N + S_\varnothing V \quad (2.21)$$

$$a_N = D_n \max[0, (1-0.1|F_n/D_n|)^5] + \max[-F_n, 0]$$

$$a_s = D_s \max[0, (1-0.1|F_s/D_s|)^5] + \max[F_s, 0]$$

$$a_E = D_e \max[0, (1-0.1|F_e/D_e|)^5] + \max[-F_e, 0]$$

$$a_w = D_w \max[0, (1-0.1|F_w/D_w|)^5] + \max[F_w, 0]$$

$$a_P = a_N + a_E + a_s + a_w + (F_n - F_s + F_e - F_w) \quad (2.22)$$

### 4. Hybrid differencing scheme

เป็นการรวบรวมข้อดีของวิธี First order upwind differencing scheme และ Central differencing scheme โดยเลือกใช้ค่าจาก Central differencing scheme ซึ่งมีความถูกต้องสูง เนื่องจากเป็น Second order scheme และตรงที่ Central differencing scheme ทำนายค่าได้ไม่ถูกต้อง ( $Pe = F/D > 2$  และ  $Pe < -2$ ) จะเปลี่ยนมาใช้ค่าจาก First order upwind differencing ซึ่งมีความเสถียรสูง เนื่องจากเป็น First scheme เขียนสมการพีชคณิตได้เป็น

$$a_P\varnothing_P = a_w\varnothing_w + a_E\varnothing_E + a_s\varnothing_s + a_N\varnothing_N + S_\varnothing V \quad (2.23)$$



$$a_N = \max[-F_n, D_n, -\frac{F_n}{2}, 0]$$

$$a_S = \max[F_s, D_s, +\frac{F_s}{2}, 0]$$

$$a_E = \max[-F_e, D_e, -\frac{F_e}{2}, 0]$$

$$a_W = \max[F_w, D_w, +\frac{F_w}{2}, 0]$$

$$a_P = a_N + a_E + a_S + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w) \quad (2.24)$$

หลังจากเลือกกระเป๋ายวิธีการแบ่งช่วงแล้ว แทนค่าทั้งหมดลงในสมการก็จะได้ระบบสมการที่พร้อมจะนำไปคำนวณค่าต่อไป

## 2.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

ในทางปฏิบัติของการออกแบบการทดลองมักเกี่ยวข้องกับกรณีที่ต้องการศึกษาผลของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป การออกแบบการทดลอง (Samruamphianskun, 2011) ที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบนี้จะสามารถใช้จำนวนการทดลองที่ต่ำ แต่ยังสามารถให้ข้อมูลเทียบเท่าการทดลองแบบทีละตัวแปร เมื่อเทียบที่ผลการทดลองเท่าๆ กัน

### 2.5.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีตัวแปรที่ต้องการศึกษา  $k$  ตัวแปร ซึ่งในแต่ละตัวแปรจะประกอบด้วยค่า 2 ระดับ คือ ค่าระดับสูง แทนด้วย + และค่าระดับต่ำ แทนด้วย - หรือ + แทนการมี และ - แทนการไม่มีของตัวแปรนั้นๆ โดยใน 1 เวกเตอร์ที่สมบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  ข้อมูล โดยสามารถที่จะศึกษาผลของอันตรกิริยาที่มีต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากตัวแปรเหล่านี้ได้

### 2.5.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^3$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  เป็นการออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรที่สนใจศึกษา 3 ตัวแปร ในแต่ละตัวแปรประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือระดับสูง และระดับต่ำ รวมทั้งหมด 8 การทดลอง ดังตารางที่ 1

ในการประมาณผลสามารถคำนวณได้จากค่า คอนทราสต์ (Contrast) เครื่องหมายของผลหลักหาได้จากค่าบวก และลบที่ได้กำหนดขึ้นดังตารางที่ 1 เมื่อเครื่องหมายของผลหลักถูกกำหนดขึ้นแล้ว เครื่องหมายสำหรับคอลัมน์ที่เหลือจะหาได้จากการนำคอลัมน์ที่เกี่ยวข้องมาคูณกันทีละแถวตัวต่อตัว ตัวอย่างเช่น เครื่องหมายของคอลัมน์ AB คือ ผลคูณของเครื่องหมายในคอลัมน์ A และ B ในแต่ละแถว และคอนทราสต์จะสามารถหาได้โดยง่ายจากตารางที่กล่าวมานี้

ตารางที่ 1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล  $2^3$

Run	A	B	C	Combination
1	-	-	-	1
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	+	+	-	ab
5	-	-	+	c
6	+	-	+	ac
7	-	+	+	bc
8	+	+	+	abc

ตัวอย่างการพิจารณาการประมาณผลหลัก

$$A = \frac{1}{4n}[-1 + a - b + ab - c + ac - bc + abc] \quad (2.25)$$

ตัวอย่างการพิจารณาการประมาณผลของอันตรกิริยา

$$AB = \frac{1}{4n}[1 - a - b + ab + c - ac - bc + abc] \quad (2.26)$$

การประมาณผลต่างๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ ดังนี้

$$AB\dots K = \frac{2}{n2^k}(\text{Contrast}_{AB\dots K}) \quad (2.27)$$

จากนั้นหาค่าผลรวมกำลังสองสำหรับผลแต่ละตัว ดังนี้

$$SS_{AB\dots K} = \frac{1}{n2^k}(\text{Contrast})^2 \quad (2.28)$$

นำค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดไปทำการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) หาค่า  $F_0$  หรือค่า p-value เพื่อวิเคราะห์ว่าผลว่าตัวแปรใดมีผลต่อค่าตอบสนองสูงที่สุด โดยการวิเคราะห์แบบ  $2^k$  นี้ก็ต้องทำการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่ได้ด้วยว่ามีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ ไม่มีรูปแบบ และมีความแปรปรวนคงที่หรือไม่ เพื่อแสดงถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์ที่ได้ทำไป

### 2.5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ เทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้เพื่อ ทดสอบสมมติฐานที่มีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่สูงกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป (ตัวแปรอิสระเป็นแบบจัดกลุ่ม ตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ) การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ จะได้ว่า Total corrected sum of square คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.30)$$

ซึ่งค่าที่ได้จะใช้สำหรับวัดความแปรผันของข้อมูล โดยการนำ  $SS_T$  มาหารด้วยระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) ที่เหมาะสม คือ  $N-1$  เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด จะทำให้ได้ค่าความแปรปรวนของตัวอย่าง  $y$

ความแปรปรวนทั้งหมดที่ได้จาก Total corrected sum of square สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม รวม

กับผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายใต้ระดับกับค่าเฉลี่ยระดับนั้นๆ ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม คือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับ ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับ คือ ความผิดพลาดสุ่ม (Random error) ดังนั้น สามารถเขียนสมการ ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.31)$$

เมื่อ  $SS_{Treatment}$  คือ ผลรวมกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ ซึ่งหาได้จาก

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

โดยจะมีลำดับชั้นความเสรีเท่ากับ ระดับของค่าเฉลี่ย  $a-1$  และ  $SS_E$  เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากการผิดพลาด มีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ  $N-a$  ซึ่งเมื่อทำการนำค่าของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัว (Sum of square) หารด้วยระดับชั้นความเสรีของตัวเอง จะได้เป็น Mean square (MS) ดังสมการ

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a-1} \quad (2.33)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{N-1} \quad (2.34)$$

โดยที่ค่า Mean square error คือ สมการที่ (2.34) และจากนั้นทำการหาอัตราส่วน  $F_0$  เพื่อทำการทดสอบ F (F test) ซึ่งเป็นการทดสอบสมมติฐานความเท่ากันของความแปรปรวนของประชากรแบบปกติ 2 กลุ่ม โดยมีวิธีคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_E} \quad (2.35)$$

ผลที่ได้จะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือ  $H_0$  ก็ต่อเมื่อ  $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$  และสรุปว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งสอง ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่า  $F_0 < F_{\alpha, a-1, N-a}$  ผลสรุปที่ได้ก็จะกลับกัน คือ แสดงว่าข้อมูลไม่ได้มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งสอง หรือใช้การตรวจสอบจากค่า p-value โดยส่วนสูงค่านี้ถูกกำหนดให้มีค่า 0.05

หรือมีค่าความเชื่อมั่นประมาณ 95% ซึ่งนิยามของ p-value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างต่ำที่จะทำให้ค่านี้มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับค่าที่สังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง และสามารถหาได้จากค่า F และระดับชั้นความเสรี ดังนั้น p-value จึงแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ  $H_0$  และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ โดยจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$  เมื่อค่า p-value  $< 0.05$

#### 2.5.4 การสร้างแบบจำลองการถดถอย

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผนไว้ล่วงหน้า อาจเกิดจากการเก็บข้อมูลที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือสิ่งที่บันทึกเอาไว้ในอดีต แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาวิเคราะห์ในกรณีดังกล่าวอยู่บ่อยครั้ง โดยแบบจำลองถดถอยประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่มีค่าคลาดเคลื่อน เรียกว่า ตัวประมาณการ (Predictor) หรือตัวแปรอิสระโดยใช้สัญลักษณ์  $X$  และตัวแปรที่มีความคลาดเคลื่อน เรียกว่าตัวแปรตอบสนอง (Response) หรือตัวแปรตามใช้สัญลักษณ์  $y$  โดยแบบจำลองถดถอยสามารถแบ่งได้สี่รูปแบบ ดังนี้

1. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัว การวิเคราะห์เป็นการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม
2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ (Multiple linear regression analysis) จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และ ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป การวิเคราะห์เป็นการหาขนาดของความสัมพันธ์ และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม
3. การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression analysis) เป็นการศึกษารูปร่างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม 1 ตัวแปร กับตัวแปรอิสระสูงกว่า 1 ตัว โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแบบไม่เป็นเส้นตรง

4. การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก (Logistic regression analysis) ใช้ในกรณีที่ตัวแปรตอบสนองมีเพียงสองสถานะ เช่น ใช่ หรือ ไม่ใช่ เป็นต้น แต่ตัวประมาณการเป็นค่าแบบต่อเนื่องปกติ

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liu และคณะ (Liu, 1999) ทบทวนเทคโนโลยีการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ และ ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เทคโนโลยีการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์นั้นเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ เพราะสามารถผลิตเอทิลีนด้วยต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเทคโนโลยีการแตกของโมเลกุลของแนฟทา เพราะแนฟทาที่ใช้เป็นสารตั้งต้นนั้นมีราคาแพงกว่าเมทานอลที่ได้จากแก๊สธรรมชาติ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ SAPO-34 จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดที่ศึกษาได้แก่ APO-5 AIPO4 APO-34 และ SAPO-17 ทั้งนี้เป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างความเป็นกรดบรอนสเตท และกรดลิวอิส ที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างอะตอมของซิลิกอนและอะตอมของอะลูมิเนียม โดยส่วนใหญ่อยู่ที่ 0.05-0.5

Soundararajan และคณะ (Soundararajan, 2001) ศึกษาการเพิ่มขึ้นของได้กบนตัวเร่งปฏิกิริยา และรูปแบบทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ โดยการจำลองปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์บนตัวเร่งปฏิกิริยา SAPO-34 ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ ภายใต้อุทกพลศาสตร์แบบแกนใน-วงนอก พบว่า เมื่อได้กสะสมบนตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอทิลีนเพิ่มขึ้นแต่อัตราการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ลดลง จุดที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อได้กสะสมบนตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่จะทำได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินส์เบา และการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด คือ ร้อยละ 75 และ 90 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งเป็นเอทิลีนร้อยละ 27.2 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นโอเลฟินส์เบาจะสูงขึ้นเมื่อเปลี่ยนทางออกจากแบบเรียบเป็นแบบฉับพลัน เนื่องจากมีระยะเวลาการสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สสูงขึ้น

Li และคณะ (Li, 2011) ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการเปลี่ยน เมทานอลเป็นโอเลฟินส์ ผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาสัมผัสระหว่างเมทานอลกับตัวเร่งปฏิกิริยา 0.08 วินาที พบว่า ค่าการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ และค่าการเลือกเกิดเป็นโอเลฟินชนิดเบา คือ อีทีน และโพรพีนมีค่าลดลงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SAPO-34 H-ZSM-5 และ H-ZSM-22 ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยา SAPO-34 มีค่าการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ร้อยละ 96 ค่าการเลือกเกิดเป็นอีทีน และโพรพีน ร้อยละ 27.3 และ 60.8 ตามลำดับ และไม่พบการเกิดขึ้นของสารประกอบอะโรมาติก ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 มีค่าการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ร้อยละ 82.5 ค่าการเลือกเกิดเป็นอีทีน และโพรพีน ร้อยละ 10.8 และ 37.3 ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-22 มีค่าการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ร้อยละ 76.5 ค่าการเลือกเกิดเป็นอีทีน และโพรพีนร้อยละ 3.7 และ 22.3 ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 และ H-ZSM-22 มีค่าการเลือกเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 26.0 และ 28.1 ตามลำดับ ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ SAPO-34 และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพรองลงมาคือ H-ZSM-5 และ H-ZSM-22 ตามลำดับ

Jiang และคณะ (Jiang, 2012) ศึกษาการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบสองชั้นเพื่อเตรียม ไดมethylออกซาเลตจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่า การไหลของอนุภาคของแข็งในชั้นล่างมีความรุนแรงสูงกว่าชั้นบน เนื่องจากชั้นล่างใช้ตัวกระจายอากาศที่มีอัตราส่วนรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งจะช่วยลดการเกิดการไหลย้อนกลับของอนุภาคของแข็ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความดันมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบสองชั้นมีความสม่ำเสมอกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

Chang และคณะ (Chang, 2013) ศึกษาการจำลองอุทกพลศาสตร์ และ จลนพลศาสตร์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นสารโอเลฟินส์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด ภายใต้การไหลแบบสองวัฏภาค คือ แก๊ส และของแข็ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SAPO-34 และทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเร็ว สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของของแข็ง และความเข้มข้นของแก๊ส

ในระบบมีรูปแบบการเกิดที่ไม่สม่ำเสมอตามแนวแกน และแนวรัศมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราส่วนการเกิดสารผลิตภัณฑ์ประเภทพาราฟินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้นส่งผลต่อร้อยละเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ และการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอทิลีนสูงขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนอัตราส่วนผสมเริ่มต้นของเมทานอลที่สูงกว่าร้อยละ 70 โดยมวลไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นผลิตภัณฑ์ ความดันในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็น โอลิฟินส์สูงที่สุดคือ  $1.5 \times 10^5$  ปาสคาล ความเร็วของแก๊สที่ 2.5-3.0 เมตรต่อวินาที และอัตราการไหลเวียนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 100-120 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้น และร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์สูง ที่ภาวะนี้จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เป็นโพรพิลีนลดลง แต่การเลือกเกิดเป็นเอทิลีนเพิ่มขึ้น แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสื่อมสภาพก็ตาม เพราะขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็ก

Mahalik และคณะ (Mahalik, 2015) ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของไหลของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสามชั้น พบว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการไหล และความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของอนุภาคของแข็ง เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไรเซอร์ ความสูงของท่อมี่ขนาดเพิ่มขึ้น ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการไหลชั้นบนของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสามชั้นมีค่าต่ำกว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบชั้นเดียว เนื่องจากจำนวนชั้นที่สูงขึ้นจะแบ่งน้ำหนักในแต่ละชั้น สำหรับการพิจารณาความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์แบบสามชั้นจะมีค่าต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบชั้นเดียวด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการไหล

Zhu และคณะ (Zhu, 2014) ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของสารองค์ประกอบ และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของไดเมทิลออกซาลेट โดยวิธีจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งฟลูอิดไดซ์เบดแบบสองชั้น และฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน อัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อไดเมทิลออกซาลेटต่อเมทานอล เท่ากับ 80 : 1 : 4 ใช้ Cu-HMS เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสองชั้น และฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมีการกระจายตัวของอุณหภูมิ และการกระจายตัวของสารองค์ประกอบเป็นรูปแบบกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง



ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสองชั้น และฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนดีกว่าภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง



### บทที่ 3

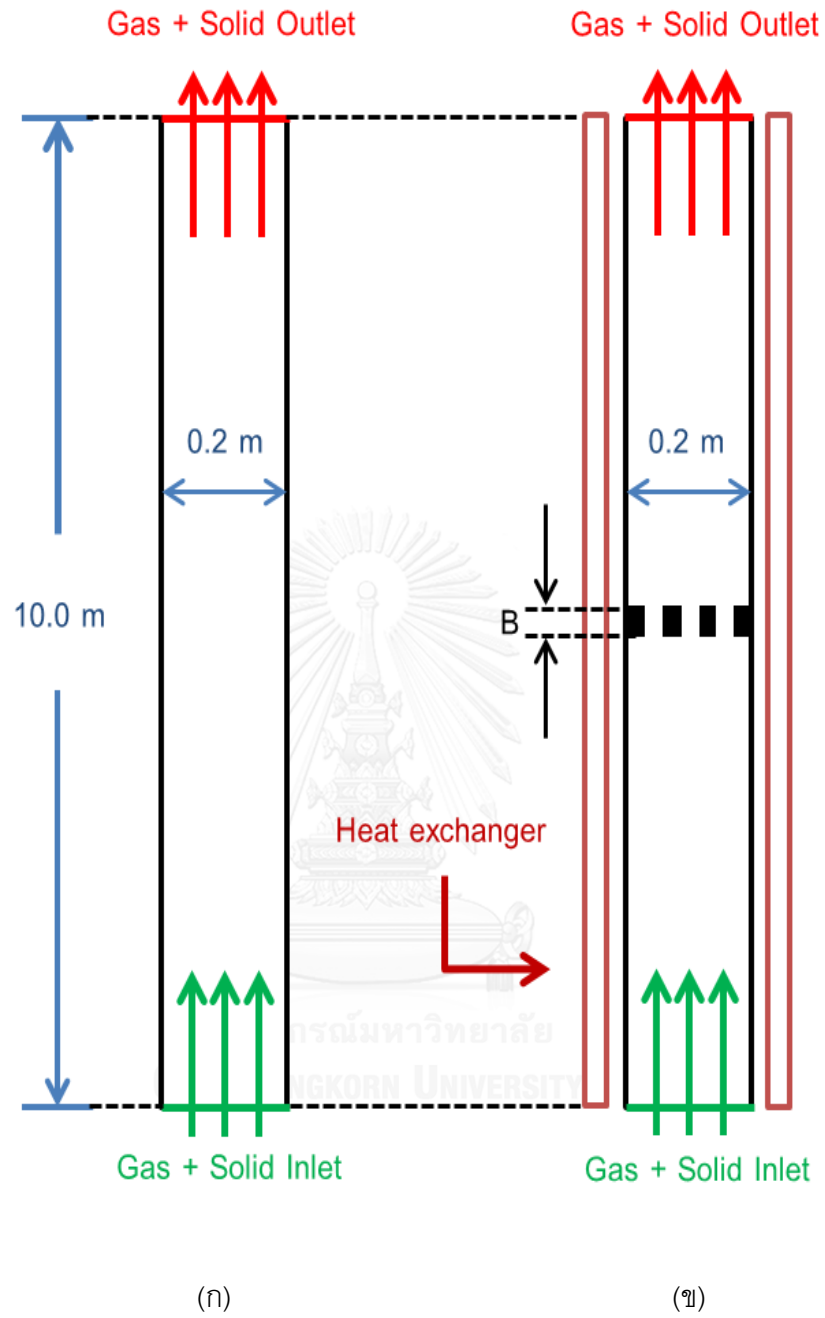
#### วิธีดำเนินงานวิจัย

การจำลองอุทกพลศาสตร์ และปฏิกิริยาเคมีในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการจำลองภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดของการทดลอง Chang และคณะ (Chang, 2013) โดยท่อโรเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร และความสูง 10.0 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) อนุภาคของแข็งที่ใช้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา SAPO-34 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าการนำความร้อน คือ 0.156 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Zhuang, 2012) จัดอยู่ในกลุ่ม A ตามวิธีการจำแนกอนุภาคแบบ Geldart ค่าของผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบ คือ ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็ง (Average axial particle velocity) ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยปริมาตรของช่องว่างในแนวแกนภายในท่อโรเตอร์ (Average axial voidage)

ในการจำลองอุทกพลศาสตร์ และปฏิกิริยาเคมีจะทำการจำลองแบบสองวัฏภาค คือ วัฏภาคแก๊ส และวัฏภาคของแข็ง จากรูป 3.1(ข) แสดงภาพเค้าร่างของท่อโรเตอร์ที่ทำการปรับปรุงเป็นแบบขั้นโดยการติดตั้งขั้นภายในท่อโรเตอร์ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ด้านข้างผนังของท่อโรเตอร์ ตัวแปร A คือจำนวนขั้นของท่อโรเตอร์ B คือความหนาของขั้นภายในท่อโรเตอร์ และ C คืออุณหภูมิของผนังท่อโรเตอร์ โดยงานวิจัยนี้แก๊สและอนุภาคของแข็งจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างด้วยความเร็ว 3.0 และ 0.67 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และมีอุณหภูมิ 723 เคลวิน

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

1. การศึกษาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย
2. การศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขั้น
3. การศึกษาปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขั้น



รูปที่ 6 แผนภาพเค้าร่างของท่อโรเตอร์ที่จะใช้จำลอง (ก) แบบยังไม่ได้รับการปรับปรุง  
(ข) แบบที่ได้รับการปรับปรุงเป็นแบบขั้น

### 3.1 การศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

การหาแบบจำลองการไหลในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิโดซ์เบดที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ แบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ

1. การหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Numerical model)
2. การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test)

#### 3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical model)

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้แนวคิดของออยเลอร์แบบหลายวัฏภาคในโปรแกรมทางการค้า ANSYS FLUENT วัฏภาคแก๊ส และวัฏภาคของแข็งจะถูกพิจารณาเป็นของไหลอย่างต่อเนื่อง ทั้งสองวัฏภาคจะถูกอธิบายในรูปของสมการอนุรักษ์ต่างๆ ซึ่งถูกประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสมการบนพื้นฐานของทฤษฎีจลนการไหลของของแข็ง (Kinetic theory of granular flow : KTGF) (Gidaspow, 1994) โดยกำหนดภาวะของเขต (Boundary conditions) กำหนดภาวะเริ่มต้น (Initial conditions) กำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ในทิศทางติดลบของแกน Y และกำหนดค่าความดันแวดล้อมเท่ากับ 101325 ปาสคาล

##### 3.1.1.1 สมการอนุรักษ์ (Conservation equations)

สมการอนุรักษ์ (Fluent, 2003) ที่ใช้ในแบบจำลองของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวัดแกว่งของของแข็ง

##### 3.1.1.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

วัฏภาคแก๊ส

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

วิญญากาศของแข็ง

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s) = 0 \quad (3.2)$$

โดยที่ผลรวมของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเท่ากับหนึ่งหน่วย  $\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1$   
เมื่อ

$\varepsilon_s$  คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของวิญญากาศของแข็ง (-)

$\varepsilon_g$  คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของวิญญากาศแก๊ส (-)

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของวิญญากาศของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของวิญญากาศแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$v_s$  คือ ความเร็วของวิญญากาศของแข็ง (เมตรต่อวินาที)

$v_g$  คือ ความเร็วของวิญญากาศแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

$t$  คือ เวลา (วินาที)

### 3.1.1.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)

วิญญากาศแก๊ส

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g v_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g v_g v_g) = \nabla \cdot \tau_g - \varepsilon_g \nabla P_g + \varepsilon_g \rho_g g + \beta(v_g - v_s) \quad (3.3)$$

วิญญากาศของแข็ง

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s v_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s v_s) = \nabla \cdot \tau_s - \varepsilon_s \nabla P_s + \varepsilon_s \rho_s g - \beta(v_g - v_s) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$\tau_g$  คือ ความเค้นเทนเซอร์ของแก๊ส (ปาสคาล)

$\tau_s$  คือ ความเค้นเทนเซอร์ของของแข็ง (ปาสคาล)

$P_g$  คือ ความดันของวิญญากาศแก๊ส (ปาสคาล)

- $P_s$  คือ ความดันของวัฏภาคของแข็ง (ปาสคาล)
- $\beta$  คือ แบบจำลองการต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสามวินาที)
- $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

3.1.1.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของวัฏภาคของแข็ง  
(Fluctuating kinetic energy conservation equation)

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s \theta_s) \right] = (-\nabla P_s I + \tau_s) : \nabla v_s + \nabla \cdot (K_s \nabla \theta) - \gamma_s \quad (3.5)$$

เมื่อ

- $I$  คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)
- $\theta_s$  คือ อุณหภูมิของอนุภาค (เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)
- $K_s$  คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
- $\gamma_s$  คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาคหรืออุณหภูมิของอนุภาค (Granular temperature) จะถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการคำนวณด้วยทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาค เช่น ความดันของอนุภาค และความหนืดของอนุภาค เป็นต้น

3.1.1.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g h_g v_g) = -\varepsilon_g \frac{\partial P}{\partial t} + \tau_g : \nabla v_g \quad (3.6)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s h_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s h_s v_s) = -\varepsilon_s \frac{\partial P}{\partial t} + \tau_s : \nabla v_s \quad (3.7)$$

เมื่อ

$h_g$  คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของแก๊ส (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

$h_s$  คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของของแข็ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

### 3.1.1.1.5 สมการอนุรักษ์การไหลและสปีชีส์

แบบจำลองที่ทำการแก้สมการอนุรักษ์การไหล และสปีชีส์นี้ จะถูกคำนวณใน ภูมิภาคของแก๊สเท่านั้น

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon Y_i) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon Y_i v) = -\nabla \cdot \varepsilon J_i + \varepsilon R_{i,ho} + \varepsilon R_{i,het} \quad (3.8)$$

เมื่อ

$R_{i,ho}$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีรวมของสมการปฏิกิริยาเคมีแบบเอกพันธ์ ของสปีชีส์  $i$  (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

$R_{i,het}$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีรวมของสมการปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์ ของสปีชีส์  $i$  (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

$J_i$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของสปีชีส์  $i$  (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

$Y_i$  คือ สัดส่วนโดยมวลของแต่ละสปีชีส์  $i$  (-)

เมื่อ  $J_i$  เป็นฟลักซ์ของการแพร่ของสปีชีส์  $i$  ในการไหลแบบราบเรียบคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$J_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (3.9)$$

เมื่อ  $D_{i,m}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสปีชีส์  $i$  ในของผสม (ตารางเมตรต่อวินาที)

### 3.1.1.2 สมการเสริม (Constitutive equation)

พลังงานของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับการชน และการเคลื่อนไหวเนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาคถูกนำมาอธิบายถึงพฤติกรรมของภูมิภาคของแข็ง

ความเค้นเทนเซอร์ (Stress tensor)

วัสดุภาคแก๊ส

$$\tau_g = \varepsilon_g \mu_g \left[ \frac{1}{2} [\nabla \cdot v_g + (\nabla \cdot v_g)^T] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v_g) I \right] \quad (3.10)$$

วัสดุภาคของแข็ง

$$\tau_s = \varepsilon_s \mu_s [\nabla \cdot v_s + (\nabla \cdot v_s)^T] - \varepsilon_s \left( \xi_s - \frac{3}{2} \mu_s \right) \nabla \cdot v_s \quad (3.11)$$

เมื่อ

$\xi_s$  คือ ความหนืดรวม (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

$\mu_s$  คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

ความดันของอนุภาคจะประกอบด้วยสองพจน์ พจน์ที่หนึ่งเกี่ยวข้องกับการชนกันของอนุภาคซึ่งจะมีผลสูงในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง และพจน์ที่สองจะเกี่ยวข้องกับจลนศาสตร์ซึ่งจะมีผลสูงในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคต่ำ

$$P_s = 2\rho_s(1+e)\varepsilon_s^2 g_0 \theta_s + \varepsilon_s \rho_s \theta_s \quad (3.12)$$

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

$$g_0 = \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.13)$$

ความหนืดเนื่องจากความเค้นจะประกอบด้วยพจน์ของจลนศาสตร์ การชน และแรงเสียดทานซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคของแข็ง

$$\mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} + \frac{10\rho_s d_p \sqrt{\pi\theta}}{96(1+e)g_0 \varepsilon_s} \left[ 1 + \frac{4}{5} \varepsilon_s g_0 (1+e) \right]^2 \quad (3.14)$$



เมื่อ

$e$  คือ Restitution Coefficient

$e = 1$  คือ การชนแบบยืดหยุ่นซึ่งจะไม่มี การสูญเสียพลังงาน

$e = 0$  คือ การชนซึ่งจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดระหว่างการชน

$0 < e < 1$  คือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งจะสูญเสียพลังงานระหว่างการชน

$d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

สำหรับการบีบอัด และการขยายตัวของอนุภาคของแข็งจะใช้ความหนาแน่นรวมของอนุภาคเป็นตัววัดความต้านทานของอนุภาค

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1 + e) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.15)$$

พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ( $\gamma_s$ )

$$\gamma_s = 3 \varepsilon_s^2 \rho_s g_0 \theta_s (1 - e^2) \left[ \frac{4}{d_p} \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \right] \quad (3.16)$$

พลังงานการกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ ( $K_s$ )

$$K_s = \frac{150 \rho_s d_p \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1 + e) g_0} \left[ 1 + \frac{6}{5} \varepsilon_s g_0 (1 + e) \right]^2 + 2 \varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_0 (1 + e) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.17)$$

แบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ Energy minimization multi scale (EMMS) ซึ่งพัฒนาโดย Yang และคณะ (Yang, 2004) โดยจากการวิจัยของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (B. Chalerm-sinsuwan, Kuchonthara, P. and Piumsomboon, P., 2010; B. Chalerm-sinsuwan, Piumsomboon, P. and Gidaspow, D., 2009) พบว่า แบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบ EMMS นั้นเหมาะกับการจำลองการไหลภายใต้ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization) เนื่องจากแบบจำลองการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคนี้จะคำนึงถึงผลของการเกิดกลุ่มก้อนของอนุภาคขึ้นภายในกระบวนการ

$$\beta_{gs} = 150 \frac{(1-\varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g |v_g - v_s|}{d_p} \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_g < 0.74 \quad (3.18)$$

$$\beta_{gs} = \frac{3(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{4} \frac{\rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \omega(\varepsilon_g)}{d_p} \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_g > 0.74 \quad (3.19)$$

$$\omega(\varepsilon_g) = -0.5760 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044} \quad \text{เมื่อ } 0.74 \leq \varepsilon_g < 0.82 \quad (3.20)$$

$$\omega(\varepsilon_g) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad \text{เมื่อ } 0.82 \leq \varepsilon_g < 0.97 \quad (3.21)$$

$$\omega(\varepsilon_g) = -31.8295 + 32.8295 \varepsilon_g \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_g > 0.97 \quad (3.22)$$

$$C_{D0} = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad \text{เมื่อ } Re < 1000 \quad (3.23)$$

$$C_{D0} = 0.44 \quad \text{เมื่อ } Re \geq 1000 \quad (3.24)$$

$$Re = \frac{d_p \rho_g \varepsilon_g |v_g - v_s|}{\mu_g} \quad (3.25)$$

เมื่อ  $C_{D0}$  คือ สัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (-)

### 3.1.2 การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม

เซลล์การคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เซลล์การคำนวณแบบมีระยะห่างไม่เท่ากัน (Non-uniform grid) จำนวน 4 ค่า ดังรูปที่ 7 ที่แสดงเซลล์การคำนวณในแต่ละขนาดที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ 3000 6000 12000 และ 18000 เซลล์การคำนวณ โดยในการหาจำนวนเซลล์การคำนวณที่เหมาะสมนั้นจะทำการเพิ่มปริมาณเซลล์การคำนวณสูงขึ้น การคำนวณจะเข้าสู่คำตอบค่าๆ หนึ่งสูงขึ้น ในการคำนวณค่าในปริมาตรควบคุมเล็กๆ นั้นจะมีความละเอียดสูงขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการคำนวณสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

