



การหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม
สำหรับ กระบวนการไบโอดีเซล โดยแมโครโปรแกรมในไมโครซอฟท์เอกซ์เซล
OPTIMIZATION IN SERIES CSTR REACTOR FOR BIODIESEL PROCESS
BY MACRO PROGRAM IN MICROSOFT EXCEL

นายกฤตภาส สุขนวล รหัสนิสิต 58365897
นางสาวกชพรรณ กงถัน รหัสนิสิต 58366566

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2561



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน การหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม
สำหรับกระบวนการไปโอติเซล โดยแม่โครโปรแกรมในไมโครซอฟต์แวร์เอกซ์เซล

ผู้จัดทำโครงการงาน นายกฤตภาส สุขนวน รหัส 58365897
นางสาวกชพรรณ กงถัน รหัส 58366566

ที่ปรึกษาโครงการงาน ดร. สุธิพงษ์ ทรงประวัตี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

Suttipong Songprawat ที่ปรึกษาโครงการงาน
(ดร. สุธิพงษ์ ทรงประวัตี)

อัคราภา กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัคราภา ประเสริฐสังข์)

วีรวรรณ วีระชัยพิเชษฐ์กุล กรรมการ
(ดร. วีรวรรณ วีระชัยพิเชษฐ์กุล)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการไปโอดีเซล โดยแม่โครโปรแกรมในไมโครซอฟต์แวร์เอกซ์เซล		
ผู้จัดทำโครงการงาน	นายกฤตภาส สุขนวล	รหัส	58365897
	นางสาวกชพรรณ กงถัน	รหัส	58366566
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร. สุทธิพงษ์	ทรงประวัติ	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2561		

บทคัดย่อ

ในโครงการงานนี้ ทางคณะผู้จัดทำ ศึกษาการเขียนโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไปโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยแม่โครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Application (VBA) บนโปรแกรมไมโครซอฟต์แวร์เอกซ์เซล ที่มีสารตั้งต้นเป็นไตรกลีเซอไรด์และเมทานอล ซึ่งกระบวนการดำเนินการที่สภาวะวิกฤตที่ ความดัน 20 เมกะปาสคาล ในช่วงอุณหภูมิ 423 ถึง 523 เคลวิน ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี 1,250 ถึง 2,250 ลิตร และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 6 ถึง 42 ต่อ 1 ดังนั้น เพื่อสามารถใช้อุณหภูมิในการเข้าทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงๆได้ ในขณะที่สารตั้งต้นยังอยู่ในสถานะของเหลว เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีในอุณหภูมิที่สูง และในขั้นตอนแรก ทางคณะผู้จัดทำ ทำการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สมการสมดุลโมล และสมการสมดุลพลังงาน เพื่อเขียนโปรแกรมการจำลองและออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีโดยแม่โครโปรแกรม และเก็บค่าผลลัพธ์เป็น Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์ ซึ่งโปรแกรมจะรันค่าต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงสภาวะคงที่ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ทำได้จากโปรแกรม Minitab 18.1 ด้วยวิธีการพื้นที่ผิวตอบสนองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลางที่ให้ค่า Conversion สูงสุด ที่สภาวะอุณหภูมิ 623 เคลวิน ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี 1,906.5657 ลิตร และอัตราส่วนโดยโมล 12.1354 ซึ่งได้ค่า Conversion และอุณหภูมิขาออก เท่ากับ 0.9347 และ 445.315 เคลวิน ตามลำดับ เมื่อนำสภาวะดังกล่าวจากโปรแกรม Minitab 18.1 มารันในโปรแกรมที่สร้างขึ้น พบว่า ค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์ เท่ากับ 0.9389 และ 445.24 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน และค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างโปรแกรมทั้งสอง เท่ากับร้อยละ 0.45 และ 0.02

Project Title	Optimization in series CSTR Reactor for Biodiesel Process By Macro program in Microsoft Excel
Author	Mr. Kittapat Sooknuan ID 58365897 Miss Kotchapan Kongthan ID 58366566
Project Advisor	Dr. Suttipong Songprawat
Major	Chemical engineering
Department	Industrial engineering
Academic Year	2561

Abstract

In this research, we study to create write a program for the mathematical model of continued reaction in order to produce biodiesel products by using from Transesterification Reaction in Macro program to join with Visual Basic for Application (VBA) on Microsoft Excel program. Initial condition substances are triglyceride and methanol at pressure 20 MPa, temperature input of reactor 423 to 523 Kelvins, reactor of capacity 1,250 to 2,250 Liters and ratio methanol : triglyceride 6 to 42 : 1. So, It can use high temperature while initial substances are liquid. This reaction is endothermic reaction which reacts at high temperature. First step, we are create write a program for the mathematical model in Macro program, It can derive the equations that they are mole and energy balances by running Macro program to keep the result are conversion and temperature output of reactor which will be run continually until it's stable. Optimum condition can find from Minitab 18.1 program. It gets the highest conversion at temperature output of reactor 623 Kelvins, reactor of capacity 1,906.5657 Liters and ratio methanol : triglyceride 12.1354 which this the conversion and temperature output of reactor are 0.9347 and 445.315 Kelvins respectively. When these conditions are run from Minitab 18.1 to the new program which found that the conversion and temperature output of reactor are 0.9389 and 445.25 Kelvins respectively. The values obtained are similar and the percentage error of conversion and temperature output of reactor when comparing between the two programs are 0.45% and 0.02% respectively.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากทางคณะผู้จัดทำได้รับความกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จาก อาจารย์ ดร.สุทธิพงษ์ ทรงประวัติ อาจารย์ที่ปรึกษาประจำโครงการนี้ ทางคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดาของคณะผู้จัดทำเป็นอย่างยิ่งที่ให้งำล้งใจอย่าง ดีเสมอมารวมถึงผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือสนับสนุนด้านต่างๆ ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ด้วยคุณค่า และประโยชน์อันพึงจะมีจากการศึกษาปริญญาโทในครั้งนี ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณความดีทั้งหมด ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ทางคณะผู้จัดทำหวังว่าโครงการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจด้านการเขียน โปรแกรมการจำลองการออกแบบทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยใช้ แมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Application (VBA) บนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล



ผู้จัดทำโครงการ
นายกฤตภาส สุขนวล
นางสาวกชพรรณ กงถัน
มิถุนายน 2562

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract)	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินโครงการและแผนการในการดำเนินโครงการ.....	3
1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับไบโอดีเซล	5
2.1.1 วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล	5
2.1.2 ประเภทของไบโอดีเซล.....	6
2.1.2.1 ไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรง	6
2.1.2.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม	6
2.1.2.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์.....	6
2.1.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	7
2.1.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	8

2.1.4.1	ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสหรือต่าง	9
2.1.4.2	ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด.....	9
2.1.4.3	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ไลเปส.....	9
2.1.4.4	ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์.....	9
2.1.5	ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน.....	10
2.1.5.1	อิทธิพลของความชื้นและกรดไขมันอิสระ.....	10
2.1.5.2	อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	10
2.1.5.3	อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา	10
2.1.5.4	อิทธิพลของเวลา.....	11
2.1.5.5	อิทธิพลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา.....	11
2.1.5.6	อิทธิพลของอัตราการกวนผสม.....	12
2.1.6	ข้อดีของไบโอดีเซล.....	12
2.1.6.1	ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านสิ่งแวดล้อม	12
2.1.6.2	ประโยชน์การใช้ไบโอดีเซลด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	12
2.1.7	ข้อเสียของไบโอดีเซล	12
2.2	ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์.....	13
2.3	สมการการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม.....	14
2.3.1	สมมติฐานของแบบจำลอง.....	14
2.3.2	สมการสมดุลโมล.....	15
2.3.2.1	กฎอัตรา	16
2.3.2.2	ปริมาณสารสัมพันธ์	17
2.3.2.3	รวมสมการ	18
2.3.2.4	สำหรับถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม.....	19
2.3.2.5	รวมสมการสำหรับถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม.....	20
2.3.3	สมการสมดุลพลังงาน.....	21
2.4	โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล	26
2.4.1	ประโยชน์ของไมโครซอฟท์เอกซ์เซล.....	26
2.4.2	ลักษณะงานที่เหมาะสมกับไมโครซอฟท์เอกซ์เซล.....	27

2.5 แมโครโปรแกรม.....	27
2.5.1 ประโยชน์ของแมโครโปรแกรม	27
2.5.2 ตัวอย่างของระบบงานทางธุรกิจที่สามารถใช้แมโครช่วยงาน	27
2.5.3 ที่เก็บแมโคร	28
2.6 Visual Basic for Applications (VBA).....	28
2.7 วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	28
2.7.1 การตรวจสอบด้วยตนเอง	29
2.7.2 การตรวจสอบด้วยการแปลภาษา	29
2.8 โปรแกรม Minitab 18.1.....	29
2.8.1 ประโยชน์ของโปรแกรม Minitab 18.1	29
2.8.2 องค์ประกอบหลักของโปรแกรม Minitab 18.1.....	30
2.9 วิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง	30
2.9.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง.....	32
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	35
3.1 ศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	36
3.2 ศึกษาแมโครโปรแกรมกับภาษา Visual Basic for Applications (VBA) เพื่อเขียนโปรแกรม การจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม	36
3.3 ศึกษาโปรแกรม Minitab 18.1 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการ ผลิตไบโอดีเซล	36
3.4 เขียนโปรแกรม.....	37
3.4.1 ระบุข้อมูลขาเข้า.....	37
3.4.2 ระบุข้อมูลขาออก	37
3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	37
3.5.1 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมเทียบกับสมการกฏอัตราจากแหล่งอ้างอิง.....	37
3.5.2 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมเทียบกับโปรแกรม Minitab 18.1	37

3.6	วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น.....	38
3.7	สรุปผลและจัดทำรายงาน	38
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	39
4.1	ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ข้อมูลจากแมโครโปรแกรม.....	39
4.1.1	การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของแมโครโปรแกรม	39
4.1.1.1	คอนเวอร์ชัน	39
4.1.2	การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการรันแมโครโปรแกรมบนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล	41
4.1.2.1	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่กำหนดกับผลที่ได้จากแมโครโปรแกรม.....	41
4.1.2.2	ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อเปลี่ยนตัวแปรที่กำหนด	45
4.1.2.3	การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องถึงเดียวกับถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถึง	46
4.1.2.4	การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถึง	48
4.2	ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 18.1	50
4.2.1	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลที่ได้จากแมโครโปรแกรม.....	51
4.2.1.1	คอนเวอร์ชัน	51
4.2.1.2	อุณหภูมิขาออกของถึงปฏิกรณ์เคมี	52
4.2.2	การวิเคราะห์กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนอง	53
4.2.2.1	คอนเวอร์ชัน	54
4.2.2.2	อุณหภูมิขาออกของถึงปฏิกรณ์เคมี	56
4.2.3	การหาสถานะที่เหมาะสมของถึงปฏิกรณ์เคมีที่ได้ค่า Conversion มีค่ามากที่สุดสำหรับขอบเขตที่กำหนด	57
4.3	ผลการรันข้อมูลในโปรแกรมการจำลองการออกแบบทางคณิตศาสตร์ของถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	58

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	61
5.1 บทสรุป	61
5.1.1 ศึกษาการสร้างโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่ เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	61
5.1.2 ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับ กระบวนการผลิตไบโอดีเซล	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก ก.....	67
ภาคผนวก ข.....	72
ภาคผนวก ค.....	84
ภาคผนวก ง.....	91
ภาคผนวก จ.....	112
ภาคผนวก ฉ.....	117
ประวัติคณะผู้จัดทำโครงการ.....	120



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการและแผนการในการดำเนินโครงการ.....	3
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง กรด และเอนไซม์.....	11
ตารางที่ 2.2 ตารางการจำแนกลักษณะและการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เคมี	13
ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิเข้าถึงปฏิกรณ์เคมี ปริมาตรถึงปฏิกรณ์เคมีแต่ละถัง อัตราส่วนโดยโมลและจำนวนถึงปฏิกรณ์เคมีที่ส่งผลต่อค่า Conversion และอุณหภูมิออกของถึงปฏิกรณ์เคมี	41
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ Conversion และอุณหภูมิออกของถึงปฏิกรณ์เคมี	43
ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่สนใจ	45
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการดำเนินการของถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องทั้ง 2 กรณี	47
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการรันข้อมูลในแมโครโปรแกรมทั้ง 3 กรณี	49
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองจากการรันข้อมูลโดยแมโครโปรแกรม จากการนำสภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Minitab 18.1.....	59
ตารางที่ ง.1 ความจุความร้อนจำเพาะของไตรกลีเซอไรด์ (กรดโอเลอิก) ที่อุณหภูมิต่างๆ	92
ตารางที่ ง.2 ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	97
ตารางที่ ง.3 ความจุความร้อนจำเพาะของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ	102
ตารางที่ ง.4 ความจุความร้อนจำเพาะของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ	107
ตารางที่ จ.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองของค่า Conversion สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	113
ตารางที่ จ.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลางและผลการทดลอง Conversion และอุณหภูมิออกของถึงปฏิกรณ์เคมี	113
ตารางที่ จ.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ความแปรปรวนของ Conversion สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	114
ตารางที่ จ.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ความแปรปรวนของอุณหภูมิออกของถึงปฏิกรณ์เคมีสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	115

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	7
รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชจากปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	8
รูปที่ 2.3 ถังปฏิกรณ์เคมีต่อเนื่องแบบเดี่ยว	15
รูปที่ 2.4 ถังปฏิกรณ์เคมีต่อเนื่อง 2 ถังต่อกัน	19
รูปที่ 2.5 พื้นที่ผิวตอบสนองแบบสามมิติ	31
รูปที่ 2.6 เส้นโครงร่างของพื้นที่ผิวตอบสนอง	31
รูปที่ 2.7 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$	32
รูปที่ 3.1 ผังงานขั้นตอนการดำเนินโครงการ	35
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของไบโอดีเซล เมื่อเวลาเปลี่ยนไปจากแหล่งอ้างอิงกับโปรแกรมที่สร้างขึ้น	40
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของร้อยละผลกระทบบของตัวแปรที่สนใจต่อค่า Conversion และ อุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี	43
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบลักษณะการเข้าสู่สภาวะคงตัวในแต่ละกรณี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่สนใจ	46
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับ ค่า Conversion ในแต่ละกรณี	47
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับอุณหภูมิ ขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี ในแต่ละกรณี	47
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับค่า Conversion ในแต่ละกรณี	47
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับอุณหภูมิ ขาออกของสาร ในแต่ละกรณี	49
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองและค่า Conversion ที่ได้จากแมโครโปรแกรม	51
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองและค่าอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีที่ได้จาก แมโครโปรแกรม	53
รูปที่ 4.10 โครงร่างและพื้นที่ผิวตอบสนองของ Conversion กับอุณหภูมิขาเข้าถังปฏิกรณ์เคมี ปริมาตร ถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์	54

รูปที่ 4.11	โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีกับอุณหภูมิขาเข้าถึงปฏิกรณ์เคมี ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์.....	56
รูปที่ 4.12	สถานะที่เหมาะสมที่สุด สำหรับค่า Conversion ที่มากที่สุด	58
รูปที่ 4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์.....	59
รูปที่ ก.1	หน้าแรกของโปรแกรมการหาสถานะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง	68
รูปที่ ก.2	หน้าต่างเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม.....	69
รูปที่ ก.3	หน้าต่างสถานะการดำเนินงาน	69
รูปที่ ก.4	หน้าต่างผลลัพธ์จากการรันโปรแกรม.....	70
รูปที่ ก.5	หน้าต่าง About us.....	70
รูปที่ ก.6	หน้าต่าง What CSTR?	71
รูปที่ ข.1	หน้าแรกของโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (Minitab 18.1)	73
รูปที่ ข.2	วิธีการเข้าสู่การสร้างพื้นที่ผิวตอบสนอง	73
รูปที่ ข.3	การกำหนดจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษา โดยใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD).....	74
รูปที่ ข.4	กำหนดระดับของแต่ละปัจจัย.....	74
รูปที่ ข.5	ผลการออกแบบสถานะในการทดลอง.....	75
รูปที่ ข.6	ผลการทดลองที่ได้จากแต่ละสถานะในการทดลองบนไมโครซอฟต์แวร์เอกซ์เซล	75
รูปที่ ข.7	การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	76
รูปที่ ข.8	การเลือกรูปแบบกราฟที่ต้องการแสดงจากผลการทดลอง	76
รูปที่ ข.9	โปรแกรมแสดงกราฟ Residual Plot.....	77
รูปที่ ข.10	หน้าต่างแสดงผลข้อมูลจากผลการทดลอง.....	77
รูปที่ ข.11	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	78
รูปที่ ข.12	สมการถดถอย	78
รูปที่ ข.13	วิธีการแสดงกราฟโครงร่าง	79
รูปที่ ข.14	การกำหนดข้อมูลที่ต้องการให้แสดงกราฟโครงร่าง	79
รูปที่ ข.15	กราฟโครงร่าง	80
รูปที่ ข.16	วิธีการเข้าสู่การแสดงผลกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง	80

รูปที่ ข.17 กำหนดข้อมูลที่ต้องการแสดงกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง.....	81
รูปที่ ข.18 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง.....	81
รูปที่ ข.19 วิธีการเข้าสู่การแสดงผลสถานะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์.....	82
รูปที่ ข.20 กำหนดผลที่ต้องการในการหาสถานะที่เหมาะสม.....	82
รูปที่ ข.21 สถานะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์.....	83
รูปที่ ข.22 หน้าต่างแสดงผลการหาสถานะที่เหมาะสม.....	83
รูปที่ ค.1 วิธีการเปิด Visual Basic for Applications (VBA).....	85
รูปที่ ค.2 หน้าต่างวิธีการสร้าง Module.....	85
รูปที่ ค.3 หน้าต่างวิธีการสร้าง Procedure.....	86
รูปที่ ค.4 หน้าต่างการตั้งชื่อ Procedure.....	86
รูปที่ ค.5 วิธีการเปิดหน้าต่าง User Form.....	87
รูปที่ ค.6 หน้าต่างการสร้าง User Form.....	87
รูปที่ ค.7 หน้าต่าง User Form 1.....	88
รูปที่ ค.8 องค์ประกอบของหน้าต่าง User Form 1.....	88
รูปที่ ค.9 หน้าต่าง Project Explorer.....	89
รูปที่ ค.10 หน้าต่าง Properties.....	89
รูปที่ ค.11 หน้าต่างวิธีการสร้าง Command Button.....	90
รูปที่ ค.12 หน้าต่างวิธีการสร้างกล่อง Command Button.....	90
รูปที่ ง.1 ความจุความร้อนจำเพาะของไตรกลีเซอไรด์ (กรดโอเลอิก) ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	96
รูปที่ ง.2 ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	101
รูปที่ ง.3 ความจุความร้อนจำเพาะของเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	106
รูปที่ ง.4 ความจุความร้อนจำเพาะของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	111

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบัน มนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมากและมีการพัฒนาระบบพลังงานหมุนเวียนขั้นสูง สำหรับพลังงานจากน้ำมันและเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่นๆ เพื่อความมั่นคงในด้านพลังงานทางเศรษฐกิจและสังคม ทำให้การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่สะอาดจากชีวมวลหรือแหล่งความร้อนใต้พิภพ ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาระบบการผลิตเชื้อเพลิงอย่างมาก ซึ่งไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้วได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับอย่างมาก เนื่องจากไบโอดีเซลมีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซลและไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์เมื่อนำไปใช้งาน (Gaurav et al., 2013) อย่างไรก็ตาม ไบโอดีเซลมีส่วนพลังงานประมาณร้อยละ 90 ของน้ำมันดีเซล ส่งผลให้ การใช้ไบโอดีเซลจะช่วยลดการประหยัดเชื้อเพลิงและพลังของเครื่องยนต์ประมาณร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล (Keera et al., 2018)

โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล เป็นโปรแกรมประเภทสเปรดชีต ที่มีการเก็บข้อมูลต่างๆ ลงบนแผ่นตารางงาน คล้ายกับการเขียนข้อมูลลงในสมุด ซึ่งการใช้งานของไมโครซอฟท์เอกซ์เซลสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการคำนวณในหลายๆด้าน เช่น ด้านบัญชี และงานสถิติ ทำให้มีความสะดวกและง่ายต่อการใส่ข้อมูล

ดังนั้น โครงการครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำ ทำการเขียนโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยใช้แมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Application (VBA) บนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล ซึ่งเป็นการสร้างโปรแกรมออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารตั้งต้นเป็นน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทำปฏิกิริยาร่วมกับแอลกอฮอล์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม ทางคณะผู้จัดทำได้นำกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน มาใช้ในการศึกษาในโครงการครั้งนี้ โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี (ลิตร) และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ โดยการจำลองโปรแกรมการสร้างถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม เพื่อแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็น Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี (เคลวิน) ทางคณะผู้จัดทำหวังว่าโครงการในครั้งนี้นี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจในการเขียนโปรแกรมการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และสามารถนำโปรแกรมที่เขียนไปประยุกต์ใช้และนำไปพัฒนาในระดับโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาการใช้แมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Application (VBA) บนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล เพื่อเขียนโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม

1.3.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม Minitab 18.1 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

1.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยมีปัจจัย ดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น: อุณหภูมิ (423 ถึง 523 เคลวิน) ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี (1,250 ถึง 2,250 ลิตร) และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ (6 ถึง 42 ต่อ 1)

ตัวแปรตาม: Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี

ตัวแปรควบคุม: อัตราการไหลโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ (1 กิโลโมลต่อวินาที) อัตราการไหลเชิงปริมาตร (1 ลิตรต่อวินาที) และความดันคงที่ (20 เมกะปาสคาล)

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตั้งแต่เดือน สิงหาคม 2561 ถึง พฤษภาคม 2562

1.6 ขั้นตอนการดำเนินโครงการและแผนการในการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการและแผนการในการดำเนินโครงการ

กิจกรรม	ระยะเวลาการดำเนินโครงการ									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.6.1 ศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	←→									
1.6.2 ศึกษาการเขียนโปรแกรมโดยการบันทึกด้วยแมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา VBA			←→							
1.6.3 เขียนโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรมโดยโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล						←→				
1.6.4 ศึกษาโปรแกรม Minitab 18.1 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม								←→		
1.6.5 ตรวจสอบความถูกต้องของการเขียนโปรแกรมและแก้ไขโปรแกรม								←→		
1.6.6 สรุปผลการดำเนินโครงการและจัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับสมบูรณ์									←→	

1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถนำความรู้เกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมบนไมโครซอฟท์เอกซ์เซลมาประยุกต์ใช้ใน ชีวิตประจำวัน

1.7.2 สามารถนำโปรแกรมที่เขียนไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็น อนุกรมของสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะของเหลวที่ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

1.7.3 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมบนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล โดยการบันทึกด้วยแมโคร ร่วมกับภาษา Visual Basic for Application (VBA)

1.7.4 สามารถนำความรู้เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม Minitab 18.1 ไปประยุกต์ใช้ในการหาสภาวะที่ เหมาะสมกับการทดลองอื่นๆ ได้



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายและแบ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี และหลักการที่นำมาใช้ในการพัฒนาโครงการ แบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ได้แก่ การอธิบายความหมายของไบโอดีเซล การอธิบายกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจากน้ำมันพืช ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน สมการที่ใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานบนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล การใช้โปรแกรม Minitab 18.1 และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล หมายถึง สารประกอบโมโนแอลคิลเอสเทอร์ เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification Reaction) ของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (Alcohol) และมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือด่าง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ (Ester) และกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลพลอยได้ ซึ่งจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ในการทำปฏิกิริยา และไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซล เนื่องจากไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์เมื่อนำไปใช้งาน (Administrator, 2550)