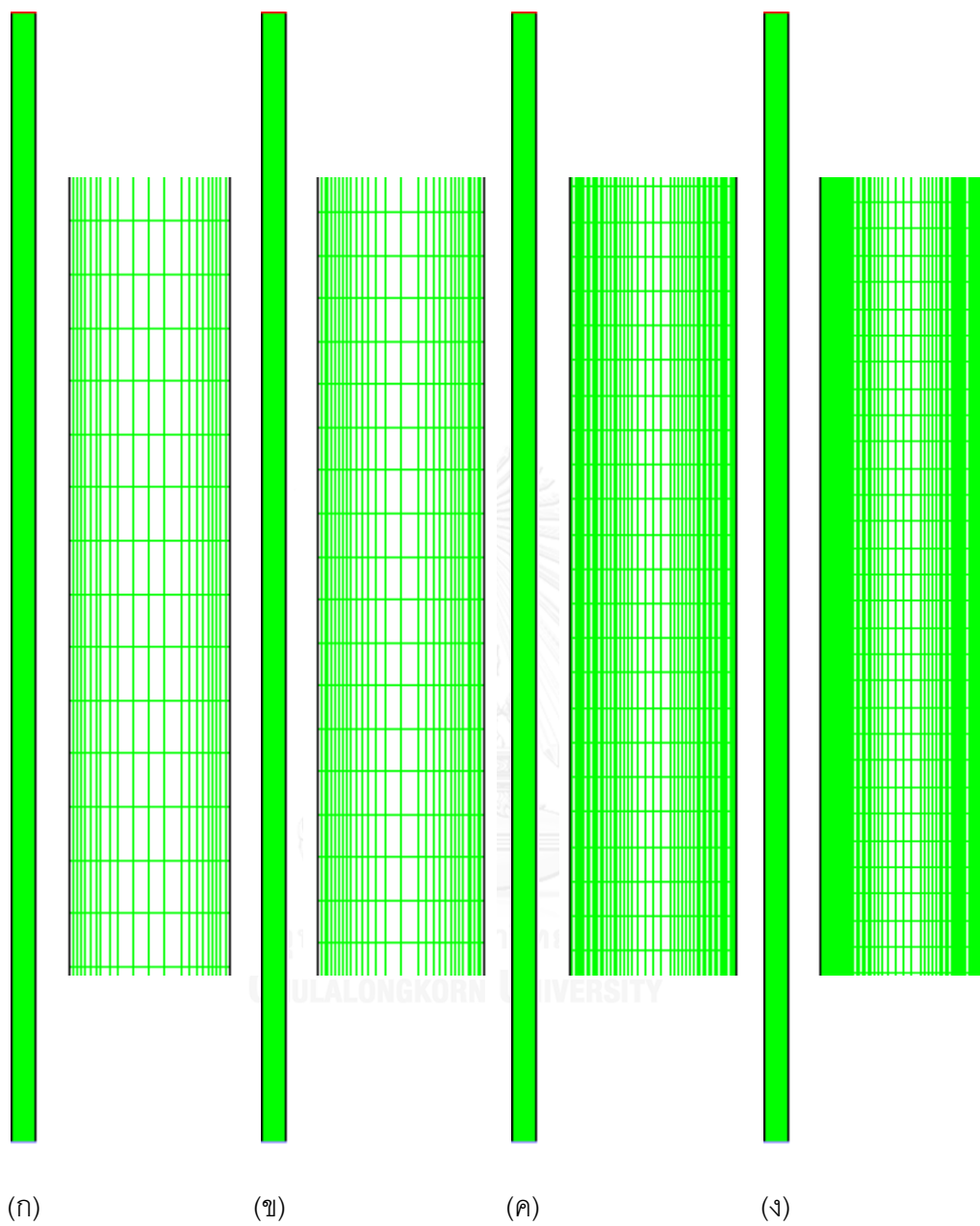
## 3.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้น

### 3.2.1 กรณีพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ร้อยละ 40

ในขั้นตอนการศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้นด้วยวิธีการจำลองของไหลเชิงคำนวณ มีตัวแปรที่ทำการศึกษา 3 ตัวแปร คือ

1. จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ (A) ซึ่งจะกำหนดโดยการลดหรือเพิ่มจำนวนชั้นภายในท่อไรเซอร์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ที่ 2 และ 4 ชั้น โดยกำหนดที่จำนวนชั้นภายในท่อไรเซอร์ที่ 1 และ 2 แผ่น ตามลำดับ ซึ่งจะส่งผลต่อพื้นที่การเคลื่อนที่ของของไหล
2. ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ (B) จะส่งผลต่อระยะความสูงในแต่ละชั้นของท่อไรเซอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความหนาที่ 0.5 และ 10.0 มิลลิเมตร
3. อุณหภูมิของผนังของท่อไรเซอร์ (C) ในงานวิจัยนี้ศึกษาที่อุณหภูมิ 673 และ 773 เคลวิน ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางอุณหพลศาสตร์

จำนวนกรณีการศึกษาใช้ตามวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  เมื่อ  $k$  คือจำนวนตัวแปร ดังนั้นจำนวนการจำลองจึงเท่ากับ  $2^3 = 8$  กรณีศึกษา แต่ละตัวแปรจะเป็นอิสระต่อกัน โดยทำการจำลองทั้งหมด 3 ชุด คือ ที่พลังค์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ดังตารางที่ 2 เปรียบเทียบการจำลองในกรณีศึกษาที่ 0 และ 8 ที่ พลังค์โดยมวลเท่ากับ 200 300 400 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ดังตารางที่ 3 และที่พลังค์โดยมวล 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ดังตารางที่ 4 ในการเปรียบเทียบผลการจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดิซ์แบบขั้นบันไดกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์เบดที่ไม่ได้ปรับปรุง ตัวแปรที่นำมาพิจารณาในส่วนของการบินปน คือ ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เนื่องจากค่าความแปรปรวนบ่งบอกถึงการกระจายตัวของอนุภาคของแข็ง ตัวแปรที่พิจารณาเรื่องการกระจายความร้อน คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิของแก๊ส และตัวแปรที่พิจารณาเรื่องระยะเวลาที่แก๊สสามารถสัมผัสกับของแข็ง คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้เพื่อให้ของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์ ในส่วนการพิจารณาอุทกพลศาสตร์ คือ ความดันลดตลอดความยาวของท่อไรเซอร์ สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง ค่าความเร็วในแนวแกน และแนวรัศมีของแก๊ส และอนุภาคของแข็ง อุณหภูมิของแก๊สในแนวแกนและแนวรัศมี



รูปที่ 7 แสดงการแบ่งเซลล์จำนวน (ก) 3000 (ข) 6000 (ค) 12000 และ (ง) 18000 เซลล์จำนวน

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  ของการทดลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัม ต่อตารางเมตรวินาที

กรณี	จำนวนชั้น (-) (A)	ความหนาของชั้น (มิลลิเมตร) (B)	อุณหภูมิของผนัง (เคลวิน) (C)
0	-	-	-
1	2	0.5	673
2	4	0.5	673
3	2	10.0	673
4	4	10.0	673
5	2	0.5	773
6	4	0.5	773
7	2	10.0	773
8	4	10.0	773

ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองแบบเปรียบเทียบฟลักซ์โดยมวล 100 200 300 400 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

กรณี	จำนวน ชั้น (-) (A)	ความหนาของ ชั้น (มิลลิเมตร) (B)	อุณหภูมิของ ผนัง (เคลวิน) (C)	ฟลักซ์โดยมวล (กิโลกรัมต่อตาราง เมตรวินาที)
9	-	-	-	200
10	-	-	-	300
11	-	-	-	400
12	-	-	-	500
13	4	10.0	773	200
14	4	10.0	773	300
15	4	10.0	773	400
16	4	10.0	773	500

ตารางที่ 4 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  ของการทดลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัม ต่อตารางเมตรวินาที

กรณี	จำนวนชั้น (-) (A)	ความหนาของชั้น (มิลลิเมตร) (B)	อุณหภูมิของผนัง (เคลวิน) (C)
17	2	0.5	673
18	4	0.5	673
19	2	10.0	673
20	4	10.0	673
21	2	0.5	773
22	4	0.5	773
23	2	10.0	773

### 3.2.2 กรณีพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ร้อยละ 10 และ 60

ศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์แบบชั้นตามในหัวข้อ 3.2.1 โดยเปรียบเทียบพื้นที่เปิดชั้นภายในท่อไรเซอร์ ซึ่งมีร้อยละพื้นที่เปิด คือ ร้อยละ 10 40 และ 60 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การจำลองอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เปิดของชั้น โดยที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

กรณี	จำนวนชั้น (-) (A)	ความหนาของ ชั้น (มิลลิเมตร) (B)	อุณหภูมิของผนัง (เคลวิน) (C)	พื้นที่เปิดของชั้น ภายในท่อไรเซอร์ (ร้อยละ)
24	2	10	673	10
25	2	10	673	60

### 3.3 การศึกษาปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขึ้น

ในส่วนของการจำลองการไหลของงานวิจัยนี้ได้เพิ่มเติมในส่วนของการจำลองปฏิกิริยาเคมี โดยเพิ่มชุดสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็น โอเลฟินส์ โดยวิฤภาคของแก๊สประกอบด้วย แก๊สเมทานอล แก๊สเอทิลีน แก๊สโพรพิลีน แก๊สบิวทิลีน แก๊สเพนทีน แก๊สเฮกซีน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน ไอน้ำ และแก๊สไนโตรเจน และในวิฤภาคของแข็งประกอบไปด้วย คาร์บอน (โค้ก) และตัวเร่งปฏิกิริยา SAPO-34 โดยปฏิกิริยาเคมีจะเป็นแบบวิฤพันธ์ (Heterogeneous reactions) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนั้นปรับปรุงมาจากงานของ Jian และคณะ (2013) โดยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error method) เพื่อให้ได้ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดใกล้เคียงกับงานวิจัยดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 6 และสมการต่อไปนี

ตารางที่ 6 สมการเคมี และค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

สมการเคมี (-)	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (กิโลโมลต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา กิโลปาสคาล ชั่วโมง)	ค่าเสียมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (-)
1. $2\text{CH}_3\text{OH} = \text{C}_2\text{H}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	$k_1 = 15.675 \cdot \exp(-38400/RT)$	$\emptyset_1 = -3 \times 10^{-7} T^2 + 0.0006T - 0.2365$
2. $3\text{CH}_3\text{OH} = \text{C}_3\text{H}_6 + 3\text{H}_2\text{O}$	$k_2 = 2 \cdot \exp(-27000/RT)$	$\emptyset_2 = -6 \times 10^{-7} T^2 + 0.0011T - 0.4143$
3. $4\text{CH}_3\text{OH} = \text{C}_4\text{H}_8 + 4\text{H}_2\text{O}$	$k_3 = 0.75 \cdot \exp(-26900/RT)$	$\emptyset_3 = -9 \times 10^{-7} T^2 + 0.0014T - 0.5148$
4. $5\text{CH}_3\text{OH} = \text{C}_5\text{H}_{10} + 5\text{H}_2\text{O}$	$k_4 = 25 \cdot \exp(-49800/RT)$	$\emptyset_4 = -8 \times 10^{-7} T^2 + 0.0013T - 0.4453$
5. $6\text{CH}_3\text{OH} = \text{C}_6\text{H}_{12} + 6\text{H}_2\text{O}$	$k_5 = 0.325 \cdot \exp(-32400/RT)$	$\emptyset_5 = 5 \times 10^{-6} T^2 - 0.0073T + 2.9317$
6. $2\text{CH}_3\text{OH} = \text{C}_{(s)} + \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	$k_6 = 1.27 \times 10^{-18} \cdot \exp(-6707/RT)$	$\emptyset_6 = -1 \times 10^{-6} T^2 + 0.0018T - 0.7954$

$$r_i = k_i(1 - \emptyset C) \cdot Y_{\text{oxygenate}} \cdot P_A \cdot \rho_p \cdot \alpha_p \quad \text{เมื่อ } i = 1-5 \quad (3.26)$$

$$r_6 = k_6(1 - \emptyset C) \cdot X_{\text{oxygenate}} \cdot C_{A0} \cdot P_A \cdot \rho_p \cdot \alpha_p \quad (3.27)$$

เมื่อ	
$r_i$	คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสมการเคมี $i$ (กิโลโมลต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา กิโลปาสกาล ชั่วโมง)
$C$	คือ องค์ประกอบได้ก่เริ่มต้น (ร้อยละโดยมวล)
$P_A$	คือ ความดันย่อยของแก๊สเมทานอลเริ่มต้น (กิโลปาสกาล)
$\rho_p$	คือ ความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยา (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$\alpha_p$	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา
$Y_{oxygenate}$	คือ สัดส่วนโดยโมลของสารประกอบออกซิเจน
$X_{oxygenate}$	คือ ร้อยละการเปลี่ยนของสารประกอบออกซิเจน

ในการจำลองต้องทำการเขียนฟังก์ชันการคำนวณด้วยภาษาซีเพิ่มเติม และทำการเพิ่มฟังก์ชันลงใน User define function (UDF) โดยเขียนฟังก์ชันเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มเข้าไปในโปรแกรม ANSYS Fluent และเนื่องจากมีค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant) ที่สูงมาก ดังแสดงในภาคผนวก ง ซึ่งแสดงถึงมีผลของปฏิกิริยาผันกลับได้น้อยมาก จึงไม่พิจารณาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาผันกลับในการจำลอง

ในส่วนการจำลองปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์นั้นใช้การออกแบบการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขึ้น ตามตารางที่ 7 และ 8 สำหรับฟลักซ์โดยมวล 100 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ตามลำดับ สำหรับกรณีพื้นที่เปิดช่องว่างเท่ากับร้อยละ 40 และกรณีพื้นที่เปิดช่องว่างเท่ากับร้อยละ 10 และ 60 ดังตารางที่ 9



ตารางที่ 7 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  ของการทดลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัม ต่อตารางเมตรวินาทีโดยเพิ่มปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

กรณี	จำนวนชั้น (-) (A)	ความหนาของชั้น (มิลลิเมตร) (B)	อุณหภูมิของผนัง (เคลวิน) (C)
26	-	-	-
27	2	0.5	673
28	4	0.5	673
29	2	10.0	673
30	4	10.0	673
31	2	0.5	773
32	4	0.5	773
33	2	10.0	773
34	4	10.0	773

ตารางที่ 8 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  ของการทดลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัม ต่อตารางเมตรวินาทีโดยเพิ่มปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

กรณี	จำนวนชั้น (-) (A)	ความหนาของชั้น (มิลลิเมตร) (B)	อุณหภูมิของผนัง (เคลวิน) (C)
35	-	-	-
36	2	0.5	673
37	4	0.5	673
38	2	10.0	673
39	4	10.0	673
40	2	0.5	773
41	4	0.5	773
42	2	10.0	773
43	4	10.0	773

ตารางที่ 9 การจำลองปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในท่อไรเซอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เปิดของชั้น โดยที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

กรณี	จำนวนชั้น (-) (A)	ความหนาของ ชั้น (มิลลิเมตร) (B)	อุณหภูมิของผนัง (เคลวิน) (C)	พื้นที่เปิดของชั้น ภายในท่อไรเซอร์ (ร้อยละ)
44	2	10	673	10
45	2	10	673	60



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย

การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test) ที่ใช้เวลาในการคำนวณต่ำที่สุดที่ยังให้ค่าที่ทำนายถูกต้อง และการหาค่าตัวแปรดำเนินการต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chang และคณะ (Chang, 2013)

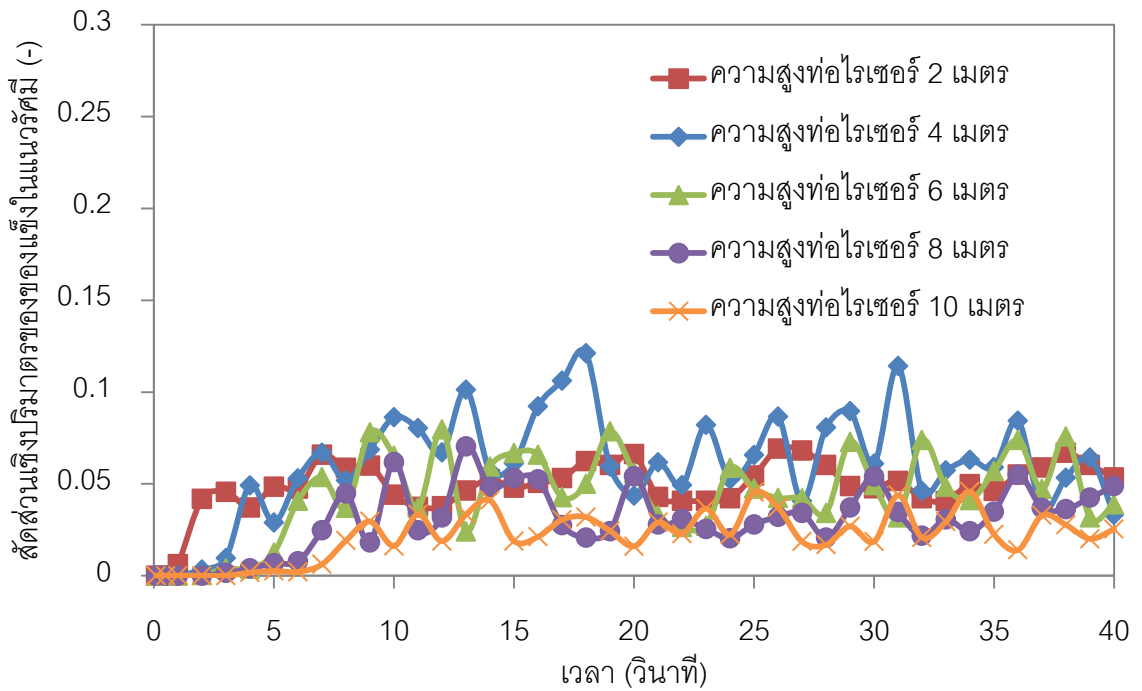
ในการหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมนั้นได้ใช้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกนในช่วงเวลาที่ 20-40 วินาทีซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (Steady state) เนื่องจากค่าที่ได้มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $\bar{X} \pm 2\sigma$ ) ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยจำนวนเซลล์การคำนวณที่นำมาศึกษา ได้แก่ จำนวนเซลล์การคำนวณที่มีขนาด 3000 6000 12000 และ 18000 เซลล์ ซึ่งมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) โดยจะมีเซลล์การคำนวณหนาแน่นบริเวณด้านข้าง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหลมีการเคลื่อนที่เป็นแบบระฆังคว่ำ (Parabola) ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า เซลล์การคำนวณที่มีจำนวน 3000 6000 และ 12000 เซลล์มีค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกนแตกต่างกัน แต่จำนวนเซลล์การคำนวณ 12000 เซลล์ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับเซลล์การคำนวณที่มีจำนวน 18000 เซลล์ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มจำนวนเซลล์การคำนวณไปจนถึง 18000 เซลล์ ใช้เพียงแค่ 12000 เซลล์ก็เพียงพอ เนื่องจากต้องการเวลาที่ใช้ในการคำนวณต่ำที่สุด

การหาค่าตัวแปรดำเนินการต่างๆ โดยการปรับค่าสัดส่วนความเร็วของแก๊สขาเข้าท่อไรเซอร์ ค่าสัมประสิทธิ์การคืนสภาพ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง ดังตารางที่ 10 เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chang และคณะ (Chang, 2013) ในตัวแปรการกระจายตัวในแนวรัศมีค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแกน จากรูปที่ 10 พบว่า การจำลองที่ 4 ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chang และคณะ (Chang, 2013) ดังนั้นจึงนำค่าตัวแปรต่างๆ

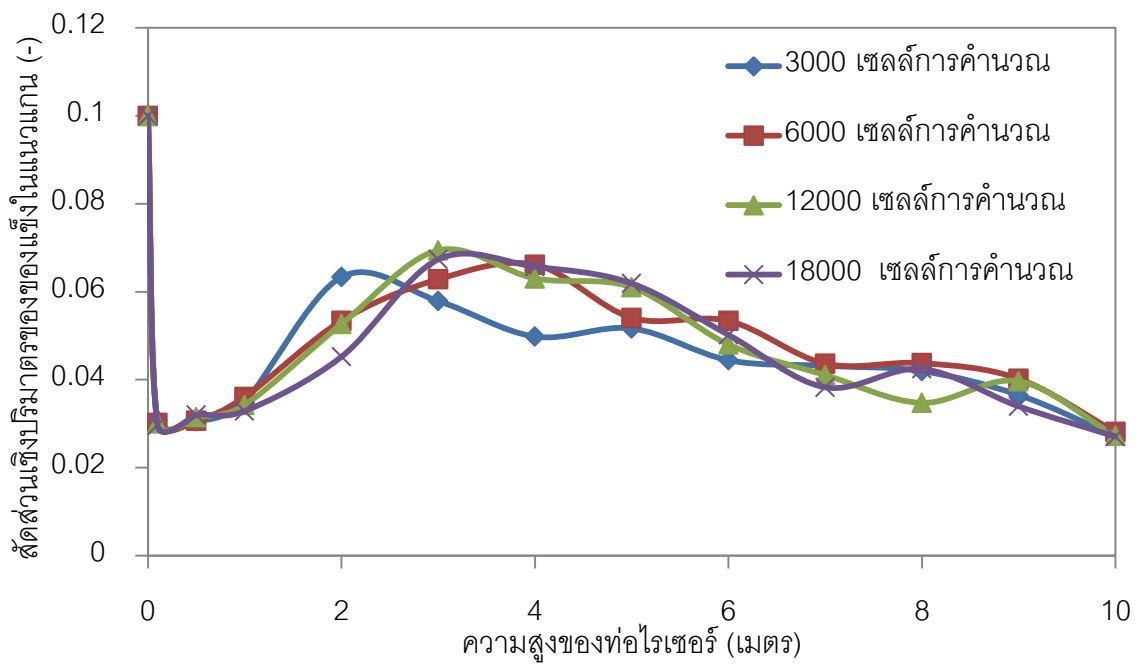
มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยสัดส่วนช่องว่างมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chang และคณะ (Chang, 2013) และ Soundararajan และคณะ (Soundararajan, 2001) เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการไหล ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งพบว่าการจำลองที่ 4 ให้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ตารางที่ 10 ตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการหาแบบจำลองการไหล

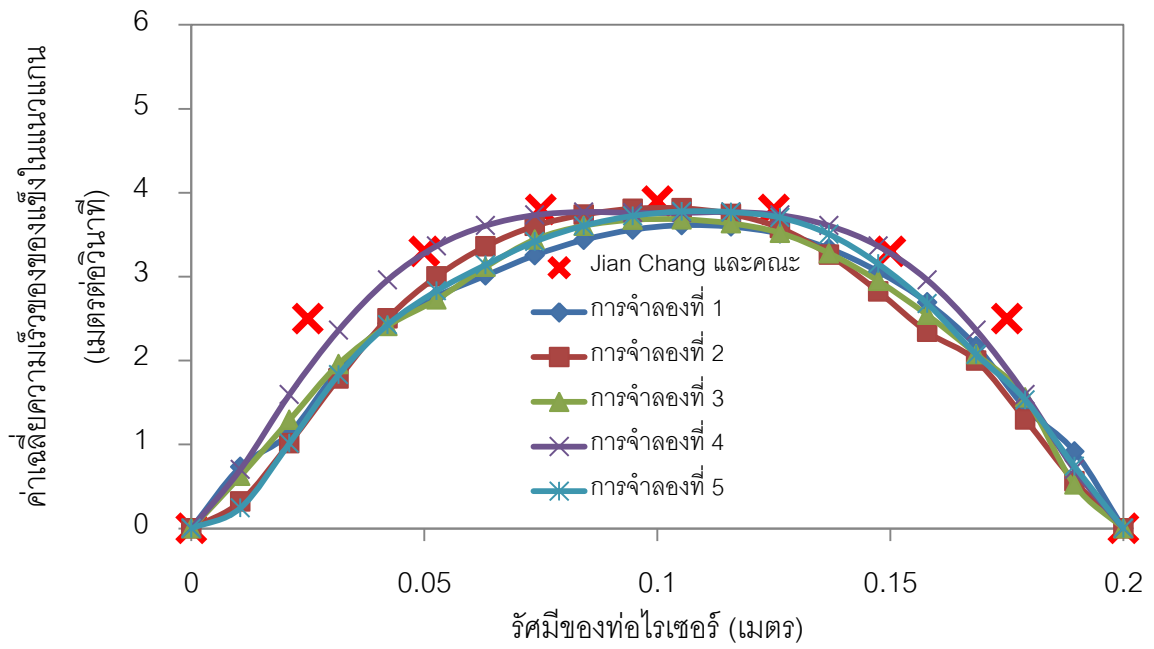
แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ยึดหยุ่น (-)		Specularity coefficient (-)	สัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็ง (-)	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)				
	ระหว่างอนุภาคกับอนุภาค	ระหว่างอนุภาคกับผนัง			ช่วงที่ 1 และ 10	ช่วงที่ 2 และ 9	ช่วงที่ 3 และ 8	ช่วงที่ 4 และ 7	ช่วงที่ 5 และ 6
1	1	0.8	0.01	0.1	2	2.4	3.2	3.7	3.9
2	0.9	0.7	0.3	0.1	2	2.4	3.2	3.7	3.9
3	0.9	0.7	0.2	0.1	2	2.4	3.2	3.7	3.9
4	0.9	0.7	0.2	0.1	2.3	2.4	3.2	3.5	3.8
5	0.9	0.7	0.2	0.9	2	2.4	3.2	3.7	3.9



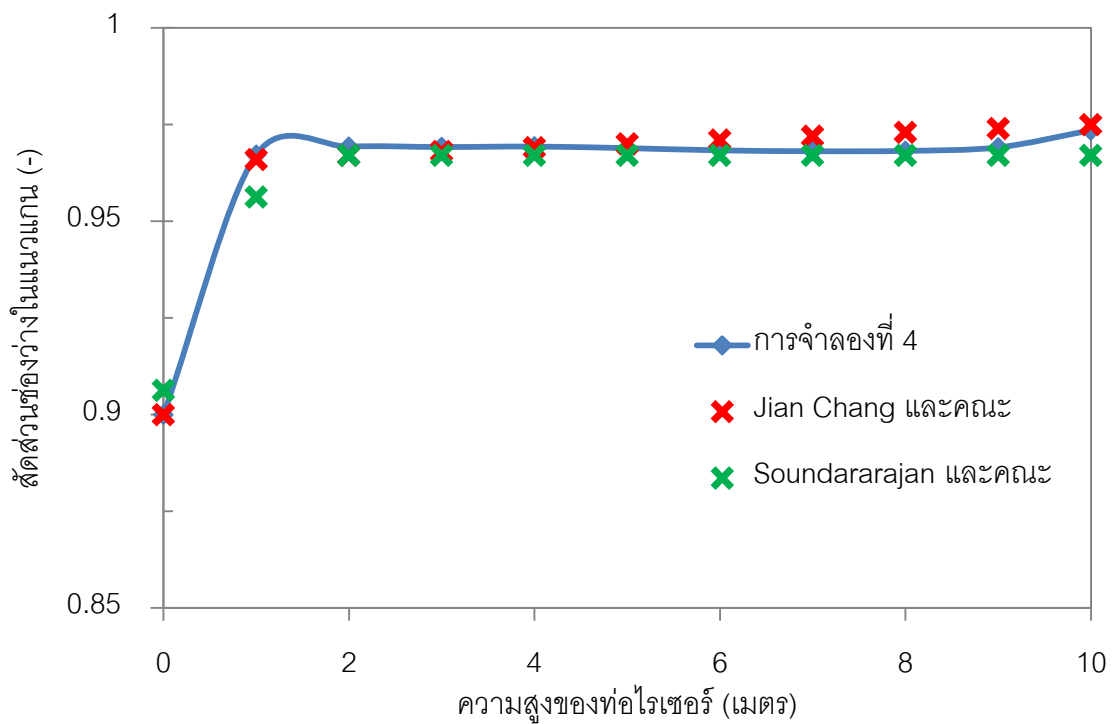
รูปที่ 8 สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่ความสูงต่างๆ ในช่วงเวลา 0-40 วินาที



รูปที่ 9 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณในตัวแปรสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน



รูปที่ 10 การกระจายตัวในแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกนที่การจำลองต่าง ๆ



รูปที่ 11 เปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างระหว่างงานวิจัยปัจจุบันกับงานวิจัยที่ผ่านมา

## 4.2 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ที่ฟลักซ์โดยมวล 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

### 4.2.1 การออกแบบการทดลอง

จากตารางที่ 11 พบว่า ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการปรับปรุงท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าสูงหมายถึงการกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมีภายในท่อโรเตอร์มีความไม่สม่ำเสมอสูงขึ้น เนื่องจากมีความปั่นป่วนของการเคลื่อนที่ของของแข็งเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลจากการที่มีพื้นที่ในการเคลื่อนที่ของของแข็งต่ำลง โดยในกรณีศึกษาที่ 4 และ 8 ซึ่งมีจำนวนชั้นของท่อโรเตอร์ คือ 4 ชั้น ความหนาของชั้น คือ 10.0 มิลลิเมตร และอุณหภูมิของผนังท่อโรเตอร์ คือ 673 และ 773 เคลวิน ตามลำดับ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีใกล้เคียงกัน และสูงที่สุด การมีค่าดังกล่าวสูงหมายความว่ามีการกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมีไม่สม่ำเสมอ มีความปั่นป่วนสูง เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ และนอกจากนั้นในกรณีศึกษาที่ 8 ยังมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมีต่ำที่สุด หมายถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวรัศมีของแก๊สมีความสม่ำเสมอสูงที่สุด แสดงถึงการปรับปรุงท่อโรเตอร์แบบนี้ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีดีกว่าแบบอื่น ในส่วนของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อโรเตอร์มีค่าสูงที่สุดในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นท่อโรเตอร์แบบ 4 ชั้น ชั้นภายในท่อโรเตอร์มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร อุณหภูมิของผนังท่อโรเตอร์ คือ 673 เคลวิน ในส่วนของเวลาที่ทำให้ของแข็งหลุดออกจากท่อโรเตอร์ พบว่า ทุกกรณีศึกษาใช้เวลามากกว่าเวลาอุดมคติ คือ 15 วินาที เนื่องจากในการจำลองนี้ได้ใช้มุมมองแบบลากรางจ์ (Lagrangian viewpoint) เป็นมุมมองที่ติดตามอนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งต่างๆ ในเวลาต่างๆ ซึ่งไม่ยึดติดกับตำแหน่งเพื่อใช้เป็นเวลาในการเปรียบเทียบในแต่ละกรณีศึกษา ร่วมกับมุมมองแบบออยเลอร์ (Eulerian viewpoint) ที่เป็นมุมมองที่กำหนดตำแหน่งตายตัว ซึ่งต่างจากเวลาอุดมคติที่คิดจาก ที่ไม่มีผลของบริเวณจุดบอด (Dead zone) จึงทำให้มีเวลาดำกว่า ดังนั้นกรณีศึกษาที่ 5 ซึ่งเป็นท่อโรเตอร์แบบ 2 ชั้น ชั้นภายในท่อโรเตอร์มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร และอุณหภูมิของผนังท่อโรเตอร์ คือ 773

เคลวิน พบว่าใช้เวลาที่ทำให้ของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์สูงที่สุด คือ 44.77 วินาที แสดงถึงว่าของแข็งมีโอกาสสัมผัสกับแก๊สได้นานกว่ากรณีศึกษาอื่น ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 11 การออกแบบการทดลองแบบ 2<sup>3</sup> ของการศึกษาผลของตัวแปรติดตั้ง และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง

กรณีศึกษา	จำนวนชั้น (-)	ความหนาชั้น (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี (-)	สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง (-)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมี (-)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
0	-	-	-	0.0036	0.0339	0.0000	36.96
1	2	0.5	673	0.0041	0.0330	12.6251	27.76
2	4	0.5	673	0.0055	0.0349	12.5717	36.28
3	2	10.0	673	0.0053	0.0332	12.6825	44.48
4	4	10.0	673	0.0065	0.0342	12.5378	34.54
5	2	0.5	773	0.0049	0.0326	12.5976	44.77
6	4	0.5	773	0.0060	0.0340	12.5157	43.54
7	2	10.0	773	0.0057	0.0329	12.7173	42.58
8	4	10.0	773	0.0066	0.0332	12.4595	39.48

\* เวลาที่ทำให้ของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์ไปเป็นจำนวนร้อยละ 73 ของของแข็งทั้งหมดที่ใส่เข้าไป



ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	1.213E-004	1	1.213E-004	49.91	0.0058
B-Thickness	7.509E-005	1	7.509E-005	30.89	0.0115
C-Temperature	1.979E-005	1	1.979E-005	8.14	0.0649
AB	2.027E-006	1	2.027E-006	0.83	0.4285
Residual	7.292E-006	3	2.431E-006		
Total	2.255E-004	7			

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของ  
ของแข็ง

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	2.07	1	2.07	48.01	0.0062
B-Thickness	0.087	1	0.087	2.01	0.2511
C-Temperature	0.65	1	0.65	15.15	0.0301
AB	0.39	1	0.39	8.96	0.0580
Residual	0.13	3	0.043		
Total	3.32	7			

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
อุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมี

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	0.36	1	0.036	53.15	0.0053
C-Temperature	2.016E-003	1	2.016E-003	2.96	0.1836
AB	8.294E-003	1	8.924E-003	13.12	0.0362
AC	2.506E-003	1	2.506E-003	3.68	0.1507
Residual	2.041E-003	3	6.803E-004		
Total	0.052	7			

ตารางที่ 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ใน  
ท่อไรเซอร์

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
C-Temperature	93.32	1	93.32	19.03	0.0223
AB	51.69	1	51.69	10.54	0.0476
BC	56.28	1	56.28	11.47	0.0429
ABC	34.37	1	34.37	7.01	0.0772
Residual	14.71	3	4.90		
Total	250.36	7			

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) โดยใช้ตัวแปร  
ตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี ค่า  
สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของ  
แก๊สตามในรัศมี และค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์ จากตารางที่ 12 พบว่า ตัวแปร A  
หรือจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร B หรือ ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์เป็นตัวแปรที่มี

นัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งใน  
 แนวนอร์สมี เนื่องจากมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 สำหรับตัวแปรตอบสนองค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของ  
 ของแข็ง จากตารางที่ 13 พบว่า ตัวแปร A หรือ จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร C หรือ  
 อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์เป็นตัวแปรที่มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าเป็นตัวแปรที่มี  
 นัยสำคัญที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้ ตารางที่ 14 เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า  
 ตอบสนองเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สตามโนร์สมี พบว่า จำนวนชั้นของท่อ  
 ไรเซอร์ (A) และอันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นและความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์เป็นตัวแปรที่  
 มีผลต่อค่าตอบสนองนี้อย่างมีนัยสำคัญ เพราะมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 และดังตารางที่ 15  
 แสดงการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์นั้น พบว่า  
 อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ (C) อันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์และความหนาของชั้น  
 ภายในท่อไรเซอร์ (AB) และอันตรกิริยาระหว่างความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์และอุณหภูมิ  
 ของผนังท่อไรเซอร์ มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่า  
 ตอบสนองนี้อย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 12 แสดงตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วน  
 เชิงปริมาตรของของแข็งในแนวนอร์สมี พบว่า ตัวแปร A หรือ จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร B  
 หรือ ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์มีผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงบวก คือ เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของ  
 ท่อไรเซอร์ หรือ เพิ่มความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จะส่งผลให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  
 สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงมีการกระจายตัวของของแข็งในแนวนอร์สมี  
 ความไม่สม่ำเสมอสูงขึ้น เนื่องจากมีความปั่นป่วนเพิ่มสูงขึ้น

ผลจากการจำลองพบว่า ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อ  
 ไรเซอร์ มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่มีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมองเปรียบเทียบกับตัวแปรต่างๆ  
 ดังรูปที่ 13 พบว่า ตัวแปร A หรือจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์มีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้เชิงบวก คือ  
 เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์จะทำให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์  
 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากจำนวนชั้นจะช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์ย้อนกลับของของแข็ง  
 และตัวแปร C หรืออุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์มีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้เชิงลบ คือ เมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์จะทำให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดความหนืดลดลง ทำให้แก๊สพาของแข็งออกจากท่อไรเซอร์ได้สูงขึ้น

รูปที่ 14 แสดงผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแนวนรัศมี พบว่า ตัวแปร A หรือจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์มีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้เชิงลบ คือ เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์จะทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแนวนรัศมีมีค่าลดลง แสดงถึงการกระจายตัวของความร้อนที่สม่ำเสมอขึ้น ลดการไหลย้อนกลับของของแข็ง ซึ่งการไหลตกกลับของของแข็งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนสะสมเป็นจุดๆ (Hot spot)

รูปที่ 15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร A หรือ จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร B หรือ ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแนวนรัศมี พบว่า ไม่ว่าความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์จะเป็นค่าสูง (+) หรือค่าต่ำ (-) เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์จะส่งผลเชิงลบต่อค่าตอบสนองนี้ หมายความว่า เมื่อความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์มีค่าสูงหรือต่ำ และเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์จะทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแนวนรัศมีมีค่าลดลง โดยที่เมื่อตัวแปร B เป็นค่าสูง เมื่อเพิ่มตัวแปร A จะให้ผลเชิงลบสูงกว่า เมื่อเทียบกับตัวแปร B ที่มีค่าต่ำ เพราะตัวแปร B ที่มีค่าสูงมีความชันของกราฟสูงกว่าตัวแปร B ที่มีค่าต่ำ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับรูปคอนทัวร์ที่ 4.9 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.9 (จ) กับ (ข) และ รูปที่ 16 (ฉ) กับ (ช) พบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอสูงขึ้น ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับการเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4.9 (จ) กับ (ฉ) และ รูปที่ 4.9 (ข) กับ (ช)

รูปที่ 17 แสดงผลของตัวแปร C หรืออุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ที่มีต่อค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์จะส่งผลในเชิงบวกต่อค่าตอบสนองนี้ คือ เมื่ออุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์เพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้เพื่อให้ของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์ร้อยละ 73 ของของแข็งที่ใส่เข้าไปก็จะสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่บริเวณผนังสูงขึ้น

ทำให้ของแข็งมีอุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular temperature) สูงขึ้น ทำให้ของแข็งมีโอกาสไปชนกับชั้นภายในท่อโรเซอรัแล้วตกกลับลงมา ทำให้เวลาที่ใช้ให้ของแข็งหลุดออกจากท่อโรเซอรัเพิ่มขึ้น

รูปที่ 18 แสดงผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อโรเซอรั พบว่า ตัวแปร A หรือ C มีค่าต่ำ (-) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร B จะให้ผลเชิงบวก หมายความว่าเมื่อใช้จำนวนชั้นของท่อโรเซอรัต่ำ หรือใช้อุณหภูมิของผนังท่อโรเซอรัต่ำ การเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นภายในท่อโรเซอรัจะทำให้เวลาที่ใช้เพื่อให้ของแข็งหลุดออกจากท่อโรเซอรัเพิ่มขึ้น เนื่องจากในกรณีที่อุณหภูมิของผนังท่อโรเซอรัมีค่าต่ำทำให้เกิดความหนืดขึ้นเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นทำให้เกิดการสะสมของของแข็งบริเวณช่องว่างของชั้นมากขึ้น เพราะแก๊สมีความหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้มีความเร็วลดลง ทำให้แก๊สพาของแข็งออกไปได้ช้า ในทางตรงกันข้ามเมื่อตัวแปร A หรือตัวแปร C มีค่าสูง (+) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร B จะให้ผลในเชิงลบ หมายความว่าเมื่อใช้จำนวนชั้นของท่อโรเซอรัสูง หรือใช้อุณหภูมิของผนังท่อโรเซอรัสูง การเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นภายในท่อโรเซอรัจะทำให้เวลาที่ใช้เพื่อให้ของแข็งหลุดออกจากท่อโรเซอรัลดลง เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้นจะช่วยเพิ่มความเร็วของแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างของชั้นมากขึ้น และในกรณีที่มีจำนวนชั้นมากเป็นการส่งเสริมให้เกิดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแก๊สมากขึ้น เพราะมีการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของชั้นมากขึ้น และอุณหภูมิของผนังท่อโรเซอรัทำให้แก๊สมีความหนืดลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นส่วนช่วยให้แก๊สเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แก๊สพาของแข็งออกท่อจากโรเซอรัได้เร็วขึ้น

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น สามารถหาแบบจำลองถดถอย (Regression model) เพื่อนำผลการวิจัยนี้ที่มีค่าตอบสนอง คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อโรเซอรั ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมี และค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อโรเซอรั ไปใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบดแบบชั้น ดังสมการที่ (4.1) สำหรับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี สมการที่ (4.2) สำหรับค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อโรเซอรั สมการที่ (4.3) สำหรับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อุณหภูมิของแก๊สในแวนรค์มี และสมการที่ (4.4) สำหรับค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์

$$Y_1^{1/2} = 0.0745 + 0.0040X_A + 0.0031X_B \quad (4.1)$$

$$1/Y_2 = 29.8649 - 0.5085X_A + 0.2857X_C \quad (4.2)$$

$$Y_3 = 12.59 - 0.067X_A - 0.033X_A X_B \quad (4.3)$$

$$Y_4 = 39.1780 + 3.4154X_C - 2.5419X_A X_B - 2.6523X_B X_C \quad (4.4)$$

โดยที่ตัวแปร  $Y_1$  คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแวนรค์มี

$Y_2$  คือ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์

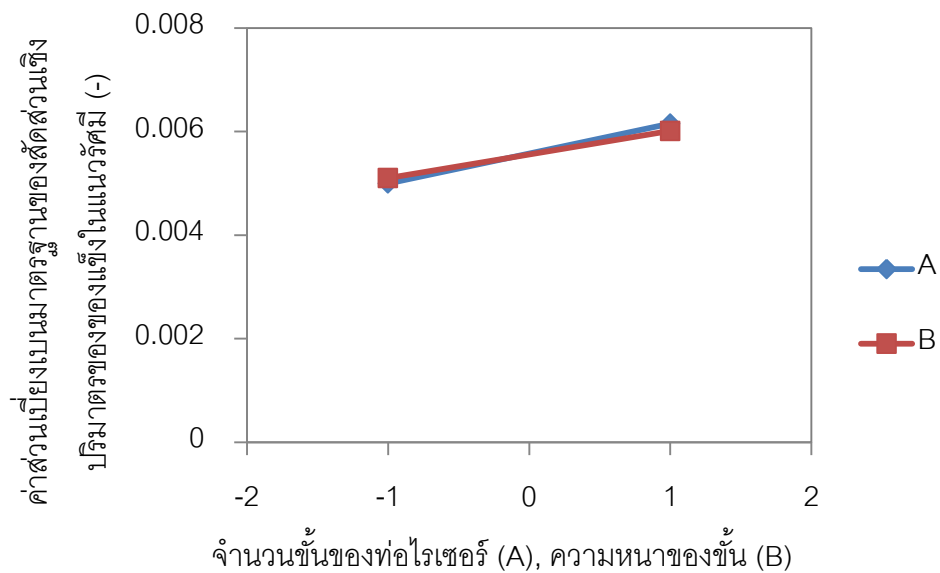
$Y_3$  คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแวนรค์มี

$Y_4$  คือ ค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์

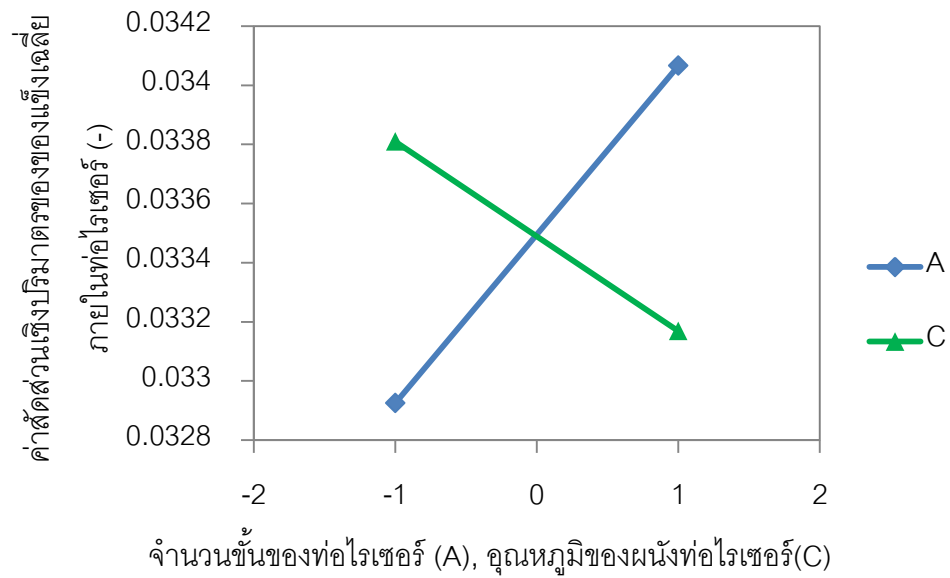
$X_A$ ,  $X_B$  และ  $X_C$  คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A B และ C ตามลำดับ

หลังจากที่ได้สมการถดถอยแล้ว เราสามารถนำสมการถดถอยมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) โดยรูปที่ 19 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแวนรค์มี เมื่อใช้จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ต่างๆ กัน พบว่า ท่อไรเซอร์แบบ 4 ชั้น และใช้ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์เป็น 10.0 มิลลิเมตร จะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแวนรค์มีต่ำที่สุด เพราะชั้นของท่อไรเซอร์แบบ 4 ชั้น และความหนาของชั้น ช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของของไหล ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น และรูปที่ 20 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์ (ก) เมื่อใช้จำนวนท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ต่างๆ กัน พบว่า เมื่อใช้ท่อไรเซอร์แบบ 4 ชั้น และความหนาชั้นเป็น 0.5 มิลลิเมตรจะใช้เวลาในการให้ของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์สูงที่สุด เพราะจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยยับยั้งการเคลื่อนที่ของของแข็งที่ผ่านขึ้นไปทางออกของท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นที่

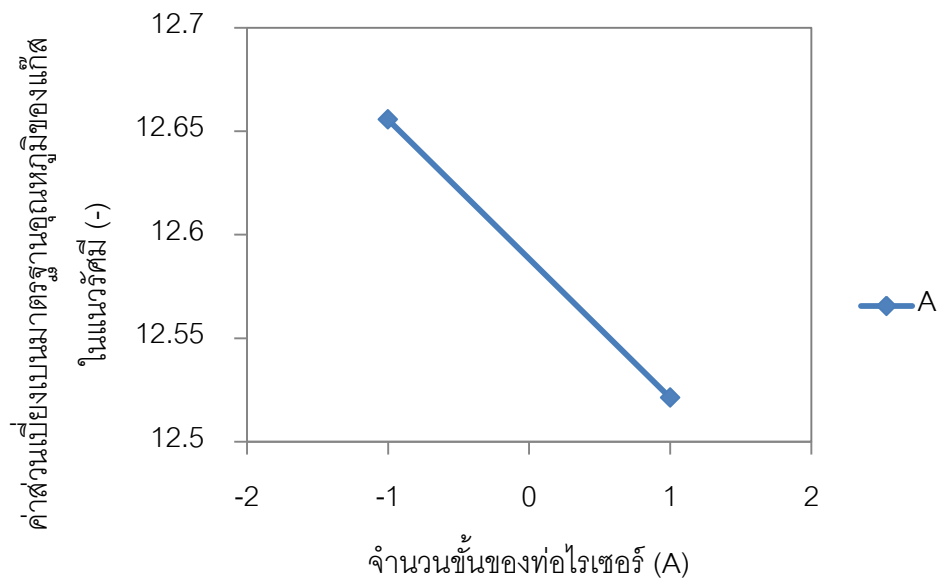
0.5 มิลลิเมตรเป็นความหนาที่ทำให้ไม่เกิดความเร็วระหว่างช่องว่างของชั้นภายในท่อโรเตอร์สูงเกินไป ทำให้ใช้เวลาในท่อโรเตอร์นานกว่า และ(ข) เมื่อใช้ความหนาของชั้นภายในท่อโรเตอร์ และคุณสมบัติของผนังท่อโรเตอร์ต่างๆ กัน พบว่า เมื่อใช้ท่อโรเตอร์ที่มีชั้นหนา 0.5 มิลลิเมตร และคุณสมบัติของผนังท่อโรเตอร์เป็น 773 เคลวิน จะทำให้เวลาที่ทำให้ของแข็งหลุดออกจากท่อโรเตอร์สูงที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติที่มากขึ้นจะทำให้ของแข็งมีคุณสมบัติแกรนูลาร์สูงขึ้น ทำให้ของแข็งมีโอกาสไปชนกับชั้นภายในท่อโรเตอร์แล้วตกกลับลงมา จึงทำให้ใช้เวลานาน ส่วนความหนาของชั้นนั้นเป็นดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 12 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาณของของแข็งในแนวรัศมี

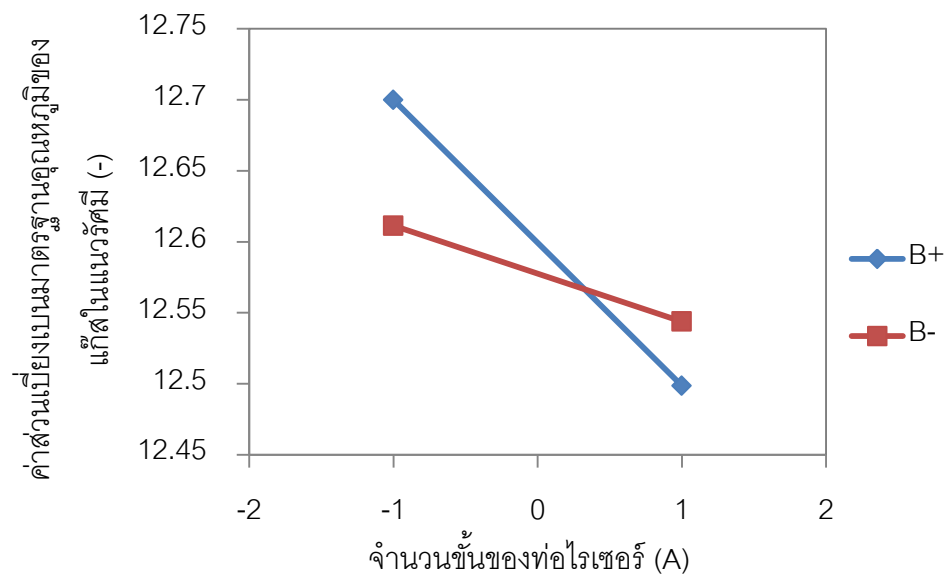


รูปที่ 13 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์

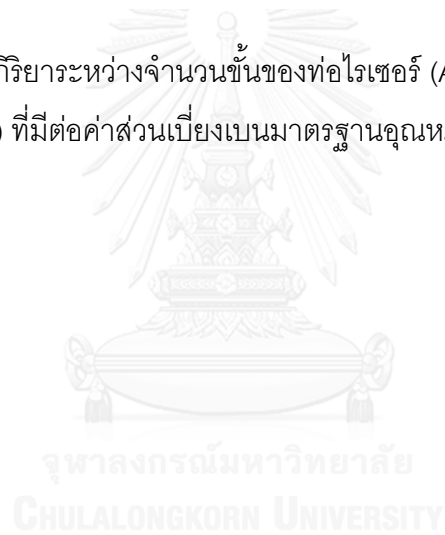


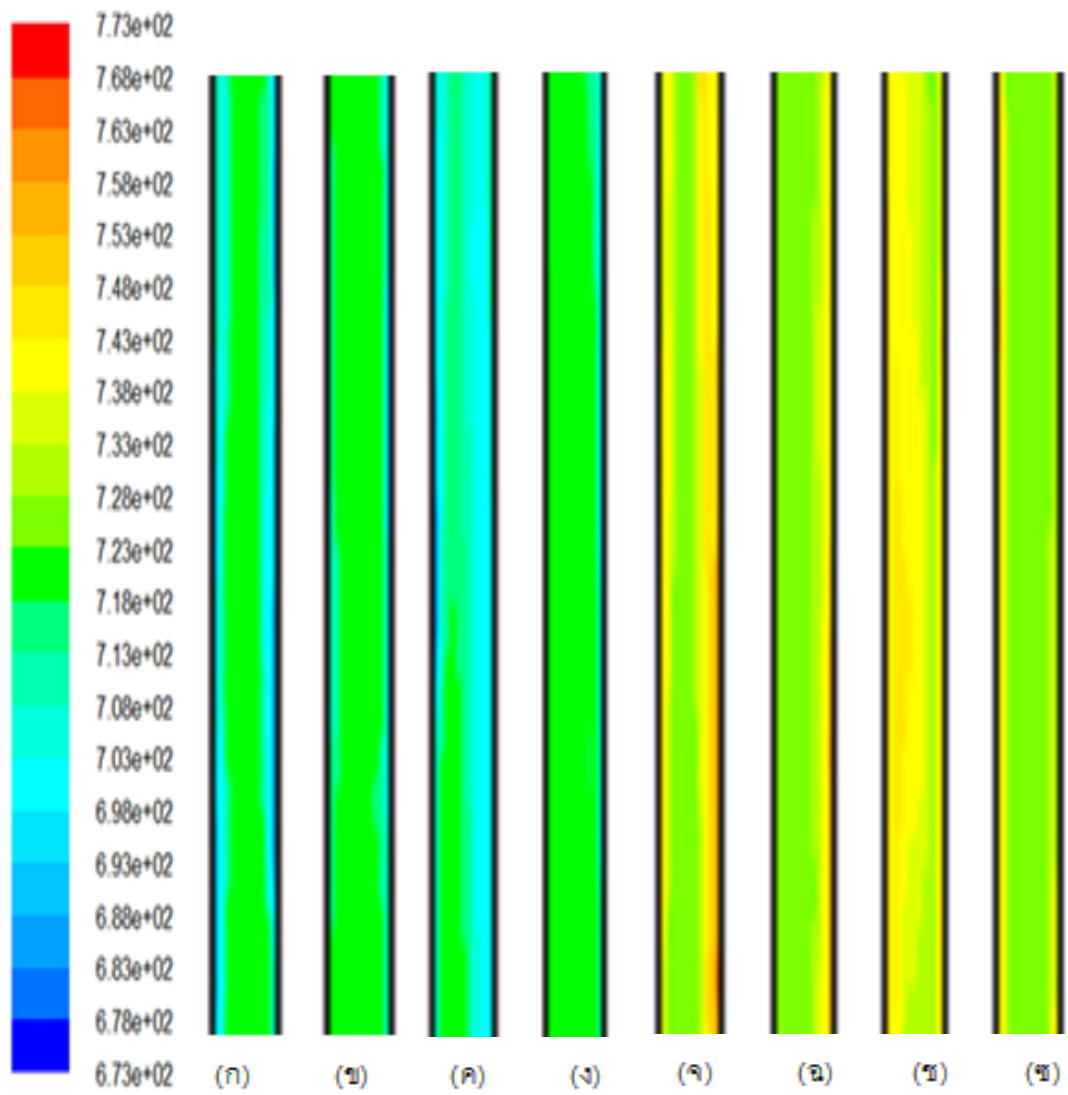
รูปที่ 14 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักเฉลี่ยในแวนวอร์คมี



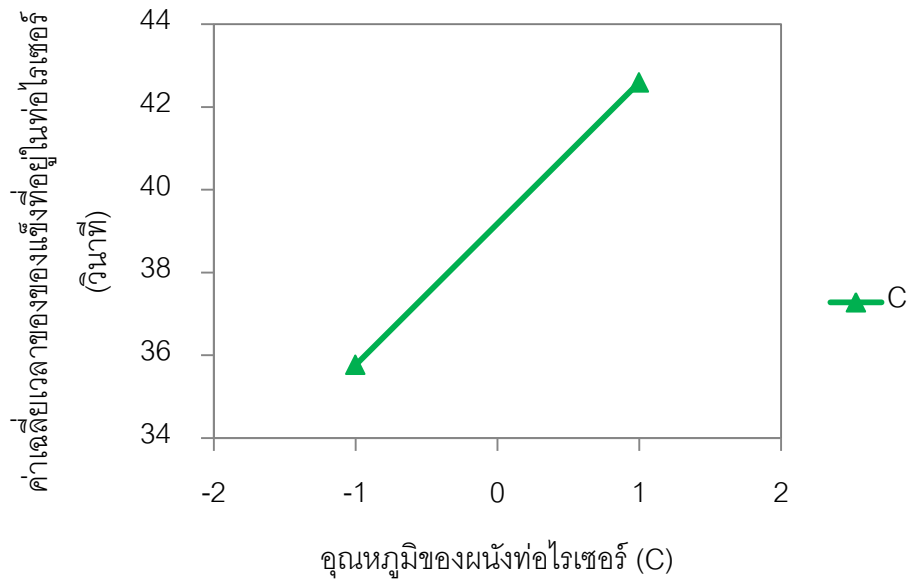


รูปที่ 15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ (A) และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ (B) ที่มีต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคุณภาพของแก๊สในแวนอร์คมี

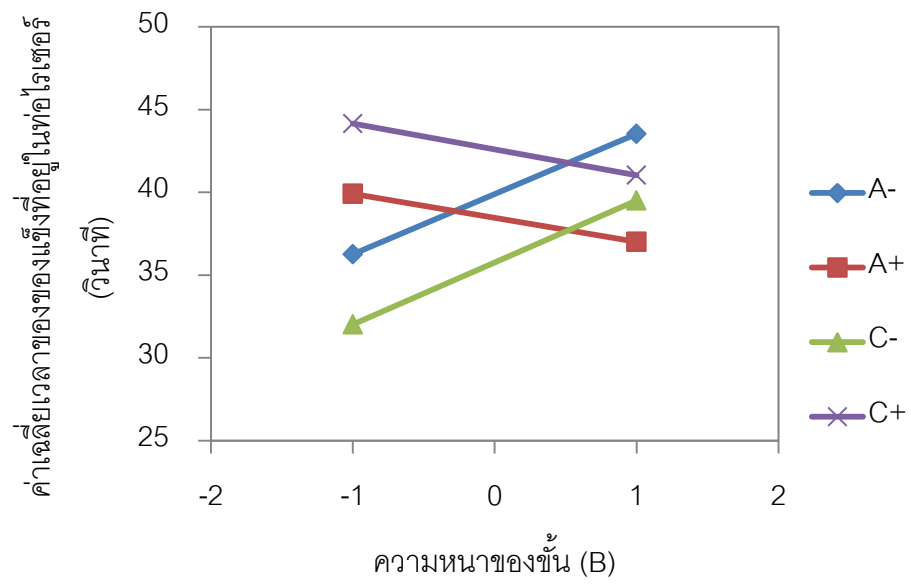




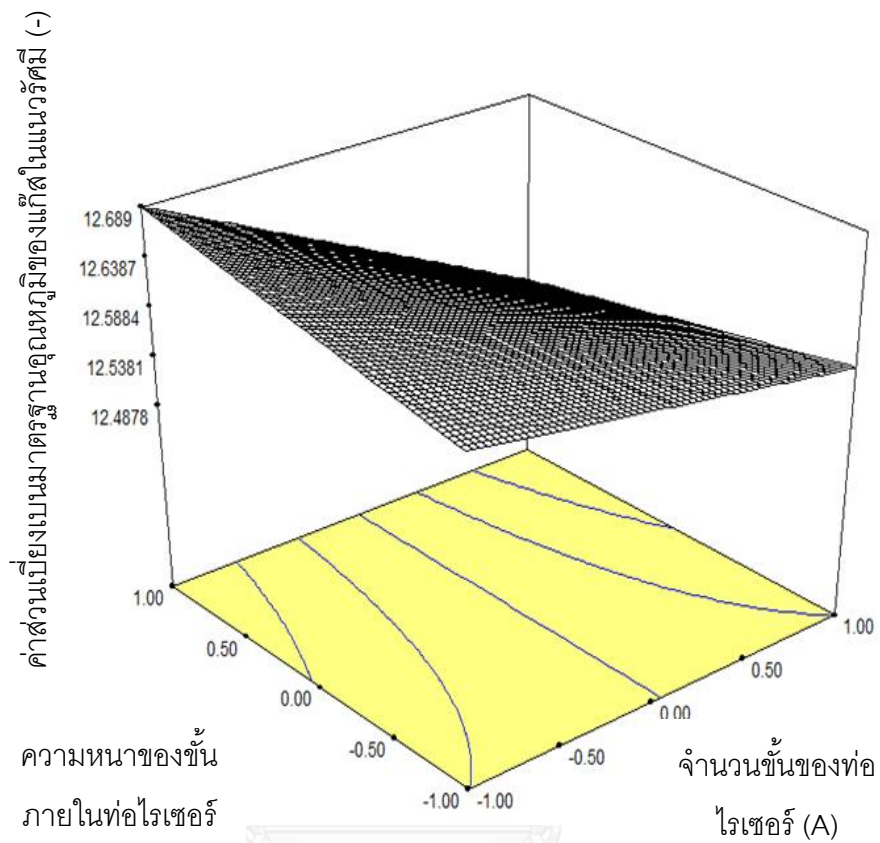
รูปที่ 16 คอนทัวร์แสดงอุณหภูมิของแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบชั้นของการจำลอง  
ที่ (ก) 1 (ข) 2 (ค) 3 (ง) 4 (จ) 5 (ฉ) 6 (ช) 7 และ (ฮ) 8



รูปที่ 17 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์

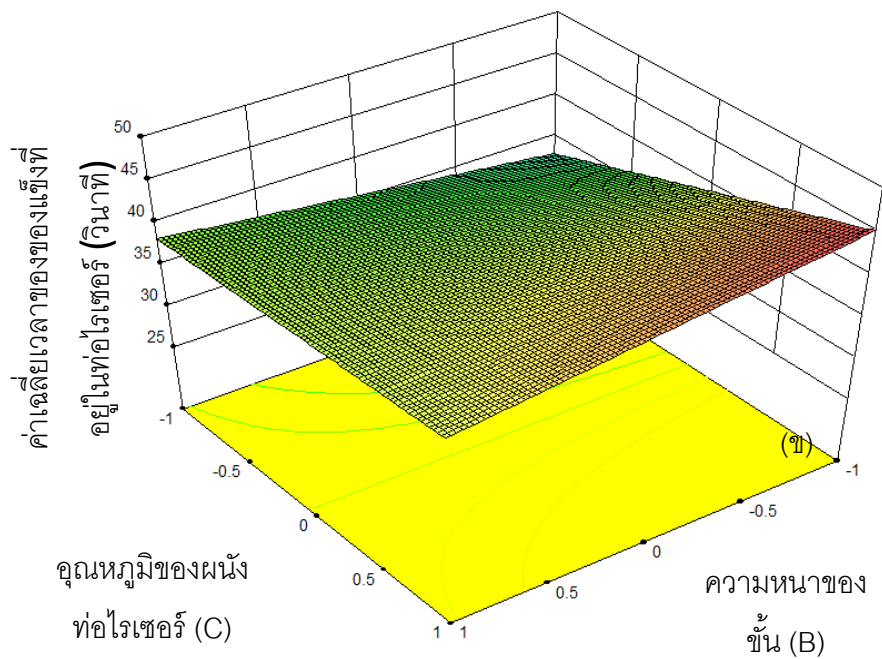
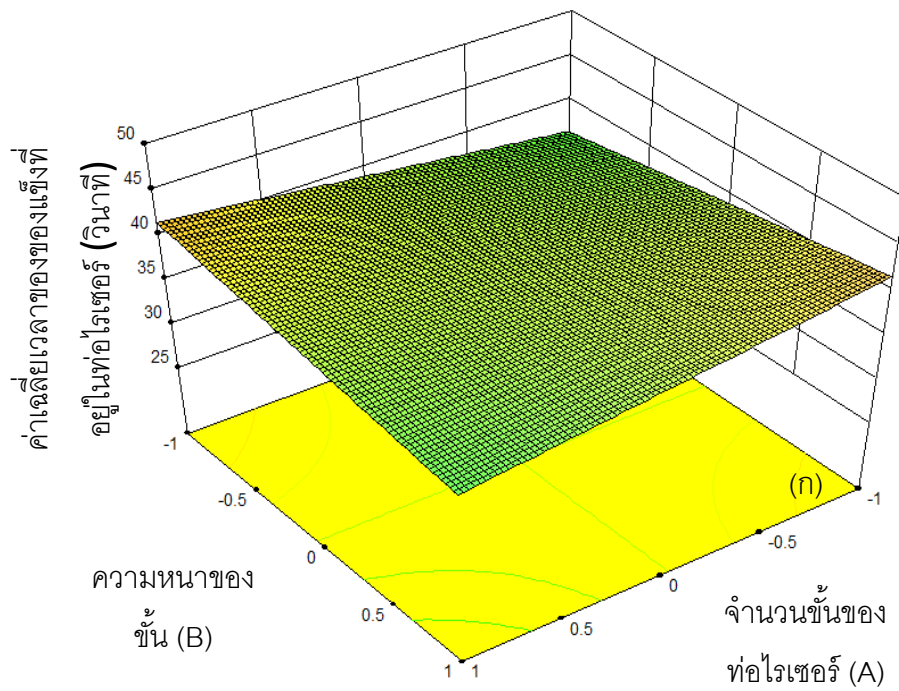


รูปที่ 18 ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 19 พื้นผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของแก๊สในแนวนอร์คมี เมื่อใช้จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ต่างๆ กัน



รูปที่ 20 พื้นผิวตอบสนองของค่าเฉลี่ยเวลาของของแข็งที่อยู่ในท่อไรเซอร์ (ก) เมื่อใช้จำนวนท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ต่างๆ กัน (ข) เมื่อใช้ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ และคุณสมบัติของผนังท่อไรเซอร์ต่างๆ กัน

## 4.2.2 อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics)

### 4.2.2.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นในตัวแปรความดันลดต่อความยาว

จากรูปที่ 21 แสดงการกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความดันลดต่อความยาว พบว่าความดันลดต่อความยาวมีรูปแบบแบ่งเป็น 2 กลุ่มกรณีศึกษา โดยที่กรณีศึกษากลุ่มที่ 1 ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 1 3 5 และ 7 และกรณีศึกษากลุ่มที่ 2 คือ กรณีศึกษาที่ 2 4 6 และ 8 ซึ่งในแต่ละกลุ่มกรณีศึกษาจะมีการติดตั้งชั้นภายในท่อไรเซอร์ที่ตำแหน่งเดียวกัน ทำให้ความดันลดต่อความยาว ณ ตำแหน่งนี้มีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบกรณีศึกษาทั้ง 8 กรณีกับท่อไรเซอร์แบบไม่ได้ปรับปรุง พบว่ามีค่าความดันลดต่อความยาวใกล้เคียงกัน แสดงว่าการปรับปรุงท่อไรเซอร์ให้เป็นแบบชั้นไม่ได้ส่งผลต่อความดันลดต่อความยาวสูงนัก เนื่องจากชั้นนั้นช่วยลดการตกกลับของของแข็ง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความดันลดต่อความยาวเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความดันลดต่อความยาวเนื่องจากท่อไรเซอร์แบบชั้นจะไปหักล้างกับการที่มีการปรับปรุงท่อไรเซอร์ให้เป็นแบบชั้นซึ่งจะไปลดความดันลดต่อความยาวที่เกิดจากการไหลตกกลับของของแข็ง