2.1.1 วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทุกชนิดสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบผลิตไบโอดีเซล แต่การเลือกน้ำมันพืชชนิดใดเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ต้องพิจารณาถึงราคา ปริมาณ และองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดนั้นๆ วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล เช่น ปาล์มน้ำมัน น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง เรพ และทานตะวัน กระบวนการผลิตไบโอดีเซลในครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำ นำกรดโอเลอิกมาเป็นสารตั้งต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นไขมันที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น พบได้ในน้ำมันมะกอก (Olive Oil) นอกจากนี้ยังพบในน้ำมันพีแคนคาโนลา น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันแมคคาเดเมีย น้ำมันดอกทานตะวันที่มีปริมาณกรดโอเลอิกสูง นอกจากนี้ยังพบในไขมันไก่ ไขมันหมู และเยื่อไขมันของมนุษย์ เป็นต้น (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

2.1.2 ประเภทของไบโอดีเซล

การนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์หรือน้ำมันที่ใช้แล้วมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล สามารถแบ่งตามประเภทของน้ำมันได้ 3 ประเภท

2.1.2.1 ไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรง (Straight Vegetable Oil)

ไบโอดีเซลประเภทนี้ใช้น้ำมันมะพร้าว ปาล์มน้ำมันหรือน้ำมันไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู สามารถนำมาใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซล โดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นๆ หรือไม่ต้องปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมัน แต่ปัญหาในการใช้งานของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรงจะต้องมีการอุ่นน้ำมันในทุกจุดที่มีน้ำมันผ่าน ได้แก่ ถังน้ำมัน ท่อทางเดินน้ำมัน ชุดกรองน้ำมัน อุณหภูมิของน้ำมันที่อุ่นอย่างน้อย 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ น้ำมันพืชมีคุณสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้ช้ากว่าน้ำมันดีเซล ทำให้เกิดการความยุ่งยากเมื่อใช้น้ำมันพืช โดยตรงในเครื่องยนต์ดีเซล และอาจทำให้เกิดการอุดตันของเครื่องยนต์ได้ (พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์, 2555)

2.1.2.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม (Veggie or Kero Mix)

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชลงให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด และได้น้ำมันที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่จำเป็นต้องใช้น้ำมันอย่างเร่งด่วน และใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้งานหนัก โดยที่อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันก๊าด และน้ำมันพืชขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นที่ใช้งาน อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันก๊าดกับน้ำมันพืชมีตั้งแต่ร้อยละ 10 ของน้ำมันก๊าด และร้อยละ 90 ของน้ำมันพืชจนถึงร้อยละ 40 ของน้ำมันก๊าด และร้อยละ 60 ของน้ำมันพืช แต่อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 20 ของน้ำมันก๊าด และร้อยละ 80 ของน้ำมันพืช และในปัจจุบันราคาของน้ำมันก๊าดค่อนข้างสูงทำให้ปริมาณของน้ำมันก๊าดน้อยส่งผลให้น้ำมันผสมที่ได้เมื่อนำไปใช้จึงเกิดผลกระทบต่อเครื่องยนต์จากปัญหาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันผสม (พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์, 2555)

2.1.2.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ (Ester)

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่นำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ นอกจากนี้ยังได้

กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่นำมาทำปฏิกิริยา และไบโอดีเซลประเภทนี้มีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และค่าความหนืดที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปทำให้มีความปลอดภัยในการทำงาน จึงสามารถนำไปใช้แทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลได้ แต่การผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์มีต้นทุนในการผลิตสูงเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลประเภทอื่นๆ และเครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและมีการสร้างแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เพิ่มขึ้น (พุมิพัฒน์ เบลูจปรีชาพัฒน์, 2555)

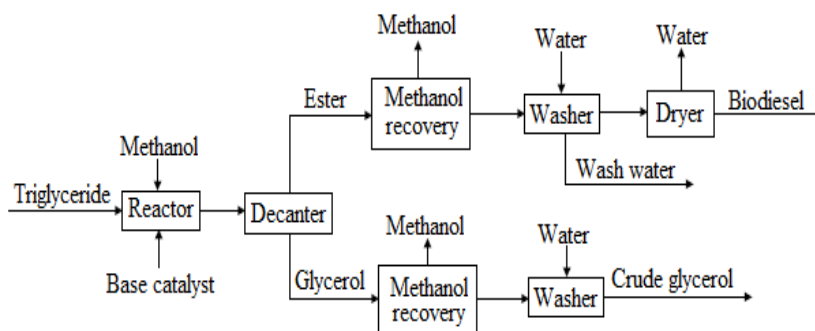
2.1.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทุกชนิดสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบผลิตไบโอดีเซลได้ แต่การเลือกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ (Ester) และกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดหรือด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเราจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นี้ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ซึ่งมีปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.1 และกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน แสดงดังรูปที่ 2.2 (กนกวรรณ มีสัมฤทธิ์ และอุทุมพร วิชาดี, 2553)



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ที่มา : <https://www.researchgate.net/publication/263941708>, Gaurav et al.



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
ที่มา : http://ethesis.nitrkl.ac.in/6786/1/Optimization_Raja_2015, RaJa

จากรูปที่ 2.1 เป็นรูปแบบทั่วไปของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ทางคณะผู้จัดทำ นำกรดโอเลอิกเป็นวัตถุดิบสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยา

จากรูปที่ 2.2 เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้สารตั้งต้นเป็นไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสหรือต่าง ซึ่งในถังปฏิกรณ์เคมี (Reactor) จะมีการกวน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง และได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้เข้าเครื่องแยก (Decanter) เพื่อแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอล โดยกลีเซอรอลมีความหนาแน่นมากกว่าเมทิลเอสเทอร์ ดังนั้น กลีเซอรอลจะตกลงก้นถังของเครื่องแยก แต่เมทิลเอสเทอร์ยังปนเปื้อนด้วยสารอื่นๆ เช่น เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา สบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในชั้นเมทิลเอสเทอร์ และไตรกลีเซอไรด์ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ดังนั้น จึงต้องทำการขจัดออกด้วยการล้างด้วยน้ำอุ่นหลายๆครั้ง เมื่อล้างสิ่งปนเปื้อนออกหมดแล้ว ขั้นตอนสุดท้าย คือ การขจัดน้ำที่หลงเหลือในชั้นเมทิลเอสเทอร์ออก ซึ่งสามารถทำได้ โดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นก็สามารถนำไปเก็บเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

2.1.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นได้ดี โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสหรือต่าง (Base Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสหรือต่างที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งทำปฏิกิริยากับเมทานอลหรือเอทานอล โดยใช้ไขมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันควรเปลี่ยนรูปเบสหรือต่างให้อยู่ในรูปของสารประกอบแอลคอกซี (Alcoxy)

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ในปริมาณมาก แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสหรือต่างเป็นปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับไตรกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อย (Free Fatty Oil) และมีข้อจำกัด คือ ถ้ามีปริมาณน้ำ และปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในระบบของการเกิดปฏิกิริยาในปริมาณมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสบู่ ที่เรียกว่า Saponification Reaction ซึ่งการเกิดสบู่จะทำให้ได้ปริมาณของเอสเทอร์น้อยลง และทำให้ขั้นตอนการแยก และล้างเอสเทอร์ทำได้ยากขึ้น (วรรณรัตน์ กลกิจ และปิยาภรณ์ วงษ์เย็น, 2553)

2.1.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid Catalyst)

กรดที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ น้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมากแต่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้า อาจจะต้องใช้เวลานานในการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถทำปฏิกิริยากับกลีเซอไรด์ที่มีส่วนประกอบเป็นกรดไขมันอิสระและน้ำในปริมาณที่สูง เช่น น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้ว (วรรณรัตน์ กลกิจ และปิยาภรณ์ วงษ์เย็น, 2553)

2.1.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ไลเปส (Lipase Catalyst)

เอนไซม์ไลเปสถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการไฮโดรไลซิสของกลีเซอรอล กระบวนการแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) และกระบวนการแอซิดไลซิส (Acidolysis) โดยข้อดีของเอนไซม์ไลเปส คือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และข้อเสียของเอนไซม์ไลเปส คือ มีราคาค่อนข้างแพง (วรรณรัตน์ กลกิจ และปิยาภรณ์ วงษ์เย็น, 2553)

2.1.4.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst)

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในระบบ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) เป็นต้น ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะช่วยแก้ปัญหาการเกิดสบู่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเมื่อใช้เบส

หรือต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการที่มีน้ำในปฏิกิริยา (วรรณรัตน์ กลกิจ และปิยาภรณ์ วงษ์เย็น, 2553)

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.1.5.1 อิทธิพลของความชื้นและกรดไขมันอิสระ

สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสหรือด่าง กลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ จะต้องมือน้ำเป็นส่วนผสมน้อยที่สุด เนื่องจากน้ำเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสบู่ในระหว่างการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ ไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในสาร เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดสบู่เช่นกัน หากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแรกทำปฏิกิริยาไม่หมดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลืออยู่จะทำปฏิกิริยาต่อกับเอทิลเอสเทอร์ ส่งผลทำให้เกิดสบู่ด้วยเช่นกัน (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

2.1.5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลอย่างมาก เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังนั้น แอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจะต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวา มากขึ้น นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น และจากค่าปริมาณสัมพันธ์สัดส่วนที่ใช้ในปฏิกิริยา คือ 3 โมลของแอลกอฮอล์ ต่อ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ ดังนั้น ถ้าใช้อัตราส่วนมากขึ้นจะทำให้ร้อยละความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลมากขึ้นเช่นกัน (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

2.1.5.3 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ถูกใช้จนหมดไปและมีปริมาณอยู่เท่าเดิม ซึ่งเมื่อใช้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งได้เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ต่าง และเอนไซม์ ซึ่งปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ถ้าต้องการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระในปริมาณมากและมีน้ำผสมอยู่ในน้ำมัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเหมาะสมกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง กรด และเอนไซม์

ตัวแปร	ตัวเร่งชนิดต่าง	ตัวเร่งชนิดกรด	เอนไซม์ไลเปส
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60-70	55-80	30-40
กรดไขมันอิสระในน้ำมัน	เกิดสบู่	เกิดเอสเทอร์	เกิดเอสเทอร์
น้ำในน้ำมัน	มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา	มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา	ไม่มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา
ปริมาณเมทิลเอสเทอร์	ปกติ	ปกติ	สูง
การ Recovery กลีเซอรอล	ยาก	ยาก	ง่าย
การทำให้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์	ทำการล้างซ้ำ	ทำการล้างซ้ำ	ไม่ต้องล้างซ้ำ
ราคา	ถูก	ถูก	แพง

ที่มา : ปริญญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันทอดที่ใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์, รุ่งทิพย์ ชัยเดช

2.1.5.4 อิทธิพลของเวลา

อัตราการเกิดไบโอดีเซลจะแปรผันโดยตรงกับเวลา คือ ถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะได้ร้อยละความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) มากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้เพียงพอ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้อุณหภูมิห้อง แต่การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า สามารถทำปฏิกิริยาได้ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลาดสั้นๆ แต่ต้องใช้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากเช่นกัน (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

2.1.5.5 อิทธิพลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ซึ่งในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจะใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เช่น ถ้าเป็นเมทานอลอุณหภูมิที่ใช้คือ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

2.1.5.6 อิทธิพลของอัตราการกวนผสม

การกวนผสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมาก สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากน้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการกวนผสมจึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อเพิ่มการถ่ายโอนมวลของสาร และให้เนื้อสารสัมผัสกันมากขึ้นเมื่อสารสัมผัสกันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

2.1.6 ข้อดีของไบโอดีเซล

2.1.6.1 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านสิ่งแวดล้อม

การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษในอากาศเนื่องจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์แบบสมบูรณ์ กรมอุทกหารเรือได้ทำการทดลองใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซล พบว่า รถที่ใช้ น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสามารถลดควันดำได้มากกว่าร้อยละ 50 ลดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ได้ร้อยละ 20 ลดฝุ่นละอองได้ร้อยละ 39 และลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ร้อยละ 99 นอกจากนี้ การใช้ไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันดีเซลนั้นสามารถลดวงจรชีวิต (Life Cycle) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ร้อยละ 78 ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

2.1.6.2 ประโยชน์การใช้ไบโอดีเซลด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์

การใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้การเผาไหม้ในกระบอกสูบเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7.5 และให้กำลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

2.1.7 ข้อเสียของไบโอดีเซล (รุ่งทิพย์ ชัยเดช, 2557)

- 2.1.7.1. เป็นของแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำมันดีเซล
- 2.1.7.2. ปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าน้ำมันดีเซล
- 2.1.7.3. ชิ้นส่วนจากยางของปั้มน้ำมันจะเสื่อมคุณภาพเร็ว
- 2.1.7.4. ค่าพลังงานความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณร้อยละ 10

2.2 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ (Type of Reactors)

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมเคมีส่วนใหญ่ มีเครื่องปฏิกรณ์เคมีหลายชนิด ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่นิยมใช้กัน คือ เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะ (Batch Reactor) เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง (CSTR Reactor) เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเฟดแบทช์ (Fed Batch Reactor) และเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบไหลต่อเนื่อง (Plug Flow Reactor; PFR) ซึ่งลักษณะการทำงานและคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์แสดงดังตารางที่ 2.2 (กนกกาญจน์ ประทักษ์กุลวงศา และคณะ, 2554)

ตารางที่ 2.2 ตารางการจำแนกลักษณะและการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เคมี

การทำงาน (Operation)	ลักษณะการทำงาน	ชนิดถังปฏิกรณ์เคมี	ข้อดี และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม
แบบต่อเนื่อง (Continuous Reactor)	สารทำปฏิกิริยาป้อนเข้าที่ทางเข้า เครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกมาที่ทางออก	- CSTR - PFR	- ได้ผลผลิตอย่างต่อเนื่องและกำลังการผลิตสูง
แบบกะ (Batch Reactor)	สารตั้งต้นทั้งหมดถูกป้อนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ แล้วจึงเริ่มทำปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาจะนำสารตั้งต้นที่เหลืออยู่และผลิตภัณฑ์ออกจากถังปฏิกรณ์	Batch Reactor	- มีโครงสร้างง่าย - กำลังการผลิตต่ำ - เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น อุตสาหกรรมผสมสี
แบบเฟดแบทช์ (Fed Batch Reactor)	สารทำปฏิกิริยาตัวหนึ่งป้อนให้เข้าไปอยู่ในถังปฏิกรณ์เคมีก่อน แล้วจึงป้อนสารทำปฏิกิริยาอีกตัวหนึ่งเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องหรือป้อนเป็นระยะๆ	Batch Reactor	- รักษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นตัวหนึ่งให้มีค่าสูงตลอดเวลาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น

ที่มา : จลนศาสตร์วิศวกรรมเคมีและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์, กนกกาญจน์ ประทักษ์กุลวงศา และคณะ

2.3 สมการการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม

สมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีคือ สมการที่นำไปสู่การคำนวณว่าเครื่องปฏิกรณ์ควรมีปริมาตรเท่าไร เพื่อให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของสารทำปฏิกิริยา และเพื่อกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (กนกกาญจน์ ประทักษ์กุลวงศา และคณะ, 2554)

2.3.1 สมมติฐานของแบบจำลอง

2.3.1.1 ใช้ถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถัง

2.3.1.2 เริ่มดำเนินการพร้อมกันทั้ง 2 ถัง

2.3.1.3 พิจารณาที่ความดันคงที่ 20 เมกะปาสกาล, อัตราการไหลเชิงโมลคงที่ 1 กิโลโมลต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่ 1 ลิตรต่อวินาที

2.3.1.4 อัตราส่วนเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 6 ต่อ 1 ขึ้นไป ส่งผลให้ปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible Reaction) เปลี่ยนเป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ (Unreversible Reaction)

2.3.1.5 สภาวะดำเนินการขึ้นอยู่กับเวลาหรือสภาวะการดำเนินการไม่คงตัว (Unsteady State)

2.3.1.6 สารตั้งต้นอยู่ในสถานะของเหลว และเป็นกระบวนการผสมที่สมบูรณ์ (Perfect Mixing)

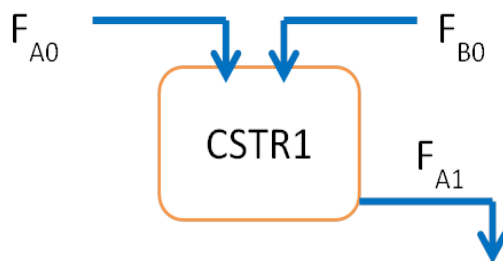
2.3.1.7 ไม่พิจารณาการหน่วงของเวลา (Time Delays)

2.3.1.8 ไม่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนและงานที่เกิดขึ้นภายในระบบ

2.3.1.9 ไม่พิจารณาการเสื่อมสลายทางความร้อนของสารตามธรรมชาติที่ใช้ในปฏิกิริยา

2.3.1.10 ไม่พิจารณาเครื่องแยกเมทิลเอสเทอร์ ถังล้างแอลกอฮอล์ และเครื่องอบแห้ง

2.3.2 สมการสมดุลโมล (Mole Balance Equation)



รูปที่ 2.3 ถังปฏิกรณ์เคมีต่อเนื่องแบบเดียว

$$\left[\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลของ} \\ \text{สารเข้าสู่ระบบ} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลของ} \\ \text{สารออกจากระบบ} \end{array} \right] \pm \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการเกิดและใช้} \\ \text{ของสารในระบบ} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสมของ} \\ \text{สารในระบบ} \end{array} \right] \quad (2.1)$$

$$F_{A0} - F_A + \int r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.2)$$

ในกรณี สถานะของระบบขึ้นอยู่กับเวลาและเป็นกระบวนการผสมที่สมบูรณ์ (Perfect Mixing) ดังนั้น

$$\frac{dN_A}{dt} \neq 0 \quad (2.3)$$

$$\int_0^V (r_A) dV = (r_A) V \quad (2.4)$$

ดังนั้น

$$F_{A0} - F_A + r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$F_A = F_{A0} - F_{A0}X_n \quad (2.6)$$

นำสมการ (2.6) แทนในสมการ (2.5) จะได้ว่า

$$F_{A0}X_n + r_A V = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\frac{dN_A}{dt} = \frac{N_A|_{n+1} - N_A|_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (2.8)$$

นำสมการ (2.8) แทนในสมการ (2.7)

$$F_{A0}X_n + r_A V = \frac{N_A|_{n+1} - N_A|_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (2.9)$$

2.3.2.1 กฎอัตรา (Rate Law) (Obie Farobie and Yukihiro Matsumura, 2015)

$$-r_A = 0.5179 e^{\frac{-19.60 \times 10^3}{RT_n}} C_A^{1.2411} C_B^{0.1476} \quad (2.10)$$

นำสมการ (2.10) แทนในสมการ (2.9)

$$F_{A0}X_n + \left[0.5179e^{\frac{-19.60 \times 10^3}{RT_n}} C_A^{1.2411} C_B^{0.1476} \right] V = \frac{N_A|_{n+1} - N_A|_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (2.11)$$

2.3.2.2 ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry for Flow Rate)

ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีจะมีการเปลี่ยนแปลงของสารจากสารหนึ่งไปเป็นอีกสารหนึ่ง การทำสมดุลโมล จึงต้องอาศัยปริมาณสารสัมพันธ์มาช่วยกำหนดความสัมพันธ์ ระหว่างสารทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์โดยใช้ค่า Conversion เป็นตัวแปร เมื่อไตรกลีเซอไรด์ เมทานอล เมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) และกลีเซอรอล แทนด้วย A, B, C และ D ตามลำดับ

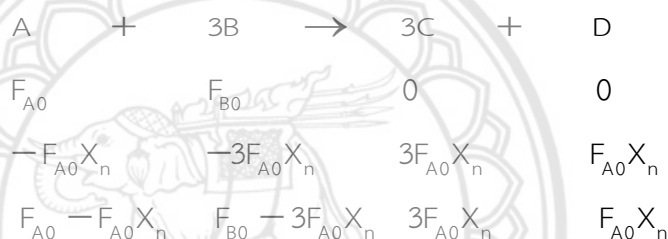
สำหรับปฏิกิริยา

เริ่มต้น :

ใช้ไป :

เหลือ :

สรุป



$$F_A = F_{A0} - F_{A0}X_n = F_{A0}(1 - X_n) \quad (2.12)$$

$$F_B = F_{B0} - 3F_{A0}X_n = F_{A0}(\theta_{B0} - 3X_n) \quad (2.13)$$

$$F_C = 3F_{A0}X_n \quad (2.14)$$

$$F_D = F_{A0}X_n \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$\theta_{B0} = \frac{F_{B0}}{F_{A0}} \quad (2.16)$$

ดังนั้น

$$C_A = C_{A0}(1 - X_n) \quad (2.17)$$

$$C_B = C_{A0}(\theta_{B0} - 3X_n) \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$\theta_{B0} = \frac{C_{B0}}{C_{A0}} = \frac{F_{B0}}{F_{A0}} \quad (2.19)$$

$$C_{A0} = \frac{F_{A0}}{V_0} \quad (2.20)$$

2.3.2.3 รวมสมการ (Combined Equation)

นำสมการ (2.19) และ สมการ (2.20) แทนในสมการ (2.11) จะได้ว่า

$$F_{A0}X_n + \left[0.5179e^{\frac{-19.60 \times 10^3}{RT_n}} \left(\frac{F_{A0}}{V_0} \right)^{1.3837} (1 - X_n)^{1.2411} (\theta_{B0} - X_n)^{0.1476} \right] V = \frac{N_A|_{n+1} - N_A|_n}{\Delta t} \quad (2.21)$$

จาก

$$N_A|_n = N_{A0}(1 - X_n) \quad (2.22)$$

$$N_A|_{n+1} = N_{A0}(1 - X_{n+1}) \quad (2.23)$$

นำสมการ (2.22) และ (2.23) แทนในสมการ (2.21)

$$F_{A0}X_n + \left[0.5179e^{\frac{-19.60 \times 10^3}{RT_n}} \left(\frac{F_{A0}}{V_0} \right)^{1.3837} (1 - X_n)^{1.2411} (\theta_{B0} - X_n)^{0.1476} \right] V = \frac{N_{A0} (X_n - X_{n+1})}{\Delta t} \quad (2.24)$$

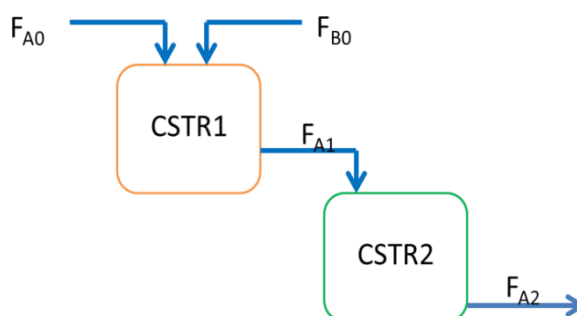
เมื่อ

$$N_{A0} = \frac{F_{A0}}{V_0} V \quad (2.25)$$

นำสมการ (2.25) แทนในสมการ (2.24) และจัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$\left[F_{A0}X_n + 0.5179e^{\frac{-19.60 \times 10^3}{RT_n}} \left(\frac{F_{A0}}{V_0} \right)^{1.3837} (1 - X_n)^{1.2411} (\theta_{B0} - X_n)^{0.1476} \right] V \Delta t - \frac{F_{A0}}{V_0} V (X_n - X_{n+1}) = 0 \quad (2.26)$$

2.3.2.4 สำหรับถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม



รูปที่ 2.4 ถังปฏิกรณ์เคมีต่อเนื่อง 2 ถังต่อกัน

จากรูปที่ 2.4 สารจากถังปฏิกรณ์เคมีถังที่ 1 (CSTR1) ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เคมีถังที่ 2 (CSTR2) เพื่อทำปฏิกิริยาเคมีภายในถังปฏิกรณ์เคมีถังที่ 2 (CSTR2) และออกมาเป็นอัตราการไหลเชิงโมลของสารขาออกจากถังปฏิกรณ์เคมี (F_{A2}) โดยได้ค่า Conversion จากถังปฏิกรณ์เคมีถังที่ 1 (CSTR 1) คือ X_1 และ Conversion ของถังปฏิกรณ์เคมีถังที่ 2 (CSTR 2) คือ X_2 และสามารถสร้างสมการ Conversion รวม (X_T) ได้ ดังนี้

$$F_{A0}|_{\text{reactor2}} = F_{A0}|_{\text{reactor1}} (1 - X_1) \quad (2.27)$$

$$F_{B0}|_{\text{reactor1}} = F_{A0}|_{\text{reactor1}} (\theta_{B0}|_{\text{reactor1}} - 3X_1) \quad (2.28)$$

ดังนั้น

$$\theta_{B0}|_{\text{reactor1}} = \frac{F_{B0}|_{\text{reactor1}}}{F_{A0}|_{\text{reactor1}}} \quad (2.29)$$

2.3.2.5 รวมสมการสำหรับถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม

$$X_T = \frac{F_{A0} - F_{A2}}{F_{A0}} \quad (2.30)$$

$$X_T = \frac{F_{A0} - F_{A1}(1 - X_2)}{F_{A0}} \quad (2.31)$$

$$X_T = \frac{F_{A0} - F_{A0}(1 - X_1)(1 - X_2)}{F_{A0}} \quad (2.32)$$

ดังนั้น

$$X_T = 1 - (1 - X_1)(1 - X_2) \quad (2.33)$$

2.3.3 สมการสมดุลพลังงาน (Energy Balance Equation) (Fogler, 2016)

จากรูปที่ 2.4 ถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถังมีการป้อนเข้าของไตรกลีเซอไรด์ สามารถสร้างสมการสมดุลพลังงานได้ ดังนี้

$$\left[\begin{array}{c} \text{พลังงานเข้า} \\ \text{สู่ระบบ} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{พลังงาน} \\ \text{ออกจากระบบ} \end{array} \right] \pm \left[\begin{array}{c} \text{พลังงานที่เกิด} \\ \text{และใช้ในระบบ} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{พลังงานสะสม} \\ \text{ของในระบบ} \end{array} \right] \quad (2.34)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{i0} H_{i0} - \sum_{i=1}^n F_i H_i + \dot{Q} - \dot{W}_s = \frac{d \left(\sum_{i=1}^n N_i H_i \right)}{dt} \quad (2.35)$$

ไม่คิดผลจากงานและไม่คิดการถ่ายโอนทางความร้อน

$$\dot{Q} \text{ และ } \dot{W}_s = 0 \quad (2.36)$$

ดังนั้น จากสมการ 2.36 จะได้ว่า

$$\frac{d \left(\sum_{i=1}^n N_i H_i \right)}{dt} = \sum_{i=1}^n N_i C_{pi} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} \quad (2.37)$$

นำสมการ (2.37) แทนในสมการ (2.35) จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{pi} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = \sum_{i=1}^n F_{i0} H_{i0} - \sum_{i=1}^n F_i H_i \quad (2.38)$$

จาก

$$H_i = H_i^0 + \int_{T_R}^T C_{P_i} dT \quad (2.39)$$

ดังนั้น นำสมการ (2.39) แทนในสมการ (2.48) จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{P_i} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = \sum_{i=1}^n F_{i0} \left(H_i^0 + \int_{T_R}^{T_0} C_{P_i} dT \right) - \sum_{i=1}^n F_i \left(H_i^0 + \int_{T_R}^T C_{P_i} dT \right) \quad (2.40)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{P_i} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = - \left(\sum_{i=1}^n F_i H_i^0 - \sum_{i=1}^n F_{i0} H_i^0 \right) - \left(\sum_{i=1}^n F_i \int_{T_R}^T C_{P_i} dT - \sum_{i=1}^n F_{i0} \int_{T_R}^{T_0} C_{P_i} dT \right) \quad (2.41)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{P_i} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = -F_{A0} X_n \Delta H_{Rxn}^0 - \left(\sum_{i=1}^n F_i \int_{T_R}^T C_{P_i} dT - \sum_{i=1}^n F_{i0} \int_{T_R}^{T_0} C_{P_i} dT \right) \quad (2.42)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{P_i} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = -F_{A0} X_n \Delta H_{Rxn}^0 - \left(\sum_{i=1}^n (F_{i0} + v_i F_{A0} X_n) \int_{T_R}^T C_{P_i} dT - \sum_{i=1}^n F_{i0} \int_{T_R}^{T_0} C_{P_i} dT \right) \quad (2.43)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{P_i} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = -F_{A0} X_n \Delta H_{Rxn}^0 - \left(\sum_{i=1}^n F_{i0} \left(\int_{T_R}^T C_{P_i} dT - \int_{T_R}^{T_0} C_{P_i} dT \right) + F_{A0} X_n \sum_{i=1}^n \int_{T_R}^T v_i C_{P_i} dT \right) \quad (2.44)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{P_i} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = -F_{A0} X_n \Delta H_{Rxn}^0 - \left(\sum_{i=1}^n F_{i0} \int_{T_0}^T C_{P_i} dT + F_{A0} X_n \sum_{i=1}^n \int_{T_R}^T v_i C_{P_i} dT \right) \quad (2.45)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{P_i} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = -F_{A0} X_n \Delta H_{Rxn}^0 - \left(\sum_{i=1}^n F_{A0} \theta_i \int_{T_0}^T C_{P_i} dT + F_{A0} X_n \sum_{i=1}^n \int_{T_R}^T v_i C_{P_i} dT \right) \quad (2.46)$$

จาก

$$\int_{T_0}^T C_{Pi} dT = \tilde{C}_{Pi} (T_n - T_0) \quad (2.47)$$

$$\int_{T_R}^T \mathbf{v}_i C_{Pi} dT = \Delta \hat{C}_P (T_n - T_R) \quad (2.48)$$

นำสมการ (2.47) และ สมการ (2.48) แทนในสมการ (2.46) จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{Pi} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = -F_{A0} X_n \Delta H_{Rxn}^0 - \left(\sum_{i=1}^n F_{A0} \theta_i \tilde{C}_{Pi} (T_n - T_0) + F_{A0} X_n \Delta \hat{C}_P (T_n - T_R) \right) \quad (2.49)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{Pi} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = (F_{A0} X_n) (-\Delta H_{Rxn}^0 + \Delta \hat{C}_P (T_n - T_R)) - F_{A0} \sum_{i=1}^n \theta_i \tilde{C}_{Pi} (T_n - T_0) \quad (2.50)$$

จาก

$$\Delta H_{Rxn} = \Delta H_{Rxn}^0 + \Delta \hat{C}_P (T_n - T_R) \quad (2.51)$$

นำสมการ (2.51) แทนในสมการ (2.50) จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{Pi} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = (F_{A0} X_n) (-\Delta H_{Rxn}) - F_{A0} \sum_{i=1}^n \theta_i \tilde{C}_{Pi} (T_n - T_0) \quad (2.52)$$

จาก

$$F_{A0} X_n = (-r_A) V \quad (2.53)$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{Pi} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = (-r_A) V (-\Delta H_{Rxn}) - F_{A0} \sum_{i=1}^n \theta_i \tilde{C}_{Pi} (T_n - T_0) \quad (2.54)$$

จาก

$$-r_A = k C_A^{1.2411} C_B^{0.1476} \quad (2.55)$$

เมื่อ

$$k = 0.5179 e^{\frac{-19.60 \times 10^3}{RT_n}} \quad (2.56)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i C_{Pi} \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^n H_i \frac{dN_i}{dt} = \left(0.5179 e^{\frac{-19.60 \times 10^3}{RT_n}} \right) C_A^{1.2411} C_B^{0.1476} V (-\Delta H_{Rxn}) - F_{A0} \sum_{i=1}^n \theta_i \tilde{C}_{Pi} (T_n - T_0) \quad (2.57)$$

เมื่อ

$$N_A|_{n+1} - N_A|_n = -N_{A0} (X_n - X_{n+1}) \quad (2.58)$$

$$C_A = C_{A0} (1 - X_n) \quad (2.59)$$

$$C_B = C_{A0} (\theta_{B0} - X_n) \quad (2.60)$$

$$C_{i0} = \frac{F_{i0}}{V_0} \quad (2.61)$$

ดังนั้น นำสมการ (2.58), (2.59), (2.60) และ (2.61) แทนในสมการ (2.57) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} (T_{n+1} - T_n) \sum_{i=1}^n N_i C_{Pi} - N_{A0} (X_n - X_{n+1}) \sum_{i=1}^n C_{Pi} (T_{n+1} - T_n) = \\ \left(0.5179 e^{\frac{-19.60 \times 10^3}{RT_n}} \right) \left(\frac{F_{A0}}{V_0} \right)^{1.3887} (1 - X_n)^{1.2411} (\theta_{B0} - X_n)^{0.1476} v(-\Delta H_{Rxn}) - F_{A0} \sum_{i=1}^n \theta_i \tilde{C}_{Pi} (T_n - T_0) \end{aligned} \quad (2.62)$$

เนื่องจากถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องถังที่ 2 (CSTR2) ใช้สมการสมดุลพลังงานรูปแบบเดียวกันกับถังปฏิกรณ์เคมีถังที่ 1 (CSTR1) ดังนั้น จึงสามารถใช้สมการสมดุลพลังงานสมการที่ 2.62 ได้

โดยที่

A	คือ ไตรกลีเซอไรด์
B	คือ เมทานอล
C	คือ เมทิลเอสเทอร์ หรือ ไบโอดีเซล
D	คือ กลีเซอรอล
F_A	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของไตรกลีเซอไรด์ (โมลต่อวินาที)
F_{A0}	คือ อัตราการไหลเชิงโมลเริ่มต้นของไตรกลีเซอไรด์ (โมลต่อวินาที)
F_{B0}	คือ อัตราการไหลเชิงโมลเริ่มต้นของเมทานอล (โมลต่อวินาที)
F_1	คือ อัตราการไหลเชิงโมลที่ออกจากถังปฏิกรณ์เคมี ถังที่ 1 ของไตรกลีเซอไรด์ (โมลต่อวินาที)
F_2	คือ อัตราการไหลเชิงโมลที่ออกจากถังปฏิกรณ์เคมี ถังที่ 2 ของไตรกลีเซอไรด์ (โมลต่อวินาที)
R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
V	คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง (ลิตร)
X_n	คือ Conversion ที่เวลาปัจจุบัน
X_{n+1}	คือ Conversion ที่เวลาถัดไป
r_A	คือ อัตราการลดลงของไตรกลีเซอไรด์ จากการเกิดปฏิกิริยา (โมลต่อลิตรต่อวินาที)
θ_i	คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสาร i กับไตรกลีเซอไรด์

θ_{B0}	คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับไตรกลีเซอไรด์ ที่เวลาเริ่มต้น
$(-\Delta H_{Rxn}^0)$	คือ ความร้อนเนื่องมาจากปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (จุลต่อโมล)
$(-\Delta H_{Rxn})$	คือ ความร้อนเนื่องมาจากปฏิกิริยา (จุลต่อโมล)
C_{Pi}	คือ ความจุความร้อนของสาร i (จุลต่อโมลเคลวิน)
\tilde{C}_{pi}	คือ ความจุความร้อนเฉลี่ยของสาร i (จุลต่อโมลเคลวิน)
$\Delta \hat{C}_p$	คือ ผลต่างของความจุความร้อนเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น (จุลต่อโมลเคลวิน)
N_i	คือ จำนวนโมลของสาร i (โมล)
$N_A _n$	คือ จำนวนโมลของไตรกลีเซอไรด์ที่เวลาปัจจุบัน (โมล)
$N_A _{n+1}$	คือ จำนวนโมลของไตรกลีเซอไรด์ที่เวลาถัดไป (โมล)
N_{A0}	คือ จำนวนโมลของไตรกลีเซอไรด์ ที่เวลาเริ่มต้น (โมล)
H_i	คือ เอนทาลปีของสาร i (จุลต่อโมล)
C_i	คือ ความเข้มข้นของสาร i (โมลต่อลิตร)
v_0	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสายป้อนที่เวลาเริ่มต้น
T_n	คือ อุณหภูมิที่เวลาปัจจุบัน (เคลวิน)
T_{n+1}	คือ อุณหภูมิที่เวลาถัดไป (เคลวิน)
T_R	คือ อุณหภูมิอ้างอิง (298.15 เคลวิน)
T_0	คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (เคลวิน)
V_i	คือ เลขหน้าโมลของสมการการเกิดปฏิกิริยา

2.4 โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล (Microsoft Excel)

ไมโครซอฟท์เอกซ์เซล เป็นโปรแกรมประเภทสเปรดชีต (Spreadsheet) หรือโปรแกรมตารางงาน ซึ่งจะเก็บข้อมูลต่างๆ ลงบนแผ่นตารางงาน คล้ายกับการเขียนข้อมูลลงในสมุดที่มีการตีช่องตาราง ทั้งแนวนอน และแนวตั้ง ซึ่งช่องตารางแต่ละช่องจะมีชื่อประจำแต่ละช่อง ทำให้ง่ายต่อการป้อนข้อมูล การแก้ไขข้อมูล สะดวกต่อการคำนวณ และการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ สามารถจัดข้อมูลต่างๆ ได้อย่างเป็นหมวดหมู่ และเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น (Khoopanumas, 2560)

2.4.1 ประโยชน์ของไมโครซอฟท์เอกซ์เซล

2.4.1.1. สร้างตารางทำงาน จัดตารางงาน และนำเสนอข้อมูลในรูปแบบต่างๆ

2.4.1.2. สร้างรายงานสรุปผลในมุมมองต่างๆ เช่น ตารางสรุปยอดขาย ตารางสรุปข้อมูลสินค้า สรุปงบดุล สรุปแผนการผลิต สรุปข้อมูล ขาดลามาสาย ของพนักงาน เป็นต้น

2.4.2 ลักษณะงานที่เหมาะสมกับไมโครซอฟท์เอกซ์เซล

- 2.4.2.1. งานด้านบัญชี
- 2.4.2.2. งานด้านการเงิน
- 2.4.2.3. งานด้านการวางแผน
- 2.4.2.4. งานด้านงบประมาณ
- 2.4.2.5. งานด้านสถิติ
- 2.4.2.6. งานด้านวิศวกรรมศาสตร์

2.5 แมโครโปรแกรม (Macro Program)

แมโคร (Macro) เป็นกลุ่มคำสั่งที่ใช้ทำงานอัตโนมัติในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล เช่น แมโคร เพื่อทำการคัดลอกข้อมูลยอดขายที่ได้มาแต่ละเดือนเข้าไปยังสมุดงานของข้อมูลยอดขายทั้งหมด โดยไมโครซอฟท์ออกแบบมาให้สร้างแมโครได้ง่ายๆ โดยการบันทึก (Record Macro) เพื่อสามารถเรียกใช้ได้ภายหลัง และจะเก็บเป็นโปรแกรมด้วยภาษา Visual Basic หรือที่เรียกว่า Visual Basic for Application (ชไลเวท พิพัฒพรณ, 2557)

2.5.1 ประโยชน์ของแมโครโปรแกรม

- 2.5.1.1. ลดระยะเวลาในการทำงานให้เหลือน้อยลง
- 2.5.1.2. ลดกระบวนการทำงานที่ซับซ้อน โดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องใช้งานเอกซ์เซลขั้นสูง ก็สามารถทำงานที่ซับซ้อนได้ โดยการรันแมโครที่บันทึกไว้ได้
- 2.5.1.3. การพัฒนาไม่ซับซ้อนมาก ไม่ต้องมีความรู้ในการเขียนโปรแกรมมาก่อน

2.5.2 ตัวอย่างของระบบงานทางธุรกิจที่สามารถใช้แมโครช่วยงาน

- 2.5.2.1. การนำเข้าข้อมูลหรือการนำเข้าไฟล์จากระบบงานอื่นเข้ามาอัตโนมัติ
- 2.5.2.2. การจัดรูปแบบงานอัตโนมัติ สามารถใช้แมโคร เพื่อจัดตารางให้สวย เช่น ฟอนต์ ตัวอักษรและสีได้อย่างง่ายๆ

2.5.2.3. การปรับปรุงข้อมูลที่ได้จากระบบอื่น เช่น SAP และ ERP แต่ยังไม่พร้อมใช้งาน ต้องลบคอลัมน์หรือเพิ่มคอลัมน์ที่ไม่ได้ใช้งานก่อน เพื่อพร้อมใช้งาน

2.5.2.4. การบันทึกข้อมูลจากแบบฟอร์มอัตโนมัติ

2.5.2.5. การออกรายงาน หรือ Pivot Table และ Pivot Chart โดยการคลิกเพียงปุ่มเดียว

2.5.2.6. การนำออกข้อมูลจากไมโครซอฟท์เอกซ์เซลไปยังระบบงานอื่นๆ

2.5.3 ที่เก็บแมโคร

2.5.3.1. Personal Macro Workbook สำหรับเก็บแมโครที่จะใช้ภายในเครื่องนั้นๆ

2.5.3.2. New Workbook สำหรับเรียกใช้แมโครใหม่ได้

2.5.3.3. This Workbook สำหรับการเก็บในเอกสารนี้ โดยจะต้องบันทึกเป็นไฟล์แบบ Macro Enable

2.6 Visual Basic for Applications (VBA)

Visual Basic for Applications เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาโดยไมโครซอฟท์ และเป็นการใช้ภาษา Visual Basic ในการเขียนโค้ดควบคุมโปรแกรมต่างๆ และถูกเพิ่มลงในไมโครซอฟท์ออฟฟิต เพื่อเสริมสร้างฟังก์ชันการพัฒนานโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซลให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการทำงาน สามารถเขียนคำสั่งให้โปรแกรมทำงานตามคำสั่งความต้องการในรูปแบบอัตโนมัติ และการใส่ปุ่มคำสั่ง เพื่อกอกรายการขายในตารางเอกซ์เซลนอกจากนี้ VBA มีจุดเด่นในการคำนวณข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความซับซ้อน และสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมอื่นๆ และสร้างโปรแกรมที่ผู้ใช้งานสามารถกำหนดเองได้ ซึ่งลักษณะการใช้งานของ Visual Basic for Applications มีดังนี้ (จิราวุธ วารินทร์, 2561)

2.7 วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

วิธีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรม หลังจากที่ทำกรเขียนโปรแกรมเสร็จสิ้นแล้ว โปรแกรมจะต้องได้รับการตรวจสอบก่อนว่า มีข้อผิดพลาดในโปรแกรมหรือไม่ซึ่งอาจเกิดจากการเขียนโปรแกรมที่ผิดหลักไวยากรณ์ของภาษา โดยทั่วไปจะมีวิธีที่จะตรวจสอบข้อผิดพลาดของโปรแกรม 2 ขั้นตอน ดังนี้ (เกตน์ศิริ ทิพนตร และศิริประภา คำแพงทอง, 2558)

2.7.1 การตรวจสอบด้วยตนเอง (Self Checking)

การตรวจสอบด้วยตนเอง โดยตนเองเป็นผู้ตรวจสอบนั้น จะต้องมีการทดลองเขียนโปรแกรมลงบนกระดาษแล้วใส่ตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมที่ละขั้นตอนด้วยตนเองว่าโปรแกรมมีการทำงานที่ถูกต้อง ได้ผลลัพธ์ตรงตามความเป็นจริงหรือไม่

2.7.2 การตรวจสอบด้วยการแปลภาษา (Translating Checking)

หลังจากที่เขียนโปรแกรมเสร็จเรียบร้อยแล้วและมีการตรวจสอบด้วยตนเองเรียบร้อยแล้ว จะมีการป้อนโปรแกรมเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการแปลโปรแกรม โดยจะต้องเรียกใช้ตัวแปลภาษาโปรแกรม ที่เรียกว่า คอมไพเลอร์ (Compiler) หรือ อินเตอร์พรีเตอร์ (Interpreter) อย่างใดอย่างหนึ่ง ทำการแปลภาษาโปรแกรมให้เป็นภาษาเครื่อง การแปลนี้จะเป็นการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมด้วย จะถูกใช้ไปในการหาข้อผิดพลาดของโปรแกรมและการแก้ไขข้อผิดพลาดนั้น ซึ่งถ้ามีข้อผิดพลาดใดๆ เครื่องคอมพิวเตอร์จะแจ้งให้ทราบทางหน้าจอ

2.8 โปรแกรม Minitab 18.1

Minitab เป็นโปรแกรมหนึ่งที่ถูกพัฒนา เพื่อการใช้งานสำหรับการคำนวณทางด้านสถิติ โดยเฉพาะหรือเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปหรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และประมวลผลทางสถิติ โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จะถูกเก็บในรูปแบบของเวิร์คชีท นอกจากนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท เช่น งานเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพ

2.8.1 ประโยชน์ของโปรแกรม Minitab 18.1

- 2.8.1.1 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติขั้นพื้นฐาน
- 2.8.1.2 การสร้างเครื่องมือควบคุมคุณภาพ
- 2.8.1.3 วิเคราะห์ความแปรปรวน
- 2.8.1.4 การออกแบบการทดลอง
- 2.8.1.5 การประเมินผลกระบวนการ

2.8.2 องค์ประกอบหลักของโปรแกรม Minitab 18.1

2.8.2.1 การเตรียมข้อมูล

2.8.2.2 คำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูล

2.8.2.3 การแสดงผลลัพธ์

2.9 วิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

วิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่พื้นที่ผิวตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทางคณะผู้จัดทำมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าสถานะที่เหมาะสมของพื้นที่ผิวตอบสนองนี้ เช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของ X_1 และ X_2 ดังนั้น จะสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$y = f(X_1, X_2) + \varepsilon \quad (2.63)$$

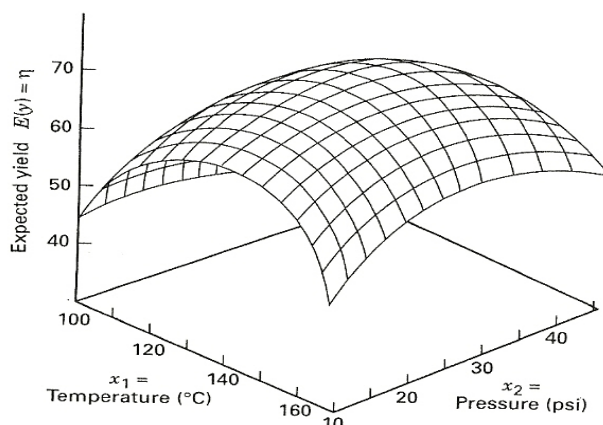
เมื่อ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลพื้นที่ผิวตอบสนอง y ที่มีผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า

$$E(y) = f(X_1, X_2) = \eta \quad (2.64)$$

ดังนั้น สามารถเขียนสมการพื้นที่ผิวตอบสนองได้ คือ

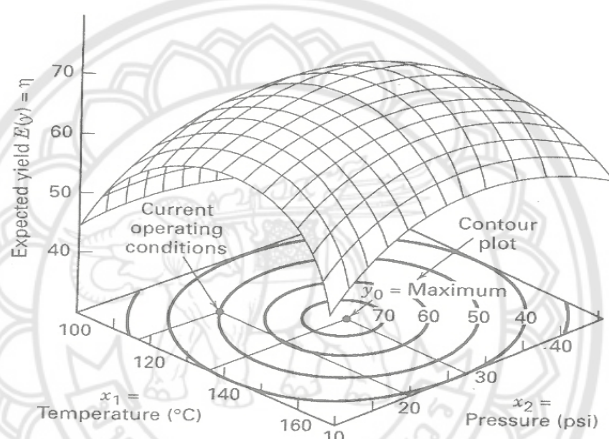
$$\eta = f(X_1, X_2) \quad (2.65)$$

โดยส่วนมากจะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปของกราฟฟิก ดังแสดงในรูปที่ ซึ่ง η จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อจะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นที่ผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น โดยส่วนมากจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นที่ผิวตอบสนองดังรูปที่ และในการสร้างร่างร่างนี้ เส้นที่มีค่าของพื้นที่ผิวตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ X_1 และ X_2 โดยเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นที่ผิวตอบสนองที่เท่ากันค่าหนึ่ง (สันติ พุ่มกระจ่าง, 2552)



รูปที่ 2.5 พื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ

ที่มา : Process Improvement Using Data, Dunn



รูปที่ 2.6 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง

ที่มา : Process Improvement Using Data, Dunn

ในปัญหาที่เกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนมากจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวตอบสนองกับตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรก คือ ทางคณะผู้จัดทำต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของพื้นผิวตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือ แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่ง (สันติ พุ่มกระจ่าง, 2552)

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.66)$$

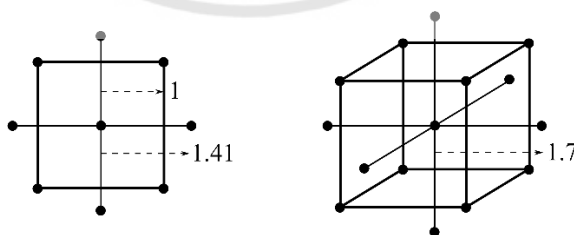
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จึงใช้ฟังก์ชันพหุนามที่กำลังสูงขึ้นไป เช่น พหุนามกำลังสอง

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j < i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.67)$$

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นที่ผิวตอบสนองส่วนมากจะใช้แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่งหรือพหุนามกำลังสองในการหาผลตอบสนอง แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นที่ผิวตอบสนองทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นที่ผิวที่สนใจมีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นที่ผิวตอบสนองมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีกำลังสองน้อยที่สุด วิธีการปีนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองจะเป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบสนอง โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (สันติ พุ่มกระจำจ, 2552)

2.9.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

การออกแบบส่วนประสมกลางเป็นวิธีการหาพื้นที่ผิวตอบสนองวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเพื่อใช้หากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไปส่วนประสมกลางจะประกอบด้วย $2k$ แฟกทอเรียลที่มี nf รัน ซึ่ง $2k$ รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว และ nc รันที่จุดศูนย์กลางดังรูปที่ แสดงส่วนประสมกลางสำหรับ $k=2$ และ $k=3$ ปัจจัย (สันติ พุ่มกระจำจ, 2552)



รูปที่ 2.7 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$

ที่มา : <https://learnche.org/pid/design-analysis-experiments/response-surface-methods>,
Montoro ea al.