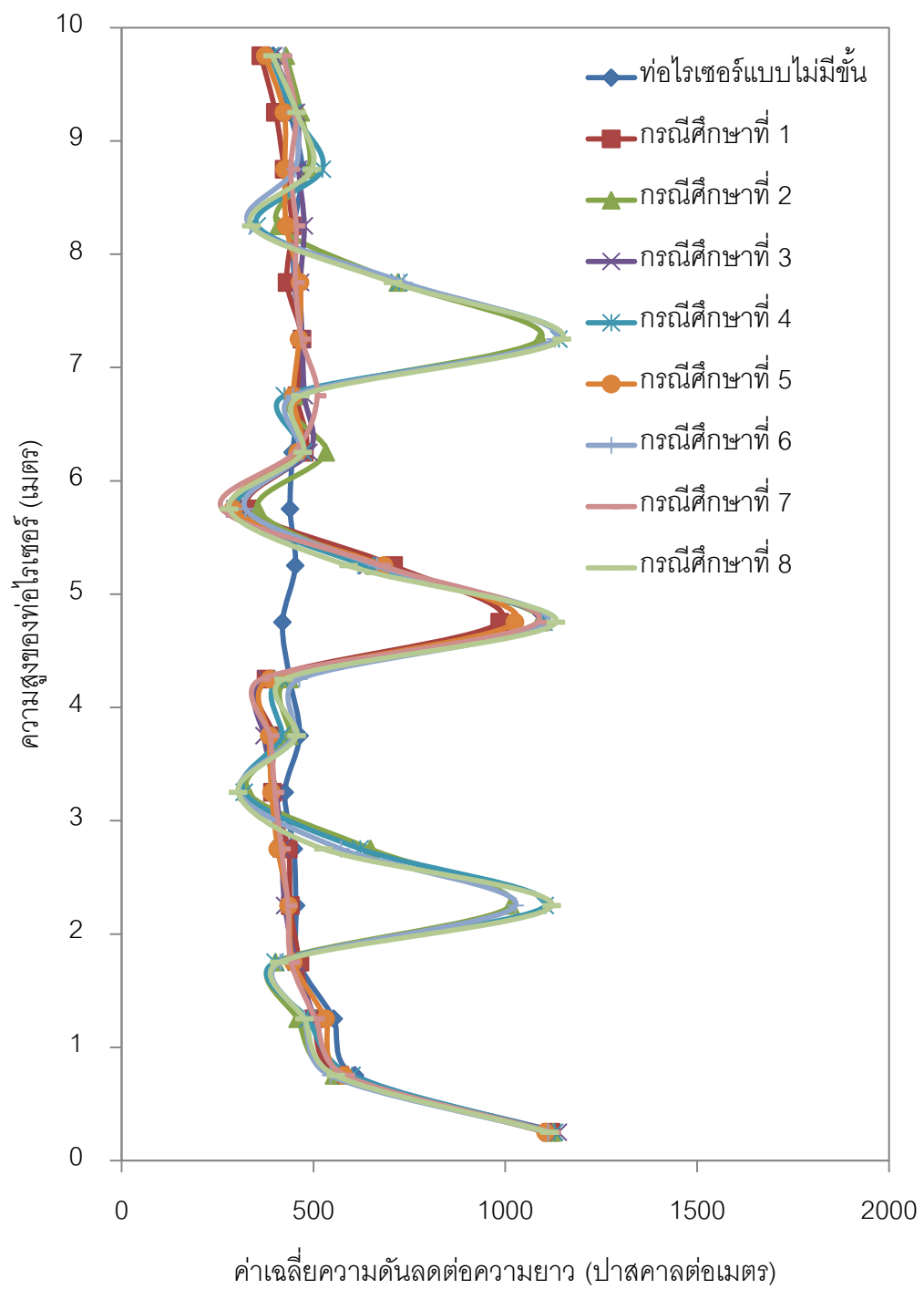
### 4.2.2.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นในตัวแปรสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

จากรูปที่ 22 พบว่า ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีความคล้ายคลึงกันแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มกรณีศึกษา คือ กรณีศึกษากลุ่มที่ 1 ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 1 3 5 และ 7 และกรณีศึกษากลุ่มที่ 2 ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 2 4 6 และ 8 กรณีศึกษาทั้ง 2 กลุ่ม นั้นในแต่ละกลุ่มจะมีจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ที่เท่ากัน ตำแหน่งที่ติดตั้งชั้นของท่อไรเซอร์ใกล้เคียงกัน โดยในตำแหน่งที่มีการติดตั้งชั้นมีค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งจะสูงกว่าตำแหน่งความสูงอื่นๆ เนื่องจากช่องว่างของชั้นมีพื้นที่แคบ ทำให้เกิดการสะสมของของแข็งบริเวณตำแหน่งนี้ โดยในกรณีศึกษากลุ่มที่ 1 และ 2 มีค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน การติดตั้งชั้นช่วยลดการไหลย้อนกลับของของแข็ง ทำให้ของแข็งสะสมอยู่บริเวณด้านบนของชั้นของท่อไรเซอร์มากกว่าบริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ ซึ่งต่างจากท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้ติดตั้งชั้นที่จะมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งใกล้เคียงกันตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ เนื่องจากไม่มีชั้น

#### 4.2.2.3 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นในตัวแปรความเร็วในแนวรัศมี และแนวแกน

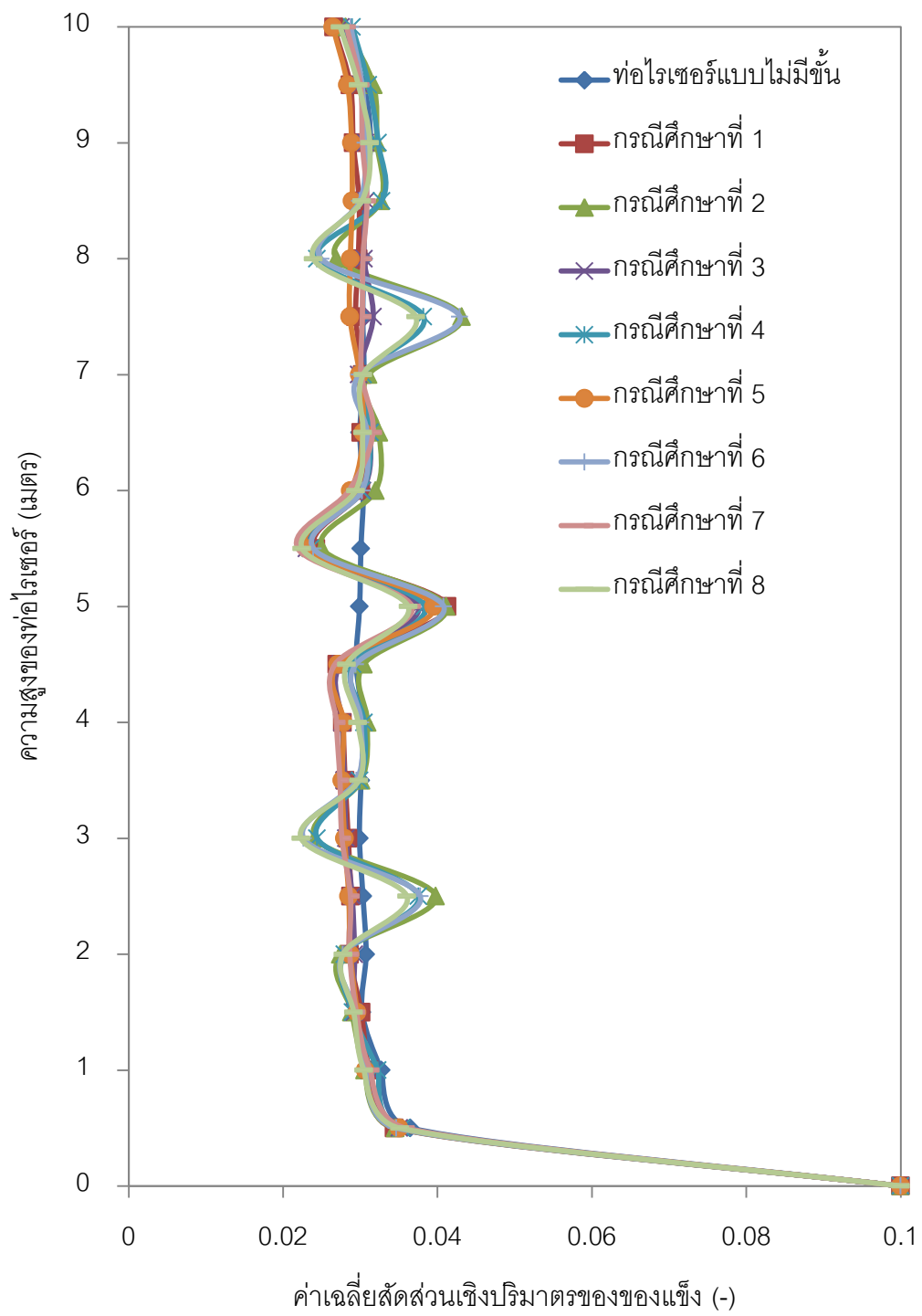
การกระจายตัวตามแนวแกน และแนวรัศมี ของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็ง และแก๊สในแนวรัศมี และแนวแกนมีรูปแบบการกระจายตัวที่เหมือนกัน เนื่องจากแก๊สเป็นตัวพาของแข็งเคลื่อนที่ โดยที่ค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกน จะมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมี เพราะของไหลเคลื่อนที่ตามแนวแกน

เนื่องจากระบบมีความเร็วสองทิศ คือ ตามแนวแกน และแนวรัศมี ซึ่งความเร็วหลักคือ ความเร็วตามแนวแกน เมื่อความเร็วตามแนวแกนปะทะกับชั้นทำให้มีความเร็วออกมาตามแนวรัศมี ดังรูปที่ 23 และ 24 คือ กราฟการกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งและแก๊ส ตามลำดับ พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีมีทั้งค่าที่เป็นเครื่องหมายบวก (+) และเครื่องหมายลบ (-) ซึ่งบ่งบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล โดยที่ค่าเฉลี่ยความเร็วที่เป็นเครื่องหมายบวกหมายถึงของไหลเคลื่อนที่ไปทางขวา และค่าที่เป็นเครื่องหมายลบหมายถึงของไหลมีทิศการเคลื่อนที่ไปทางซ้าย โดยท่อไรเซอร์ที่มีการปรับปรุงมีความกว้างสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อไรเซอร์แบบไม่มีชั้น แสดงว่าเกิดความปั่นป่วนสูงขึ้นภายในท่อไรเซอร์เมื่อมีการติดตั้งชั้น ซึ่งเป็นผลดีต่อระบบ เพราะจะทำให้เกิดการผสมกันสูงขึ้น สามารถยืนยันผลได้จากรูปที่ 25

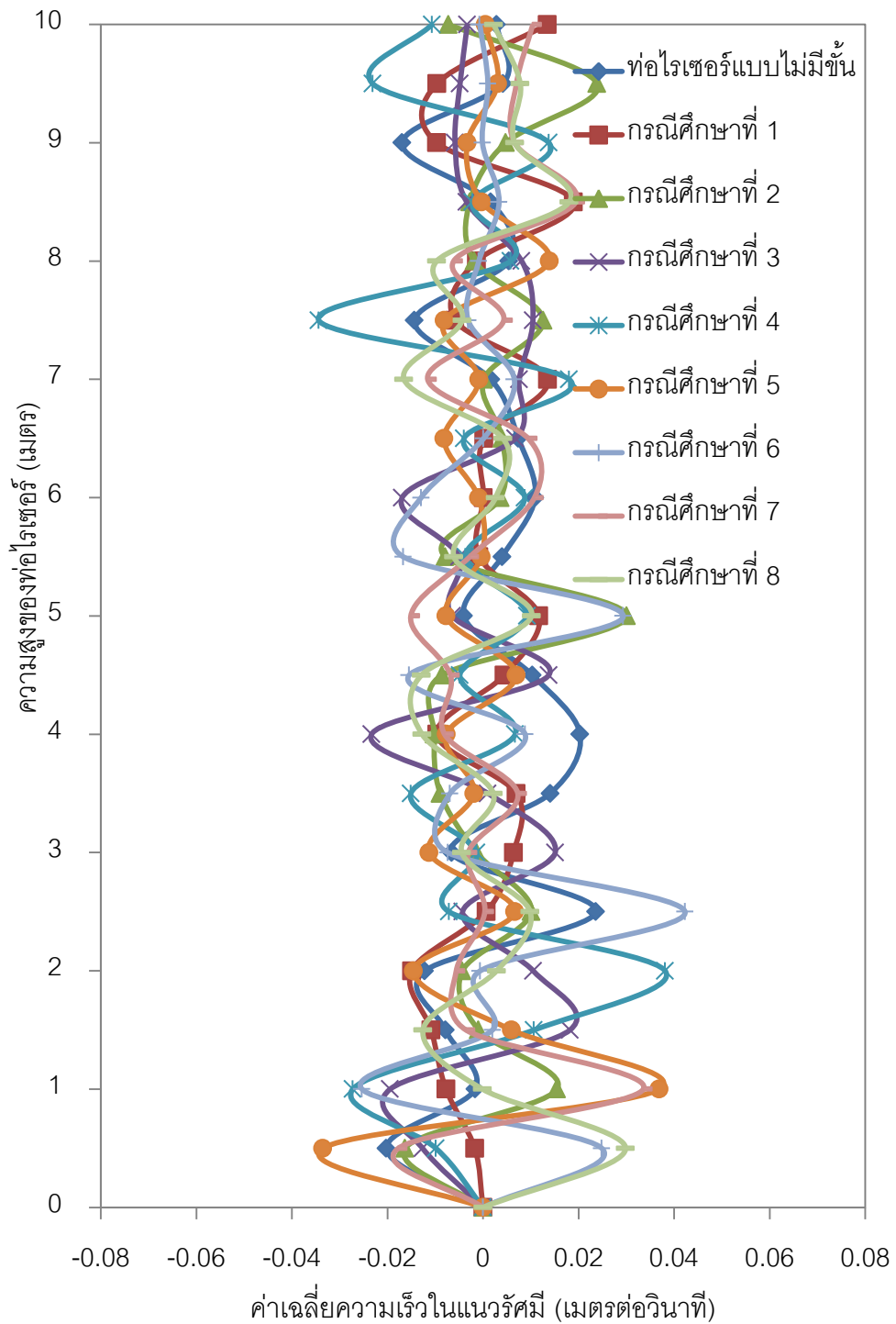


รูปที่ 21 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความดันลดต่อความยาววินาทีที่ 20-40

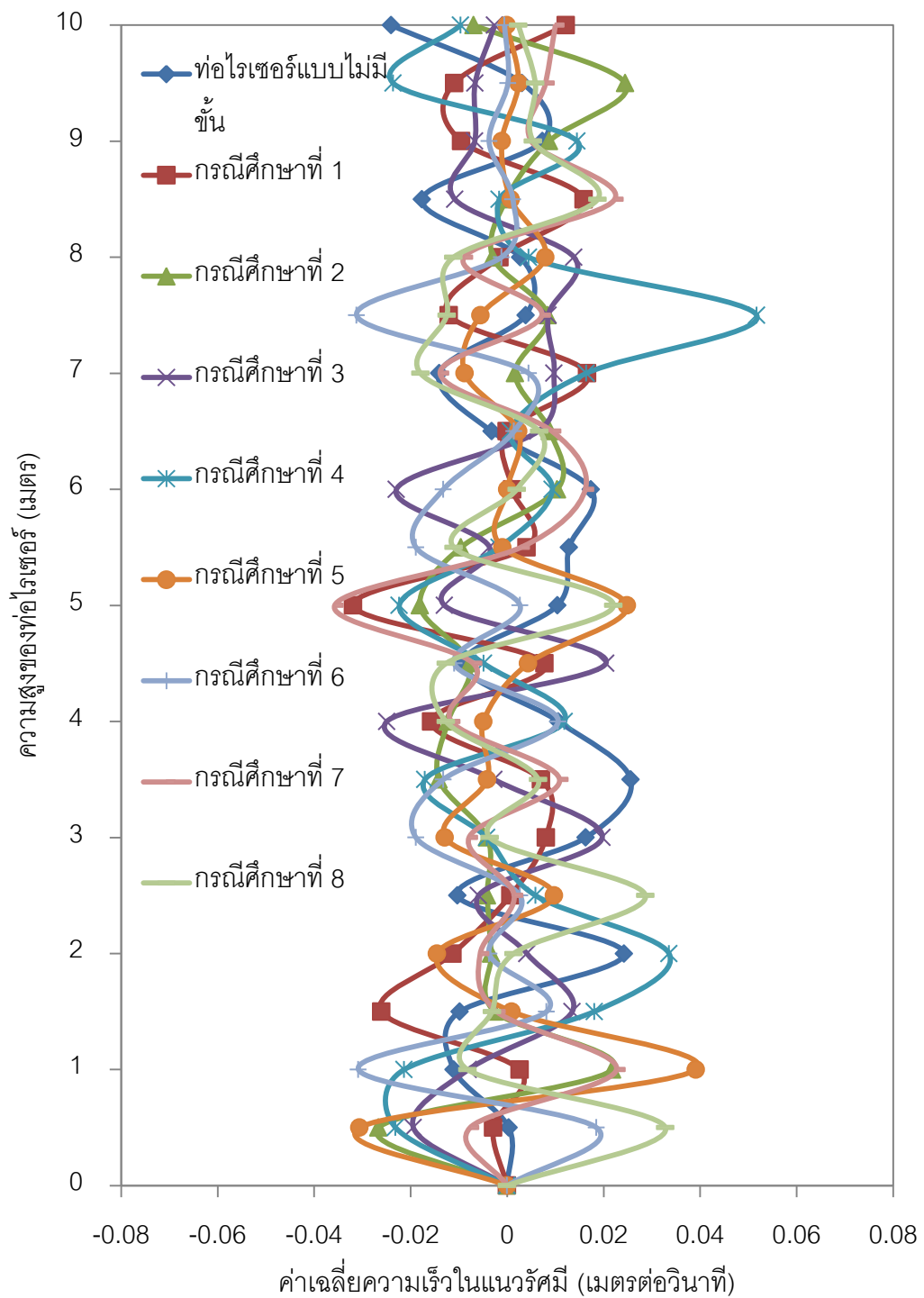




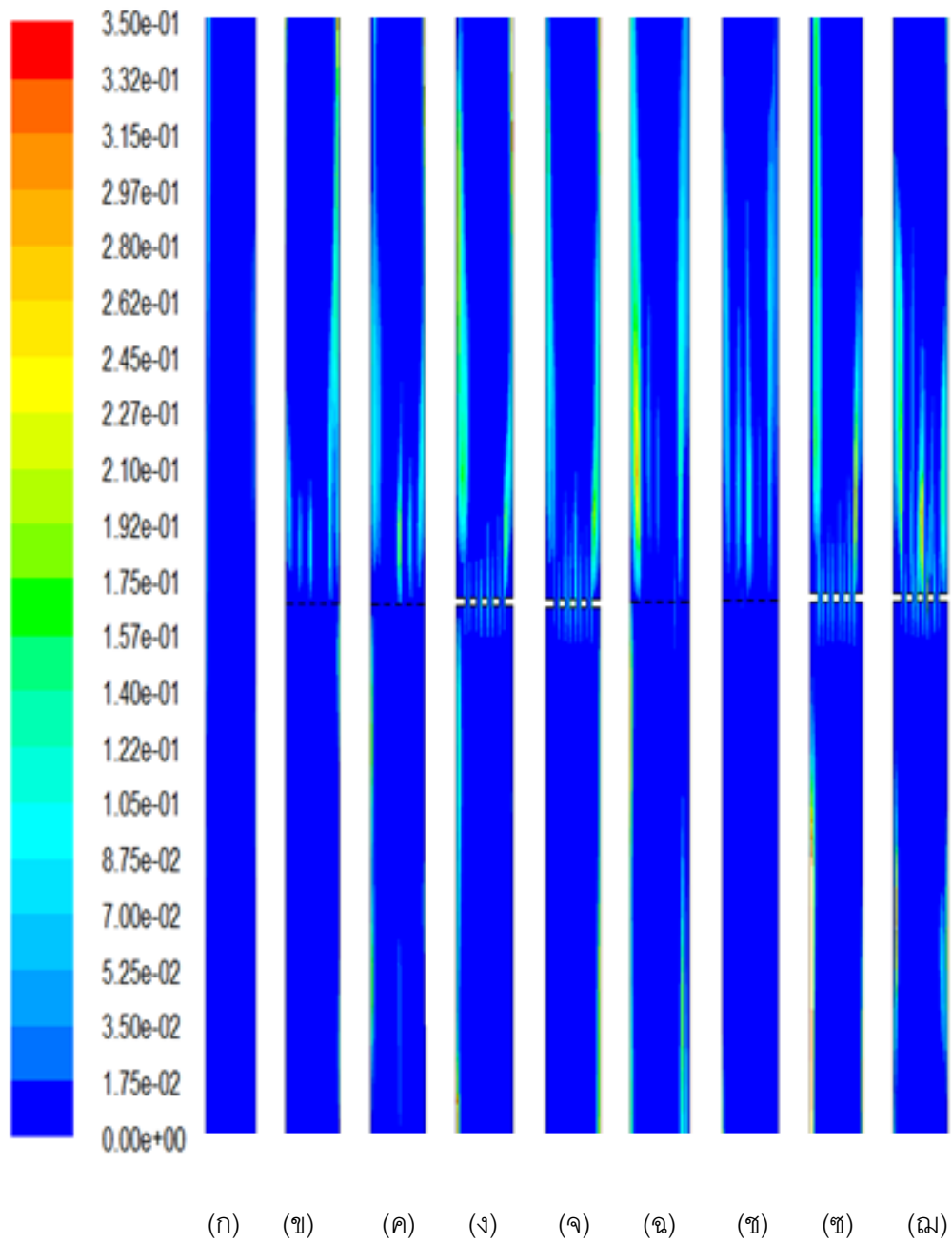
รูปที่ 22 การกระจายตัวตามแนวแกนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อโรเตอร์



รูปที่ 23 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี



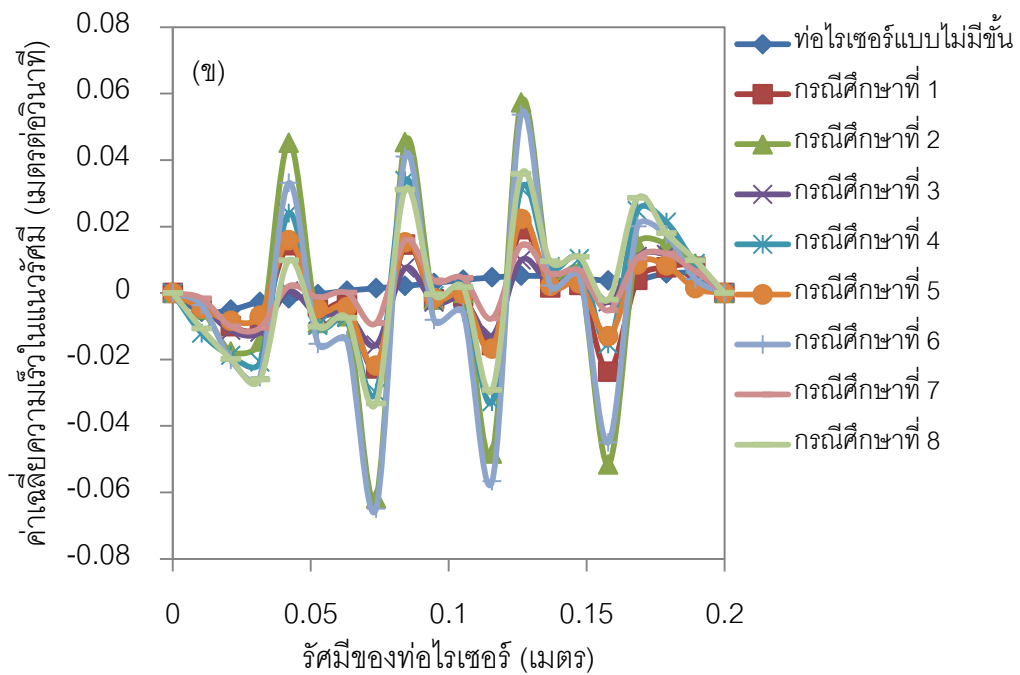
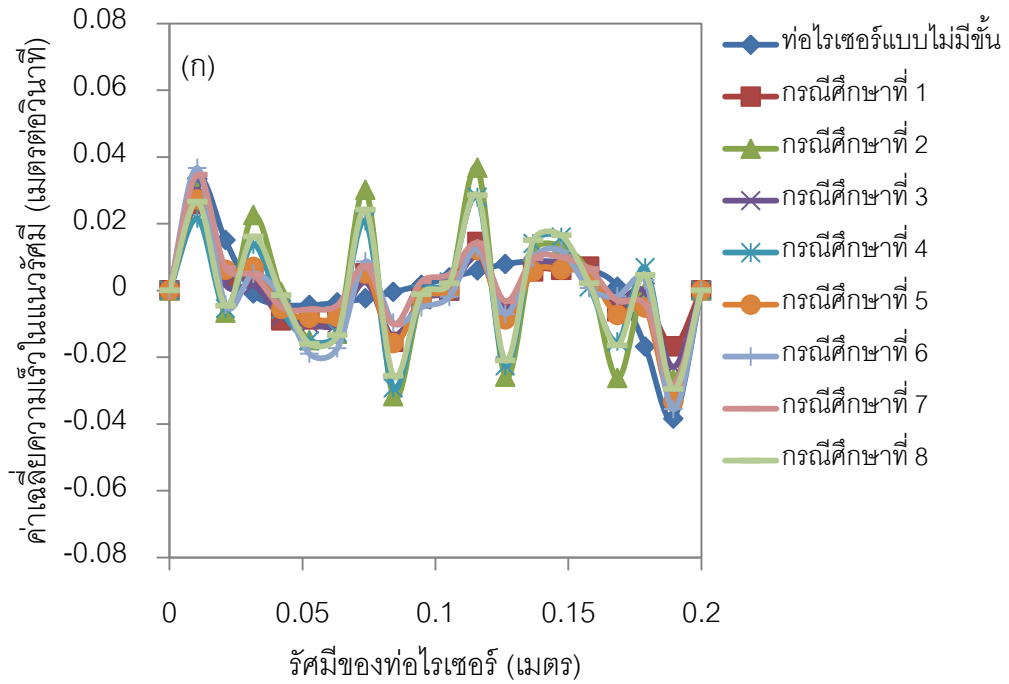
รูปที่ 24 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวรัศมี



รูปที่ 25 คอนทัวร์แสดง Granular Temperature ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดของการ  
จำลองที่ (ก) 0 (ข) 1 (ค) 2 (ง) 3 (จ) 4 (ฉ) 5 (ช) 6 (ฌ) 7 และ (ณ) 8

รูปที่ 26 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (ก) ค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็งในแนวรัศมี (ข) ค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สในแนวรัศมี พบว่า ความเร็วของของไหลในแนวรัศมีมีทั้งเครื่องหมายบวก หมายถึง ของแข็งเคลื่อนที่ไปทางขวา และเครื่องหมายลบ หมายถึง ของแข็งเคลื่อนที่ไปทางซ้าย แสดงว่าของไหลมีการเคลื่อนที่ผสมกัน โดยท่อไรเซอร์แบบชั้นในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 8 พบความเร็วที่เป็นบวก และลบสลับเป็นช่วงๆ เนื่องจากของไหลเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของชั้น ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่แบบนี้เป็นการเคลื่อนที่ที่ของไหลวิ่งเข้ากันทำให้เกิดการผสมกันในแนวรัศมีสูงขึ้น และเนื่องจากมีพื้นที่ที่จำกัดการเคลื่อนที่ที่สูงขึ้น จะสังเกตได้ว่า กรณีศึกษาที่ 2 4 6 และ 8 มีค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีที่เป็นเครื่องหมายบวก และเครื่องหมายลบสูงกว่า กรณีศึกษาที่ 1 3 5 และ 7 เพราะมีพื้นที่การเคลื่อนที่จำกัดกว่าจากการเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และในทุกกรณีศึกษาพบว่าของแข็งเคลื่อนที่เข้าหากึ่งกลางของท่อไรเซอร์ เนื่องจากพบค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งที่เป็นบวกบริเวณผนังด้านซ้าย และเป็นลบบริเวณผนังด้านขวา ส่วนในกรณีที่เป็นท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้ติดตั้งชั้นนั้น พบว่า มีรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ไม่ได้ไปทางซ้าย หรือทางขวา เนื่องจากกราฟค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีมีความราบเรียบ รูปแบบการเคลื่อนที่แบบนี้จะส่งผลให้เกิดการผสมระหว่างแก๊สและของแข็งได้ต่ำ

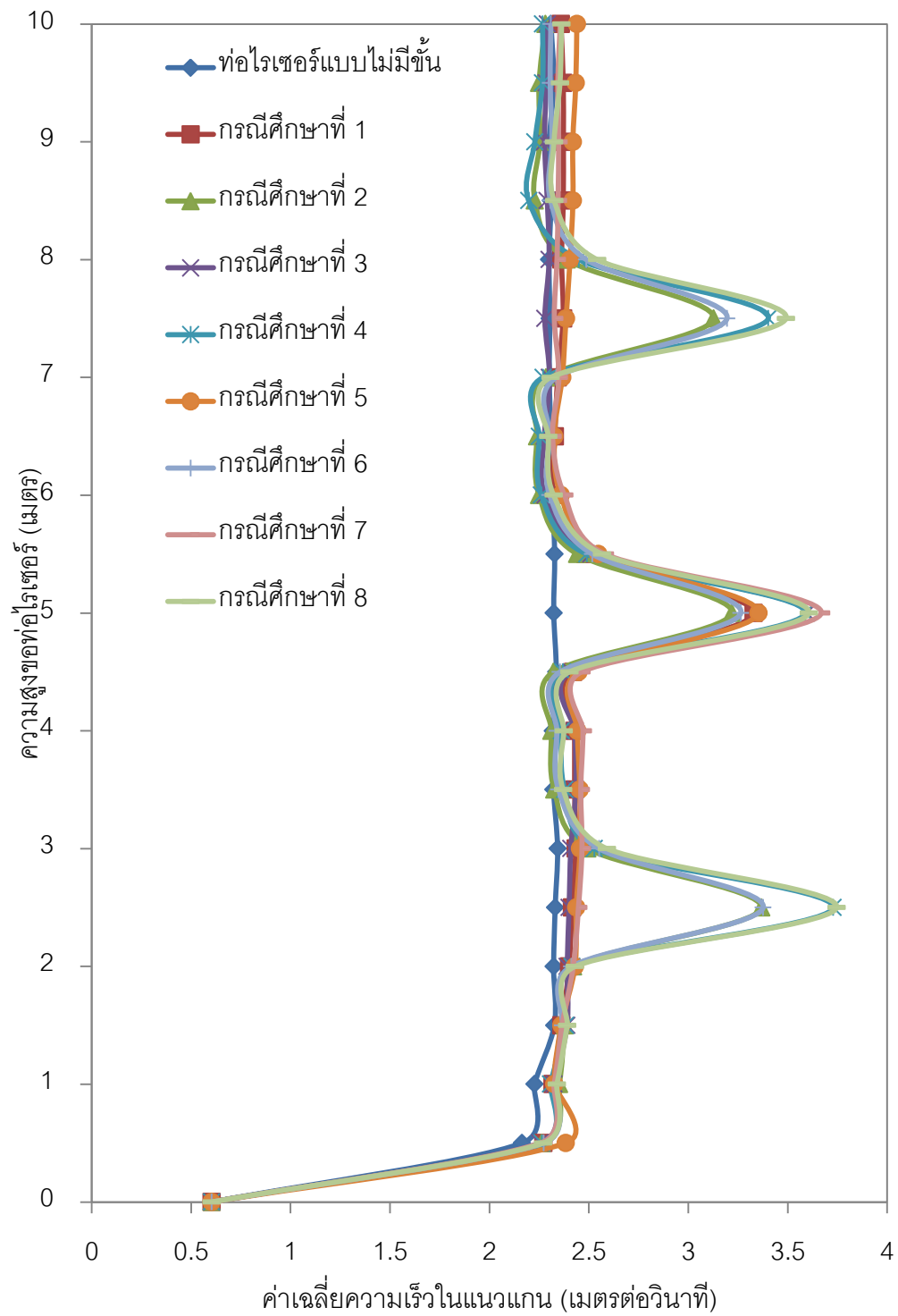
รูปที่ 27 และ 28 แสดงการกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งและของแก๊สในแนวแกน ตามลำดับ พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของของไหลในบริเวณตำแหน่งที่มีการติดตั้งชั้นจะมีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่น และค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็งในแนวแกนจะลดลงหลังจากผ่านชั้นภายในท่อไรเซอร์ตามความสูง เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานจากการชนในระหว่างชั้น ซึ่งค่าเฉลี่ยความเร็วของของไหลในแนวแกนที่ลดลงนั้นจะช่วยเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสระหว่างแก๊สและของแข็งสูงขึ้น เมื่อเทียบกับท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงให้เป็นแบบชั้น



รูปที่ 26 การกระจายตัวตามรัศมี (ก) ค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็งในแนวรัศมี (ข) ค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สในแนวรัศมี