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยของการออกแบบการหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ของผู้ที่เคยทำวิจัยมาแล้ว โดยส่วนใหญ่ จะทำการจำลองการออกแบบ โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus และ Aspen Hysys ถ้าคณะผู้จัดทำ ต้องการใช้โปรแกรมเหล่านี้ จะต้องศึกษาการใช้งาน และจะต้องมีความชำนาญในการใช้โปรแกรม เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีความซับซ้อนมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาการจำลอง และการเขียนโปรแกรมในการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยการเขียนโปรแกรมจะใช้การบันทึก โดยแมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Application (VBA) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของไมโครซอฟท์เอกซ์เซล

Anastopoulous et al. (2009) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช 4 ชนิด ด้วยเอทานอล ทำการทดลอง โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาวะการเกิดปฏิกิริยา เช่น ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโมล ของเอทานอลต่อน้ำมันพืช ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเป็นเอทิลเอสเทอร์ (Conversion) มีค่าที่เหมาะสมของน้ำมันพืชทั้ง 4 ชนิด ภายใต้สภาวะของปฏิกิริยาที่เหมาะสมคุณสมบัติทางเคมี และคุณภาพทางกายภาพของเอทิลเอเทอร์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนเดียวของน้ำมันพืช อัตราส่วนระหว่างเอทานอลต่อน้ำมันพืช เป็น 12 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH ร้อยละ 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 2 ชั่วโมง 30 นาที และจากงานวิจัยนี้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบสองขั้นตอนมีผลลัพธ์ดีกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนเดียว ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.75 อัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำมันพืชอัตราส่วน 6 ต่อ 1 และระยะเวลาในการปฏิกิริยาประมาณ 30 นาที

Shen et al. (2011) ศึกษาการออกแบบและการควบคุมกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการแยกเฟส และรีไซเคิลภายในระบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี โดยใช้ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ เนื่องจากน้ำทิ้งของเครื่องปฏิกรณ์เคมีจะถูกแยกออกเป็นสองชั้นในสายของของเหลว ดังนั้นสามารถปรับปรุงกระบวนการนี้ได้ โดยการติดตั้งเครื่องแยกของเหลว (Decanter) หลังจากเครื่องปฏิกรณ์เคมี โดยออกแบบในโปรแกรม Aspen Plus จากกระบวนการนี้สามารถนำเมทานอลกลับไปใช้ใหม่เป็นสารตั้งต้นได้ในการทำปฏิกิริยา

กับไตรกลีเซอไรด์ที่เครื่องปฏิกรณ์เคมี และจากการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล ลดค่าใช้จ่ายของสารตั้งต้นได้ถึงร้อยละ 20 และสามารถลดต้นทุนพลังงานลงร้อยละ 26

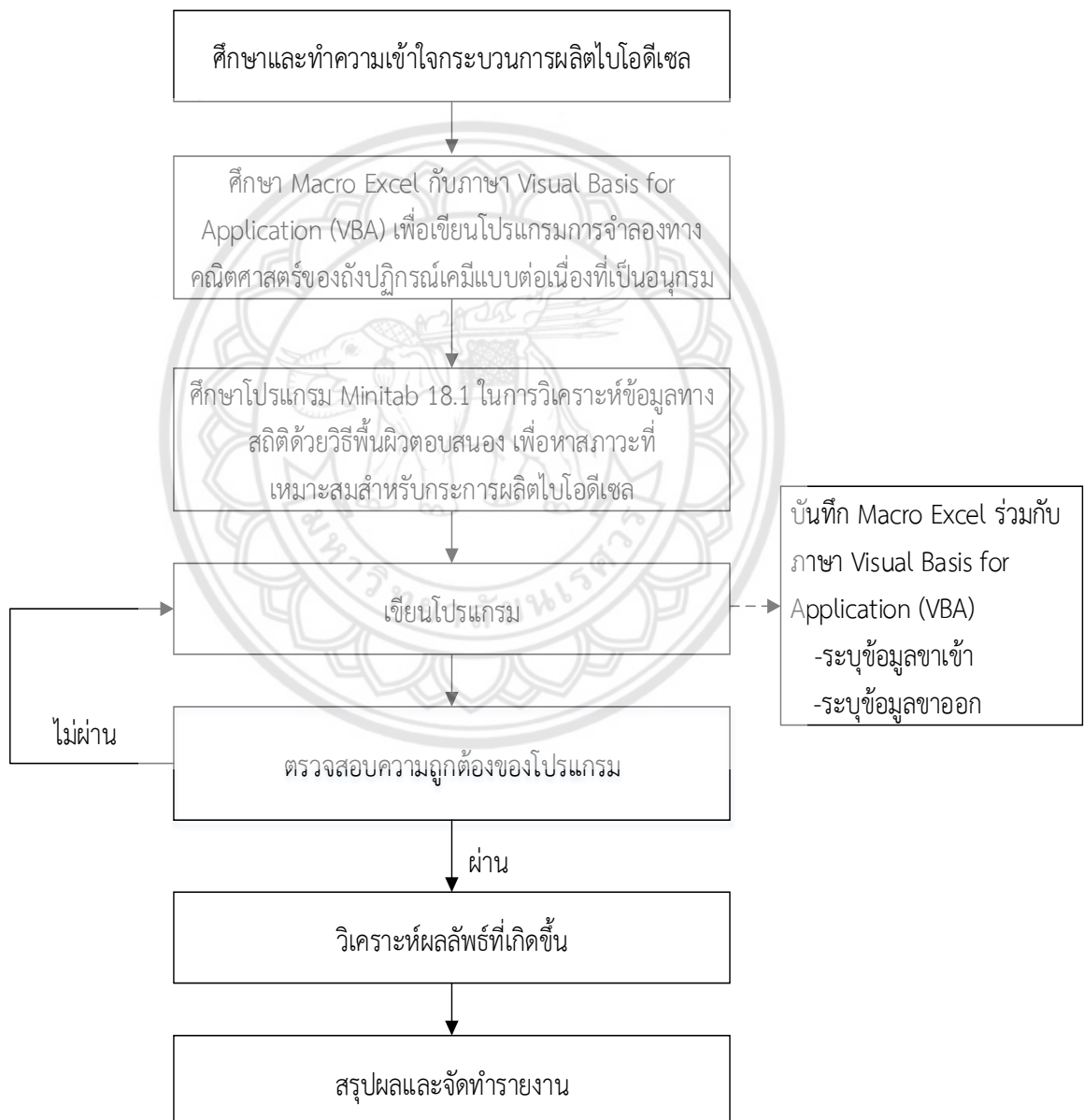
Raja. (2015) ศึกษาความแตกต่างของปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลระหว่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเอสเทอริฟิเคชันที่มีความต้องการใช้พลังงาน และการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้จำเป็นต้องมีการวิจัยแหล่งพลังงานทดแทนอย่างยั่งยืนอื่นๆ ได้แก่ เชื้อเพลิงชีวภาพไบโอดีเซล โดยศึกษาจากโปรแกรม Aspen Plus เพื่อทำความเข้าใจกับรูปแบบขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากการวิเคราะห์กระบวนการใช้ตัวแปรที่มีความแตกต่างกันในการดำเนินงาน และหาวิธีที่มีผลต่อการแยกสารในกระบวนการผลิต และจากงานวิจัยนี้จะพิจารณาแบบจำลอง และการกำหนดรูปแบบต่างๆ สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยออกแบบ และจำลองกระบวนการผลิต โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และเอสเทอริฟิเคชัน และศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปฏิกิริยา เช่น Conversion ของไตรกลีเซอรอล มีค่าร้อยละ 99 และค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 94



บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

ในการดำเนินโครงการหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน สามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงการในรูปแบบของผังงานแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงการได้ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผังงานขั้นตอนการดำเนินโครงการ

3.1 ศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ศึกษาหลักการและขั้นตอนกระบวนการผลิตไบโอดีเซล การเลือกใช้สารตั้งต้น การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้สอดคล้องกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์รองที่ต้องการ เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน จากนั้นนำหลักการมาพิจารณา เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

3.2 ศึกษาแมโครโปรแกรมกับภาษา Visual Basic for Applications (VBA) เพื่อเขียนโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม

ศึกษาแมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Applications (VBA) เพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม เนื่องจากแมโครเป็นกลุ่มคำสั่งที่ใช้ทำงานอัตโนมัติในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล และสามารถเรียกใช้ได้ในภายหลัง และจะเก็บเป็นโปรแกรมด้วยภาษา Visual นอกจากนี้โปรแกรมภาษา Visual Basic ยังใช้ในการเขียนโค้ดควบคุมโปรแกรม

3.3 ศึกษาโปรแกรม Minitab 18.1 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ศึกษาการใช้โปรแกรม Minitab 18.1 เนื่องจากเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลหรือผลลัพธ์ที่แสดงออกมามีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำมากขึ้นในการศึกษาครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำเลือกใช้วิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติที่นำมาใช้ในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลการเกิดไบโอดีเซลจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน และทำให้ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เช่น อุณหภูมิ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ สร้างสมการ และแผนภาพคอนทัวร์ โดยการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

3.4 เขียนโปรแกรม

ในการเขียนโปรแกรมด้วยการเขียนโค้ด ทางคณะผู้จัดทำนำฟังก์ชันต่างๆ มาใช้ในการเขียนโค้ดบนไมโครซอฟต์แวร์เอกซ์เซล เพื่อสร้างเป็นโปรแกรมการออกแบบ และจำลองถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ซึ่งการเขียนโปรแกรมนี้จะเขียนโปรแกรมผ่านการบันทึกด้วยแมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Applications (VBA) และระบุข้อมูลขาเข้า และข้อมูลขาออก ดังนี้

3.4.1 ระบุข้อมูลขาเข้า (Input)

- 3.4.1.1 อุณหภูมิ เคลวิน (Kelvin)
- 3.4.1.2 ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี ลิตร (Litre)
- 3.4.1.3 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์

3.4.2 ระบุข้อมูลขาออก (Output)

- 3.4.2.1 Conversion
- 3.4.2.2 อุณหภูมิ เคลวิน (Kelvin)

3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

3.5.1 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมเทียบกับสมการกฏอัตราจากแหล่งอ้างอิง

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยแมโครโปรแกรมบนไมโครซอฟต์แวร์เอกซ์เซล ซึ่งจะตรวจสอบความถูกต้องจากสมการกฏอัตราจากแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015) ดังสมการที่ 3.1

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = -(0.5179s^{-1}) \times \exp\left(-\frac{19.60KJ/mol}{RT}\right) C_{TG}^{1.2411} C_{MeOH}^{0.1476} \quad (3.1)$$

3.5.2 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมเทียบกับโปรแกรม Minitab 18.1

การตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรม จะตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้เทียบกับโปรแกรม Minitab 18.1 เพื่อดูว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง และแม่นยำ โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการพื้นที่ผิวตอบสนองโดยการออกแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งข้อมูลที่น่ามาใช้ในการศึกษา มีดังต่อไปนี้

3.5.2.1 อุณหภูมิ อยู่ในช่วง 423 ถึง 523 เคลวิน

3.5.2.2 ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี อยู่ในช่วง 1,250 ถึง 2,250 ลิตร

3.5.2.3 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ อยู่ในช่วง 6 ถึง 42 ต่อ 1

นอกจากนี้ นำผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่สร้างขึ้นเทียบกับโปรแกรม Minitab 18.1 ด้วยร้อยละความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) ดังสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละความคลาดเคลื่อน} = \frac{|E - S|}{S} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ E คือ ค่าจากโปรแกรม Minitab 18.1

S คือ ค่าจากโปรแกรมที่สร้างขึ้นจากแมโครโปรแกรมในไมโครซอฟท์เอกซ์เซล

3.6 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการเขียนโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยจะวิเคราะห์ผลลัพธ์ ดังต่อไปนี้

3.6.1 ตัวแปรที่มีผลต่อค่า Conversion

3.6.1 ความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับทฤษฎี

3.6.1 ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้ โดยวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab 18.1

3.7 สรุปผลและจัดทำรายงาน

3.7.1 สรุปผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

3.7.2 สรุปผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

โครงการในครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการสร้างโปรแกรมออกแบบถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรมด้วยการนำกระบวนการผลิตไบโอดี จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้ไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลเป็นสารตั้งต้น และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในการศึกษาโดยแมโครโปรแกรมในไมโครซอฟท์เอกซ์เซล และศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม ซึ่งปัจจัยที่ทางคณะผู้จัดทำสนใจและคาดว่าจะส่งผลต่อค่า Conversion มากที่สุด มีทั้งหมด 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิขาเข้า ปริมาตรของถึงปฏิกรณ์เคมี และอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เขียนสมการของการเกิดปฏิกิริยาเคมีในถึงปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยมีสมมติฐาน คือ กระบวนการการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Perfect Mixing) และสภาวะดำเนินการขึ้นอยู่กับเวลาหรือสภาวะการดำเนินการไม่คงตัว (Unsteady State) โดยจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สมการสมดุลโมล และสมการสมดุลพลังงาน

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาการเขียนโปรแกรมโดยใช้ ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลร่วมกับแมโครโปรแกรม เพื่อคำนวณสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยเขียนให้โปรแกรมรันค่า Conversion ที่ทำให้สมการเป็นจริง และทำการเก็บค่าไว้ โดยรันค่า ณ ช่วงเวลาที่ไปจนถึงสภาวะคงตัว จึงหยุดการทำงานของโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมของถึงปฏิกรณ์เคมี ที่ได้มาซึ่งค่า Conversion มากที่สุด ด้วยวิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง ในโปรแกรม Minitab 18.1 และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ได้

4.1 ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ข้อมูลจากแมโครโปรแกรม

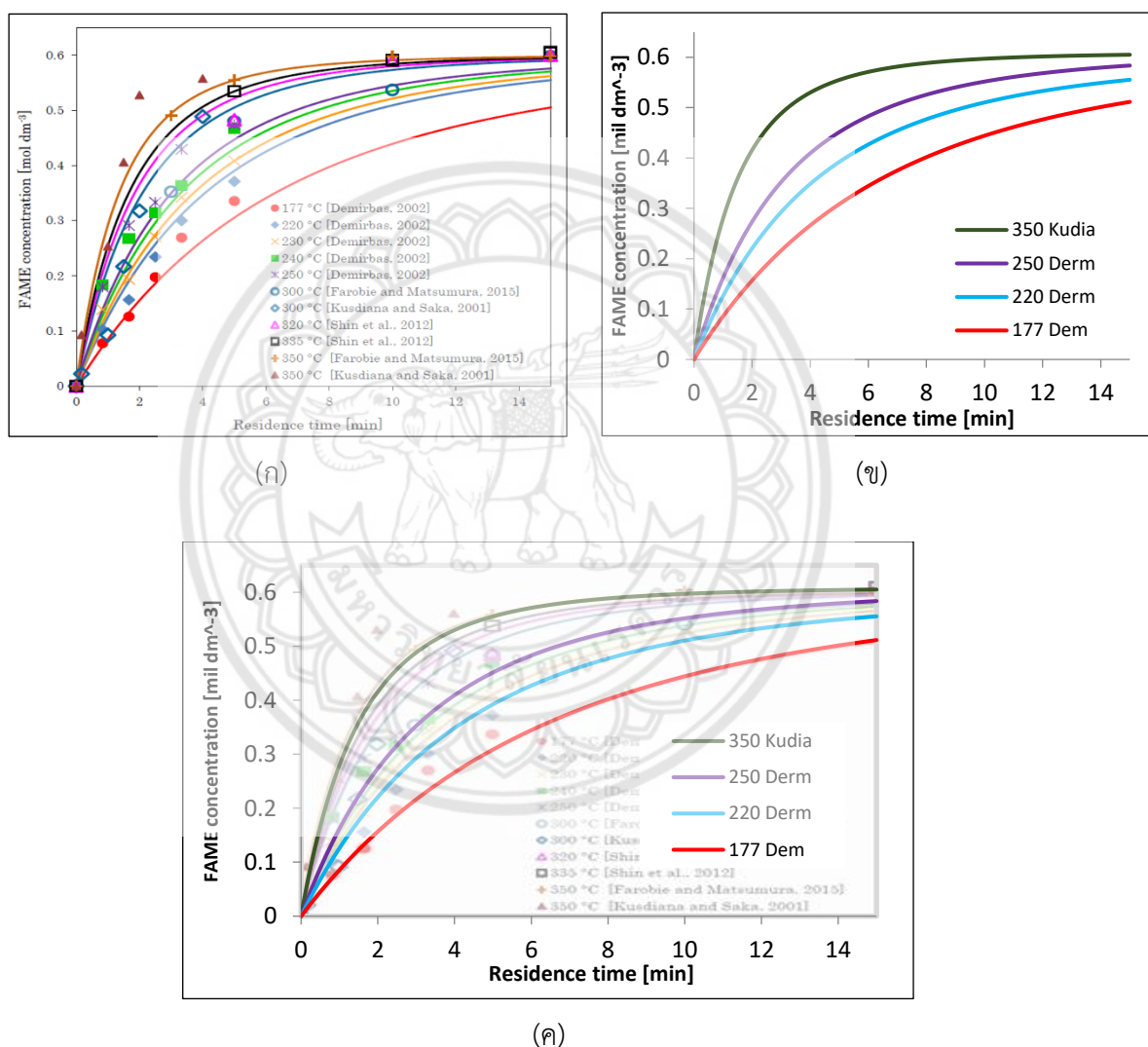
4.1.1 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของแมโครโปรแกรม

4.1.1.1 คอนเวอร์ชัน (Conversion)

ก. การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากโปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยแมโครโปรแกรมบนไมโครซอฟท์เอกซ์เซลกับผลการทดลองจากแหล่งอ้างอิง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยตรวจสอบจากความถูกต้องของสมการกฎอัตราจากแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015) แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = -(0.5179s^{-1}) \times \exp\left(-\frac{19.60KJ/mol}{RT}\right) C_{TG}^{1.2411} C_{MeOH}^{0.1476} \quad (4.1)$$

ซึ่งสมการที่ 4.1 เป็นสมการที่นำมาใช้จำลองกระบวนการเกิดปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 (ก) ความเข้มข้นของไบโอดีเซล เมื่อเวลาเปลี่ยนไปจากแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015), (ข) ความเข้มข้นของไบโอดีเซล เมื่อเวลาเปลี่ยนไปจากโปรแกรมที่สร้างขึ้น และ (ค) ความเข้มข้นของไบโอดีเซลเมื่อเวลาเปลี่ยนไปและเปรียบเทียบข้อมูลจากแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015) และโปรแกรมที่สร้างขึ้น

จากรูปที่ 4.1 เมื่อนำข้อมูลที่สภาวะต่างๆ ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมารันสมการกฎอัตราจากแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015) โดยใช้แมโครโปรแกรมและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมกับผลลัพธ์จากแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015) โดยทางคณะผู้จัดทำ เลือก 4 สภาวะมาเปรียบเทียบ ได้แก่ อุณหภูมิที่ 177 220 250 และ 350 องศาเซลเซียส ความดันคงที่ 20 เมกะปาสคาล และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 42 ต่อ 1 พบว่า จากรูปที่ 4.1 (ค) เส้นกราฟของข้อมูลการทดลองซ้อนทับกันพอดี ดังนั้น สามารถวิเคราะห์ได้ว่า สมการกฎอัตราจากแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015) ที่นำมาใช้ในการเขียนโปรแกรมการจำลองการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ได้ในช่วงขั้นตอนต่อไป

4.1.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการรันแมโครโปรแกรมบนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล

4.1.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่กำหนดกับผลที่ได้จากแมโครโปรแกรม

สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่กำหนดกับผลลัพธ์ที่ได้จากแมโครโปรแกรม โดยจะทำการเปลี่ยนตัวแปรขาเข้าที่กำหนด คือ อุณหภูมิ, อัตราส่วนโดยโมล, ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีแต่ละถัง และจำนวนถังปฏิกรณ์เคมีที่ใช้ดำเนินการ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิขาเข้าถังปฏิกรณ์เคมี ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมีแต่ละถัง อัตราส่วนโดยโมล และจำนวนถังปฏิกรณ์เคมีที่ส่งผลต่อค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี

การ ทดลอง ครั้งที่	ตัวแปร	อุณหภูมิขาเข้า ถังปฏิกรณ์	อัตราส่วน โดยโมล	ปริมาตรถัง ปฏิกรณ์เคมี	จำนวนถัง ปฏิกรณ์เคมี	Conversion	อุณหภูมิขาออกของ ถังปฏิกรณ์เคมี
1.	อุณหภูมิขาเข้าถัง ปฏิกรณ์	473 เคลวิน	33	2,000 ลิตร	2	0.7308	369.11 เคลวิน
		573 เคลวิน	33	2,000 ลิตร	2	0.9031	413.85 เคลวิน
	ร้อยละความแตกต่าง	21.14	0	0	0	23.58	12.12

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิขาเข้าถึงปฏิกรณ์เคมี ปริมาตรถึงปฏิกรณ์เคมีแต่ละถัง อัตราส่วน โดยโมล และจำนวนถึงปฏิกรณ์เคมีที่ส่งผลต่อค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถึงปฏิกรณ์เคมี

การทดลองครั้งที่	ตัวแปร	อุณหภูมิขาเข้าถึงปฏิกรณ์	อัตราส่วนโดยโมล	ปริมาตรถึงปฏิกรณ์เคมี	จำนวนถึงปฏิกรณ์เคมี	Conversion	อุณหภูมิขาออกของถึงปฏิกรณ์เคมี
2.	อัตราส่วนโดยโมล	523 เคลวิน	24	1,750 ลิตร	2	0.8151	393.54 เคลวิน
	ระหว่าง ME: TG	523 เคลวิน	42	1,750 ลิตร	2	0.8235	391.92 เคลวิน
ร้อยละความแตกต่าง		0	75	0	0	1.03	0.41
3.	ปริมาตรถึงปฏิกรณ์เคมี	523 เคลวิน	24	1,750 ลิตร	2	0.8151	393.54 เคลวิน
		523 เคลวิน	24	2,250 ลิตร	2	0.8283	389.07 เคลวิน
ร้อยละความแตกต่าง		0	0	28.57	0	2.85	1.14
4.	จำนวนถึงปฏิกรณ์เคมี	473 เคลวิน	15	1,500 ลิตร	1	0.4431	373.5 เคลวิน
		473 เคลวิน	15	1,500 ลิตร	2	0.6807	376.32 เคลวิน
ร้อยละความแตกต่าง		0	0	0	100	53.62	0.76

หมายเหตุ. ME คือ เมทานอล และ TG คือ ไตรีกีซีเอโรด์

จากตารางที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ ดังนี้

ก. จากการทดลองครั้งที่ 1 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าถึงปฏิกรณ์เคมีเพิ่มขึ้นจาก 473 เคลวิน ถึง 573 เคลวิน ส่งผลให้ค่า Conversion เพิ่มขึ้น ร้อยละ 23.58 และอุณหภูมิขาออกของถึงปฏิกรณ์เคมีเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 12.12

ข. จากการทดลองครั้งที่ 2 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรีกีซีเอโรด์เพิ่มขึ้นจาก 0.8151 ถึง 0.8235 ส่งผลให้ค่า Conversion เพิ่มขึ้น ร้อยละ 1.03 และอุณหภูมิขาออกถึงปฏิกรณ์เคมีลดลง ร้อยละ 0.41

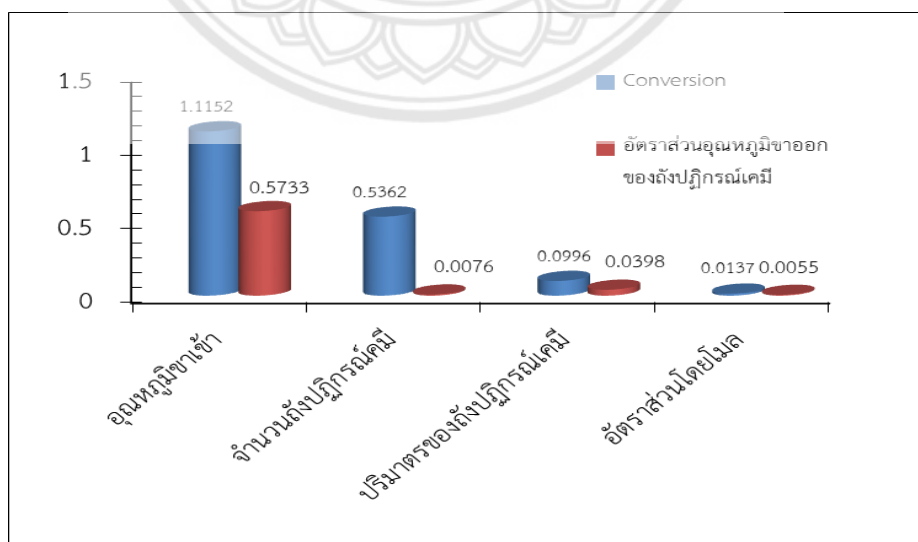
ค. จากการทดลองครั้งที่ 3 ปริมาตรของถึงปฏิกรณ์เคมีเพิ่มขึ้นจาก 1,750 ลิตร ถึง 2,250 ลิตร ส่งผลให้ค่า Conversion เพิ่มขึ้น ร้อยละ 2.85 และอุณหภูมิขาออกถึงปฏิกรณ์เคมีลดลง ร้อยละ 1.14

ง. จากการทดลองครั้งที่ 4 เมื่อจำนวนของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ดำเนินการเพิ่มขึ้นจาก 1 ถังเป็น 2 ถัง ส่งผลให้ค่า Conversion เพิ่มขึ้น ร้อยละ 53.62 และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละ 0.76

จากข้อมูลดังกล่าว สามารถนำมาเปรียบเทียบผลกระทบบของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี

การเปลี่ยนแปลง	อัตราส่วน Conversion	อัตราส่วนอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี
การทดลองครั้งที่ 1 อุณหภูมิขาเข้า	1.1152	0.5733
การทดลองครั้งที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์	0.0137	0.0055
การทดลองครั้งที่ 3 ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี	0.0996	0.0398
การทดลองครั้งที่ 4 จำนวนถังปฏิกรณ์เคมี	0.5362	0.0076



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของร้อยละผลกระทบบของตัวแปรที่สนใจต่อค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ ดังนี้

ก. ตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราส่วนค่า Conversion เรียงลำดับจากน้อยไปมาก คือ อุณหภูมิขาเข้า จำนวนถังปฏิกรณ์เคมี ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี และ อัตราส่วนโดยโมล ตามลำดับ

ข. ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีเรียงลำดับจากน้อยไปมาก คือ อุณหภูมิขาเข้า ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี จำนวนถังปฏิกรณ์เคมี และอัตราส่วนโดยโมล ตามลำดับ

ค. เมื่ออุณหภูมิขาเข้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนค่า Conversion และอัตราส่วนอุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมีมากที่สุดและส่งผลให้สภาวะของถังปฏิกรณ์เคมีทั้งสองถังใช้สภาวะที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนี้ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีมาก ทำให้ค่าอัตราส่วน Conversion และอัตราส่วนอุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมี เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าอัตราส่วน Conversion และอัตราส่วนอุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมีเท่ากับ 1.1152 และ 0.5733 ตามลำดับ

ง. เมื่อจำนวนของถังปฏิกรณ์เคมีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วน Conversion เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มถังปฏิกรณ์เคมีมา 1 ถัง จะทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเคมีภายในถังปฏิกรณ์เคมีมากขึ้น ซึ่งมีค่าอัตราส่วน Conversion และอัตราส่วนอุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมีเท่ากับ 0.5362 และ 0.0076 ตามลำดับ

จ. เมื่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วน Conversion เพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าอัตราส่วน Conversion และอัตราส่วนอุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมีเท่ากับ เท่ากับ 0.0996 และ 0.0398 ตามลำดับ

ฉ. เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วน Conversion เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ เพื่อทำปฏิกิริยาเคมีเป็นการเพิ่มปริมาณเมทานอลที่ใช้ในปฏิกิริยา ซึ่งจากหลักการของเลอชาเตอลิเอที่กล่าวว่า เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลถูกรบกวนโดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสมดุลของระบบ ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่จะลดผลกระทบของการรบกวนนั้น เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง (ธวัชพล บุญมา และคณะ, 2555) จากหลักการข้างต้น ปัจจัยที่รบกวนสภาวะสมดุล คือ การเพิ่มขึ้นของสารตั้งต้นที่ใช้ ส่งผลให้ระบบเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เกิดสารผลิตภัณฑ์มากขึ้นและอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 6 ต่อ 1 ขึ้นไป สามารถเปลี่ยนรูปแบบของปฏิกิริยาจากปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible Reaction) เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้

(Unreversible Reaction) ทำให้ค่า Conversion เพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลน้อยกว่าปัจจัยอื่นที่นำมาพิจารณา ซึ่งมีค่าอัตราส่วน Conversion และอัตราส่วนอุณหภูมิขาออกถึงปฏิกรณ์เคมีเท่ากับ 0.0137 และ 0.0055

นอกจากนี้ อุณหภูมิขาออกจากถังปฏิกรณ์เคมี ที่มีผลกระทบจากปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมีที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารเคมีและปฏิกิริยาที่ได้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่อมีระยะเวลาเข้าทำปฏิกิริยามากขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีลดลงจากถังปฏิกรณ์เคมีที่มีปริมาตรน้อยกว่า นอกจากนี้ จำนวนถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลยังส่งผลต่ออุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีอีกด้วย

4.1.2.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อเปลี่ยนตัวแปรที่กำหนด

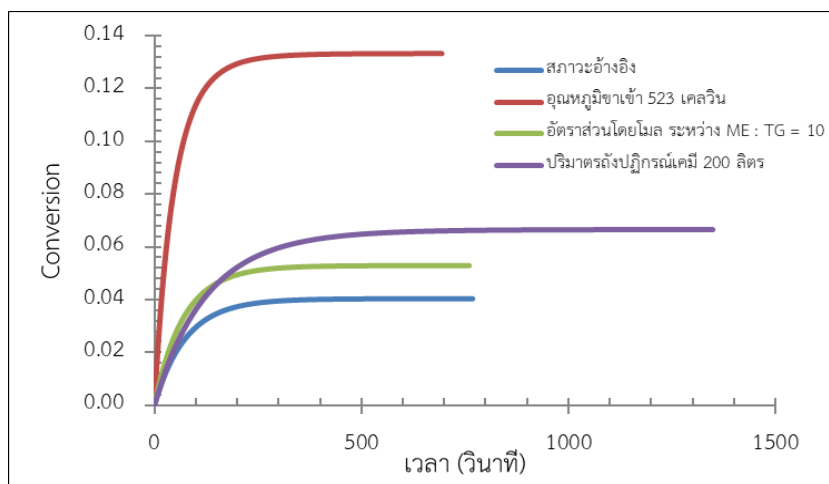
สภาวะคงตัวที่ใช้อ้างอิงในการดำเนินการในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรขาเข้าที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 3 ต่อ 1 ของปฏิกิริยา ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี 100 ลิตร อัตราการไหลโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ 100 โมลต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงปริมาตร 1 ลิตรต่อวินาที เพื่อวิเคราะห์หาความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว เนื่องจากสามารถทำให้การรันข้อมูลในแมโครโปรแกรมมีความรวดเร็วและผลลัพธ์ที่ออกมามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละสภาวะ

สำหรับตัวแปรที่สนใจ คือ อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมล และปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี โดยจะทำการรันแมโครโปรแกรมและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับสภาวะอ้างอิงที่กล่าวมาข้างต้นแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่สนใจ

เงื่อนไขที่กำหนด	เวลา (วินาที)
สภาวะอ้างอิง	768
อุณหภูมิขาเข้า 523 เคลวิน	694
อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง ME : TG 10	760
ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี 200 ลิตร	1,348

หมายเหตุ. สภาวะอ้างอิง คือ อุณหภูมิ 423 เคลวิน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 3 ต่อ 1 ของปฏิกิริยา ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี 100 ลิตร อัตราการไหลโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ 100 โมลต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงปริมาตร 1 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบลักษณะการเข้าสู่สภาวะคงตัวในแต่ละกรณี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่สนใจ

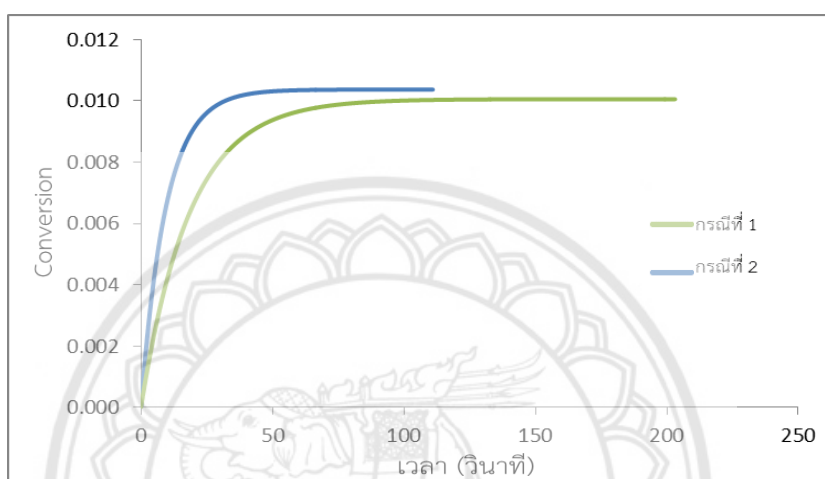
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 423 เคลวินเป็น 523 เคลวิน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 10 พบว่า เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวลดลงและอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีเพิ่มขึ้นจาก 100 ลิตร เป็น 200 ลิตร ส่งผลให้เวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารใช้เวลาอยู่ในถังปฏิกรณ์เคมีมากขึ้น

4.1.2.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องถังเดียวและถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถัง

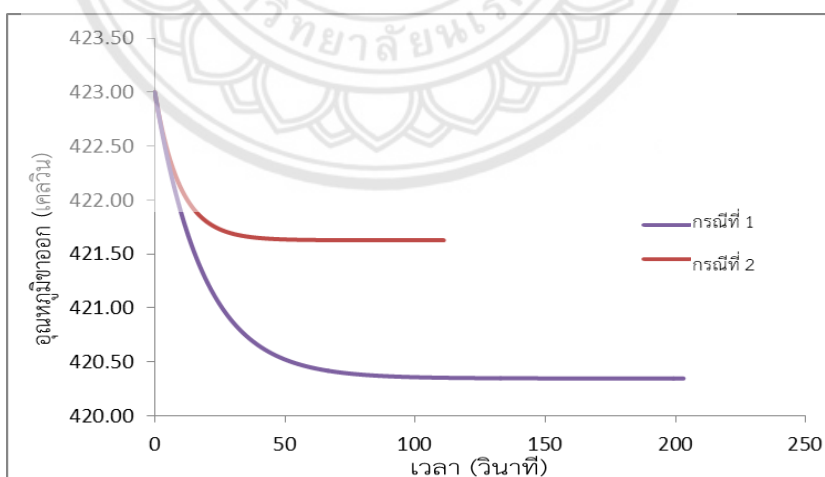
สภาวะที่นำมาใช้เป็นสภาวะเดียวกันกับสภาวะในหัวข้อ 4.1.2.2 ซึ่งจะเปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 สภาวะดำเนินการใช้ถังปฏิกรณ์เคมี 1 ถัง ปริมาตร 20 ลิตร และกรณีที่ 2 สภาวะการดำเนินการทั้งสองถัง ถังละ 10 ลิตร ปริมาตรรวมกัน 2 ถัง เป็น 20 ลิตร ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการดำเนินการของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องทั้ง 2 กรณี

กรณี	จำนวนถังปฏิกรณ์เคมี	Conversion	อุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี (เคลวิน)	เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที)
1	1	0.0101	420.35	203
2	2	0.0104	421.63	111



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับค่า Conversion ในแต่ละกรณี



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี ในแต่ละกรณี

จากตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ของค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี มีค่าใกล้เคียงกัน โดยพบว่า ค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีที่ได้มีค่ามากในกรณีที่สภาวะการดำเนินการใช้ถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถัง ถ้าใช้ถังปฏิกรณ์เคมีถังเดียวจะได้ค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี เท่ากับ 0.0101 และ 420.35 เคลวิน ตามลำดับ ในขณะที่การใช้ถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถัง จะได้ค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี เท่ากับ 0.0104 และ 421.63 ตามลำดับ ซึ่งค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของถังปฏิกรณ์เคมีถังเดียวจะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว 203 วินาที และถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถัง ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว 111 วินาที ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถังปฏิกรณ์เคมีถังเดียวใช้เวลามากกว่าถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นแบบอนุกรม 2 ถัง ดังนั้น ควรเลือกใช้กรณีของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถัง สำหรับใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อได้ค่า Conversion มีค่าสูงที่สุด

4.1.2.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถัง

ในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม 2 ถัง เมื่อปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมีทั้งสองถังไม่เท่ากัน ซึ่งสภาวะที่นำมาใช้เป็นสภาวะเดียวกันกับสภาวะในหัวข้อ 4.1.2.2 แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี ถังที่ 2 มีขนาดเล็กกว่าถังปฏิกรณ์เคมี ถังที่ 1 คือ ถังที่ 1 มีปริมาตร 20 ลิตร และถังที่สองมีปริมาตร 10 ลิตร

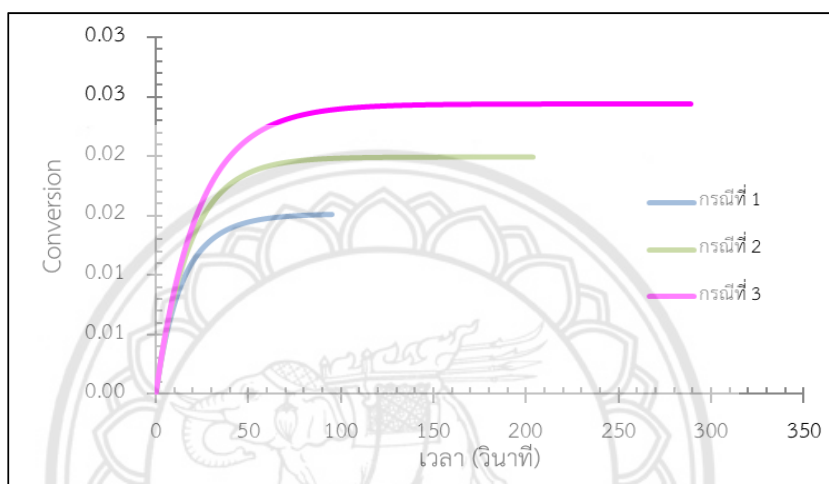
กรณีที่ 2 ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี ถังที่ 2 มีขนาดเท่ากับ คือ ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี ถังที่ 1 และถังที่ 2 มีปริมาตร 20 ลิตร

กรณีที่ 3. ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี ถังที่ 2 มีขนาดใหญ่กว่าถังปฏิกรณ์เคมี ถังที่ 1 คือ ถังที่ 1 มีปริมาตร 20 ลิตร และถังที่สองมีปริมาตร 30 ลิตร

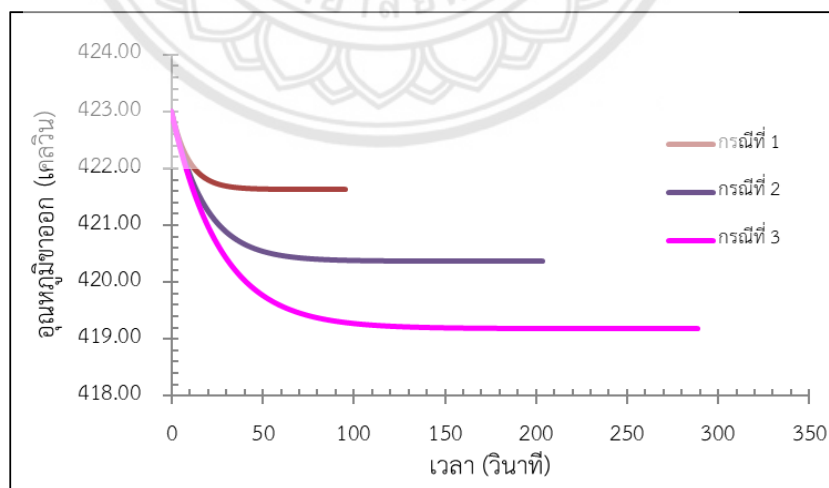
ผลการทดลองจากการรันข้อมูลในแมโครโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการรันข้อมูลในแมโครโปรแกรมทั้ง 3 กรณี

กรณีที่	ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ เคมีถังที่ 2 (ลิตร)	Conversion	อุณหภูมิขาออกของถัง ปฏิกรณ์เคมี (เคลวิน)	เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ สภาวะคงตัว (วินาที)
1	10	0.0151	421.63	95
2	20	0.0199	420.36	204
3	30	0.0244	419.18	289



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับค่า Conversion ในแต่ละกรณี



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับอุณหภูมิขาออกของสาร ในแต่ละกรณี

จากตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 เมื่อเรียงลำดับขนาดของถังปฏิกรณ์เคมีถึงที่ 2 จากน้อยไปมาก คือ 10 20 และ 30 ลิตร ตามลำดับ พบว่า เมื่อถังปฏิกรณ์เคมีถึงที่ 2 มีปริมาตรเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Conversion เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน คือ 0.0151 0.0199 และ 0.0244 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน เมื่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน คือ 95 204 และ 289 วินาที ตามลำดับ แต่อุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมีมีค่าลดลง คือ 421.63 420.36 และ 419.18 เคลวิน ตามลำดับ และจากการทดลองควรใช้กรณีของถังปฏิกรณ์เคมีถึงที่ 2 มีขนาดใหญ่กว่าถังปฏิกรณ์เคมีถึงที่ 1 เนื่องจากทำให้ค่า Conversion มีค่าเพิ่มขึ้น

4.2 ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 18.1

สภาวะการดำเนินการที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 18.1 คือ อุณหภูมิขาเข้าถังปฏิกรณ์เคมี 423 ถึง 523 เคลวิน ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีแต่ละถัง 1,250 ถึง 2,250 ลิตร และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 6 ถึง 42 ต่อ 1 ซึ่งมีสภาวะควบคุม คือ อัตราการไหลโดยโมลไตรกลีเซอไรด์ 1 กิโลโมลต่อวินาที อัตราการไหลเชิงปริมาตร 1 ลิตรต่อวินาที และความดันคงที่ 20 เมกะปาสคาล โดยถังปฏิกรณ์เคมีทั้ง 2 ถัง ใช้ปริมาตรเท่ากัน สาเหตุที่ใช้ตัวแปรที่สนใจเป็น อุณหภูมิของสารขาเข้า ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ เนื่องจากปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์เป็นกรณีศึกษาของงานวิจัยของผู้ที่เคยทำมาแล้ว โดยส่วนมากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะสนใจผลกระทบจากสองตัวแปรนี้ และอีกหนึ่งตัวแปรคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยา และโครงการในครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำ ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น จึงเลือกอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สนใจเพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งตัวแปร เนื่องจากปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เป็นแบบจำลองนี้ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและโครงการในครั้งนี้ศึกษาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤติ (Supercritical Condition) ที่ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าสภาวะการดำเนินการปกติได้ ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกอุณหภูมิขาเข้าเป็นตัวแปรที่สนใจ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม

4.2.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลที่ได้จากแมโครโปรแกรม

4.2.1.1 คอนเวอร์ชัน (Conversion)

จากการศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรด้วยการวิเคราะห์การถดถอย โดยอาศัยการออกแบบการทดลองด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง 20 การทดลอง ทำให้ได้รูปแบบสมการที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรเดี่ยวและตัวแปรพร้อม ดังสมการที่ 4.2

$$Y_1 = (-2.2800) + 0.008661X_1 + 0.000277X_2 + 0.003912X_3 - 0.000006X_1^2 - 0.000000X_2^2 - 0.000025X_3^2 - 0.000000X_1X_2 - 0.000003X_1X_3 - 0.000000X_2X_3 \quad (4.2)$$