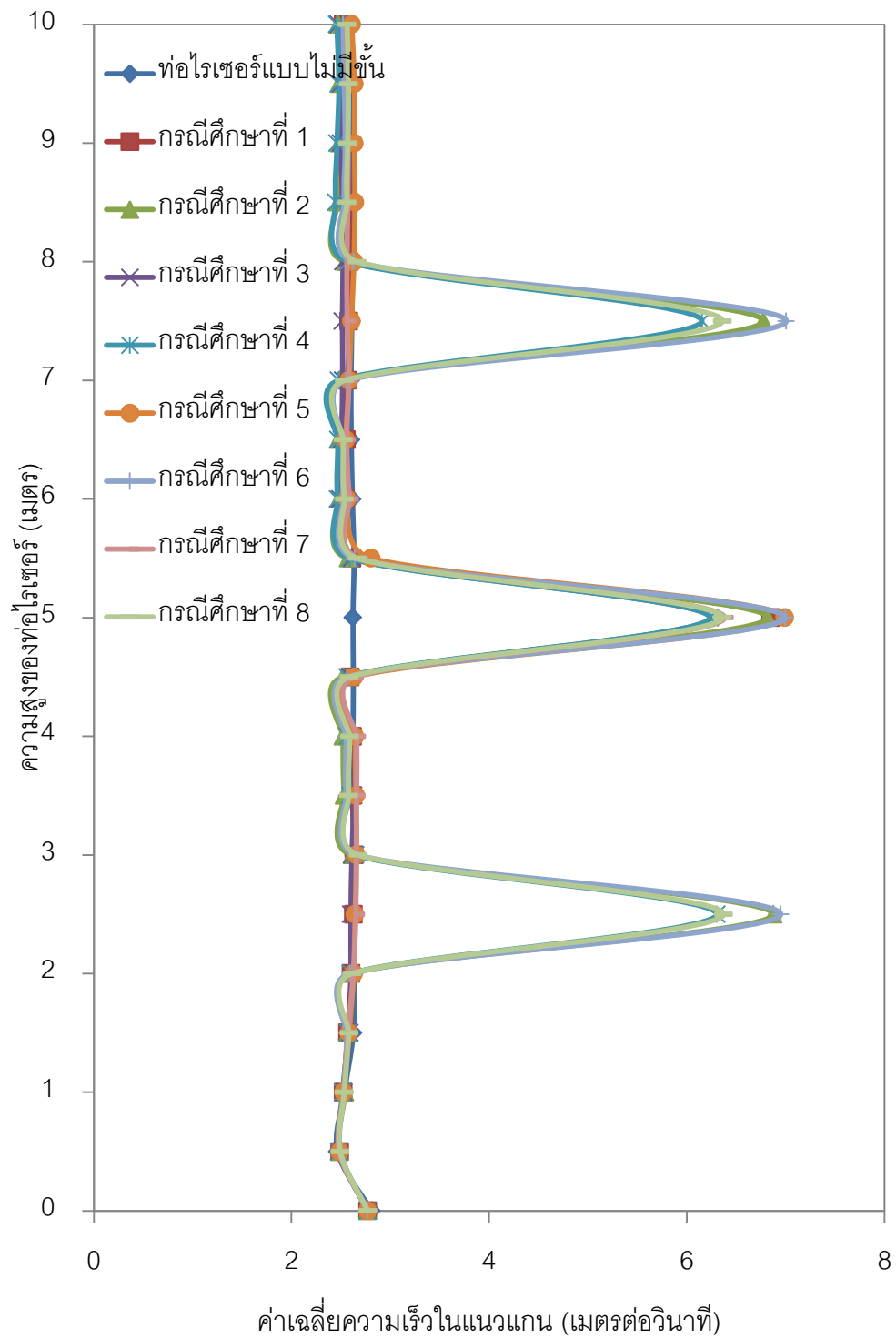
รูปที่ 29 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (ก) ค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็งในแนวแกน (ข) ค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สในแนวแกน พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วของของไหลในแนวแกนมีรูปแบบเป็นพาราโบลา เนื่องจากแก๊สที่ป้อนเข้า ถูกป้อนด้วยความเร็วที่เป็นรูปแบบพาราโบลา และทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งเป็นเช่นเดียวกับของแก๊ส โดยค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สมีค่าสูงกว่าค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็ง เพราะว่าแก๊สเป็นตัวที่พาของแข็งให้เคลื่อนที่ และที่มีลักษณะค่าความเร็วเฉลี่ยเป็นคลื่นๆ ขึ้นลง เนื่องจากเมื่อมีการปรับปรุงท่อโรเตอร์ให้เป็นแบบขั้น ทำให้มีการไหลผ่านช่องว่างระหว่างชั้นภายในท่อโรเตอร์ บริเวณที่เป็นช่องว่างจะมีค่าเฉลี่ยความเร็วที่สูงกว่าบริเวณที่เป็นขั้น ซึ่งบริเวณที่มีขั้นจะมีค่าเฉลี่ยความเร็วที่ต่ำลงเนื่องจากการชนระหว่างอนุภาคของไหลกับขั้น โดยค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สมีความผันผวนมากกว่าค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็ง เนื่องจากค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สมีค่าสูงกว่าค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็ง เป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างของค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สเนื่องจากชั้นของท่อโรเตอร์ที่มากกว่าของของแข็ง ในกรณีศึกษาที่ 2 4 6 และ 8 ที่เป็นท่อโรเตอร์แบบ 4 ขั้น จะมีรูปแบบของกราฟที่เป็นคลื่นชัดเจนกว่า กรณีศึกษาที่ 1 3 5 และ 7 ที่เป็นท่อโรเตอร์แบบ 2 ขั้น เพราะท่อโรเตอร์แบบ 4 ขั้น มีพื้นที่ในการเคลื่อนที่ต่ำกว่าแบบ 2 ขั้น โดยจากกราฟไม่พบค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนที่มีค่าเป็นลบ ที่หมายถึงของแข็งเคลื่อนที่ในทิศลง เนื่องจากข้อมูลที่ดึงมาถูกมาทำเป็นค่าเฉลี่ย เลยไม่แสดงการตกกลับของของแข็ง แต่แท้จริงแล้วยังคงมีการตกกลับของของแข็งอยู่ และการเพิ่มจำนวนชั้นของท่อโรเตอร์นั้นจะช่วยลดการตกกลับของของแข็งได้ ดังแสดงในรูปที่ 30 ซึ่งแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของของแข็ง พบว่า ขั้นจะช่วยยับยั้งการตกกลับของของแข็งบริเวณผนังท่อโรเตอร์ได้

จากผลการจำลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดให้เป็นแบบขั้นนั้นช่วยในเรื่องของการผสมกันระหว่างของแข็งและแก๊สในระบบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดได้

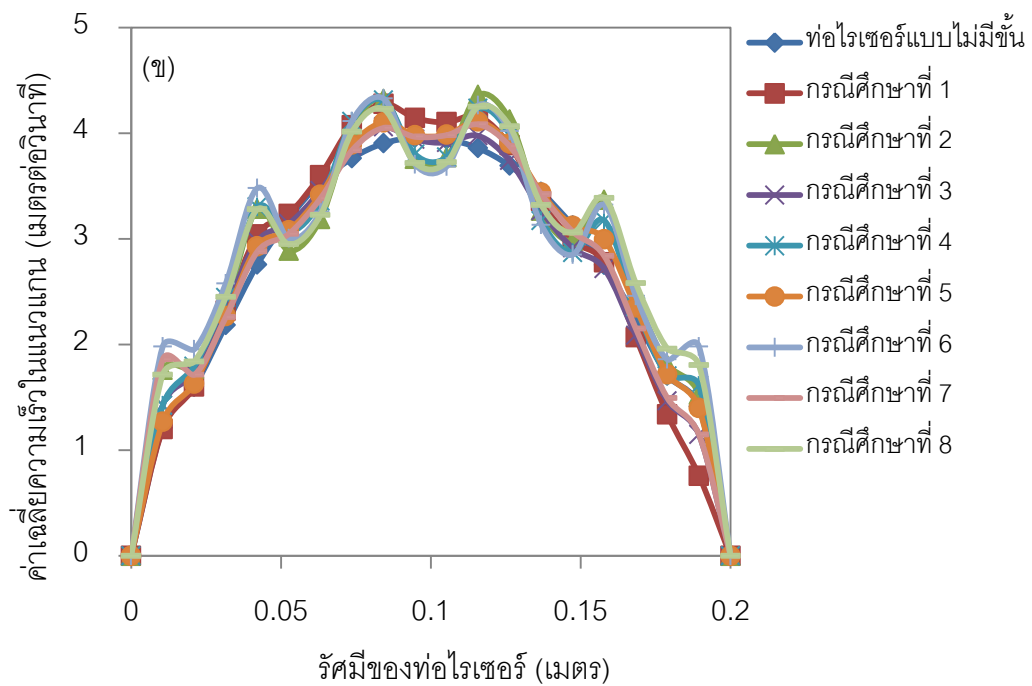
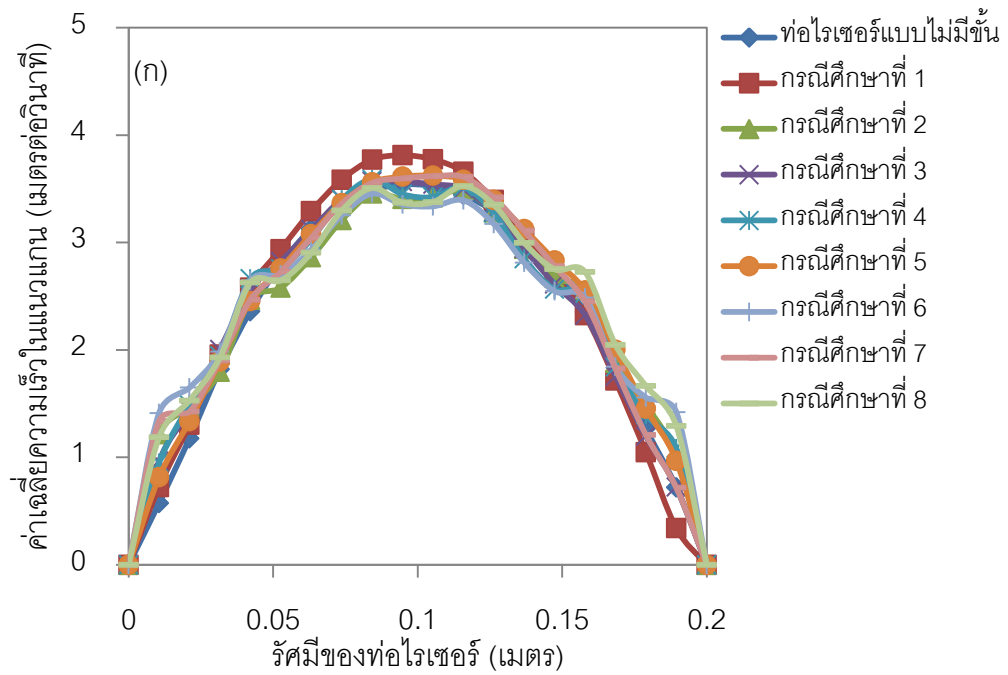


รูปที่ 27 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกน

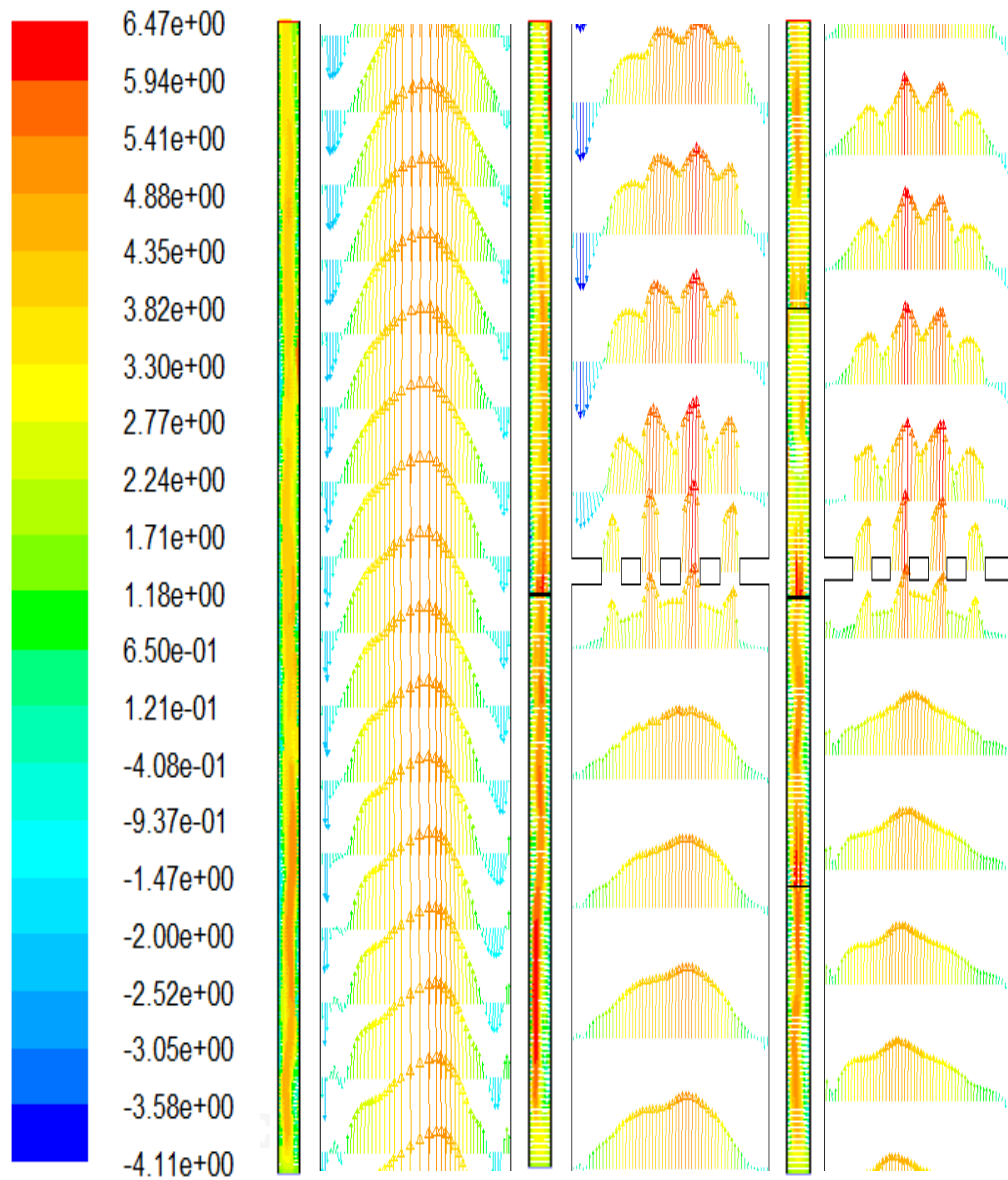




รูปที่ 28 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวแกน



รูปที่ 29 การกระจายตัวตามแนวรัศมี (ก) ค่าความเร็วเฉลี่ยของของแข็งในแนวแกน (ข) ค่าความเร็วเฉลี่ยของแก๊สในแนวแกน



(ก)

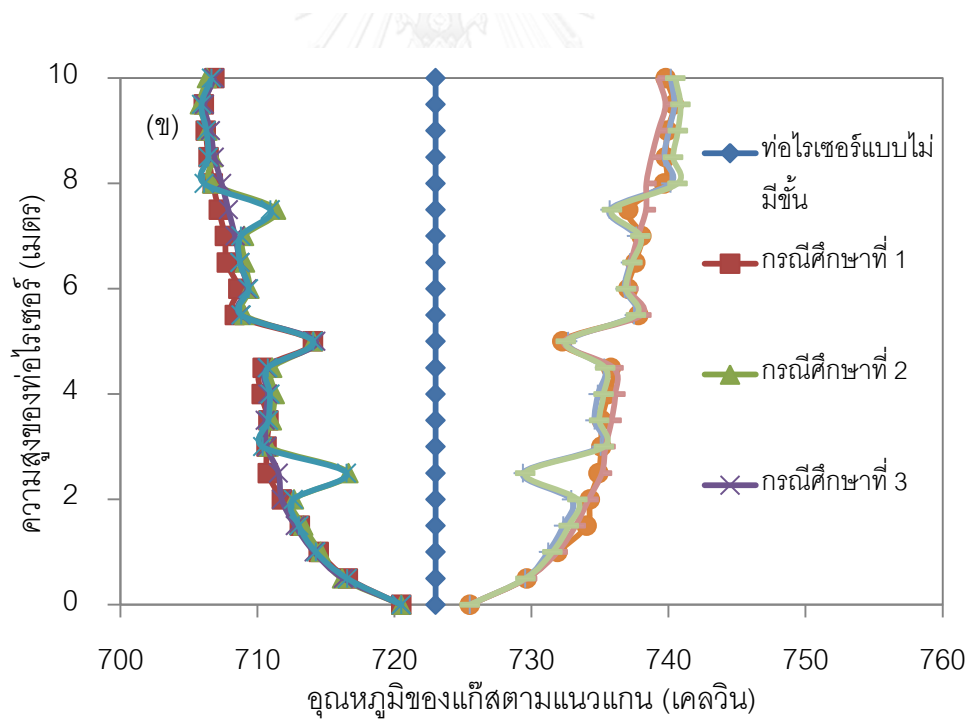
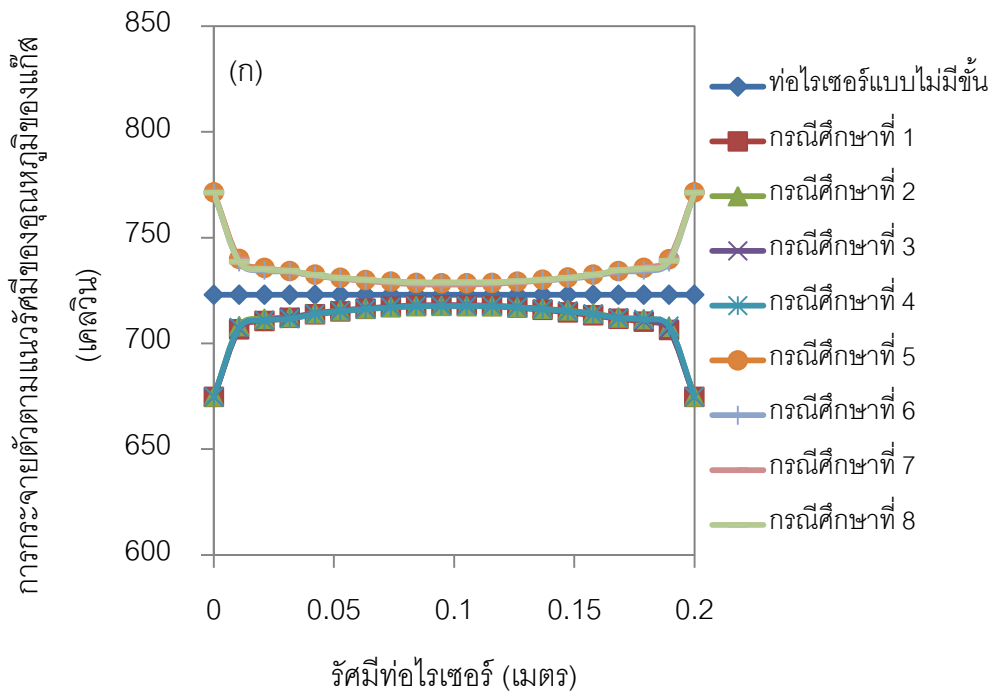
(ข)

(ค)

รูปที่ 30 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวแกน (ก) ท่อโรเตอร์ที่ไม่ปรับปรุง (ข) ท่อโรเตอร์แบบ 2 ชั้น (ค) ท่อโรเตอร์แบบ 4 ชั้น

#### 4.2.2.4 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นในตัวแปรอุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมี และแนวแกน

ปฏิกิริยาที่มีในงานนี้เกิดในภูมิภาคแก๊สเป็นหลัก ดังนั้นตัวแปรที่จะบ่งบอกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิที่เกิดจากการปรับปรุงท่อไรเซอร์โดยเพิ่มเครื่องทำความร้อน คืออุณหภูมิของแก๊ส โดยที่แก๊สถูกป้อนที่อุณหภูมิ 723 เคลวิน เมื่อใช้อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์เป็น 673 เคลวิน และ 773 เคลวิน พบว่า อุณหภูมิของแก๊ส ลดลง และเพิ่มขึ้น ตามลำดับ เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ รูปที่ 31 (ก) แสดงการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแก๊สตามแนวรัศมี พบว่า อุณหภูมิของแก๊สมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ แสดงถึงมีการถ่ายเท และกระจายความร้อนได้ดี ยกเว้นบริเวณใกล้กับผนังของท่อไรเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างรวดเร็ว เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิมุมผนังมีค่าสูง และรูปที่ 31 (ข) แสดงการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแก๊สตามแนวแกน พบว่า อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามความสูงของท่อไรเซอร์ เนื่องจากมีเวลาที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้นตามความสูงของท่อไรเซอร์ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างรวดเร็วบริเวณที่มีการติดตั้งภายในท่อไรเซอร์



รูปที่ 31 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแก๊ส (ก) ตามแนวรัศมี (ข) ตามแนวแกน

#### 4.3 การศึกษาผลของฟลักซ์โดยมวลที่มีต่ออุทกพลศาสตร์

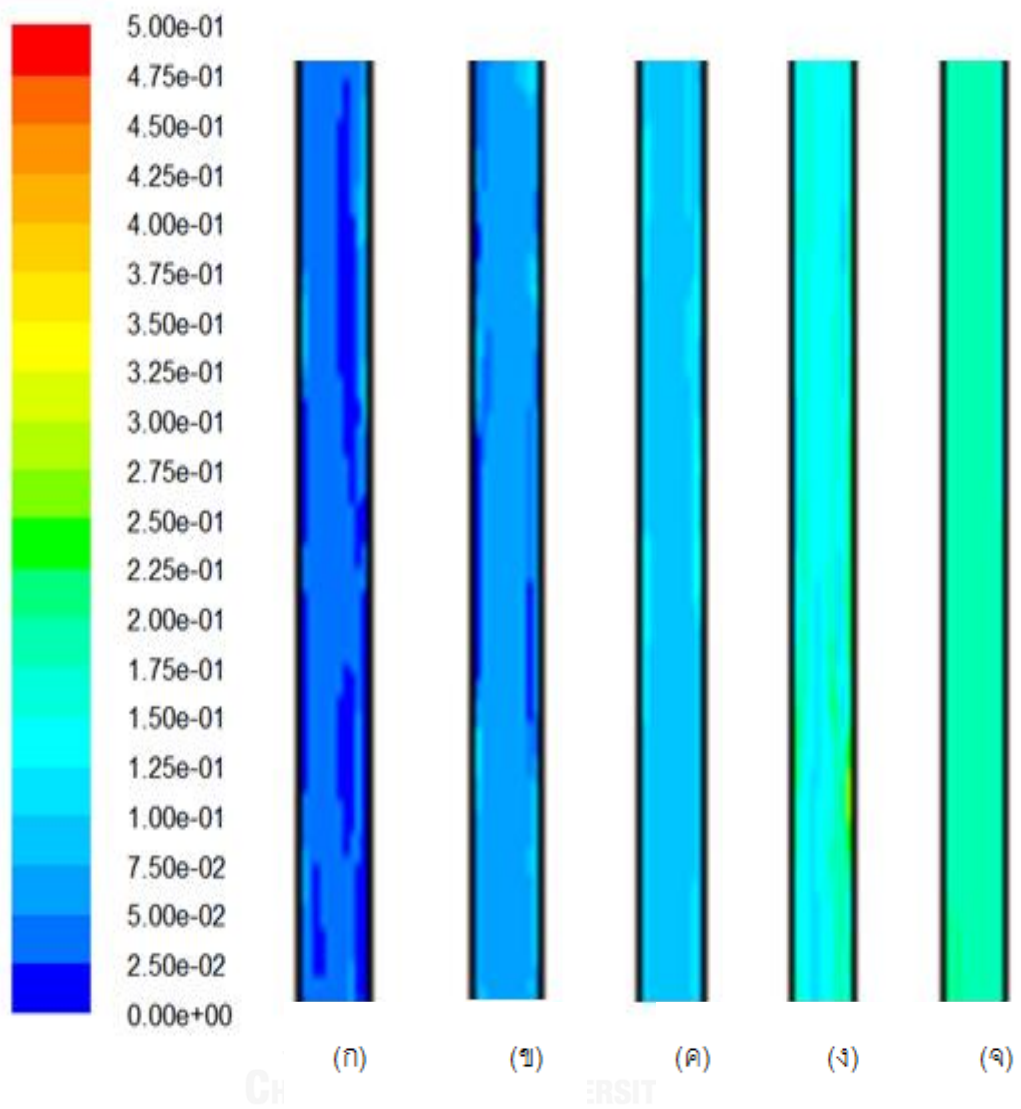
ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์นั้น ฟลักซ์โดยมวลเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งสามารถบอกการเคลื่อนที่ของของไหลได้ โดยในการจำลองในหัวข้อที่ 4.2 เป็นการจำลองที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ซึ่งมีความเบาบางของอนุภาคของแข็ง จึงได้ทำการศึกษาโดยจำลองภาวะเมื่อเพิ่มค่าฟลักซ์โดยมวลเป็น 200 300 400 และ 500 ตามลำดับดังตารางที่ 16 เพื่อเปรียบเทียบอุทกพลศาสตร์ที่ได้รับจากการที่มีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น

รูปที่ 32 แสดงภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในท่อโรเซออร์แบบไม่มีชั้นที่วินาทีที่ 40 พบว่า เมื่อเพิ่มฟลักซ์โดยมวล จะทำให้ความหนาแน่นของของแข็งสูงขึ้น และสามารถสังเกตเห็นการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งได้สูงขึ้น ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับในกรณีของท่อ โรเซออร์แบบ 4 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 33

จากการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์โดยมวล พบว่า ที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที สามารถแสดงผลของการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งได้ชัดเจนกว่าที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที เนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคของแข็งสูงขึ้น และจากรูปที่ 33 พบว่าอนุภาคของแข็งในท่อโรเซออร์ที่ได้รับการปรับปรุงแบบ 4 ชั้นมีการกระจายตัวตามแนวแกนที่สม่ำเสมอ และมีปริมาณของแข็งมากกว่าท่อโรเซออร์ที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยดูได้จากสีของรูปคอนทัวร์ ดังนั้นจึงได้ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของท่อโรเซออร์ที่ไม่ได้ปรับปรุง และได้รับการปรับปรุงโดยการออกแบบเป็นชั้นที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ต่อไปนี้ในหัวข้อที่ 4.4

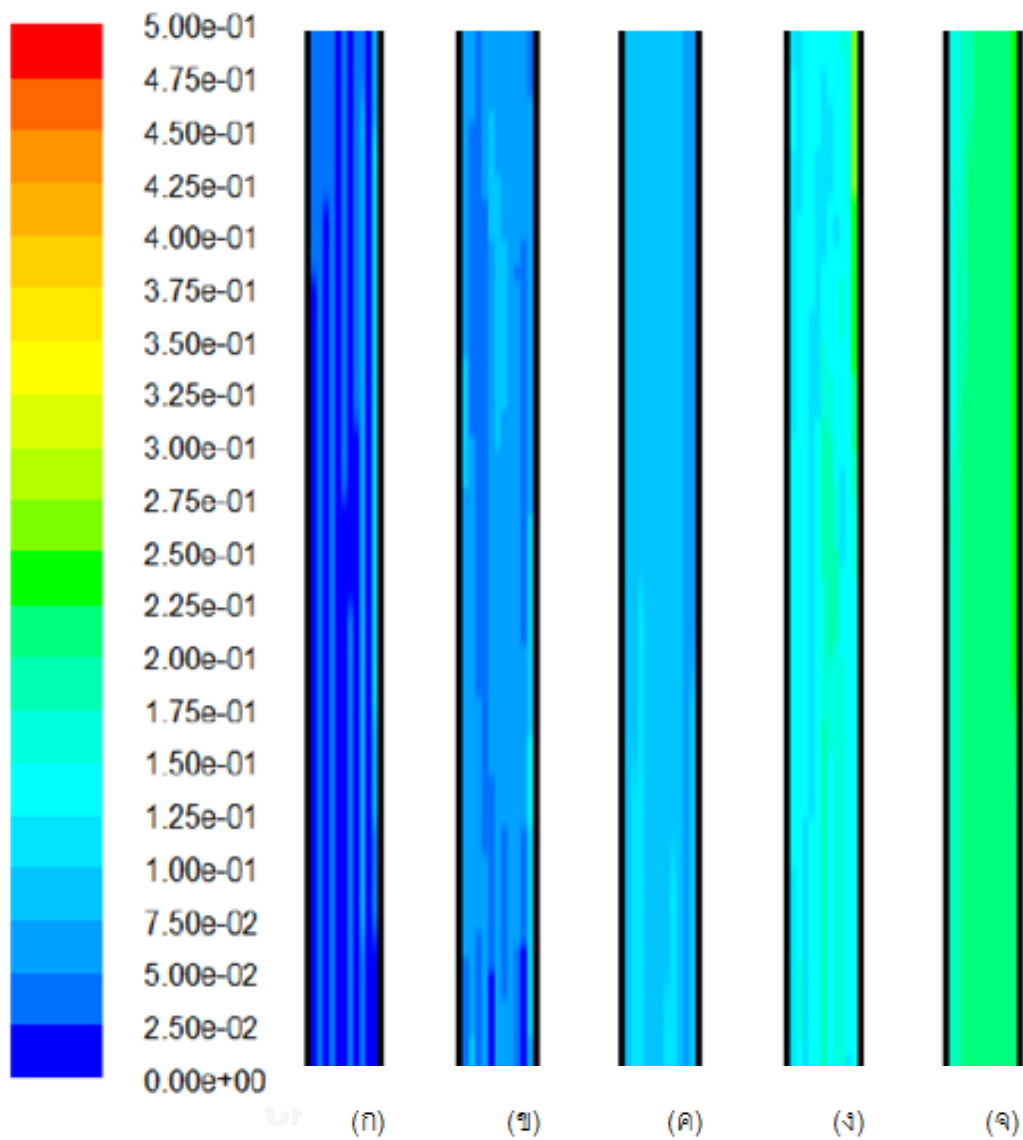
ตารางที่ 16 การศึกษาผลของฟลักซ์โดยมวลที่มีต่ออุทกพลศาสตร์

กรณีศึกษา	จำนวนชั้น (-)	ความหนา ของชั้น (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ฟลักซ์โดยมวล (กิโลกรัมต่อ ตารางเมตร วินาที)
0	-	-	-	100
9	-	-	-	200
10	-	-	-	300
11	-	-	-	400
12	-	-	-	500
8	4	10.0	723	100
13	4	10.0	723	200
14	4	10.0	723	300
15	4	10.0	723	400
16	4	10.0	723	500



รูปที่ 32 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงที่เวลา 40 วินาทีที่ฟลักซ์โดยมวล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 และ (จ) 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที





รูปที่ 33 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์แบบ 4 ชั้นที่เวลา 40 วินาที  
ที่ฟลักซ์โดยมวล (ก) 100 (ข) 200 (ค) 300 (ง) 400 และ (จ) 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

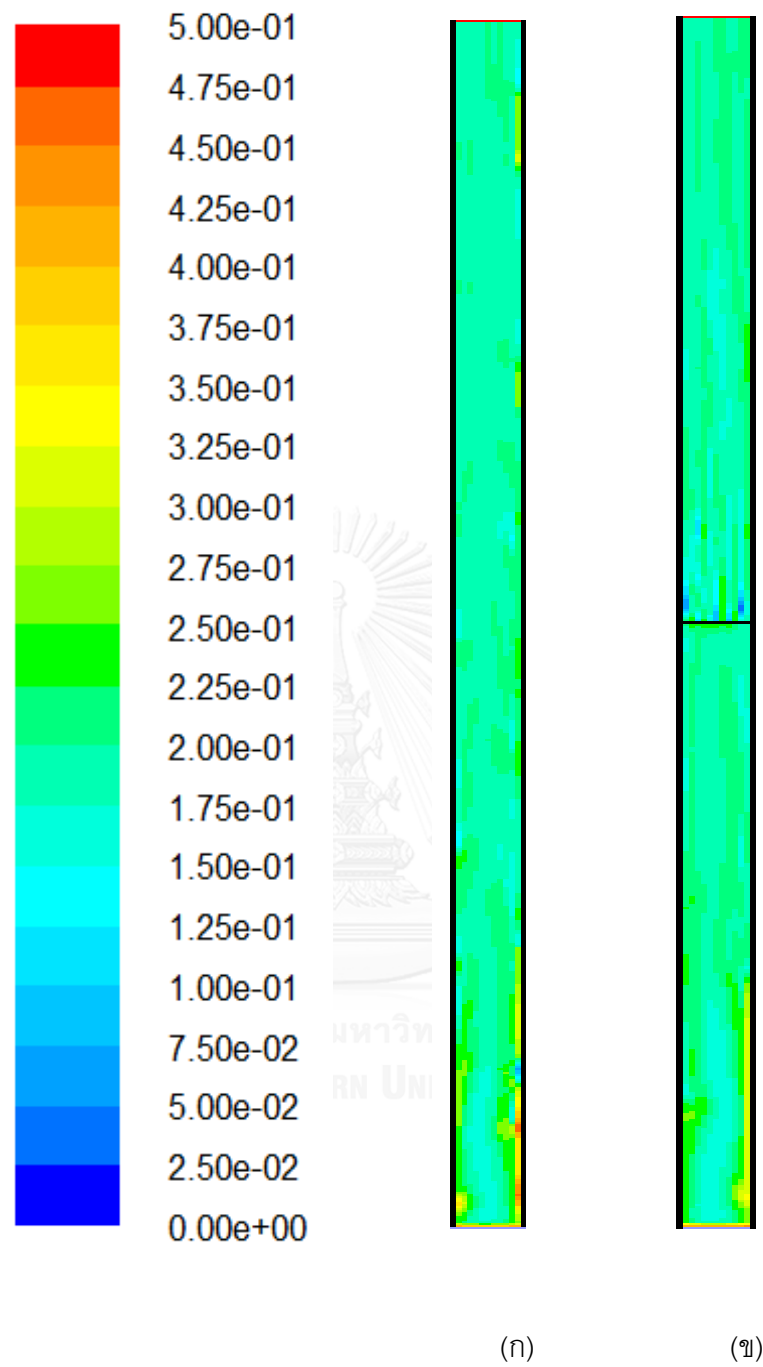
#### 4.4 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ที่ฟลักซ์โดยมวล 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