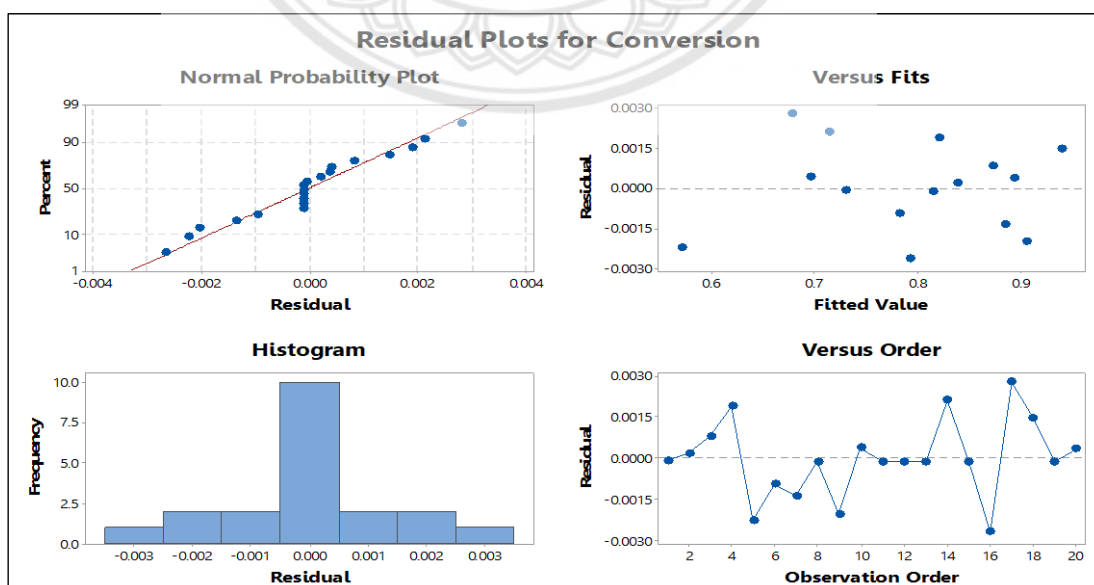
เมื่อ Y_1 คือ ค่า Conversion

X_1 คือ อุณหภูมิ มีค่าอยู่ในช่วง 473 ถึง 573 เคลวิน

X_2 คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี มีค่าอยู่ในช่วง 1,225 ถึง 2,250 ลิตร

X_3 คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ มีค่าอยู่ในช่วง 6 ถึง 42

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 4.8 ดังนี้



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองและค่า Conversion ที่ได้จากแมโครโปรแกรม

จากรูปที่ 4.8 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ 4 ประการ ดังนี้

ก. การวิเคราะห์การแจกแจงการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) จากรูปที่ 4.8 มีลักษณะเป็นจุดเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงและการกระจายตัวรวมกันที่บริเวณศูนย์ของข้อมูลมีความเหมาะสม

ข. การวิเคราะห์ความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) จากรูปที่ 4.6 มีค่าการกระจายตัวสูง

ค. การวิเคราะห์แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) จากรูปที่ 4.2 มีลักษณะคล้ายรูประฆังคว่ำ โดยมีจุดศูนย์กลางเท่ากับศูนย์ และถือว่าข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่ดี

ง. การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูล (Residual Versus The Order of Data) จากรูปที่ 4.8 เป็นค่าสุ่มที่มีลักษณะขึ้นลงไม่แน่นอน มีลักษณะการสุ่มที่เท่ากันในช่วง 11 ถึง 13 ดังนั้น ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่มีความเป็นอิสระ

4.2.1.2 อุดหนุนมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี

จากการศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรด้วยการวิเคราะห์การถดถอย โดยอาศัยการออกแบบการทดลองด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพินท์ผิวตอบสนอง 20 การทดลอง ทำให้ได้รูปแบบสมการที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรเดี่ยวและตัวแปรพร้อม ดังสมการที่ 4.3

$$Y_2 = (317.9) - 0.0462X_1 - 0.0193X_2 - 0.35X_3 + 0.000496X_1^2 - 0.00003X_2^2 + 0.00485X_3^2 - 0.000006X_1X_2 - 0.000115X_1X_3 + 0.000012X_2X_3 \quad (4.3)$$

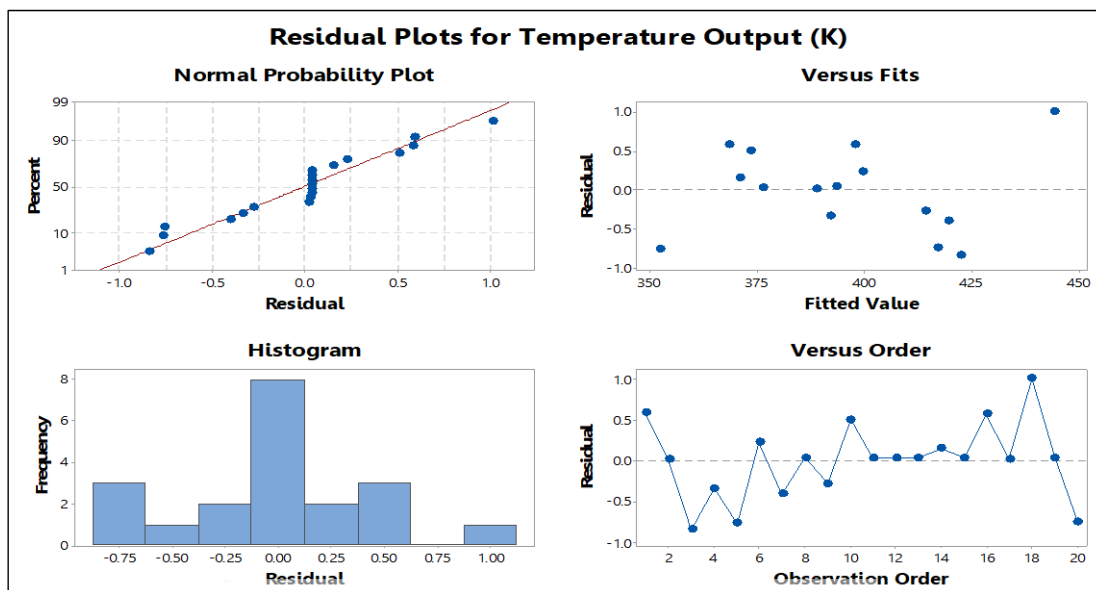
เมื่อ Y_2 คือ อุดหนุนมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี

X_1 คือ อุณหภูมิ มีค่าอยู่ในช่วง 473 ถึง 573 เคลวิน

X_2 คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี มีค่าอยู่ในช่วง 1,225 ถึง 2,250 ลิตร

X_3 คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ มีค่าอยู่ในช่วง 6 ถึง 42 ต่อ 1

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.9 ดังนี้



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองและค่าอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีที่ได้จากแมโครโปรแกรม

จากรูปที่ 4.9 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ 4 ประการ ดังนี้

ก. การวิเคราะห์การแจกแจงการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) จากรูปที่ 4.9 มีลักษณะเป็นจุดเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงและการกระจายตัวรวมกันที่บริเวณศูนย์ของข้อมูลมีความเหมาะสม

ข. การวิเคราะห์ความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) จากรูปที่ 4.9 มีค่าการกระจายตัวสูง

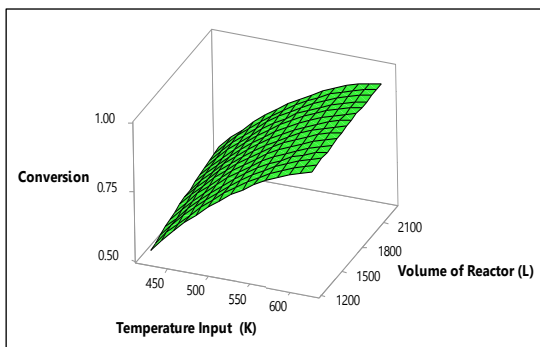
ค. การวิเคราะห์แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) จากรูปที่ 4.3 มีลักษณะคล้ายรูปประฆังคว่ำ โดยมีจุดศูนย์กลางเท่ากับศูนย์ และถือว่าข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่ดี

ง. การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูล (Residual Versus The Order of Data) จากรูปที่ 4.7 เป็นค่าสุ่มที่มีลักษณะขึ้นลงไม่แน่นอน มีลักษณะสุ่มเท่ากันที่ช่วง 11 ถึง 13 และ 15 ดังนั้น ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่มีความเป็นอิสระ

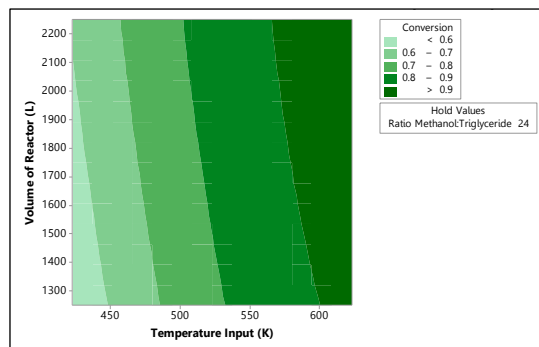
4.2.2 การวิเคราะห์กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนอง

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของค่า ที่มีผลจากการเปลี่ยนปัจจัยทั้ง 3 โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรต์ แสดงดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11

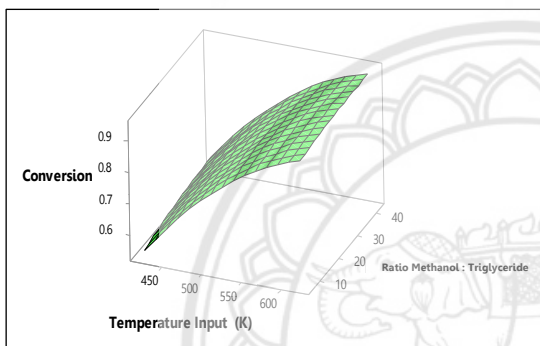
4.2.2.1 คอนเวอร์ชัน (Conversion)



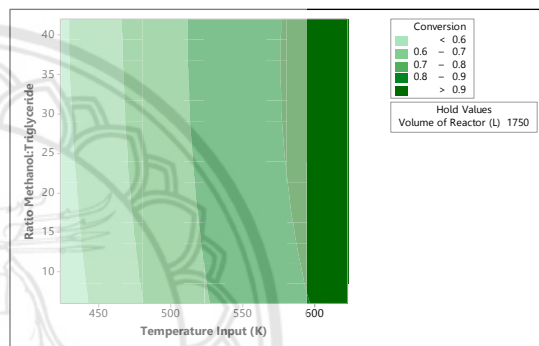
(ก)



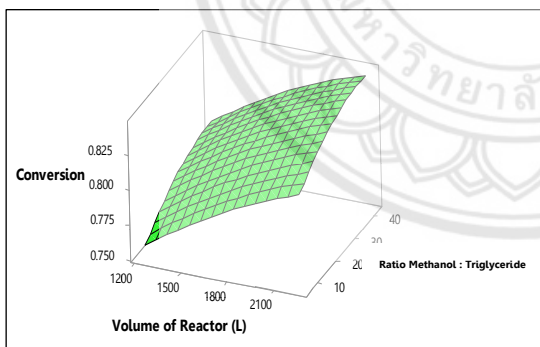
(ข)



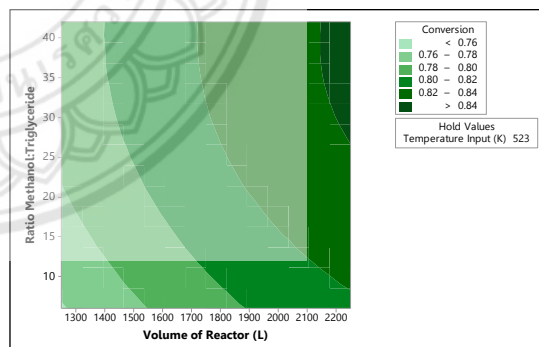
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.10 (ก-ข) กราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของ Conversion กับอุณหภูมิขาเข้าถึงปฏิกรณ์เคมีและปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี, (ค-ง) อุณหภูมิขาเข้าถึงปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับไตรกลีเซอไรด์ และ (จ-ฉ) ปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์

จากรูปที่ 4.10 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

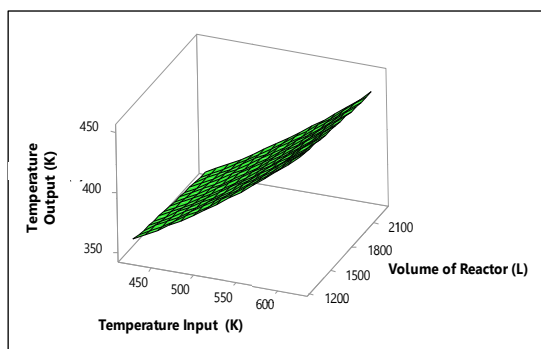
ก. รูป (ก-ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีที่มีผลต่อค่า Conversion โดยมีขอบเขตของปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมีอยู่ในช่วง 1,250 ถึง 2,250 ลิตร และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 423 ถึง 523 เคลวิน พบว่า อุณหภูมิเข้ามีนัยสำคัญต่อค่า Conversion แต่ผลกระทบจากปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีไม่สามารถบอกได้ว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ เนื่องจากอุณหภูมิเข้าส่งผลต่อค่า Conversion มากกว่าปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี ซึ่งได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อ 4.2.1.1

ข. รูป (ค-ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ที่ส่งผลต่อค่า Conversion โดยมีขอบเขตของอัตราส่วนโดยโมลอยู่ในช่วง 6 ถึง 42 ต่อ 1 พบว่า อัตราส่วนโดยโมลไม่สามารถบอกได้ว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ เนื่องจากอุณหภูมิเข้าส่งผลต่อค่า Conversion มากกว่าผลจากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์

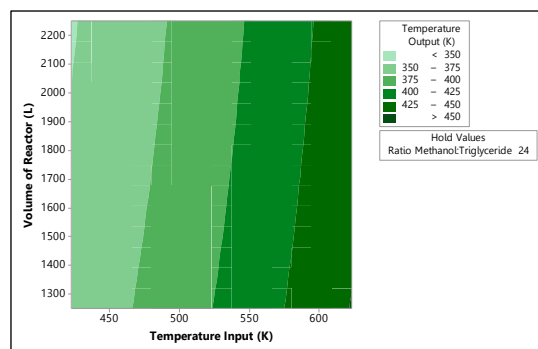
ค. รูป (ฉ-จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์และปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีที่ส่งผลต่อค่า Conversion พบว่า มีนัยสำคัญต่อค่า Conversion ด้วยกันทั้งสองตัวแปร



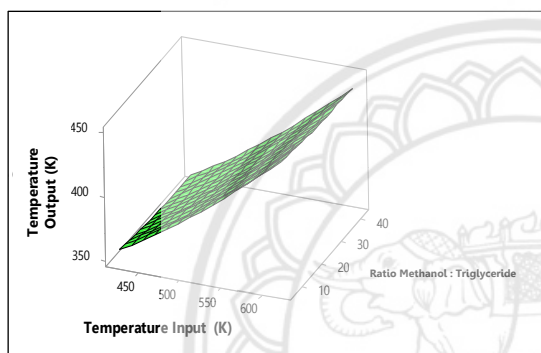
4.2.2.2 อุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี



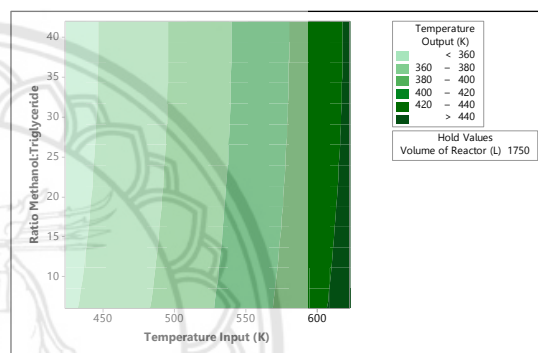
(ก)



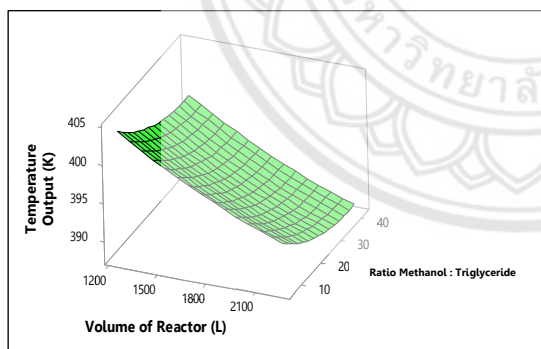
(ข)



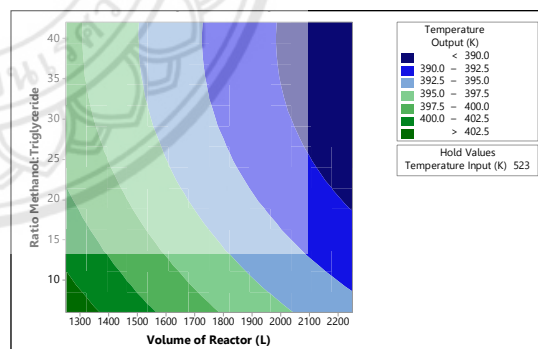
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.11 (ก-ข) กราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีกับอุณหภูมิขาเข้าถังปฏิกรณ์เคมีและปริมาตรถังปฏิกรณ์เคมี, (ค-ง) อุณหภูมิขาเข้าถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ และ (จ-ฉ) ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์

จากรูปที่ 4.11 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

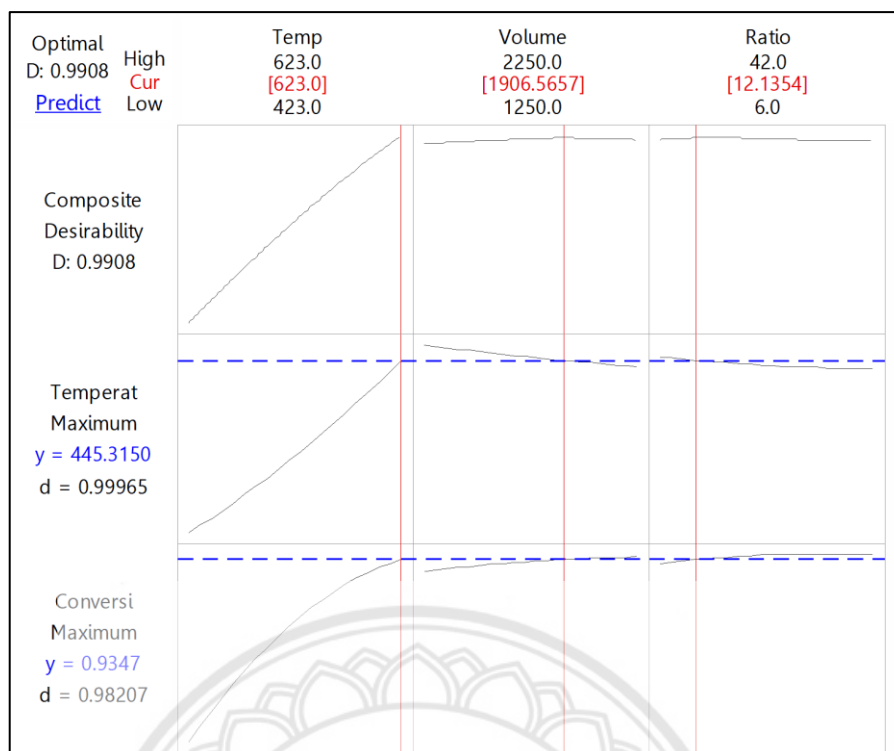
ก.รูป (ก-ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิขาออก โดยมีขอบเขตของปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีอยู่ในช่วงระหว่าง 1,250 ถึง 2,250 ลิตร และอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 423 ถึง 523 เคลวิน พบว่า อุณหภูมิขาเข้าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีอย่างมาก ทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีมีนัยสำคัญหรือไม่

ข.รูป (ค-ง) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิขาออก โดยมีขอบเขตของค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์อยู่ในช่วง 6 ถึง 42 ต่อ 1 พบว่า ไม่สามารถบอกได้ว่ามีนัยสำคัญหรือไม่

ค. รูป (ฉ-จ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์และปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีที่ส่งผลต่ออุณหภูมิขาออก พบว่า มีนัยสำคัญต่อค่าอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีด้วยกันทั้งสองตัวแปร

4.2.3 การหาสถานะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีที่ได้ค่า Conversion มีค่ามากที่สุด สำหรับขอบเขตที่กำหนด

จากรูปแบบของสมการที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองพบว่า ทั้งสามปัจจัย คือ อุณหภูมิ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ ไตรกลีเซอไรด์ ส่งผลกระทบบต่อค่า Conversion อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า R-sq เท่ากับ ร้อยละ 99.95 และ R-sq (adj) เท่ากับ ร้อยละ 99.91 และการหาสถานะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีได้ค่า Conversion ที่มีค่ามากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.12

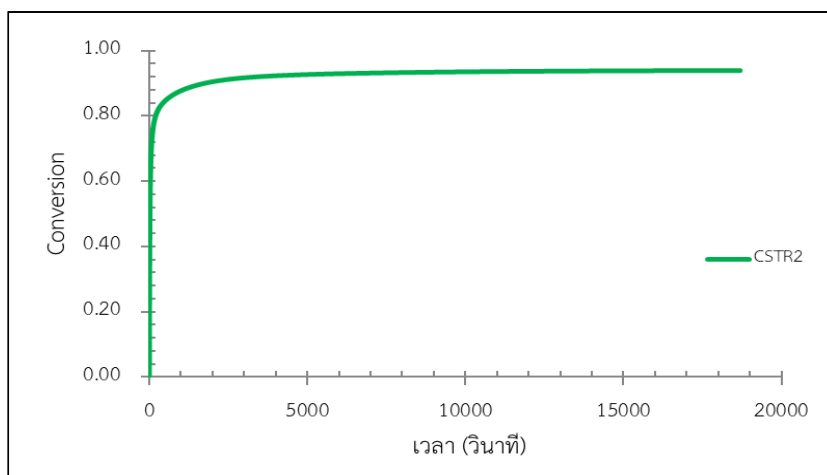


รูปที่ 4.12 สภาวะที่เหมาะสมที่สุด สำหรับค่า Conversion ที่มากที่สุด

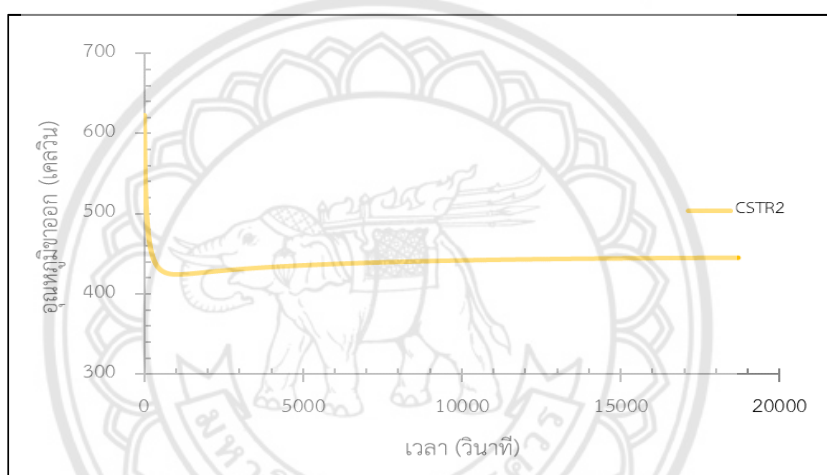
การหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมี เพื่อให้ได้ค่า Conversion มีค่าสูงสุด ซึ่งสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 18.1 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า การหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีที่ทำให้ได้ค่า Conversion สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.9347 และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี มีค่าเท่ากับ 445.315 เคลวิน ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 623 เคลวิน ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี 1,906.5657 ลิตร และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 12.1354 ต่อ 1

4.3 ผลการรันข้อมูลในโปรแกรมการจำลองการออกแบบทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

จากการเขียนโปรแกรมการออกแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยใช้แมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Application (VBA) บนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.6