การเพิ่มฟลักซ์โดยมวลเป็นการเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของของแข็ง ทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของอุทกพลศาสตร์ได้ชัดเจนขึ้น

จากตารางที่ 17 พบว่า ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการปรับปรุงท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซิสเบดกรณีศึกษาที่ 17 ซึ่งมีจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ คือ 2 ชั้น ความหนาของชั้น คือ 0.5 มิลลิเมตร และอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ 673 เคลวิน มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีต่ำที่สุด แสดงถึงการกระจายตัวของของแข็งมีความสม่ำเสมอสูงที่สุด และมีความสม่ำเสมอสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้ปรับปรุง เนื่องจากแก๊สมีความหนืดสูงขึ้นจากการลดของอุณหภูมิทำให้มีการเคลื่อนที่ลดลง ความปั่นป่วนลดลง แสดงดังรูปที่ 34 และในกรณีศึกษาที่ 16 และ 22 ซึ่งมีจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ คือ 4 ชั้น อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ 773 เคลวิน และความหนาของชั้น คือ 10.0 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีใกล้เคียงกัน และสูงที่สุด การมีค่าดังกล่าวสูงหมายความว่ามีการกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมีไม่สม่ำเสมอ มีความปั่นป่วนสูง เนื่องจากพื้นที่การเคลื่อนที่ที่ต่ำลง และความหนืดที่ลดลงของแก๊สเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในส่วนของคุณสมบัติของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์มีค่าสูงที่สุดในกรณีศึกษาที่ 18 ซึ่งเป็นท่อไรเซอร์แบบ 4 ชั้น ชั้นภายในท่อไรเซอร์มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ คือ 673 เคลวิน เนื่องจากจำนวนชั้นที่มากขึ้นจะช่วยป้องกันไม่ให้ของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์ได้ง่าย

ตารางที่ 17 การออกแบบการทดลองแบบ 2<sup>3</sup> ของการศึกษาผลของตัวแปรติดตั้ง และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง

กรณีศึกษา	จำนวน ชั้น (-)	ความหนา ของชั้น (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของสัดส่วน เชิงปริมาตรของ ของแข็งในแนวรัศมี (-)	สัดส่วนเชิง ปริมาตรของ ของแข็งเฉลี่ย (- )
12	-	-	-	0.0036	0.2090
17	2	0.5	673	0.0025	0.2111
18	4	0.5	673	0.0052	0.2143
19	2	10.0	673	0.0029	0.2106
20	4	10.0	673	0.0054	0.2134
21	2	0.5	773	0.0033	0.2066
22	4	0.5	773	0.0064	0.2099
23	2	10.0	773	0.0035	0.2068
16	4	10.0	773	0.0065	0.2097



รูปที่ 34 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเปรียบเทียบภายในท่อไอเซอร์ที่เวลา 40 วินาที (ก) กรณีศึกษาที่ 12 (ข) กรณีศึกษาที่ 17

#### 4.5 การศึกษาผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบดแบบชั้น

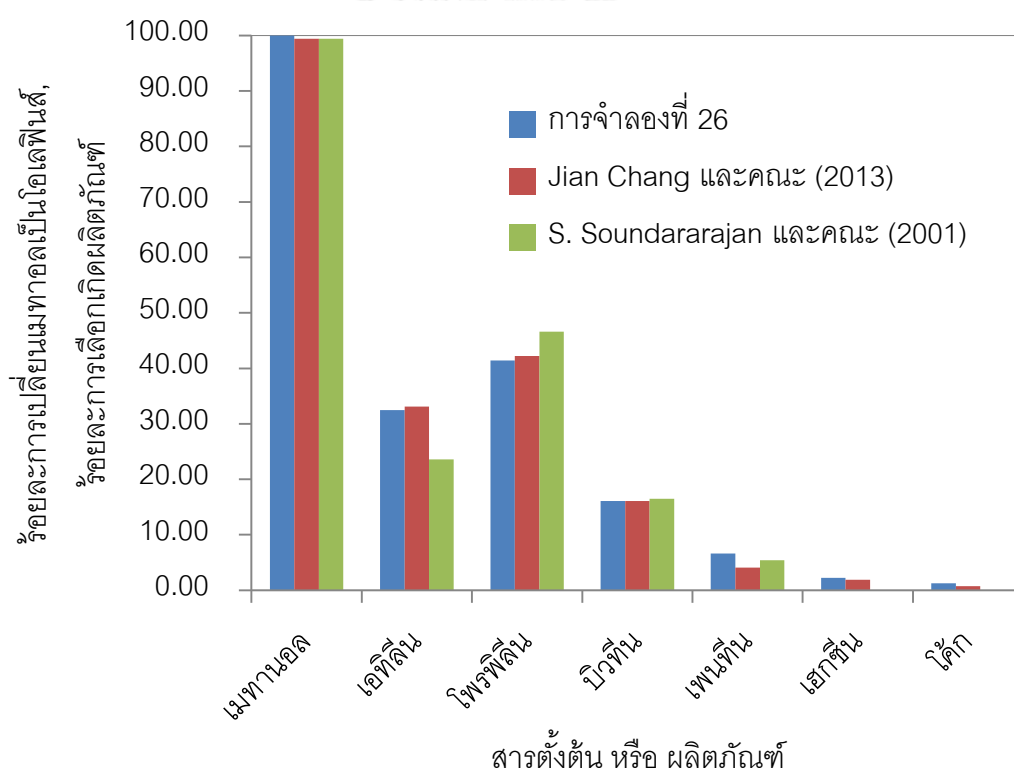
ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของไหลได้ศึกษาผลที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบดแบบชั้น ซึ่งมีร้อยละของพื้นที่เปิด คือ ร้อยละ 10 40 และ 60 ตามลำดับ โดยจากผลจำลองพบว่า พื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งเพียงเล็กน้อย จากตารางที่ 18 พบว่า การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เปิดนั้นให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีความปั่นป่วนสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของของแข็งที่สามารถผ่านช่องว่างของชั้นได้สูงทำให้มีการชนกันระหว่างอนุภาคสูงขึ้น และมีค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งแตกต่างกันในแต่ละกรณีศึกษา โดยเมื่อเพิ่มพื้นที่เปิดของชั้นทำให้สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มมากเกินไปจนพื้นที่เปิดเป็นร้อยละ 60 จะทำให้สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งลดลง เนื่องจากมีความเป็นเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบดแบบชั้นที่ลดลง

ตารางที่ 18 การศึกษาผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบดแบบชั้น และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง

กรณีศึกษา	พื้นที่เปิดของชั้น (ร้อยละ)	ส่วนเบี่ยงเบน	
		มาตรฐานของสัดส่วน เชิงปริมาตรของ ของแข็งในแนวรัศมี (-)	สัดส่วนเชิงปริมาตร ของของแข็งเฉลี่ย (-)
24	10.00	0.0050	0.0292
3	40.00	0.0053	0.0332
25	60.00	0.0060	0.0323

#### 4.6 การหาแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

การหาแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบกับในส่วนของตัวแปรค่าการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์กับงานวิจัยของ Chang และคณะ (Chang, 2013) โดยทำการปรับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละสมการเคมีที่แสดงได้ดังตารางที่ 6 ซึ่งได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาดังแสดงในรูปที่ 35 และตารางที่ 19 ดังนั้นจึงได้นำแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ได้มาใช้ในงานวิจัยนี้ในส่วนของการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขึ้น และใช้ร้อยละของค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองที่ 26 เป็นค่าอ้างอิง



รูปที่ 35 กราฟเปรียบเทียบผลได้จากการจำลองปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์กับงานวิจัยที่ผ่านมา

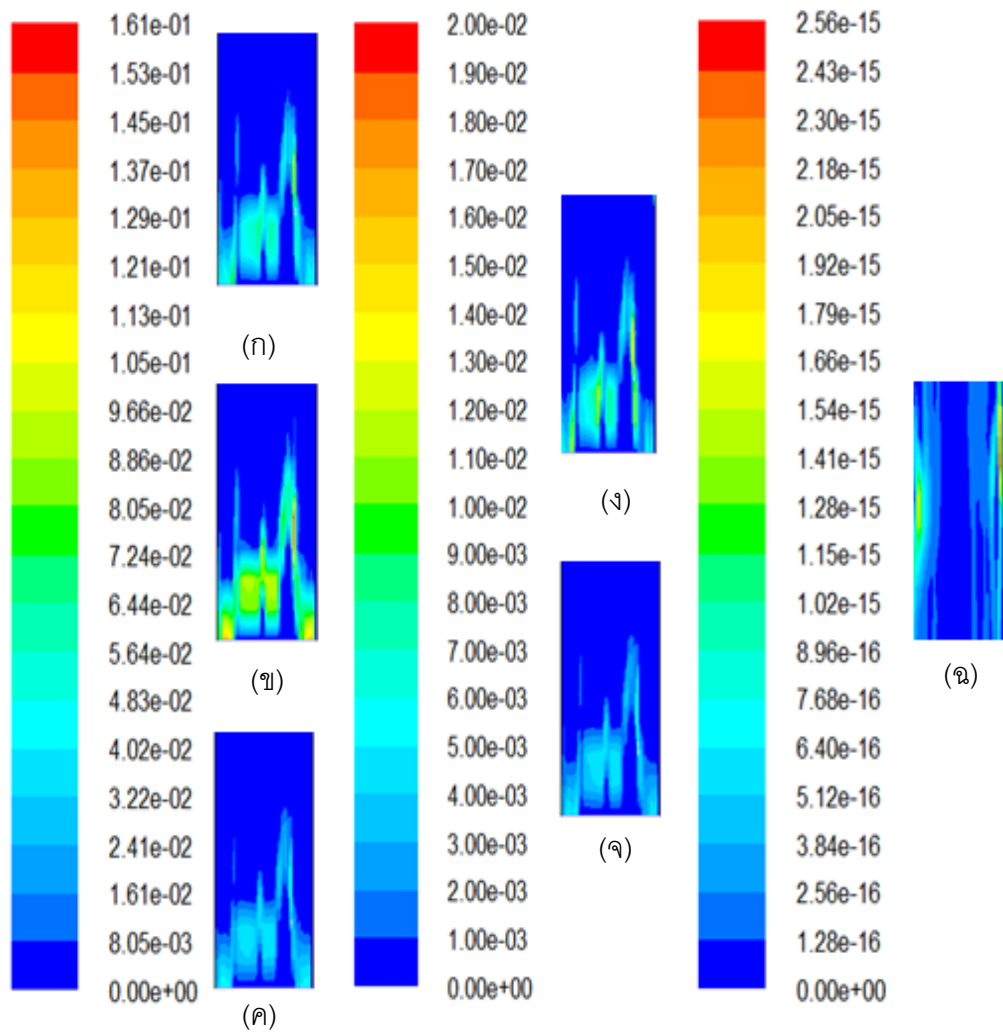
ตารางที่ 19 ตารางเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

ตัวแปร (ร้อยละ)	การจำลองที่ 26	Chang และคณะ	Soundararajan และคณะ
การเปลี่ยนเมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์	100.00	99.42	99.40
การเลือกเกิดเอทิลีน	32.45	33.13	23.60
การเลือกเกิดโพรพิลีน	41.43	42.23	46.60
การเลือกเกิดบิวทีน	16.06	16.10	16.50
การเลือกเกิดเพนทีน	6.60	4.06	5.40
การเลือกเกิดเฮกซีน	2.20	1.90	-
การเลือกเกิดไค้ก	1.25	0.75	-

#### 4.7 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ที่ฟลักซ์โดยมวล 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

จากรูปที่ 36 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์พบว่า อัตราการเกิดโพรพิลีน เอทิลีน บิวทีน เพนทีน เฮกซีน และไค้ก มีค่าลดลง ตามลำดับ

จากผลการจำลองพบว่า ร้อยละการเปลี่ยนเมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไค้กเบดก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงเป็นเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไค้กเบดแบบชั้นนั้นมีความเท่ากัน คือ ร้อยละ 100 แสดงว่าการปรับปรุงท่อไรเซอร์ไม่ได้ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ แต่ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์นั้นมีการเปลี่ยน และมีความเท่ากันเนื่องจากมีร้อยละการเปลี่ยนเมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์เท่ากัน ดังตารางที่ 20



รูปที่ 36 คอนทัวร์แสดงอัตราการผลิต (ก) เอทิลีน (ข) โพรพิลีน (ค) บิวทีน (ง) เพนทีน (จ) เฮกซีน และ (ฉ) ไซคลิก



ตารางที่ 20 ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

กรณีศึกษา	ค่าการเกิดผลิตภัณฑ์ และค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)						
	เอทิลีน	โพรพิลีน	บิวทีน	เพนทีน	เฮกซีน	ไค้ก	โอเลฟินส์เบา
26	32.45	41.43	16.06	6.60	2.20	1.25	73.88
27	27.75	47.00	18.04	3.76	2.21	1.24	74.75
28	27.61	46.98	18.03	3.81	2.20	1.37	74.59
29	27.32	47.34	18.18	3.70	2.20	1.26	74.66
30	29.31	45.50	17.45	4.33	2.23	1.17	74.81
31	27.45	47.22	18.13	3.75	2.20	1.25	74.67
32	27.36	47.02	18.05	3.77	2.19	1.61	74.38
33	28.34	46.41	17.81	3.99	2.22	1.24	74.74
34	28.88	45.82	17.58	4.22	2.22	1.29	74.69

ผลิตภัณฑ์หลักที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ โอเลฟินส์เบา ซึ่งแก่ เอทิลีน และโพรพิลีน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่มีความต้องการสูง จากตารางที่ 20 พบว่าการปรับปรุงท่อไรเซอร์ให้เป็นแบบชั้นนั้นทำให้ร้อยละการเกิดเอทิลีน และร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนมีค่าลดลง แต่ร้อยละการเกิดโพรพิลีน และร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นมีความปั่นป่วนสูงกว่าท่อไรเซอร์แบบที่ไม่ได้ปรับปรุง ทำให้มีการสัมผัสกันของตัวเร่งปฏิริยา และเมทานอลสูงกว่า ซึ่งจากอัตราการเกิดปฏิริยาเคมีตามรูปที่ 36 พบว่าอัตราการเกิดโพรพิลีนนั้นมีอัตราเร็วกว่าอัตราการเกิดเอทิลีน

กรณีศึกษาที่ 29 คือท่อไรเซอร์แบบ 2 ชั้น ชั้นภายในท่อไรเซอร์มีความหนา 10.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ คือ 673 เคลวิน ให้ร้อยละการเกิดโพรพิลีน และบิวทีน และร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีน และบิวทีนสูงสุด คือ ร้อยละ 74.34 และ 18.18 ตามลำดับ

กรณีศึกษาที่ 30 คือท่อไรเซอร์แบบ 4 ชั้น ชั้นภายในท่อไรเซอร์มี ความหนา 10.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ คือ 673 เคลวิน ให้ร้อยละการเกิดเอทีลิน และโอเลฟินส์เบา(เอทีลิน และโพรพิลีน) และร้อยละการเลือกเกิดเอทีลิน และโอเลฟินส์เบาสูงที่สุด คือร้อยละ 29.31 และ 74.81 ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ย และความปั่นป่วนสูงที่สุด ตารางที่ 21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดเอทีลิน

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	0.66	1	0.66	3306.25	0.0111
B-Thickness	1.69	1	1.69	8464.00	0.0069
AB	0.95	1	0.95	4761.00	0.0092
AC	0.24	1	0.24	1225.00	0.0182
BC	0.16	1	0.16	812.25	0.0223
ABC	0.28	1	0.28	1406.25	0.0170
Residual	2.000E-004	1	2.000E-004		
Total	4.00	7			

ตารางที่ 22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดโพรพิลีน

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	2.196E-006	1	2.196E-006	10.74	0.0465
B-Thickness	3.114E-006	1	3.114E-006	15.22	0.0299
AB	1.541E-006	1	1.541E-006	7.53	0.0710
ABC	6.304E-007	1	6.304E-007	3.08	0.1774
Residual	6.137E-007	3	2.046E-007		
Total	8.095E-006	7			

ตารางที่ 23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดบิวทีน

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	1.370E-006	1	1.370E-006	7.00	0.0572
B-Thickness	1.890E-006	1	1.890E-006	9.66	0.0359
AB	9.525E-007	1	9.525E-007	4.87	0.0920
Residual	7.825E-007	4	1.956E-007		
Total	4.996E-006	7			

ตารางที่ 24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดเพนทีน

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	6.717E-003	1	6.717E-003	11.51	0.0427
B-Thickness	0.010	1	0.010	17.61	0.0247
AB	4.741E-003	1	4.741E-003	8.13	0.0651
AC	1.487E-003	1	1.487E-003	2.55	0.2086
Residual	1.750E-003	3	5.833E-004		
Total	0.025	7			

ตารางที่ 25 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดเฮกซีน

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
B-Thickness	6.125E-004	1	6.125E-004	8.45	0.0335
AB	3.125E-004	1	3.125E-004	4.31	0.0925
Residual	3.625E-004	5	7.250E-005		
Total	1.288E-003	7			

ตารางที่ 26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดไดก

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	2.242E-003	1	2.242E-003	29.48	0.0323
B-Thickness	3.157E-003	1	3.157E-003	41.51	0.0233
C-Temperature	1.424E-003	1	1.424E-003	18.73	0.0495
AB	3.446E-003	1	3.446E-003	45.31	0.0214
AC	1.620E-003	1	1.620E-003	21.31	0.0439
Residual	1.521E-004	2	7.605E-005		
Total	0.012	7			

ตารางที่ 27 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการเกิดโอเลฟินส์เบา

Source of variation	SS	df	MS	F <sub>0</sub>	p-value
A-Stage	4.512E-003	1	4.512E-003	1.35	0.3295
C-Temperature	0.033	1	0.033	9.72	0.0526
AB	0.086	1	0.086	25.74	0.0148
ABC	0.014	1	0.014	4.07	0.1370
Residual	0.010	3	3.346E-003		
Total	0.15	7			

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน โดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน โพรพิลีน บิวทีน เพนทีน เฮกซีน โดdek และโอเลฟินส์เบา จากตารางที่ 21 พบว่า ตัวแปร A หรือ จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ อันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ อันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ อันตรกิริยาระหว่างความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ และอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ และอันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ และอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละการเกิดเอทิลีนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 สำหรับค่าร้อยละการเกิดเอทิลีนนั้นจากตารางที่ 22 พบว่า ตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ คือ ตัวแปร A หรือ จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จากตารางที่ 23 เป็นการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าร้อยละการเกิดบิวทีน พบว่า ตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าเป็นตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าร้อยละการเกิดเพนทีน คือ ตัวแปร A หรือ จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ ดังแสดงในตารางที่ 24 สำหรับค่าร้อยละการเกิดเฮกซีนในตารางที่ 25 พบว่า ตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ เป็นตัวแปรที่มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนองนี้อย่างมีนัยสำคัญ จากตารางที่ 26 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดโดdekอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 คือ ตัวแปร A หรือ จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ ตัวแปร C หรืออุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ อันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ และอันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ และค่าร้อยละการเกิดโอเลฟินส์เบา มีตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ คือ อันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ เนื่องจากมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 ดังตารางที่ 27

รูปที่ 37 แสดงตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน พบว่า ตัวแปร A หรือจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร B หรือความหนาของ

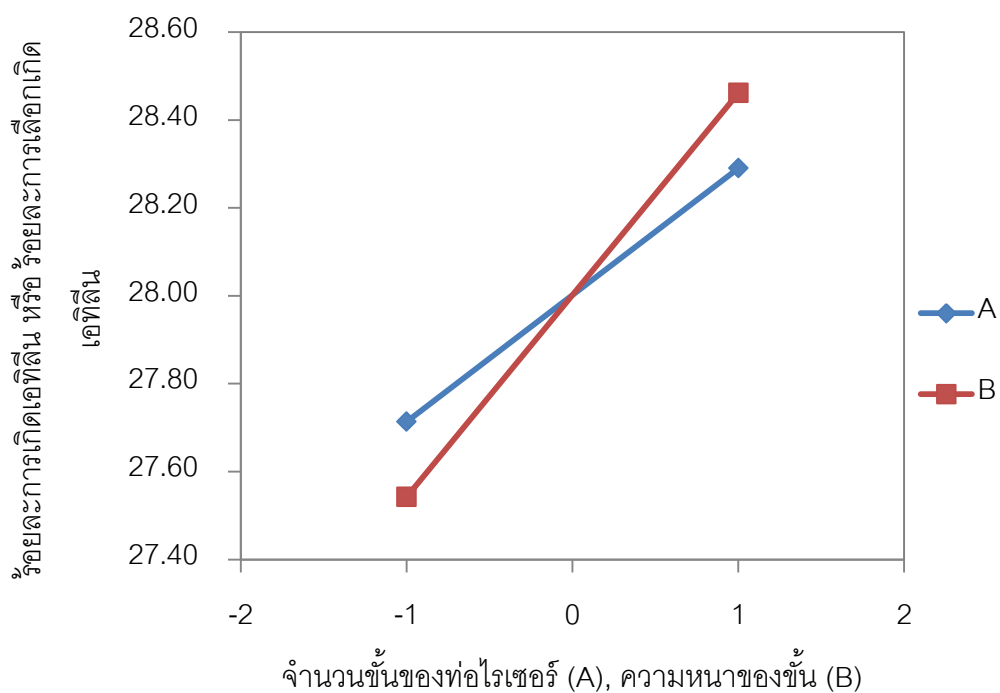
ขึ้นภายในท่อไรเซอรัมีผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงบวก คือ เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอรั หรือเพิ่มความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอรั จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนมีค่าสูงขึ้น

รูปที่ 38 แสดงผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน พบว่า ตัวแปร B มีค่าสูง (+) หรือตัวแปร C มีค่าต่ำ (-) หรือค่าสูง (+) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร A จะส่งผลเชิงบวกต่อค่าตอบสนองนี้ หมายความว่า ท่อไรเซอรัที่มีชั้นภายในท่อไรเซอรัมีความหนาสูง หรือ มีอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอรัไม่ว่าจะต่ำหรือสูง เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอรัจะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวแปร B มีค่าต่ำ (-) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร A จะส่งผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงลบ คือ ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอรัมีค่าสูง เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอรัจะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าการเลือกเกิดเอทิลีนมีค่าลดลง

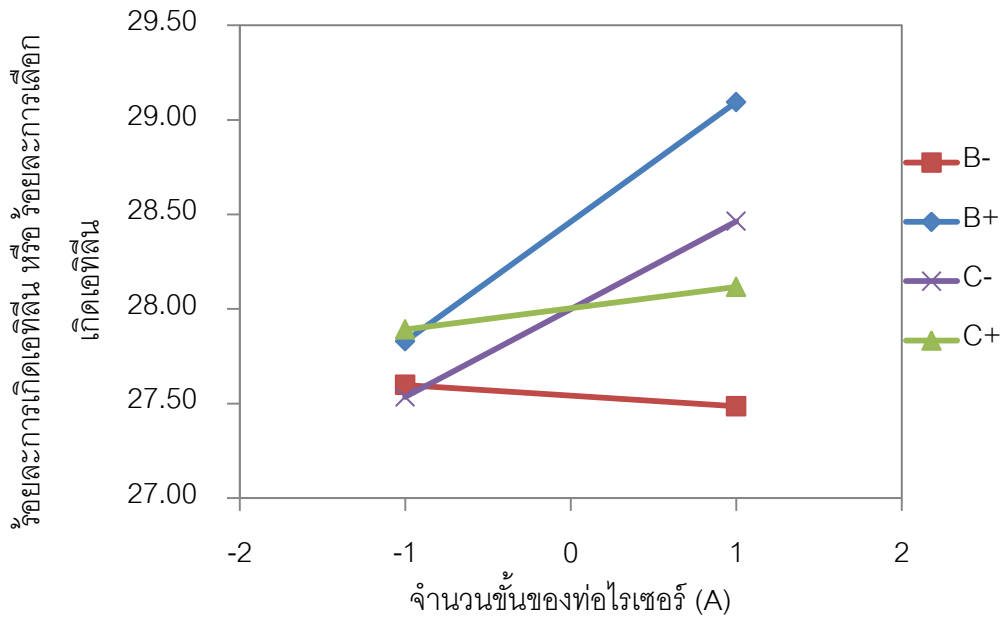
รูปที่ 39 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอรั และตัวแปร C หรืออุณหภูมิของผนังท่อไรเซอรัที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน โดยพบว่า ไม่ว่าอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอรัจะมีค่าสูง หรือต่ำ การเพิ่มขึ้นของตัวแปร B จะส่งผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงบวก ท่อไรเซอรัที่มีชั้นความหนามากขึ้น จะทำให้ค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิของผนังมีค่าสูง จะให้ค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิด เอทิลีนเพิ่มสูงกว่าที่อุณหภูมิของผนังท่อ ไรเซอรัมีค่าต่ำ เมื่อเพิ่มความหนาของชั้น

รูปที่ 40 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรหลักทั้ง 3 ตัวแปรที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน และค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน พบว่า ที่ตัวแปร A มีค่าสูง (+) และตัวแปร B มีค่าต่ำ (-) หรือค่าสูง (+) หรือตัวแปร A มีค่าต่ำ (-) และตัวแปร B มีค่าต่ำ (-) เมื่อตัวแปร C เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงลบ คือ เมื่อใช้ท่อไรเซอรัที่มีจำนวนชั้นสูง และมีความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอรัสูงหรือต่ำ หรือ เมื่อใช้ท่อไรเซอรัที่มีจำนวนชั้นต่ำ และมีความหนาของท่อไรเซอรัต่ำ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอรัจะทำให้ค่าการเกิดเอทิลีน หรือค่าการเลือกเกิด

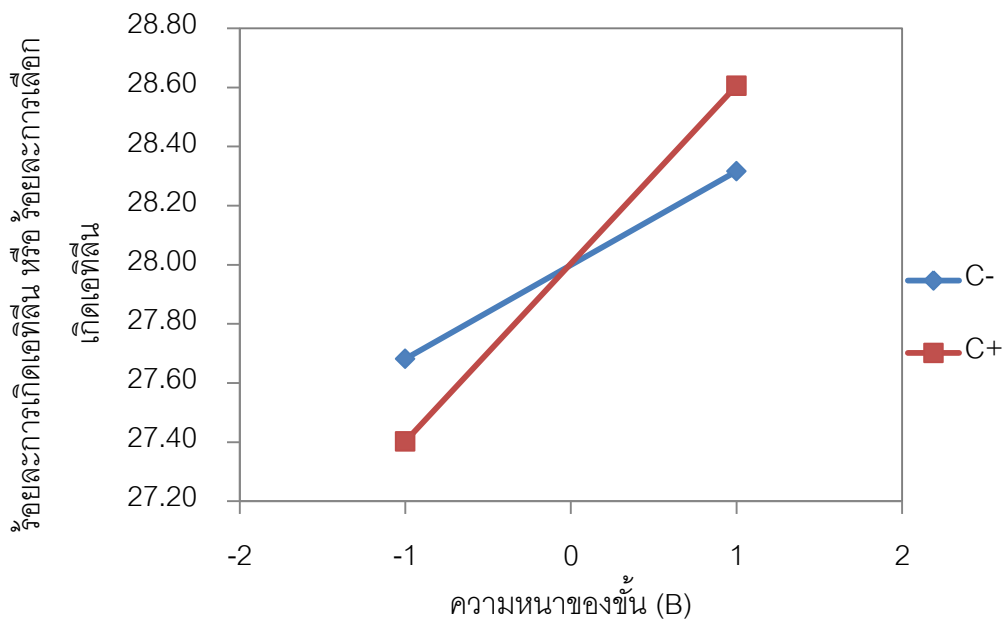
เอทิลีนมีค่าลดลง แต่ที่ตัวแปร A มีค่าต่ำ (-) และตัวแปร B มีค่าสูง (+) เมื่อตัวแปร C เพิ่มขึ้นจะส่งผลเชิงบวก หมายความว่า เมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่มีจำนวนชั้นต่ำ และมีความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ต่ำ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 37 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน

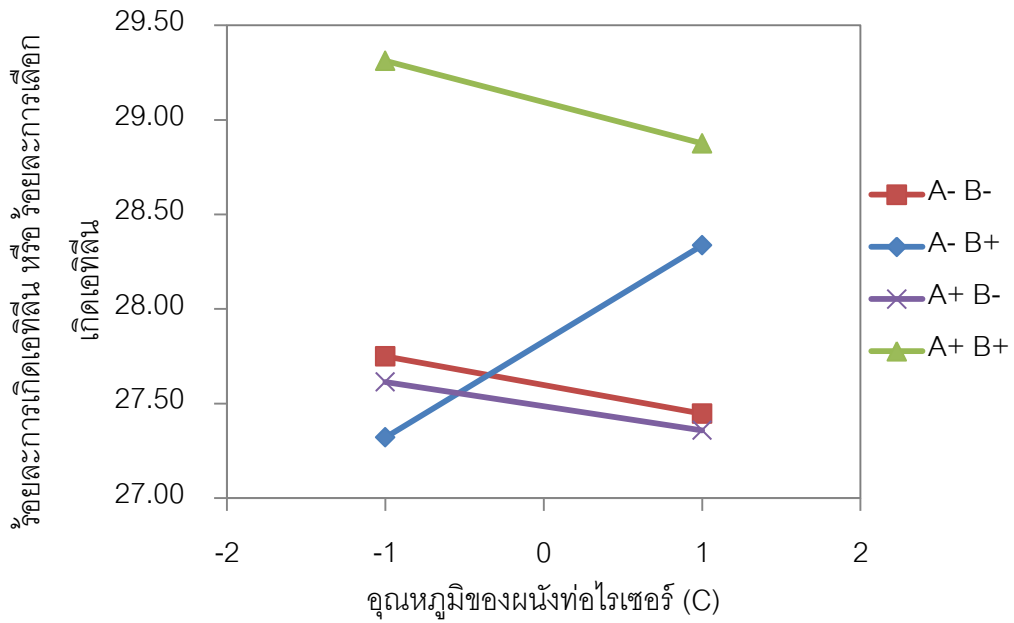


รูปที่ 38 ผลของอันตรกิริยา (AB, BC) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน

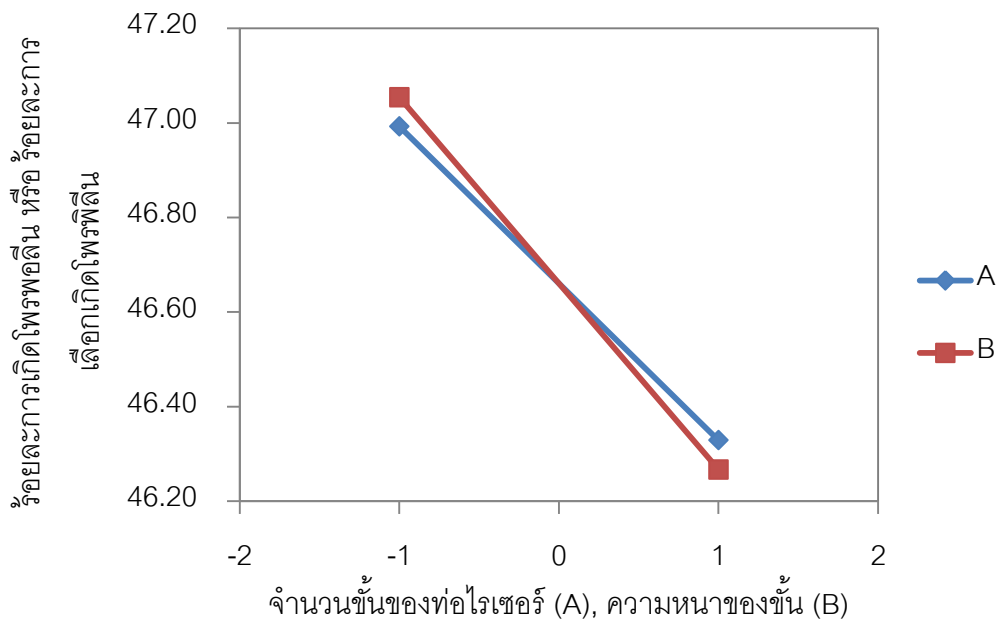


รูปที่ 39 ผลของอันตรกิริยา (BC) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน





รูปที่ 40 ผลของอันตรกิริยา (ABC) ที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเอทีไลน์ หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเอทีไลน์



รูปที่ 41 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดโพรฟีไลน์ หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโพรฟีไลน์

รูปที่ 41 แสดงตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดโพรพิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีน พบว่า ตัวแปร A หรือจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ มีผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงลบ หมายความว่า เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ หรือเพิ่มความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดโพรพิลีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีนมีค่าลดลง

รูปที่ 42 แสดงตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดบิวทีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดบิวทีน โดยพบว่า ตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ มีผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงลบ คือ เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดบิวทีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดบิวทีนมีค่าลดลง

รูปที่ 43 แสดงตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดเพนทีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเพนทีน พบว่า ตัวแปร A หรือจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์มีผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงบวก หมายความว่า เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ หรือเพิ่มความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดเพนทีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเพนทีนมีค่าสูงขึ้น

รูปที่ 44 แสดงตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดเฮกซีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเฮกซีน โดยพบว่า ตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ มีผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงบวก แสดงว่า เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดเฮกซีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเฮกซีนมีค่าเพิ่มขึ้น

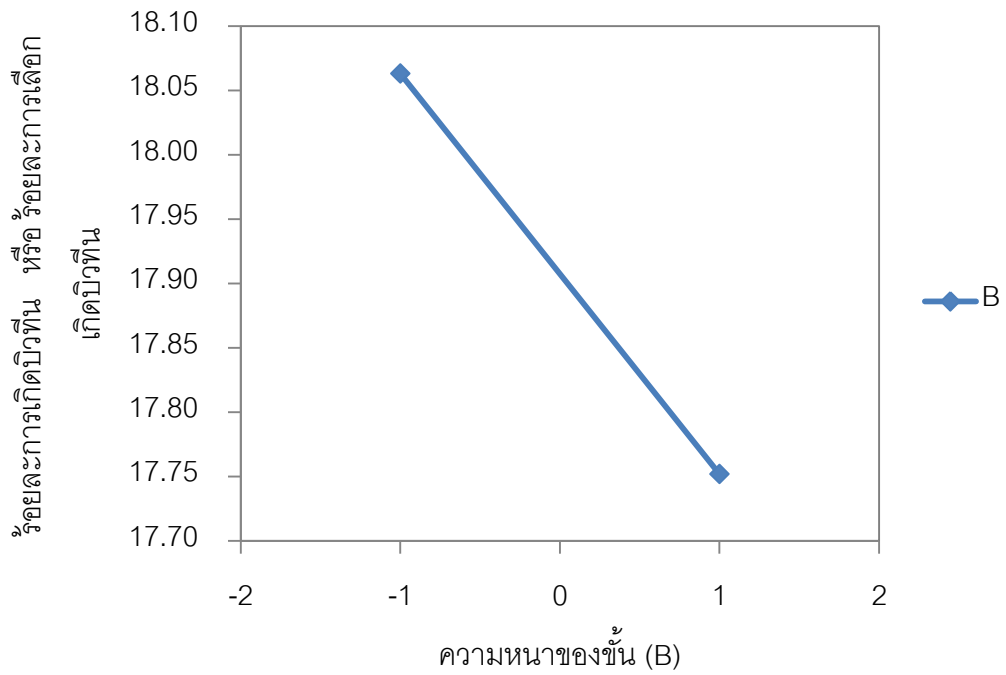
รูปที่ 45 แสดงตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดไดค็อก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดไดค็อก พบว่า ตัวแปร A หรือจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ และตัวแปร C หรืออุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์มีผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงบวก หมายความว่า เมื่อจำนวนท่อไรเซอร์ หรืออุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดไดค็อก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดไดค็อกเพิ่มขึ้น แต่ตัวแปร B หรือความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ มีผลต่อค่าตอบสนองนี้เชิงลบ แสดงว่าเมื่อความ

หนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดโค้ก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโค้กมีค่าลดลง

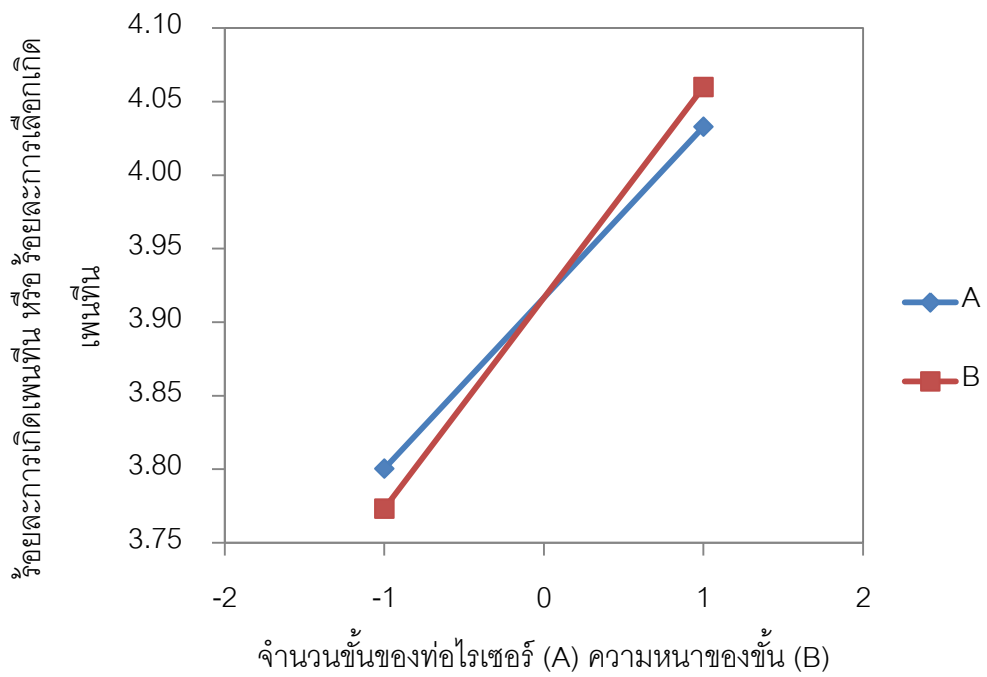
รูปที่ 46 แสดงผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดโค้ก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโค้ก พบว่า ตัวแปร B มีค่าสูง (+) หรือค่าต่ำ (-) หรือตัวแปร C มีค่าสูง (+) หรือค่าต่ำ (-) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร A จะส่งผลเชิงบวกต่อค่าตอบสนองนี้ หมายความว่า ท่อไรเซอร์ที่มีชั้นภายในท่อไรเซอร์มีความหนา หรือบาง หรือ มีอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ไม่ว่าจะต่ำหรือสูง เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิดโค้ก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโค้กมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 47 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ (A) และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ (B) ที่มีต่อค่าร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา พบว่า ตัวแปร B มีค่าสูง (+) เมื่อค่าตัวแปร A เพิ่มขึ้นจะส่งผลเชิงบวก แต่ตัวแปร B มีค่าต่ำ (-) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร A จะส่งผลในเชิงลบ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ที่มีชั้นภายในท่อไรเซอร์หนาจะทำให้ค่าร้อยละการเกิดโอเลฟินส์เบา หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา มีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าลดลงในท่อไรเซอร์ที่มีชั้นบาง

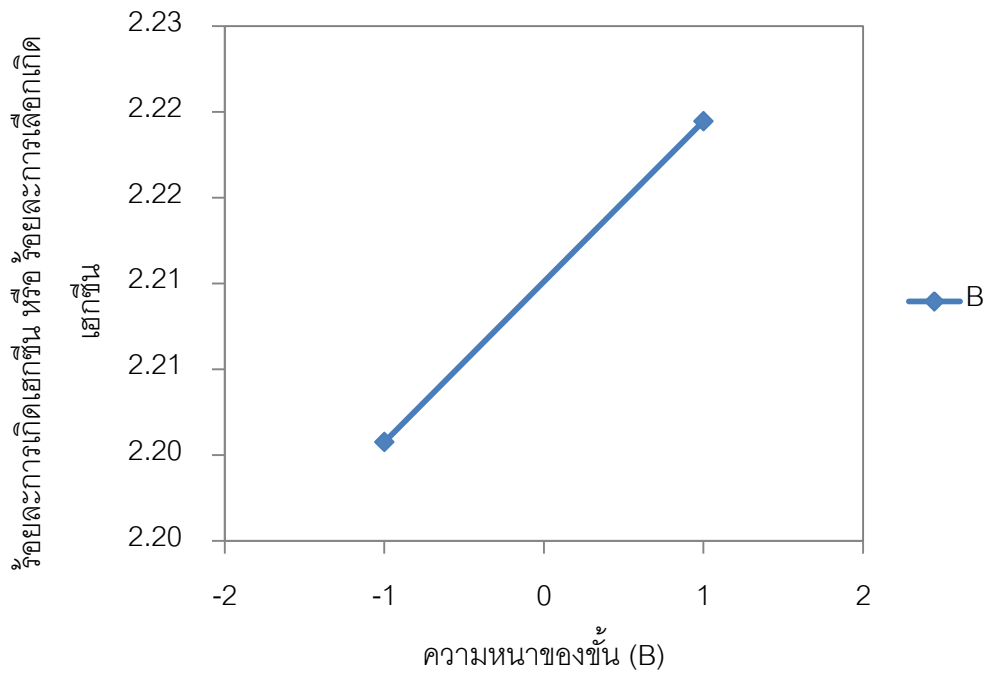
จากผลการจำลองดังกล่าวเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ซึ่งทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยานานขึ้น ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ ส่งผลให้เกิดการปั่นป่วนสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างชั้น และอุณหภูมิที่ผนังของท่อไรเซอร์ทำให้แก๊สมีความหนืดที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะส่งผลต่อความเร็วของแก๊ส และการเคลื่อนที่ของตัวเร่งปฏิกิริยา



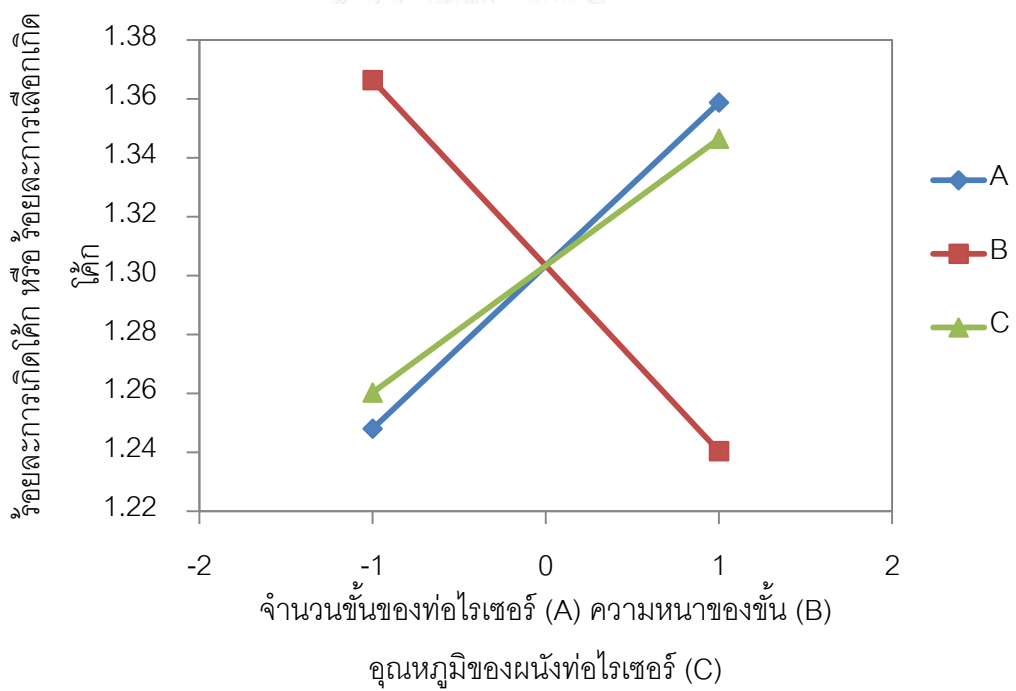
รูปที่ 42 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดบิวทิน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดบิวทิน



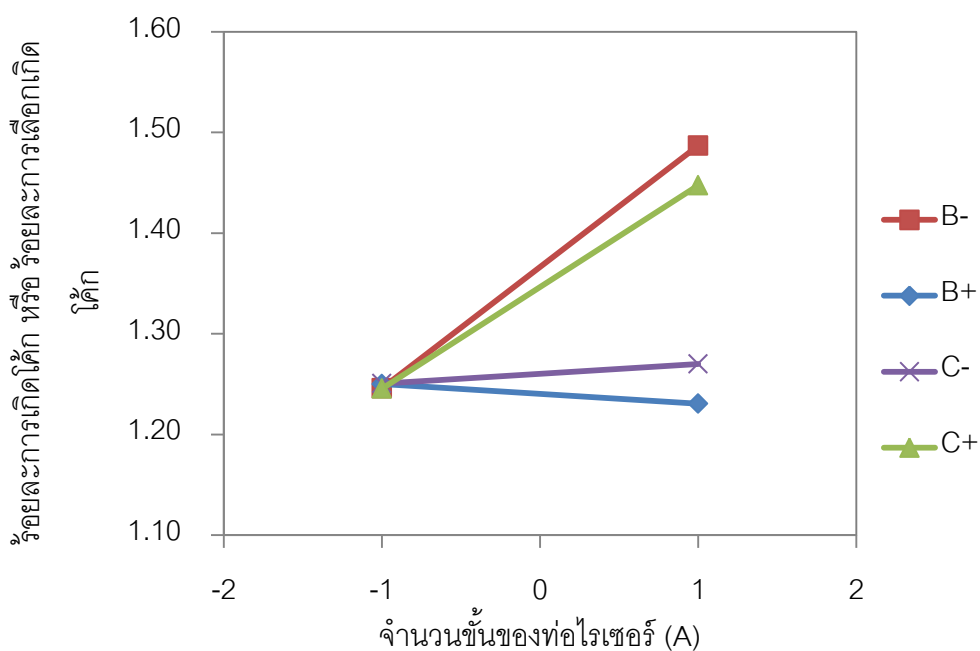
รูปที่ 43 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเพนทิน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเพนทิน



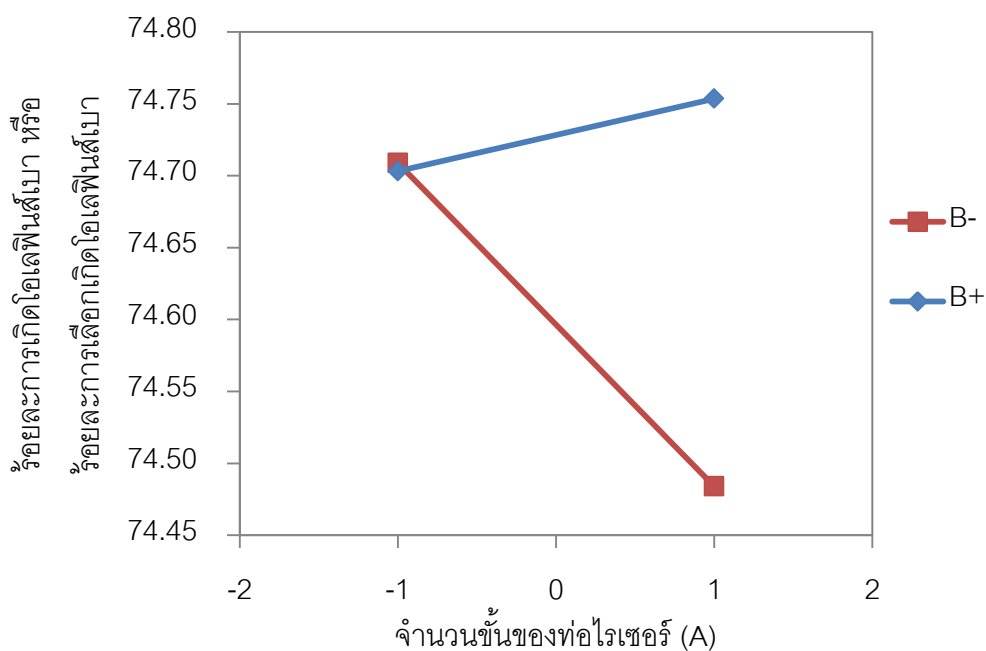
รูปที่ 44 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดเฮกซีน หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดเฮกซีน



รูปที่ 45 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดได้ก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดได้ก



รูปที่ 46 ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดได้ก หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดได้ก



รูปที่ 47 ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเกิดโอเลฟินส์เบา หรือค่าร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น สามารถหาแบบจำลองถดถอย (Regression model) เพื่อนำผลการวิจัยนี้ที่มีค่าตอบสนอง คือ ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของ เอทีดีน

โพรพิลีนบิวทีน เพนทีน เฮกซีน ไค้ก และโอเลฟินส์เบา ไปใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไค้เบดแบบชั้น ดังสมการที่ (4.5) เอทิลีน (4.6) โพรพิลีน (4.7) บิวทีน (4.8) เพนทีน (4.9) เฮกซีน (4.10) ไค้ก และ (4.11) โอเลฟินส์เบา

$$Y_5 = 28.00 + 0.29X_A + 0.46X_B + 0.35X_A X_B - 0.17X_A X_C + 0.14X_B X_C - 0.19X_A X_B X_C \quad (4.5)$$

$$1/Y_6^2 = 0.15 + 5.240 \times 10^{-4} X_A + 6.239 \times 10^{-4} X_B \quad (4.6)$$

$$1/Y_7 = 0.05585 + 4.86099 \times 10^{-4} X_B \quad (4.7)$$

$$\ln Y_8 = 1.36 + 0.029X_A + 0.036X_B \quad (4.8)$$

$$Y_9 = 2.21 + 8.750 \times 10^{-3} X_B \quad (4.9)$$

$$1/Y_{10}^2 = 0.8786 - 0.0167X_A + 0.0199X_B - 0.0133X_C + 0.0208X_A X_B - 0.0142X_A X_C \quad (4.10)$$

$$Y_{11} = 74.62 - 0.10X_A X_B \quad (4.11)$$

- โดยที่ตัวแปร  $Y_5$  คือ ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของเอทิลีน  
 $Y_6$  คือ ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของโพรพิลีน  
 $Y_7$  คือ ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของบิวทีน  
 $Y_8$  คือ ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของเพนทีน  
 $Y_9$  คือ ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของเฮกซีน  
 $Y_{10}$  คือ ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของไค้ก  
 $Y_{11}$  คือ ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของโอเลฟินส์เบา  
 $X_A$   $X_B$  และ  $X_C$  คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A B และ C ตามลำดับ

#### 4.8 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งที่มีผลต่อปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ที่ฟลักซ์โดยมวล 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

จากผลการจำลองการเกิดปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบชั้นที่ฟลักซ์โดยมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที พบว่า ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์เท่ากับ 100 ในทุกรณีศึกษา และพบว่ามีค่าร้อยละการเกิดโอเลฟินส์เบา และร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา มีค่าลดลงเล็กน้อยจากกรณีที่ใช้ฟลักซ์เชิงมวลเท่ากับ 100 เนื่องจากการใช้ฟลักซ์เชิงมวลเท่ากับ 500 ทำให้มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เป็นผลให้เกิดได้กสะสมบนตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น ซึ่งการเกิดได้กบนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าร้อยละการเกิดโอเลฟินส์เบา และค่าร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา นั้นลดลง โดยที่กรณีที่ให้ค่าการเกิดโอเลฟินส์เบา และค่าการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา สูงที่สุด คือ ร้อยละ 74.46 โดยแบ่งเป็นร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน และร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 26.44 และร้อยละการเกิดโพรพิลีน และร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 48.02 ซึ่งคือ กรณีศึกษาที่ 38 ที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดแบบ 2 ชั้น มีความหนาของชั้นเท่ากับ 10.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิผนังของท่อไรเซอร์เท่ากับ 673 เคลวิน ดังแสดงในตารางที่ 28



ตารางที่ 28 ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้นที่ฟลักซ์เชิงมวลเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

กรณีศึกษา	ค่าการเกิดผลิตภัณฑ์ และค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)						โอเลฟินส์ เบา
	เอทิลีน	โพรพิลีน	บิวทีน	เพนทีน	เฮกซีน	ไค้ก	
35	27.40	46.27	17.78	4.91	2.13	1.51	73.67
36	28.83	44.93	17.25	5.24	2.16	1.59	73.77
37	25.14	49.10	18.87	3.27	2.15	1.47	74.24
38	26.44	48.02	18.44	3.37	2.19	1.55	74.46
39	30.90	42.37	16.26	6.86	2.15	1.46	73.27
40	30.77	41.78	16.05	7.71	2.12	1.57	72.55
41	29.41	44.19	16.97	5.83	2.15	1.45	73.60
42	24.01	50.23	19.32	2.76	2.13	1.56	74.24
43	30.32	42.83	16.43	6.80	2.14	1.49	73.15

#### 4.9 การศึกษาผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้นที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

จากตารางที่ 29 พบว่ากรณีศึกษาที่ 29 ซึ่งมีพื้นที่เปิดของชั้นร้อยละ 40 นั้นมีค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีนที่สูงที่สุด แต่ให้ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนต่ำสุด เนื่องจากร้อยละพื้นที่เปิดของชั้นนั้นส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งของแข็ง และแก๊ส ซึ่งร้อยละพื้นที่เปิดที่ต่ำเกินไปจะทำให้ความเร็วที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นนั้นสูง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไม่ดี และถ้าร้อยละพื้นที่เปิดสูงเกินไป จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นด้วยความเร็วที่ต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลตกกลับของของแข็ง และเกิดการสะสมตัวของความร้อน โดย ร้อยละพื้นที่เปิดที่เหมาะสมในการเกิดโพรพิลีนคือ ร้อยละ 40 เนื่องจากมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโพรพิลีน และพื้นที่เปิดร้อยละ 60 มีอุณหภูมิเหมาะแก่การเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นเอทิลีนมากกว่าการเกิดโพรพิลีน

เนื่องจากมีอุณหภูมิที่สูงกว่ากรณีศึกษาอื่น ดังภาพที่ 48 ที่แสดงอุณหภูมิภายในท่อไรเซอร์ของแต่ละกรณีศึกษา

ตารางที่ 29 ผลของพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ที่มีต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ และร้อยละเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

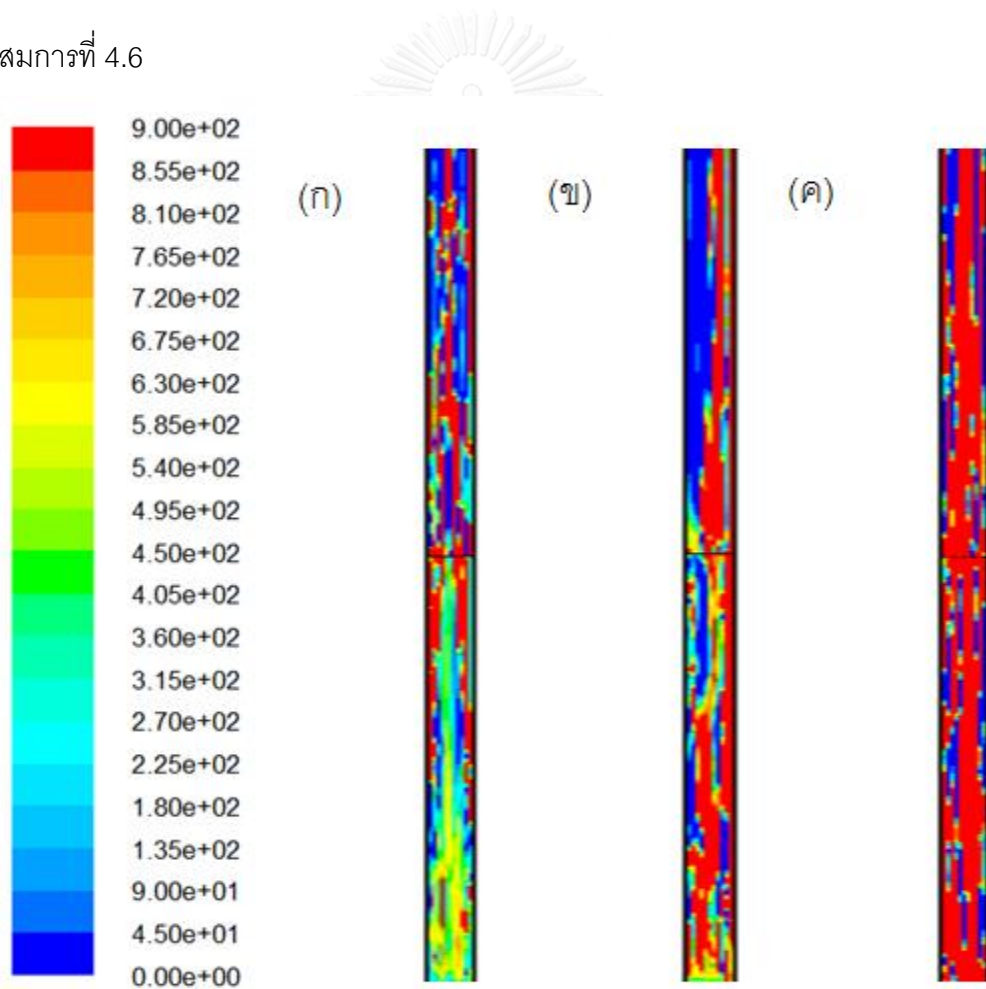
กรณีศึกษา	ค่าการเกิดผลิตภัณฑ์ และค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)						
	เอทิลีน	โพรพิลีน	บิวทีน	เพนทีน	เฮกซีน	โค้ก	โอเลฟินส์ เบา
29	27.32	47.34	18.18	3.70	2.20	1.26	74.66
44	32.12	40.57	15.55	8.08	2.14	1.54	72.70
45	42.13	16.73	6.35	32.07	1.49	1.23	58.85

#### 4.10 การประยุกต์ใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้น

จากข้อมูลทางสถิติ สามารถนำมาใช้เพื่อออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นเพื่อให้เหมาะต่อการใช้งาน โดยสำหรับงานที่ต้องการความปั่นป่วนสูง หรือมีการผสมที่ดี มีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งในท่อไรเซอร์ที่สูง และใช้เวลาในการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง และแก๊ส ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ควรออกแบบโดยเพิ่มจำนวนชั้น ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ และอุณหภูมิผนังท่อไรเซอร์ แต่ไม่ควรเพิ่มจำนวนชั้นมากเกินไปเนื่องจากจะทำให้เวลาที่อนุภาคของแข็ง และแก๊สสัมผัสกันน้อยลง และไม่ควรเพิ่มอุณหภูมิผนังท่อไรเซอร์มากเกินไป เพราะจะทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งลดลง ดังสมการที่ 4.1 4.2 และ 4.4

สำหรับงานที่ต้องการการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ และมีการผสมที่ดี หรือความปั่นป่วนสูง ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผสมทางกายภาพ เช่น การอบแห้ง หรือการปรับสภาพของอนุภาคของแข็ง เป็นต้น ควรออกแบบเครื่องปฏิกรณ์โดยการเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ความหนาของชั้น ดังสมการที่ 4.1 และ 4.3

การปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้นนั้นทำให้ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนลดลง แต่เพิ่มค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีน อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงนี้ได้ทำให้ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา มีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบดั้งเดิม ซึ่งโอเลฟินส์เบา นั้นเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่สำคัญ เช่น การนำไปทำเป็นพอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน เป็นต้น สำหรับกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์เป็นเอทิลีนเป็นหลัก ดังเช่นในงานวิจัยนี้ ควรออกแบบโดยการเพิ่มจำนวนชั้น และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ ดังสมการที่ 4.5 แต่ถ้าต้องการผลิตภัณฑ์เป็นโพรพิลีนเป็นหลัก ควรออกแบบโดยการลดจำนวนชั้น และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ ดังสมการที่ 4.6



รูปที่ 48 คอนทัวร์ของอุณหภูมิของแก๊สเปรียบเทียบภายในท่อไรเซอร์ที่เวลา 40 วินาที กรณีศึกษาที่ 29 (ก) กรณีศึกษาที่ 44 และ (ค) กรณีศึกษาที่ 45

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของอุทกพลศาสตร์และปฏิบัติการการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบขั้นแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัยอุทกพลศาสตร์ภายในของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบขั้น และปฏิบัติการการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบขั้น

##### 5.1.1 การหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัย

1. การจำลองการไหลในการวิจัยใช้ค่าเฉลี่ยที่เวลา 20-40 วินาที เนื่องจากเป็นเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (Steady state)
2. พื้นที่เซลล์การคำนวณที่เหมาะสมที่ใช้ในการวิจัย คือ 12000 เซลล์การคำนวณ
3. ได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบขั้น โดยแบ่งความเร็วของแก๊สเข้าเป็นเป็นช่วงทั้งหมด 10 ช่วง ช่วงละ 0.02 เมตร จากซ้ายไปขวา คือ 2.3 2.4 3.2 3.5 3.8 3.8 3.5 3.2 2.4 และ 2.3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ เพื่อให้ได้การเคลื่อนที่แบบระฆังคว่ำ ใช้สัมประสิทธิ์ยืดหยุ่นระหว่างอนุภาค และอนุภาคเป็น 0.9 สัมประสิทธิ์ระหว่างอนุภาค และผนังเป็น 0.7 สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเป็น 0.1 และค่าสัมประสิทธิ์ Specularity เป็น 0.2

### 5.1.2 อุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบขึ้น

1. ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีสูงที่สุด คือ กรณีศึกษาที่ 4 และ 8 ซึ่งมีจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ คือ 4 ชั้น ความหนาของชั้น คือ 10.0 มิลลิเมตร และอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ คือ 673 และ 773 เคลวิน ตามลำดับ
2. ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์มีค่าสูงที่สุดในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นท่อไรเซอร์แบบ 4 ชั้น ขึ้นภายในท่อ ไรเซอร์มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ คือ 673 เคลวิน
3. ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิของแก๊สในแนวรัศมีต่ำที่สุด และใช้เวลาที่ทำให้ของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์สูงที่สุด คือ 44.77 วินาที คือ กรณีศึกษาที่ 5 ซึ่งเป็นท่อไรเซอร์แบบ 2 ชั้น ขึ้นภายในท่อไรเซอร์มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร และอุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ คือ 773 เคลวิน
4. จำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ไม่ส่งผลกระทบต่อความดันลด และสามารถป้องกันการไหลย้อนกลับของของแข็ง เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ความดันป่วนของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น และช่วยเพิ่มระยะเวลาที่แก๊สสัมผัสกับของแข็ง
5. ความหนาของชั้นภายในของท่อไรเซอร์ เมื่อเพิ่มความหนาของชั้น จะทำให้ความดันป่วนของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบขึ้นเพิ่มขึ้น เพราะพื้นที่ในการเคลื่อนที่ของของแข็งลดลง
6. อุณหภูมิของผนังท่อไรเซอร์ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความดันป่วนของของไหลโดยรวม แต่ถ้าพิจารณาโดยละเอียด อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อความดันป่วนในแนวรัศมี โดยเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ความดันป่วนของของแข็งจะเพิ่มขึ้น เพราะอุณหภูมิกرانูล่าเพิ่มขึ้น
7. เมื่อเพิ่มฟลักซ์โดยมวลจะส่งผลให้ความหนาแน่นของของแข็งเพิ่มขึ้น สามารถสังเกตการกระจายตัวของของแข็งได้สูงขึ้น

8. พื้นที่เปิดของของชั้นภายในท่อไรเซออร์มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งเพียงเล็กน้อย

#### 5.1.3 ปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขึ้น

1. การเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์เกิดได้อย่างสมบูรณ์ในทุกกรณีศึกษา
2. การปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขึ้นนั้นทำให้ค่าร้อยละการเกิด และ ร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีนลดลง แต่เพิ่มค่าร้อยละการเกิด และ ร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีน แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงนี้ได้ทำให้ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบา(เอทิลีน และโพรพิลีน) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบดั้งเดิม
3. ค่าร้อยละการเกิดเอทิลีน และโอเลฟินส์เบา และร้อยละการเลือกเกิดเอทิลีน และโอเลฟินส์เบาสูงที่สุด คือร้อยละ 29.31 และ 74.81 คือ กรณีศึกษาที่ 30 คือท่อ ไรเซออร์แบบ 4 ชั้น ชั้นภายในท่อไรเซออร์มีความหนา 10.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิของผนังท่อไรเซออร์ คือ 673 เคลวิน
4. ค่าร้อยละการเกิดโพรพิลีน และร้อยละการเลือกเกิดโพรพิลีนสูงที่สุด คือ ร้อยละ 74.34 ในกรณีศึกษาที่ 29 คือ ท่อไรเซออร์แบบ 2 ชั้น ชั้นภายในท่อไรเซออร์มี ความหนา 10.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิของผนังท่อไรเซออร์ คือ 673 เคลวิน
5. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขึ้นสามารถช่วยเพิ่มค่าร้อยละการเกิด และ ค่าร้อยละการเลือกเกิดโอเลฟินส์เบาให้สูงขึ้นจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด โดยเหมาะสมต่อผู้ที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่เป็นโพรพิลีนเป็นหลัก เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขึ้นจะช่วยเพิ่มค่าร้อยละการเกิด และค่าร้อยละการเลือกเกิดของโพรพิลีน
6. จำนวนชั้นของท่อไรเซออร์ และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซออร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ของโพรพิลีนกลับลดลง เนื่องจากการเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซออร์ และ

ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นความเร็วสูงบริเวณพื้นที่เปิดของชั้นสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

7. คุณสมบัติของผนังท่อไรเซอร์ไม่ได้ส่งผลโดยตรงกับปฏิกิริยาเคมีภายในท่อไรเซอร์ เนื่องจากคุณสมบัติของผนังท่อไรเซอร์แตกต่างจากคุณสมบัติภายในท่อไรเซอร์ต่ำเกินไปทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ต่ำ คุณสมบัติภายในท่อไรเซอร์จึงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง
8. พลังก์โดยมวลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าร้อยละการเกิด และค่าร้อยละการเลือกเกิดของโอเลฟินส์เบาลดลง
9. ร้อยละพื้นที่เปิดของชั้นภายในท่อไรเซอร์ที่เหมาะสมระหว่าง ร้อยละ 10 40 และ 60 คือ ร้อยละ 40 ซึ่งให้ค่าร้อยละการเกิด และร้อยละการเลือกเกิดของโอเลฟินส์เบาสูงที่สุด

#### 5.1.4 แนวทางการปรับปรุงอุทกพลศาสตร์ และปฏิบัติการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบขึ้น

1. การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์โดยเพิ่มจำนวนชั้นของท่อไรเซอร์ ความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จะช่วยให้การกระจายความร้อนมีความสม่ำเสมอ และมีการผสมที่ดี หรือความปั่นป่วนสูง ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผสมทางกายภาพ
2. การออกแบบโดยเพิ่มจำนวนชั้น และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์ จะได้เอทิลีนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก แต่ถ้าต้องการผลิตภัณฑ์เป็นโพรพิลีนเป็นหลัก ควรออกแบบโดยการลดจำนวนชั้น และความหนาของชั้นภายในท่อไรเซอร์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปฏิกิริยาเคมีการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบขึ้น โดยใช้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างง่าย ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติม

โดยใช้ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์อย่างละเอียดจะได้ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบได้  
ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น





## รายการอ้างอิง

- Aghamohammadi, S., Haghghi, M., Charghand, M. (2014). Methanol conversion to light olefins over nanostructured CeAPSO-34 catalyst: Thermodynamic analysis of overall reactions and effect of template type on catalytic properties and performance. *Master. Res. Bull.*, 50, 462-475.
- Center, C. I. C. (Producer). (2011, 8 May 2017). Circulating Fluidized Bed. Retrieved from <http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php/ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน>
- Chalermssinsuwan, B., Kuchonthara, P. and Piumsomboon, P. (2010). CFD modeling of tapered circulating fluidized bed reactor risers: Hydrodynamic descriptions and chemical reaction responses. *Chem. Eng. Process. : Process Intensif.*, 49, 1144-1160.
- Chalermssinsuwan, B., Piumsomboon, P. and Gidaspow, D. (2009). Kinetic theory based computation of PSRriser: Part I—Estimate of mass transfer coefficient. *Chem. Eng. Sci.*, 64, 1196-1211.
- Chang, J., Zhang K., Chen, H., Yang, Y., Zhang, L. (2013). CFD modelling of the hydrodynamics and kinetic reactions in a fluidised-bed MTO reactor. *Chem. Eng. Res. Des.*, 91, 2355–2368.
- Fluent. (2003). *Fluent 6.2.16 User's Guide [Electronic Documentation]*
- Gidaspow, D. (1994). *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description*. Boston: Academic Press.
- Grace, J. R., Avidan, A. A., and Knowlton, T. M. (1997). *Circulating Fluidized Beds*. London: Blackie Academic & Professional.
- Jiang, C. W., Zheng, Z.W., Zhu, Y.P., Luo, Z.H. (2012). Design of a two-stage fluidized bed reactor for preparation of diethyl oxalate from carbon monoxide. *Chem. Eng. Res. Des.*, 90, 915–925.
- Kunii, D., Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering* (2 ed.). Butterworth-Heinemann, Stoneham.