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.13 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (วินาที) กับ Conversion (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (วินาที) กับ อุณหภูมิ (เคลวิน) ที่สภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Minitab

18.1

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองจากการรันข้อมูลโดยแมโครโปรแกรม จากการนำสภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Minitab 18.1

ตั้งปฏิกรณ์เคมี	Conversion	อุณหภูมิขาออกของตั้งปฏิกรณ์เคมี (เคลวิน)	เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที)	เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (ชั่วโมง)
CSTR1	0.7716	438.78	5,862	1.6
CSTR2	0.9389	445.24	18,692	5.2

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.13 เมื่อนำข้อมูลจากการหาสถานะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมี ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลางในโปรแกรม Minitab 18.1 จากการรันข้อมูลใน โปรแกรมการจำลองการออกแบบทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในแมโครโปรแกรมบนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล ได้ค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมี ณ สถานะคงตัว เท่ากับ 0.9389 และ 445.24 เคลวิน ตามลำดับ และค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Conversion และอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์เคมี ณ สถานะคงตัว เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง ในโปรแกรม Minitab 18.1 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.45 และ ร้อยละ 0.02 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองโครงการในครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำ ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้สารตั้งต้น คือ ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอล เพื่อให้ได้ค่า Conversion มากที่สุดในขอบเขตของสภาวะที่ใช้ในการทดลอง โดยปัจจัยและขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ที่ 473 ถึง 573 เคลวิน ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีแต่ละถัง ที่ 1,250 ถึง 2,250 ลิตร และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ ที่ 6 ถึง 42 ต่อ 1 และศึกษาการเขียนโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยใช้แมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Application บนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล ซึ่งสามารถสรุปผลโครงการตามวัตถุประสงค์ได้ ดังนี้

5.1.1 ศึกษาการสร้างโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

5.1.1.1 จากการศึกษาการเขียนโปรแกรมการออกแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยใช้แมโครโปรแกรมร่วมกับภาษา Visual Basic for Application บนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากผลการทดลอง โดยการรันกฎอัตราด้วยแมโครโปรแกรม เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของโปรแกรมที่จำลองขึ้นกับกฎอัตราจากแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015) พบว่าเส้นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไบโอดีเซลกับเวลาที่รันโดยแมโครโปรแกรมซ้อนทับกันพอดีกับแหล่งอ้างอิง (Farobie and Matsumura, 2015) ดังนั้น สามารถวิเคราะห์ได้ว่าสมการกฎอัตราที่ใช้ดำเนินการในแมโครโปรแกรมเพื่อเขียนโปรแกรมการจำลองการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีความถูกต้อง

5.1.1.2 จากการรันแมโครโปรแกรมและการเปรียบเทียบกันที่สภาวะต่างๆ สรุปผลได้ ดังนี้

ก. ตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า Conversion เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ อุณหภูมิขาเข้าถังปฏิกรณ์เคมี จำนวนถังปฏิกรณ์ที่ใช้ดำเนินการ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ และ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ ตามลำดับ

ข. ตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีที่เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ อุณหภูมิขาเข้าถังปฏิกรณ์เคมี ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ จำนวนถังปฏิกรณ์ที่ใช้ดำเนินการ และ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ ตามลำดับ

ค. ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ แต่จะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีเพิ่มขึ้น

ง. ในกรณีที่เปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์เคมีแบบถังเดียว (CSTR1) กับถังปฏิกรณ์เคมีแบบ 2 ถัง (CSTR2) เมื่อปริมาตรรวมทั้ง 2 ถังเท่ากัน คือ 20 ลิตร พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่คงตัวของค่า Conversion และ อุณหภูมิขาออกจากถังปฏิกรณ์เคมี มีค่าใกล้เคียง คือ 203 วินาที และ 111 วินาที ตามลำดับ

จ. ค่า Conversion มีค่ามากที่สุด เมื่อถังปฏิกรณ์เคมีถังที่ 2 (CSTR2) มีปริมาตรมากกว่าถังปฏิกรณ์เคมีถังที่ 1 (CSTR1)

5.1.2 ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม โดยใช้โปรแกรม Minitab 18.1 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองและออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง จากผลการทดลอง สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

5.1.2.1 จากการศึกษาสมการทำนายค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งค่า R-sq เท่ากับ ร้อยละ 99.97 และร้อยละ 99.95 ตามลำดับ และ R-sq (adj) เท่ากับ ร้อยละ 99.95 และร้อยละ 99.91 ตามลำดับ จากค่าดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือ ดังนั้น ปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิขาเข้าถังปฏิกรณ์ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์มีผลต่อค่า Conversion และ อุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมี

5.1.2.2 จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองด้วยวิธีส่วนประสมกลางในโปรแกรม Minitab 18.1 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม

สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่ให้ค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกถึงปฏิกรณ์เคมีสูงที่สุดที่สภาวะอุณหภูมิ เท่ากับ 623 เคลวิน ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมีแต่ละถัง เท่ากับ 1,906.5657 ลิตร อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ เท่ากับ 12.1354 จะได้ค่า Conversion และอุณหภูมิขาออกถึงปฏิกรณ์เคมี เท่ากับ 0.9347 และ 445.315 เคลวิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 หากต้องการความแม่นยำและผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ ควรเพิ่มจำนวนตัวแปรในการวิเคราะห์มากขึ้น เช่น ขนาดของถังปฏิกรณ์เคมีที่ไม่เท่ากันและจำนวนของถังปฏิกรณ์เคมีที่ต่อแบบอนุกรม เป็นต้น

5.2.2 โครงการนี้ ถือว่ามีความซับซ้อนไม่มาก เนื่องจากสภาวะที่ควบคุมค่อนข้างมากและโครงการที่ทำการศึกษาคือเป็นขั้นเริ่มต้นที่จัดทำภายในเวลาที่จำกัด หากต้องการแบบจำลองให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ควรตัดสภาวะคงตัวบางสภาวะออก เช่น ไม่คิดการเสื่อมสลายทางความร้อนของสารตามธรรมชาติที่ใช้ในปฏิกิริยาหรือไม่คิดผลของปฏิกิริยาข้างเคียง เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

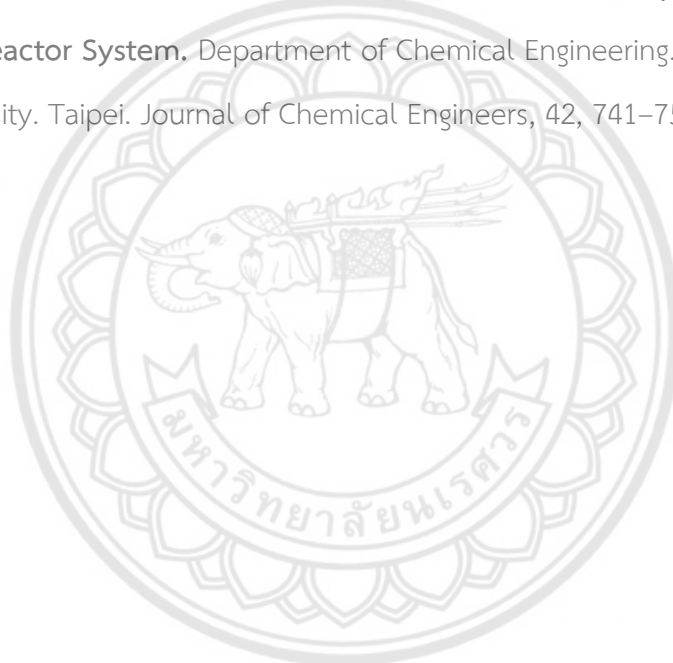
- กนกกาญจน์ ประทักษ์กุลวงศา, ธนาวรรณ ต่อตระกูล, นวตล เพ็ชรวัฒนา, พรศักดิ์ กางทา และอลิษา ไส้ประเสริฐ. (2554). **จลนศาสตร์วิศวกรรมเคมี และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ (Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design)**. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ.
- กนกวรรณ มีสัมฤทธิ์ และอุทุมพร วิชาติ. (2553). **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกรดจากน้ำมันถั่วเหลือง (Biodiesel Production from Soy Bean Acid Oil)**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ. กรุงเทพฯ.
- เกตน์ศิริ ทิพนตร และศิริประภา คำแพงทอง. (2558). **วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม**. สืบค้นเมื่อ 1 กันยายน 2561 จาก <http://ketsirithipnet.blogspot.com/>
- จิราวุธ วารินทร์. (2561). **สร้างระบบงาน เพื่อจัดการข้อมูลด้วย Excel VBA (ฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 4)**. กรุงเทพฯ : ชิมพลิฟาย
- ชไลเวท พิพัฒพรณวงศ์. (2557). **Macro Excel คืออะไร**. สืบค้นเมื่อ 22 สิงหาคม 2561 จาก <https://www.9experttraining.com/articles/microsoft-excel-macro-คืออะไร>
- ธวัชพล บุญมา, ธัญวัชร ภูจ้อย, รัชชานนท์ ศิริยงค์ และวศิน เอี่ยมอ่อนตา. (2555). **หลักการของ เลอซาเตอริเอ (สมดุลเคมี)**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน 2562 จาก <https://enchemcom2c.wordpress.com>
- พุดิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์. (2555). **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึง บนมอนต์มอริลโลไนต์**. ปริญญาานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต. สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ.
- รุ่งทิพย์ ชัยเดช. (2557). **การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันทอดที่ใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอก**. ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- วรรณรัตน์ กลกิจ และปิยาภรณ์ วงษ์เย็น. (2553). **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศ (Biodiesel Production from Vernicia Montana Louroil)**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ. กรุงเทพฯ.

- สันติ พุ่มกระจ่าง. (2552). **การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดตั้งหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Statistical Analysis for Dual Response Surface of Hard Disk Drive Head Alignment Process)**. ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- Aashish Gaurav, Mateus Lenz Leite, Flora T Ng & Garry L Rempel. (2013). **Transesterification of Triglyceride to Fatty Acid Alkyl Esters (Biodiesel): Comparison of Utility Requirements and Capital Costs between Reaction Separation and Catalytic Distillation Configurations**. Department of Chemical Engineering. University of Waterloo. Canada. *Energy Fuels*, 27, 6,847-6,857.
- Administrator. (2550). **ไบโอดีเซล คืออะไร**. สืบค้นเมื่อ 1 กันยายน 2561, จาก <http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/index.php>
- George Anastopoulous, Ypatia Zannikou, Stamoulis Stournas & Stamatis Kalligeros. (2009). **Transesterification of Vegetable Oils with Ethanol and Characterization of The Key Fuel Properties of Ethyl Esters**. School of Chemical Engineering. National Technical University of Athens. *Grieg*, 2, 362-376.
- H. Scott Fogler. (2016). **Elements of Chemical Reaction Engineering**. United States of America: Prentice Hall International.
- Keera, El Sabagh, & Taman A. (2018). **Castor Oil Biodiesel Production and Optimization**. *Egypt, Egyptian Journal of Petroleum*, 27, 979-984.
- Kevin Dunn. (2010). **Process Improvement Using Data**. Retrieved 2 April 2019 from <https://learnche.org/pid/design-analysis-experiments>
- Khoopanumas. (2560). **Excel คืออะไร**. สืบค้นเมื่อ 22 สิงหาคม 2561, จาก <https://sites.google.com/site/kroopanumas/bth-reiyn-microsoft-excel/excel-khux-xari>
- K. Vivek Raja. (2015). **Optimization of Biodiesel Production Using Aspen Plus**. Department of Chemical Engineering. National Institute of Technology Rourkela. India
- Obie Farobie & Yukihiro Matsumura. (2015). **General Reaction Rate Equation for**

Biodiesel Production In Supercritical Methanol. Division of Energy and Environmental Engineering. Institute of Engineering, Hiroshima University. Japan, *Procedia Environmental Sciences Journal*, 28, 204-213.

Sérgio Roberto Montoro, Simone de Fátima Medeiros, Amilton Martins Santos, Messias Borges Silva & Marli Luiza Tebaldi. (2013). **Application of 2K Experimental Design and Response Surface Methodology In The Optimization of The Molar Mass Reduction of Poly (PHBV).** Unites Kingdom: Intechopen Limited.

Yin Heng Shen, Jian Kai Cheng, Jeffrey D. Ward & Cheng Ching Yu. (2011). **Design and Control of Biodiesel Production Processes with Phase Split and Recycle In The Reactor System.** Department of Chemical Engineering. National Taiwan University. Taipei. *Journal of Chemical Engineers*, 42, 741–750.





ภาคผนวก ก

คู่มือการแนะนำการใช้งานของโปรแกรม

มหาวิทยาลัยสุรินทร์

ก. คู่มือแนะนำการใช้โปรแกรม

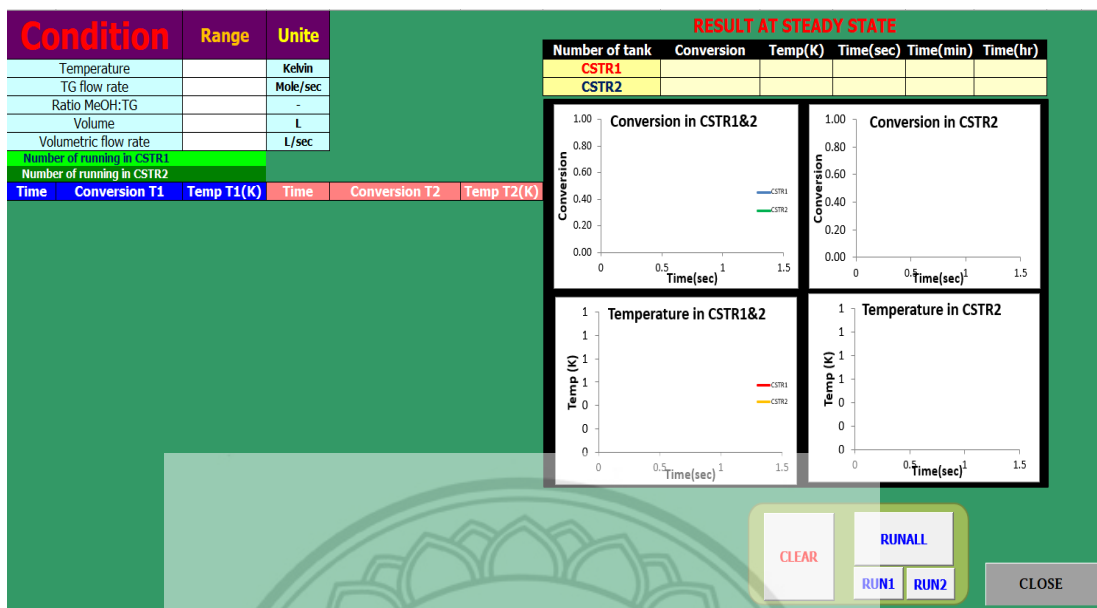
การสร้างคู่มือการใช้งานของโปรแกรมที่สร้างขึ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่เป็นอนุกรม สำหรับกระบวนการไบโอดีเซล โดยแมโครโปรแกรมในไมโครซอฟท์เอกซ์เซล ทางคณะผู้จัดทำได้จัดทำขึ้น เพื่อให้ผู้ใช้งานเข้าใช้โปรแกรมได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

หน้าเริ่มต้นโปรแกรม เมื่อผู้ใช้งานเปิดโปรแกรมขึ้นมาจะแสดงหน้าต่างเริ่มต้นการใช้งาน ดังรูปที่ ก.1



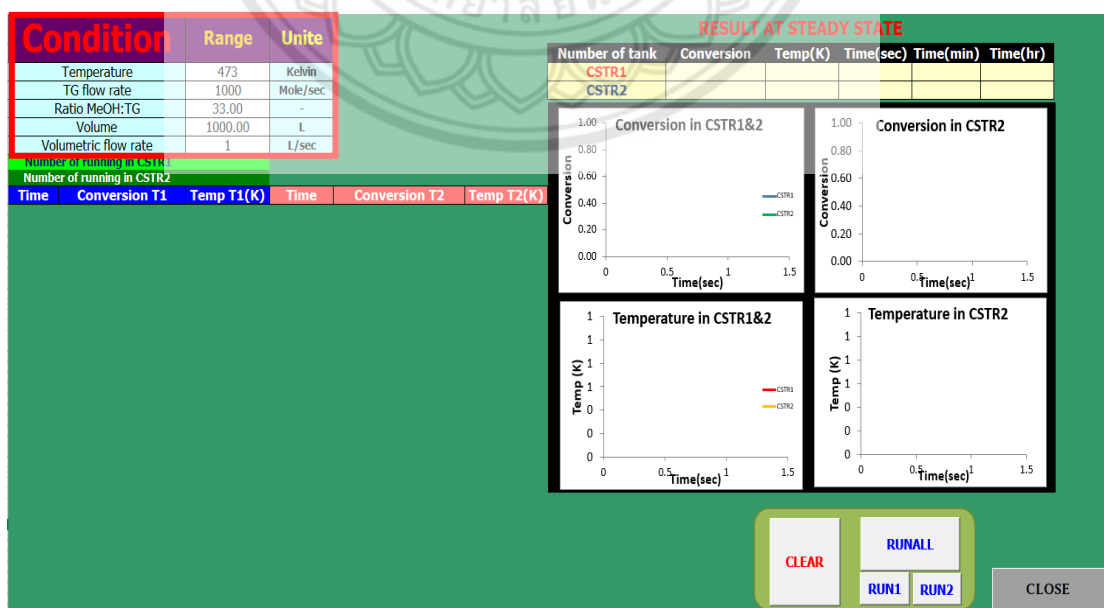
รูปที่ ก.1 หน้าแรกของโปรแกรมการหาสภาวะที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง

เมื่อคลิกที่ปุ่ม Enter จะเข้าไปสู่หน้าต่างเริ่มต้นการใช้งานบนโปรแกรม ดังรูปที่ ก.2



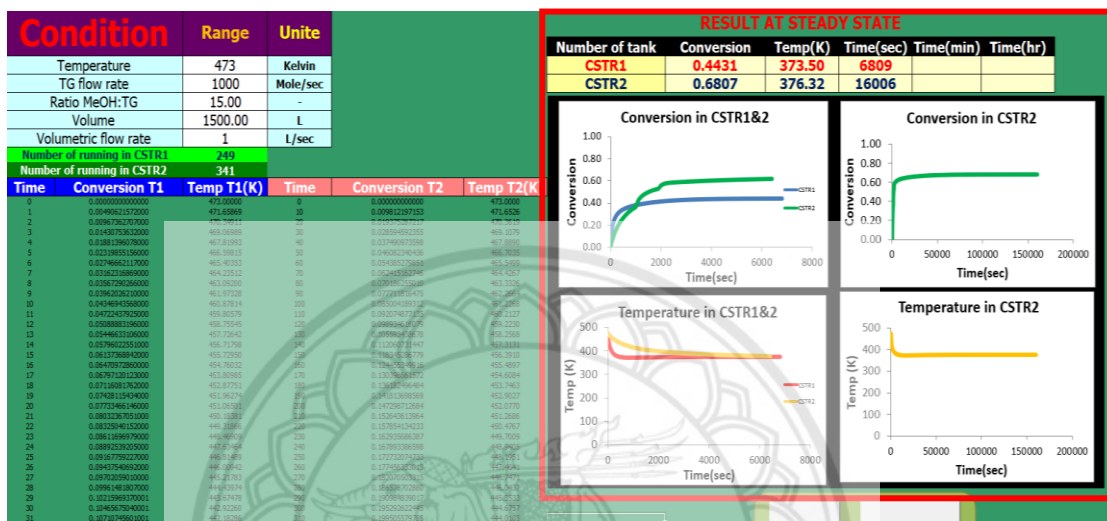
รูปที่ ก.2 หน้าต่างเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม

หลังจากนั้น ป้อนข้อมูลสถานะที่ต้องการและคลิกที่ปุ่ม Run โดยสามารถเลือกได้ว่าจะรันข้อมูลทั้งสองถังในครั้งเดียวหรือรันข้อมูลทีละถัง นอกจากนี้ยังสามารถกดปุ่ม Clear เพื่อลบข้อมูลที่รันข้อมูลค้างไว้



รูปที่ ก.3 หน้าต่างสถานะการดำเนินงาน

หลังจากทำการป้อนข้อมูลต่างๆ ครบแล้ว โปรแกรมจะรันข้อมูล และแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็น Conversion, อุณหภูมิ (Temperature) และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) ในถังปฏิกรณ์ CSTR1 และ CSTR2 นอกจากนี้ โปรแกรมยังแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นกราฟข้อมูล เช่น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัว (วินาที) กับ Conversion ของถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง



รูปที่ ก.4 หน้าต่างผลลัพธ์จากการรันโปรแกรม

นอกจากนี้ ยังมีฟังก์ชันเพิ่มเติมจากหน้าแรกของโปรแกรม สามารถกดปุ่ม About Us ดูข้อมูลของคณะผู้จัดทำ และปุ่ม What CSTR? ดูความหมายของ CSTR คืออะไร แสดงดังรูปที่ ก.5 และรูป ก.6



Mr. Kittapat Sooknuan
Years 4 in chemical Engineering
Naresuan University
Email: gingnonging@hotmail.com



Miss Kotchapan Kongphan
Years 4 in chemical Engineering
Naresuan University
Email: sk_toei10@hotmail.com

PROJECT ADVISOR:
AJAN Dr. Suttipong Songprawat (Ph.D.)
During my high school life, I studied at Triam Udom Suksa School, which is top one high school in Thailand and I was the Physics Olympic student in Thailand. I graduated my Bachelor Degree with the 1st Class Honor (Summa cum laude) with "Gold Honor Medal" in Chemical Engineering field and Master Degree from Chulalongkorn University. Moreover, I graduated another Master Degree and Ph.D. Degree with GPA 4.00 and 2 Honor Awards in Chemical Engineering from Illinois Institute of Technology (IIT), Chicago IL USA.

Back

รูปที่ ก.5 หน้าต่าง About us

Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)

A continuous stirred tank reactor (CSTR) is a batch reactor equipped with an impeller or other mixing device to provide efficient mixing. In chemical engineering the name CSTR is often used to refer to an idealised agitated tank reactor used to model operation variables required to attain a specified output.

In flow chemistry, a continuous stirred tank reactor (CSTR) equipped with features to continuously feed and exhaust reactants is an example of a mechanically mixed flow reactor.

Flow Chemistry and the CSTR

For practical use in flow chemistry a single CSTR suffers from severe back mixing. It also gives extremely poor control residence time. A wide range of residence times is often referred to as a broad residence time distribution (RTD, see below). Each molecule of reagent does not necessarily flow through the reactor in the same time. The back mixing and broad RTD combine to limit the performance of a single CSTR. For most reactions the back mixing and variable residence time have a negative impact on product yield, selectivity and space-yield for the reactor.

For flow chemistry continuous stirred tank reactors are often used in cascades of 3 or 4 CSTRs. By adopting this configuration of multiple CSTRs the residence time control can be much improved and the back mixing significantly reduced.

[Back](#)

รูปที่ ก.6 หน้าต่าง What CSTR?