- Li, J., Wei, Y., Liu, G., Qi, Y., Tian, P., Li, B., He, Y., Liu, Z. (2011). Comparative study of MTO conversion over SAPO-34, H-ZSM-5 and H-ZSM-22: Correlating catalytic performance and reaction mechanism to zeolite topology. *Catal. Today*, 171, 221– 228.
- Liu, Z., Liang, J. (1999). Methanol to olefin conversion catalysts. *Current opinion in solid state and material science*, 4, 80-84.
- Mahalik, K., Mohanty, Y.K., Biswal, K.C., Roy, G.K., Sahu, J.N. (2015). Statistical modeling and optimization of a multistage gas–solidfluidized bed for removing pollutants from flue gases. *Particuology*, 22, 72-81.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere.
- Samruamphianskun, T. (2011). *Effect of ring baffles on hydrodynamics and mixing in a riser of circulating fluidized bed reactor using cfd simulation*. Master's Thesis, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
- Soundararajan, S., Dalai, A.K., Berruti, F. (2001). Modeling of methanol to olefin (MTO) process in a circulating fluidized bed reactor. *Fuel*, 80, 1187-1197.
- Yang, N., Wang, W., Ge, W., Wang, L. and Li, J. . (2004). Simulation of Heterogeneous Structure in a Circulating Fluidized-Bed Riser by Combining the Two-Fluid Model with the EMMS Approach. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 5548-5561.
- Zhu, Y. P., Xiao, F.Z., Luo, Z.H. (2014). A CFD simulation study to evaluate the flow and catalytic hydrogenation of dimethyl oxalate in a packed bed, a two stage fluidized bed, and a circulating fluidized bed. *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, 9, 280– 292.
- Zhuang, Y. Q., Gao, X., Zhu, Y.P., Luo, Z.H. (2012). CFD modeling of methanol to olefins process in a fixed-bed reactor. *Powder Technology*, 221, 419-430.

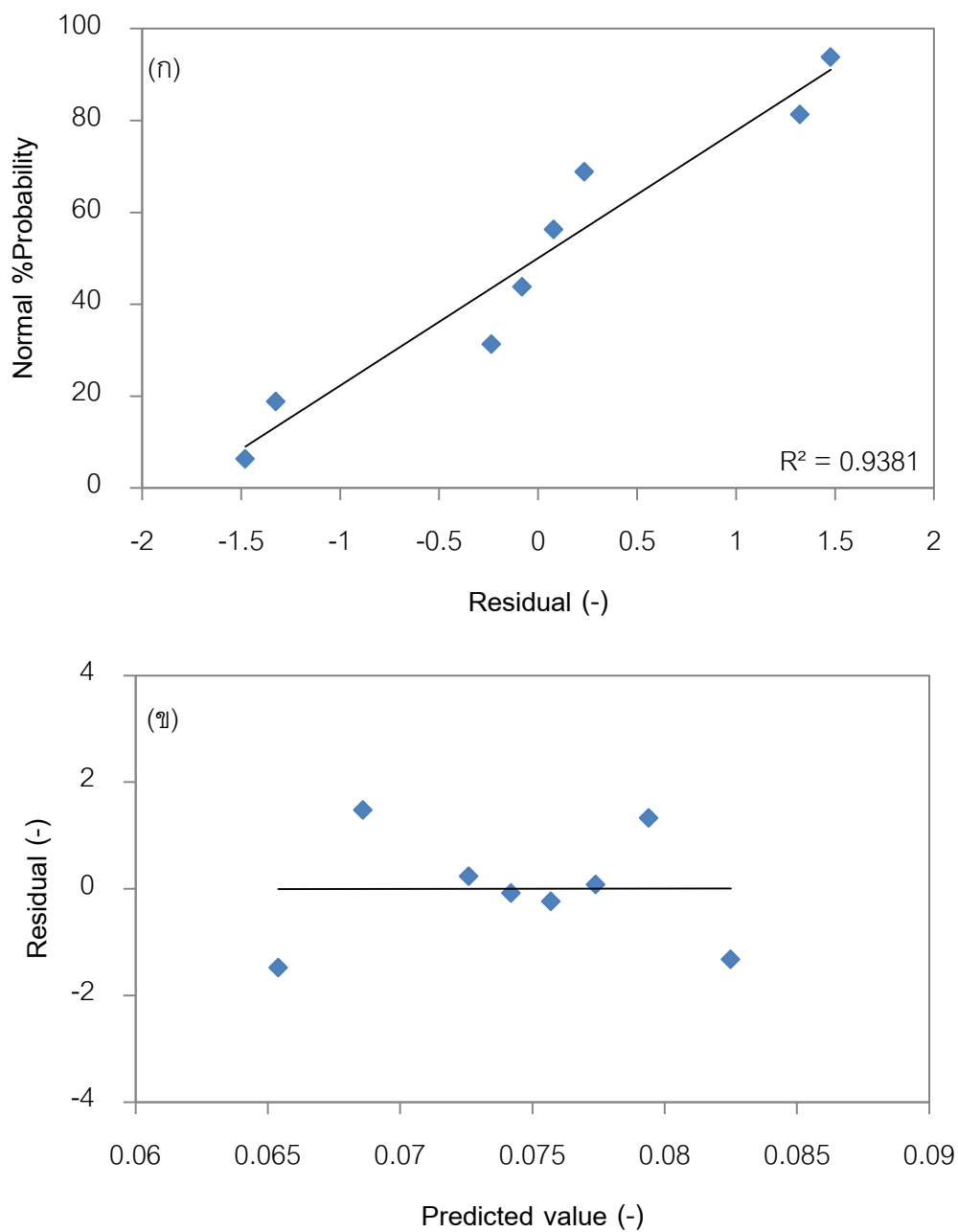


ภาคผนวก

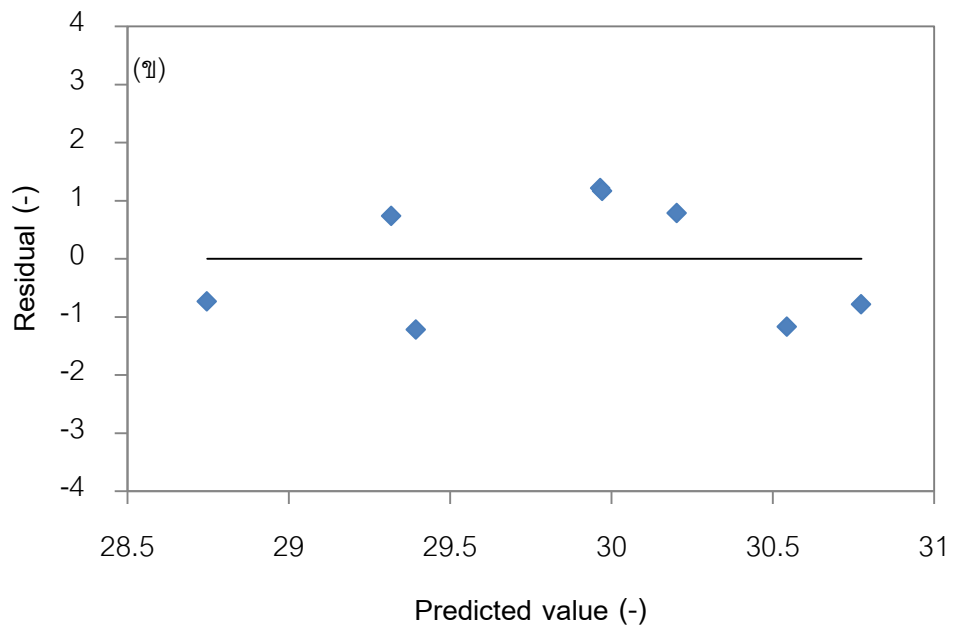
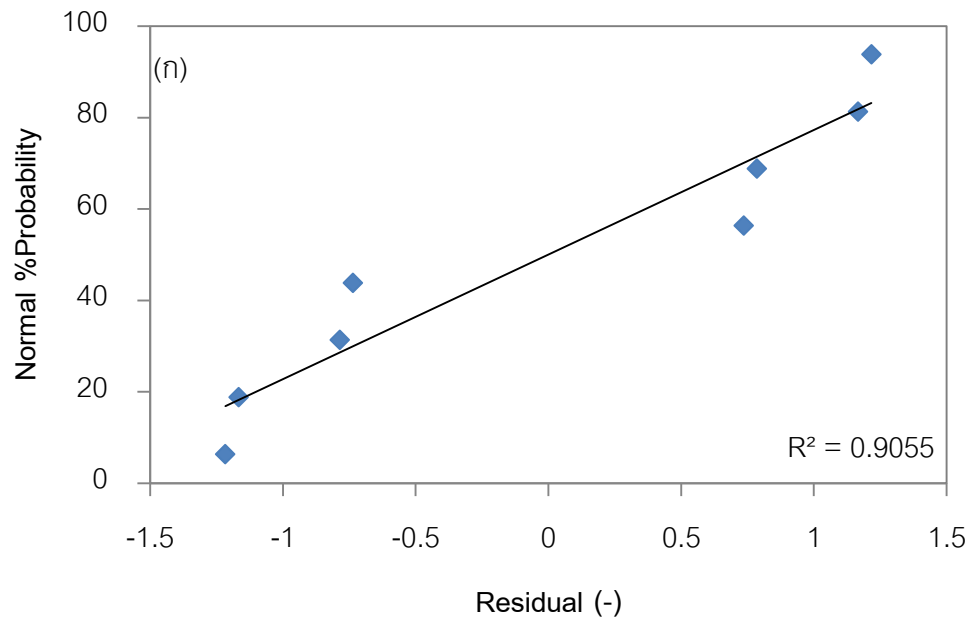
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

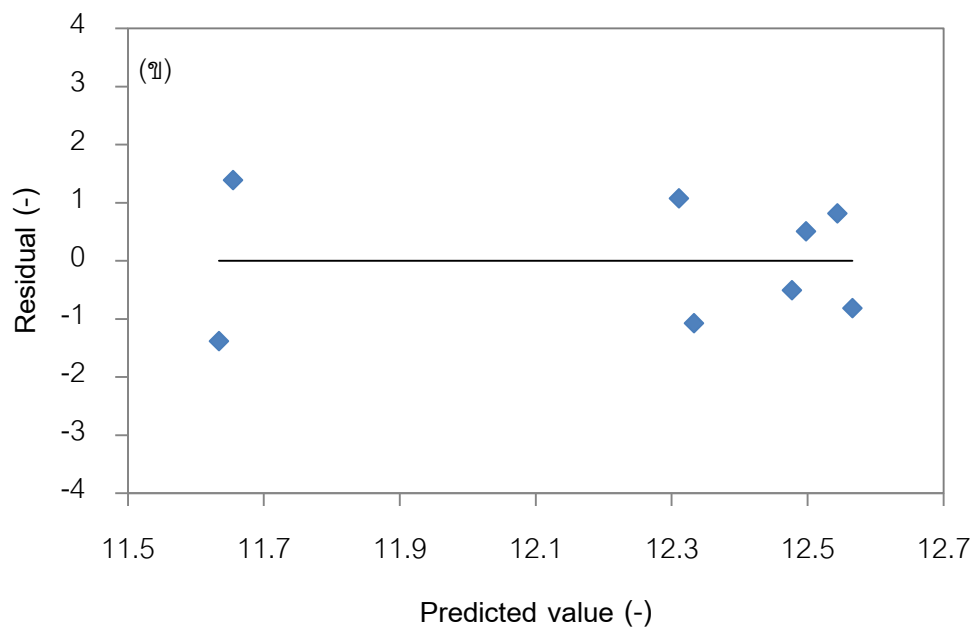
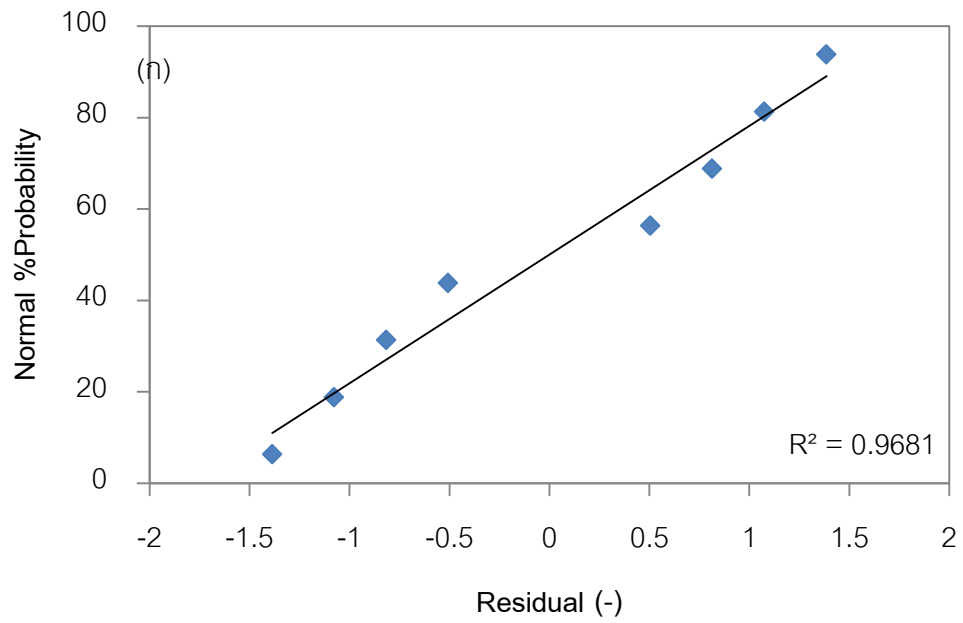
## การวิเคราะห์ทางสถิติ



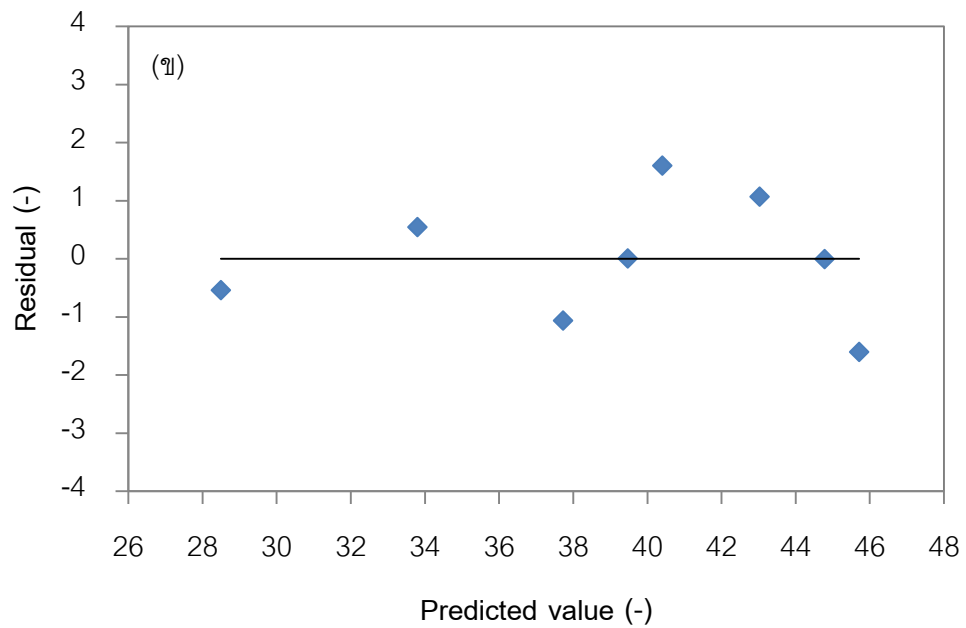
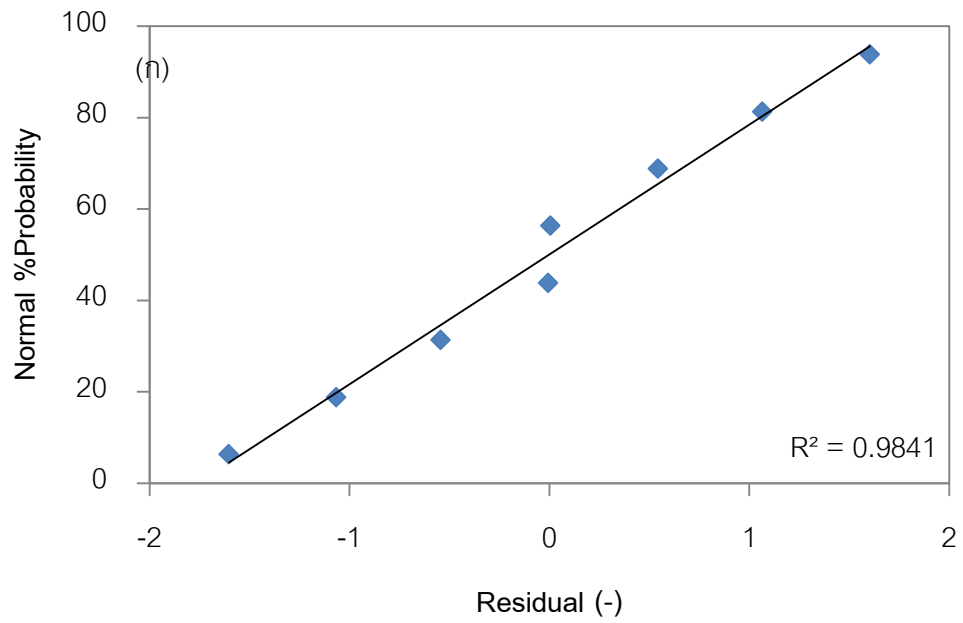
รูปที่ 49 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.1



รูปที่ 50 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.2



รูปที่ 51 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.3



รูปที่ 52 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.4

## ภาคผนวก ข

### โปรแกรมเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการจำลองภาวะบนโปรแกรม ANSYS FLUENT

#### 6.3.26

ในส่วนของ การจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมี การเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบขึ้น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์ จึงได้เขียนฟังก์ชันเพิ่มเติมดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 1 ถึงปฏิกิริยาที่ 6 ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ตารางที่ 6 โดยโปรแกรม ANSYS FLUENT สามารถที่จะเพิ่มเติมคำสั่งเพื่อที่จะสามารถคำนวณนอกเหนือจากการคำนวณพื้นฐานตามที่โปรแกรมมี ซึ่งโปรแกรมนั้นคือ User Define Function หรือ UDF โดยอาศัยรูปแบบภาษา C ในการเขียนโปรแกรม และใช้ฟังก์ชันที่ถูกรวบรวมไว้ในแฟ้ม udf.h ที่ตัวโปรแกรม ANSYS FLUENT ซึ่งก่อนการเขียน UDF ต้องเรียกคำสั่ง `#include udf.h` ขึ้นต้นแฟ้ม UDF นั้นๆ คำสั่งดังกล่าวคือคำสั่งที่สั่งให้โปรแกรม Fluent นำแฟ้ม udf.h มาแทรกในส่วนบนสุดของแฟ้ม UDF โดยในขณะนั้นที่แฟ้ม UDF จะถูกแปลโปรแกรม (compiled) ให้อยู่ในรูปแบบรันไทม์ไลบรารี (Runtime Library) ที่สามารถใช้ได้ทันทีในขณะที่ทำการจำลอง

แฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี การเปลี่ยนเมทานอลเป็น โอเลฟินส์ และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปต่อไปนี้



```

#include "udf.h"
DEFINE_HET_RXN_RATE(kinetic_model1,c,t,hr,wk,yk,rr,rr_t)
{
  Thread **pt = THREAD_SUB_THREADS(t);
  Thread *gas = pt[0];
  Thread *solid = pt[1];
  real k1, fee1, partialpres, cokecont;
  if(Data_Valid_P())
  {
    k1 = 15.675*exp(-38400/(8.314*C_T(c,gas)));
    fee1 = (-3*pow(10,-7)*pow(C_T(c,gas),2))+0.0006*C_T(c,gas))-0.2365;
    partialpres = 50;
    cokecont = yk[1][1]*100;
    *rr = k1*(1-(fee1*cokecont))*(yk[0][0]*(wk[0][0]+wk[0][9])/wk[0][0])*
      partialpres*1500*C_VOF(c,solid)*1000/3600;
    *rr_t = *rr;
  }
}

```

Include header file and define constant

Reaction rate and kinetic constant function

รูปที่ 53 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่การเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ตามสมการเคมีที่ 1 ในตารางที่ 6

```

#include "udf.h"
DEFINE_HET_RXN_RATE(kinetic_model2,c,t,hr,wk,yk,rr,rr_t)
{
  Thread **pt = THREAD_SUB_THREADS(t);
  Thread *gas = pt[0];
  Thread *solid = pt[1];
  real k2, fee2, partialpres, cokecont;
  if(Data_Valid_P())
  {
    k2 = 2*exp(-27000/(8.314*C_T(c,gas)));
    fee2 = (-6*pow(10,-7)*pow(C_T(c,gas),2))+0.0011*C_T(c,gas))-0.4143;
    partialpres = 50;
    cokecont = yk[1][1]*100;
    *rr = k2*(1-(fee2*cokecont))*(yk[0][0]*(wk[0][0]+wk[0][9])/wk[0][0])*
      partialpres*1500*C_VOF(c,solid)*1000/3600;
    *rr_t = *rr;
  }
}

```

Include header file and define constant

Reaction rate and kinetic constant function

รูปที่ 54 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่การเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ตามสมการเคมีที่ 2 ในตารางที่ 6

```

#include "udf.h"
DEFINE_HET_RXN_RATE(kinetic_model3,c,t,hr,wk,yk,rr,rr_t)
{
  Thread **pt = THREAD_SUB_THREADS(t);
  Thread *gas = pt[0];
  Thread *solid = pt[1];
  real k3, fee3, partialpres, cokecont;
  if(Data_valid_P())
  {
    k3 = 0.75*exp(-26900/(8.314*C_T(c,gas)));
    fee3 = (-9*pow(10,-7)*pow(C_T(c,gas),2))+(0.0014*C_T(c,gas))-0.5148;
    partialpres = 50;
    cokecont = yk[1][1]*100;
    *rr = k3*(1-(fee3*cokecont))*(yk[0][0]*(wk[0][0]+wk[0][9])/wk[0][0])*
      partialpres*1500*C_VOF(c,solid)*1000/3600;
    *rr_t = *rr;
  }
}

```

Include header file and define constant

Reaction rate and kinetic constant function

รูปที่ 55 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ตามสมการเคมีที่ 3 ในตารางที่ 6

```

#include "udf.h"
DEFINE_HET_RXN_RATE(kinetic_model4,c,t,hr,wk,yk,rr,rr_t)
{
  Thread **pt = THREAD_SUB_THREADS(t);
  Thread *gas = pt[0];
  Thread *solid = pt[1];
  real k4, fee4, partialpres, cokecont;
  if(Data_valid_P())
  {
    k4 = 25*exp(-49800/(8.314*C_T(c,gas)));
    fee4 = (-8*pow(10,-7)*pow(C_T(c,gas),2))+(0.0013*C_T(c,gas))-0.4453;
    partialpres = 50;
    cokecont = yk[1][1]*100;
    *rr = k4*(1-(fee4*cokecont))*(yk[0][0]*(wk[0][0]+wk[0][9])/wk[0][0])*
      partialpres*1500*C_VOF(c,solid)*1000/3600;
    *rr_t = *rr;
  }
}

```

Include header file and define constant

Reaction rate and kinetic constant function

รูปที่ 56 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ตามสมการเคมีที่ 4 ในตารางที่ 6

```

#include "udf.h"
DEFINE_HET_RXN_RATE(kinetic_model5,c,t,hr,wk,yk,rr,rr_t)
{
  Thread **pt = THREAD_SUB_THREADS(t);
  Thread *gas = pt[0];
  Thread *solid = pt[1];
  real k5, fee5, partialpres, cokecont;
  if(Data_Valid_P())
  {
    k5 = 0.325*exp(-32400/(8.314*C_T(c,gas)));
    fee5 = (5*pow(10,-6)*pow(C_T(c,gas),2))-(0.0073*C_T(c,gas))+2.9317;
    partialpres = 50;
    cokecont = yk[1][1]*100;
    *rr = k5*(1-(fee5*cokecont))*(yk[0][0]*(wk[0][0]+wk[0][9])/wk[0][0])*
      partialpres*1500*C_VOF(c,solid)*1000/3600;
    *rr_t = *rr;
  }
}

```

Include header file and define constant

Reaction rate and kinetic constant

รูปที่ 57 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ตามสมการเคมีที่ 5 ในตารางที่ 6

```

#include "udf.h"
DEFINE_HET_RXN_RATE(kinetic_model6,c,t,hr,wk,yk,rr,rr_t)
{
  Thread **pt = THREAD_SUB_THREADS(t);
  Thread *gas = pt[0];
  Thread *solid = pt[1];
  real k6, fee6, cokecont, cokeconc;
  if(Data_Valid_P())
  {
    k6 = 1.27*pow(10,-18)*exp(-6707/(8.314*C_T(c,gas)));
    fee6 = (-1*pow(10,-6)*pow(C_T(c,gas),2))+(0.0018*C_T(c,gas))+0.7954;
    cokecont = yk[1][1]*100;
    cokeconc = 50-((yk[0][0]/wk[0][0])*C_R(c,gas))*8.314*(C_T(c,gas));
    *rr = k6*(1-(fee6*cokecont))*cokeconc*1500*C_VOF(c,solid)*1000/3600;
    *rr_t = *rr;
  }
}

```

Include header file and define constant

Reaction rate and kinetic constant function

รูปที่ 58 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์ตามสมการเคมีที่ 6 ในตารางที่ 6

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณผลที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีการเปลี่ยนเมทานอลเป็นโอเลฟินส์

ข้อมูลที่ได้จากการจำลองของโปรแกรม ANSYS FLUENT นั้นได้มาในรูปของความเข้มข้นของสารเคมีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีในหน่วยของโมลลาร์ (M) คือ โมลต่อลิตร

การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (Conversion)

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

%Conversion คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์

Reactant in คือ สารตั้งต้นขาเข้า (โมลต่อลิตร)

Reactant out คือ สารตั้งต้นขาออก (โมลต่อลิตร)

การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (Selectivity)

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

%Selectivity A คือ ค่าร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ A

Product A คือ ผลิตภัณฑ์ A ที่เกิดขึ้น (โมลต่อลิตร)

Total product คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด (โมลต่อลิตร)\*

\* คิดเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอน (Carbon balance)

การคำนวณค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ (Yield)

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

%Yield A คือ ค่าร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ A

## ตัวอย่างที่ 1

ณ เริ่มปฏิกิริยา

สารตั้งต้น คือ แก๊สเมทานอลมีความเข้มข้น 1.000 โมลต่อลิตร

ณ ที่สิ้นสุดปฏิกิริยา

สารตั้งต้น คือ	แก๊สเมทานอลมีความเข้มข้น	0.00001	โมลต่อลิตร
ผลิตภัณฑ์ คือ	แก๊สเอทิลีนมีความเข้มข้น	0.250	โมลต่อลิตร
	แก๊สโพรพิลีนมีความเข้มข้น	0.350	โมลต่อลิตร
	แก๊สบิวทีนมีความเข้มข้น	0.155	โมลต่อลิตร
	แก๊สเพนทีนมีความเข้มข้น	0.128	โมลต่อลิตร

$$\%Conversion = \frac{1.000 - 0.00001}{1.000} \times 100 = 100.00\%$$

$$\%Selectivity\ of\ ethylene = \frac{0.250}{0.250 + 0.350 + 0.155 + 0.128} \times 100 = 28.31\%$$

$$\%Selectivity\ of\ propylene = \frac{0.350}{0.250 + 0.350 + 0.155 + 0.128} \times 100 = 39.64\%$$

$$\%Selectivity\ of\ butene = \frac{0.155}{0.250 + 0.350 + 0.155 + 0.128} \times 100 = 17.55\%$$

$$\%Selectivity\ of\ pentene = \frac{0.128}{0.250 + 0.350 + 0.155 + 0.128} \times 100 = 14.50\%$$

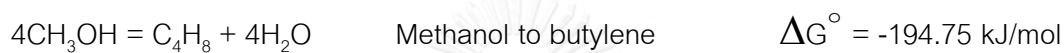
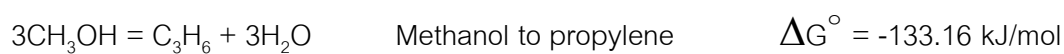
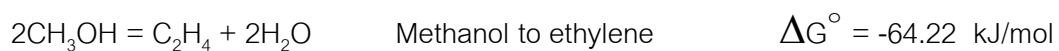
$$\%Yield\ of\ ethylene = \frac{100.00 \times 28.31}{100} = 28.31\%$$

$$\%Yield\ of\ propylene = \frac{100.00 \times 39.64}{100} = 39.64\%$$

$$\%Yield\ of\ butene = \frac{100.00 \times 17.55}{100} = 17.55\%$$

$$\%Yield\ of\ pentene = \frac{100.00 \times 14.50}{100} = 14.50\%$$

## ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีการเปลี่ยนเมทานอลเป็น  
โอเลฟินส์

(Aghamohammadi, 2014)

จากสมการ  $\Delta G^\circ = -RT \ln K$  ที่อุณหภูมิ 723 K

Methanol to ethylene

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= -RT \ln K \\ -64.22 \text{ kJ/mol} &= (-8.314 \text{ J/mol.K})(723 \text{ K})(\ln K) \end{aligned}$$

$$\ln K = \frac{(-64.22 \times 10^3 \text{ J/mol})}{(-8.314 \text{ J/mol.K})(723 \text{ K})}$$

$$\ln K = 10.68$$

$$K = 43639$$

Methanol to propylene

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

$$-133.16 \text{ kJ/mol} = (-8.314 \text{ J/mol.K})(723 \text{ K})(\ln K)$$

$$\ln K = \frac{(-133.16 \times 10^3 \text{ J/mol})}{\{-8.314 \text{ J/mol.K}\}(723 \text{ K})}$$

$$\ln K = 22.15$$

$$K = 4.17 \times 10^9$$

Methanol to butene

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

$$-194.75 \text{ kJ/mol} = (-8.314 \text{ J/mol.K})(723 \text{ K})(\ln K)$$

$$\ln K = \frac{(-194.75 \times 10^3 \text{ J/mol})}{\{-8.314 \text{ J/mol.K}\}(723 \text{ K})}$$

$$\ln K = 32.40$$

$$K = 1.17 \times 10^{14}$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักรพงษ์ ฝูพานิช เกิดเมื่อวันพฤหัสบดีที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี พ.ศ. 2554 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ภาคนอกเวลาราชการ ในปี พ.ศ. 2557 ขณะที่กำลังทำงานอยู่ที่บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) เข้าร่วมงาน และนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 ในบทความชื่อ “การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น” ณ โรงแรมดุสิตธานี พัทยา เมื่อวันที่ 8 ถึง 10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2559