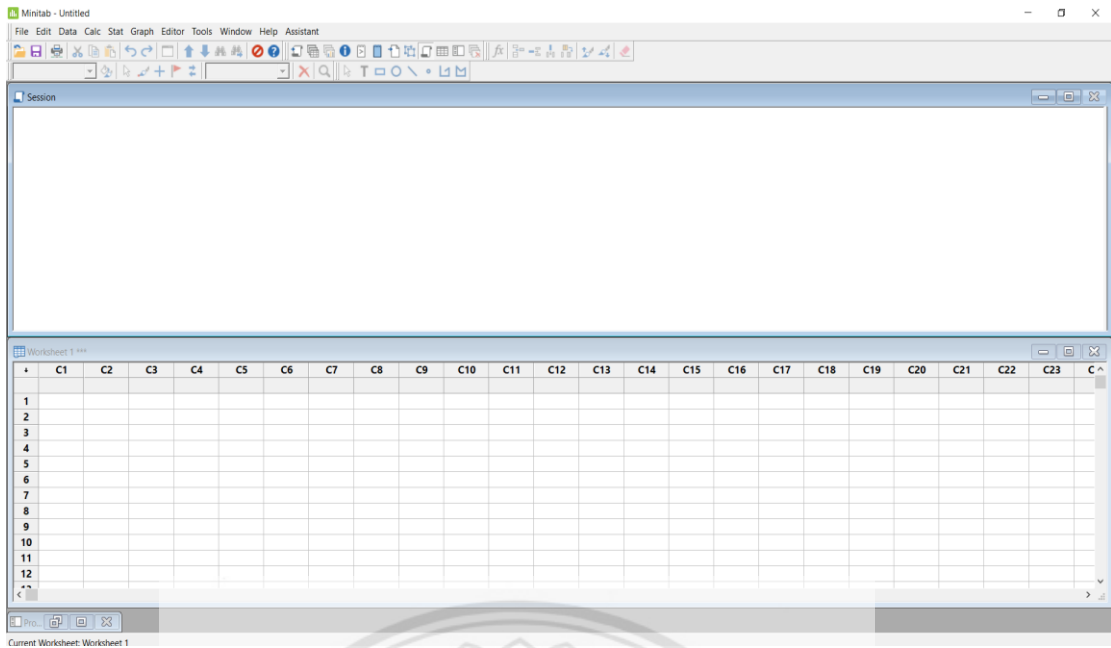




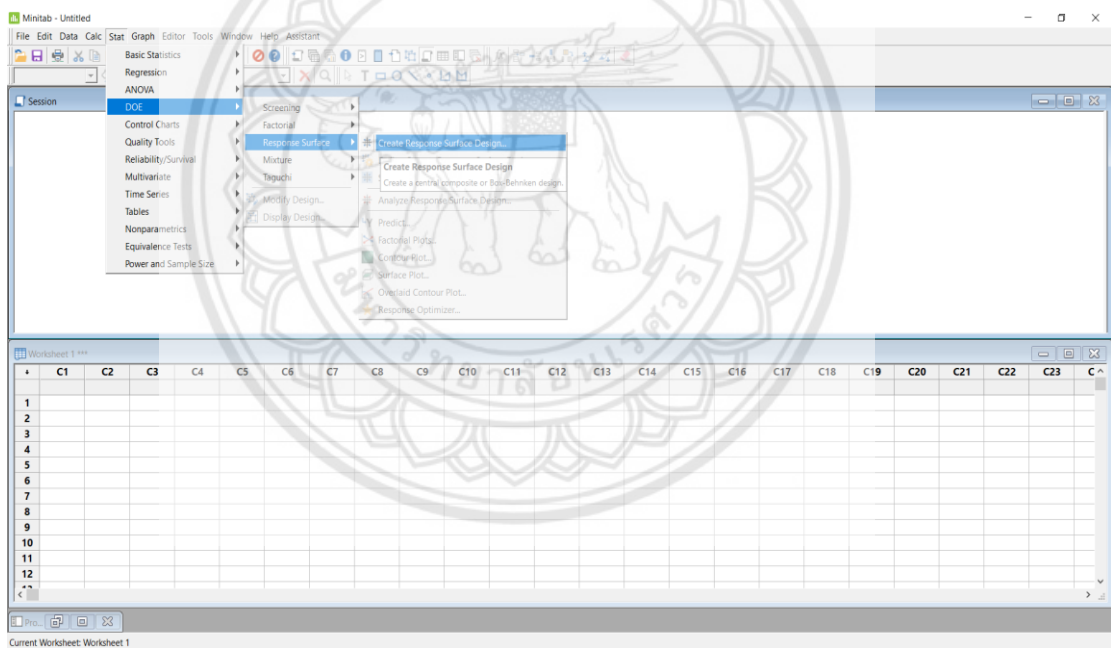
ภาคผนวก ข

คู่มือการแนะนำการใช้งานของโปรแกรม Minitab 18.1

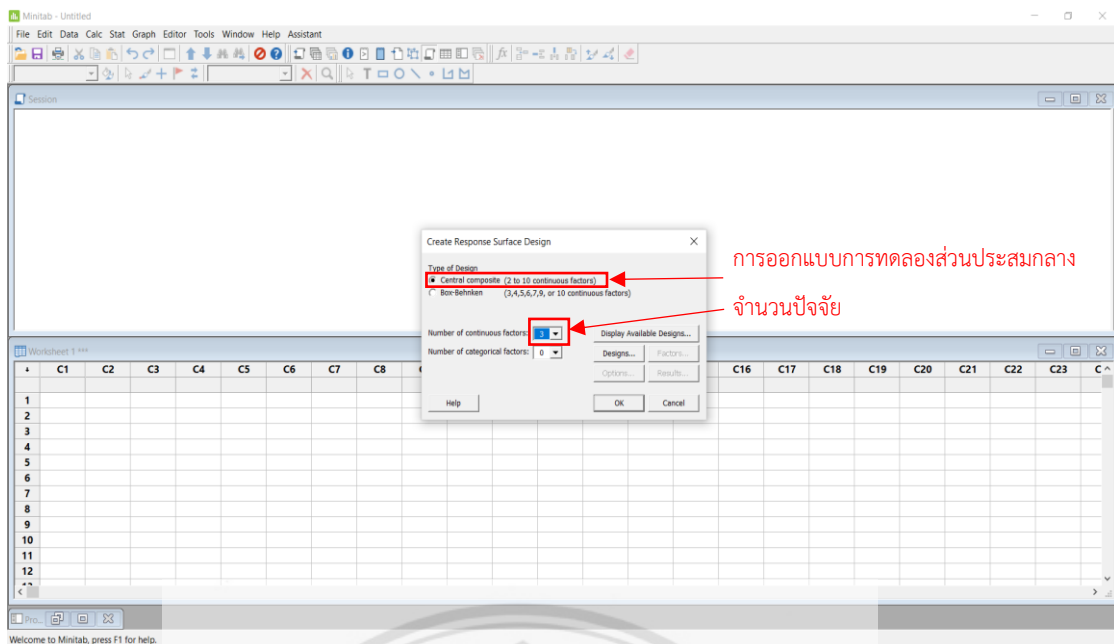
มหาวิทยาลัยพระนคร



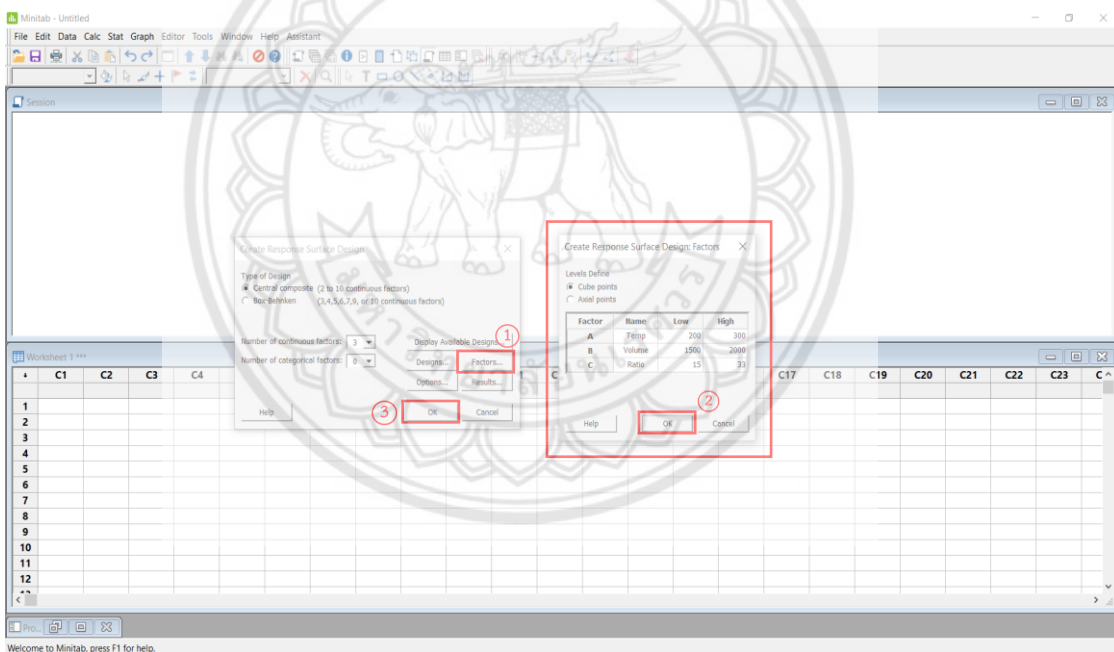
รูปที่ ข.1 หน้าแรกของโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (Minitab 18.1)



รูปที่ ข.2 วิธีการเข้าสู่การสร้างพื้นที่ผิวตอบสนอง



รูปที่ ข.3 การกำหนดจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษา โดยใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD)



รูปที่ ข.4 กำหนดระดับของแต่ละปัจจัย

Minitab - SERIES NEW.MPJ

File Edit Data Calc Stat Graph Editor Tools Window Help Assistant

Session

Central Composite Design

Design Summary

Factors: 3 Replicates: 1
 Base runs: 20 Total runs: 20
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

$\alpha = 2$
 Two-level factorial: Full factorial

Point Types

Cube points: 8
 Center points in cube: 6
 Axial points: 6
 Center points in axial: 0

Worksheet 2 ***

StdOrder	RunOrder	PTType	Blocks	Temp	Volume	Ratio	Conversion Temperature	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	
1	7	1	1	1	473	2000	33															
2	12	2	-1	1	523	2250	24															
3	2	3	1	1	573	1500	15															
4	14	4	-1	1	523	1750	42															
5	9	5	-1	1	423	1750	24															
6	11	6	-1	1	523	1250	24															
7	6	7	1	1	573	1500	33															
8	17	8	0	1	523	1750	24															
9	8	9	1	1	573	2000	33															
10	5	10	1	1	473	1500	33															
11	16	11	0	1	523	1750	24															
12	19	12	0	1	523	1750	24															

Current Worksheet: Worksheet 2

รูปที่ ข.5 ผลการออกแบบสภาวะในการทดลอง

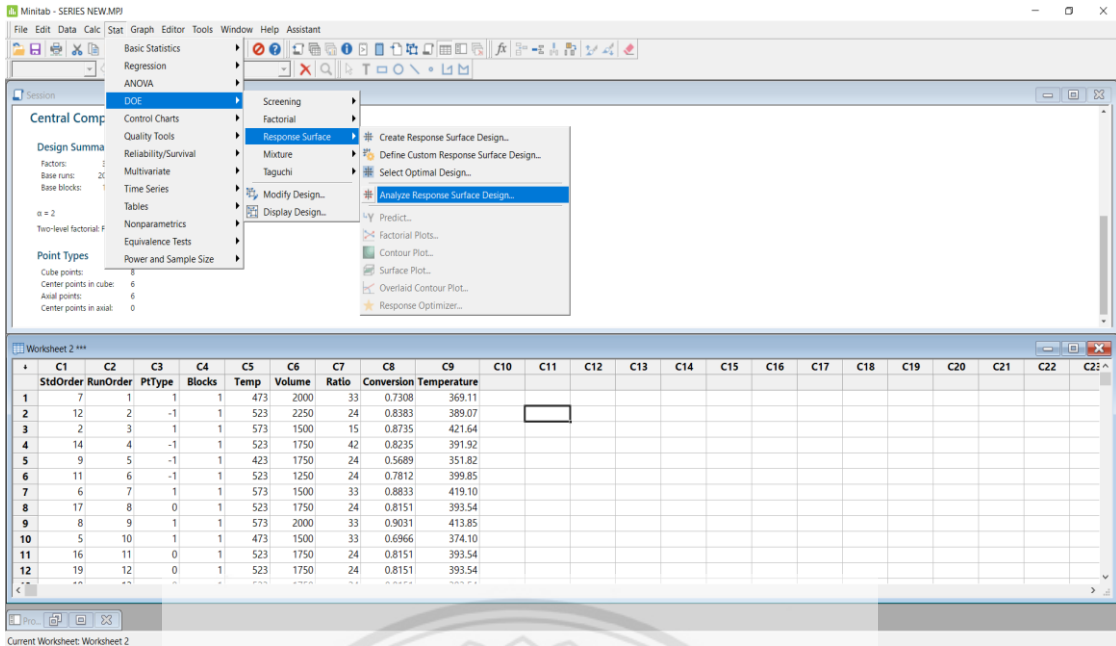
Minitab - SERIES NEW.MPJ - [Worksheet 2 ***]

File Edit Data Calc Stat Graph Editor Tools Window Help Assistant

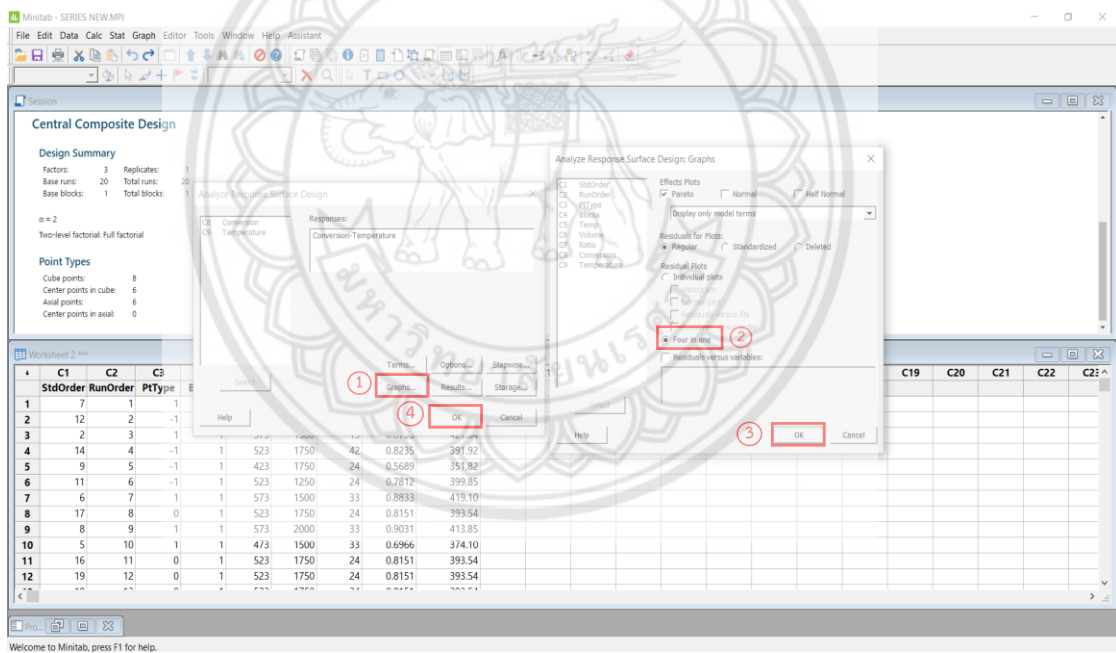
StdOrder	RunOrder	PTType	Blocks	Temp	Volume	Ratio	Conversion Temperature	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	
1	7	1	1	1	473	2000	33	0.7308	369.11													
2	12	2	-1	1	523	2250	24	0.6383	389.07													
3	2	3	1	1	573	1500	15	0.8735	421.64													
4	14	4	-1	1	523	1750	42	0.8235	391.92													
5	9	5	-1	1	423	1750	24	0.5689	351.82													
6	11	6	-1	1	523	1250	24	0.7812	399.85													
7	6	7	1	1	573	1500	33	0.8833	419.10													
8	17	8	0	1	523	1750	24	0.8151	393.54													
9	8	9	1	1	573	2000	33	0.9081	413.85													
10	5	10	1	1	473	1500	33	0.6966	374.10													
11	16	11	0	1	523	1750	24	0.8151	393.54													
12	19	12	0	1	523	1750	24	0.8151	393.54													
13	18	13	0	1	523	1750	24	0.8151	393.54													
14	3	14	1	1	473	2000	15	0.7159	371.33													
15	20	15	0	1	523	1750	24	0.8151	393.54													
16	13	16	-1	1	523	1750	6	0.7896	398.47													
17	1	17	-1	1	473	1500	15	0.6811	376.39													
18	10	18	-1	1	423	1750	24	0.9414	249.35													
19	15	19	0	1	523	1750	24	0.8151	393.54													
20	4	20	1	1	573	2000	15	0.8344	416.24													

Current Worksheet: Worksheet 2

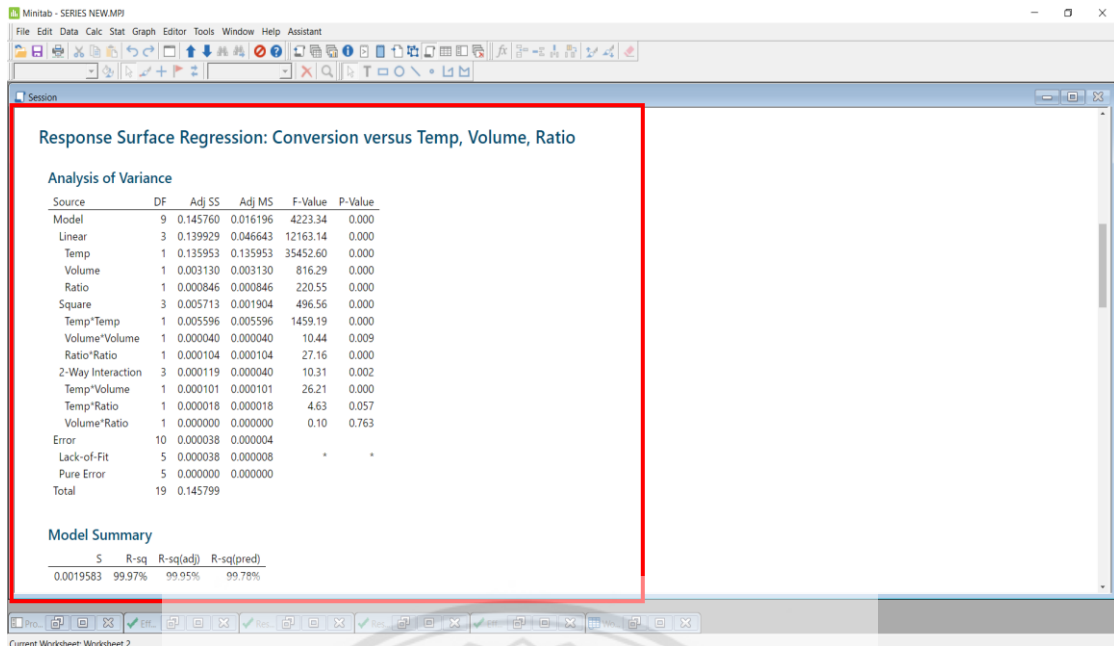
รูปที่ ข.6 ผลการทดลองที่ได้จากแต่ละสภาวะในการทดลองบนไมโครซอฟท์เอกซ์เซล



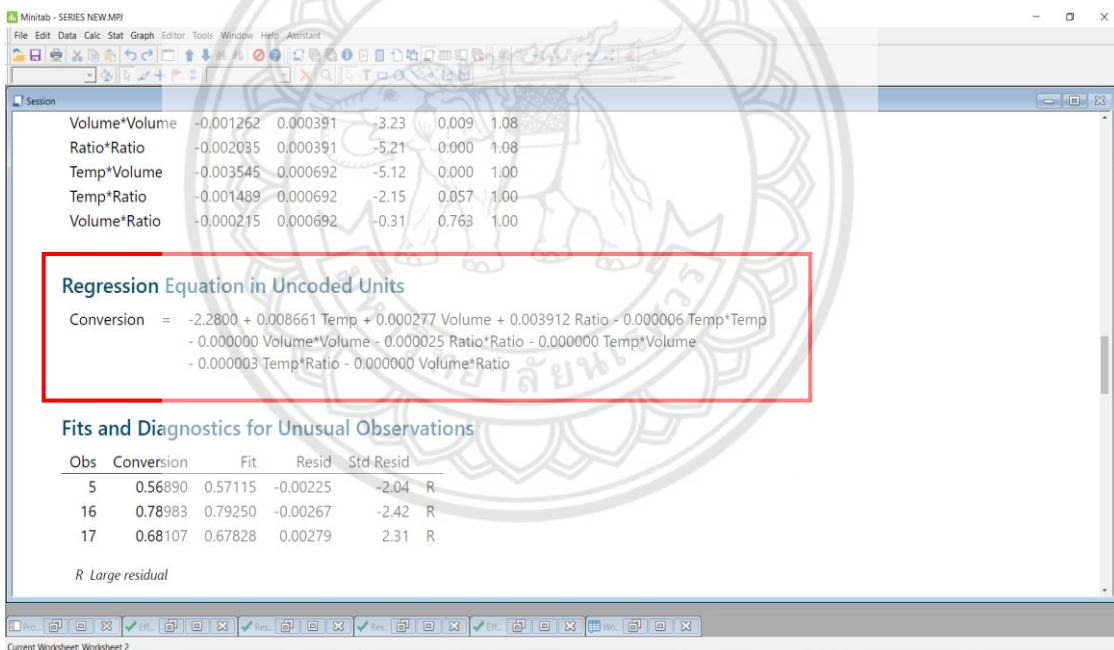
รูปที่ ข.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ ข.8 การเลือกรูปแบบกราฟที่ต้องการแสดงจากผลการทดลอง



รูปที่ ข.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน



รูปที่ ข.12 สมการถดถอย

Regression Equation in Uncoded

$$\text{Conversion} = -2.2800 + 0.008661 \text{Temp} + 0.000000 \text{Volume} + 0.000000 \text{Ratio} - 0.000006 \text{Temp} * \text{Temp} - 0.000000 \text{Volume} * \text{Volume} - 0.000025 \text{Ratio} * \text{Ratio} - 0.000000 \text{Temp} * \text{Volume} - 0.000003 \text{Temp} * \text{Ratio} - 0.000000 \text{Volume} * \text{Ratio}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Conversion	Fit	Resid	Std Resid	
5	0.56890	0.57115	-0.00225	-2.04	R
16	0.78983	0.79250	-0.00267	-2.42	R
17	0.68107	0.67828	0.00279	2.31	R

R Large residual

รูปที่ ข.13 วิธีการแสดงกราฟโครงร่าง

Contour Plot

Responses: Temperature

Variables: Temp, Volume

Generate plots for all pairs of continuous variables

In separate panels of the same graph

On separate graphs

OK

Model Coefficients

Term	Coeff	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.815181	0.000791	1043.07	0.000	
Temp	0.001180	0.000480	2.46	0.019	1.00
Volume	0.013987	0.000480	28.97	0.000	1.00
Ratio	0.007270	0.000480	14.95	0.000	1.00
Temp*Temp	-0.014918	0.000391	-38.20	0.000	1.00
Volume*Volume	-0.001362	0.000391	-3.28	0.009	1.00
Ratio*Ratio	-0.002039	0.000391	-5.23	0.000	1.00
Temp*Volume	-0.003545	0.000692	-5.12	0.000	1.00
Temp*Ratio	-0.001489	0.000692	-2.15	0.037	1.00
Volume*Ratio	-0.000215	0.000692	-0.31	0.763	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Conversion} = -2.2800 + 0.008661 \text{Temp} + 0.000000 \text{Volume} + 0.000000 \text{Ratio} - 0.000006 \text{Temp} * \text{Temp} - 0.000000 \text{Volume} * \text{Volume} - 0.000025 \text{Ratio} * \text{Ratio} - 0.000000 \text{Temp} * \text{Volume} - 0.000003 \text{Temp} * \text{Ratio} - 0.000000 \text{Volume} * \text{Ratio}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Conversion	Fit	Resid	Std Resid	
5	0.56890	0.57115	-0.00225	-2.04	R
16	0.78983	0.79250	-0.00267	-2.42	R
17	0.68107	0.67828	0.00279	2.31	R

R Large residual

Effects Pareto for Conversion

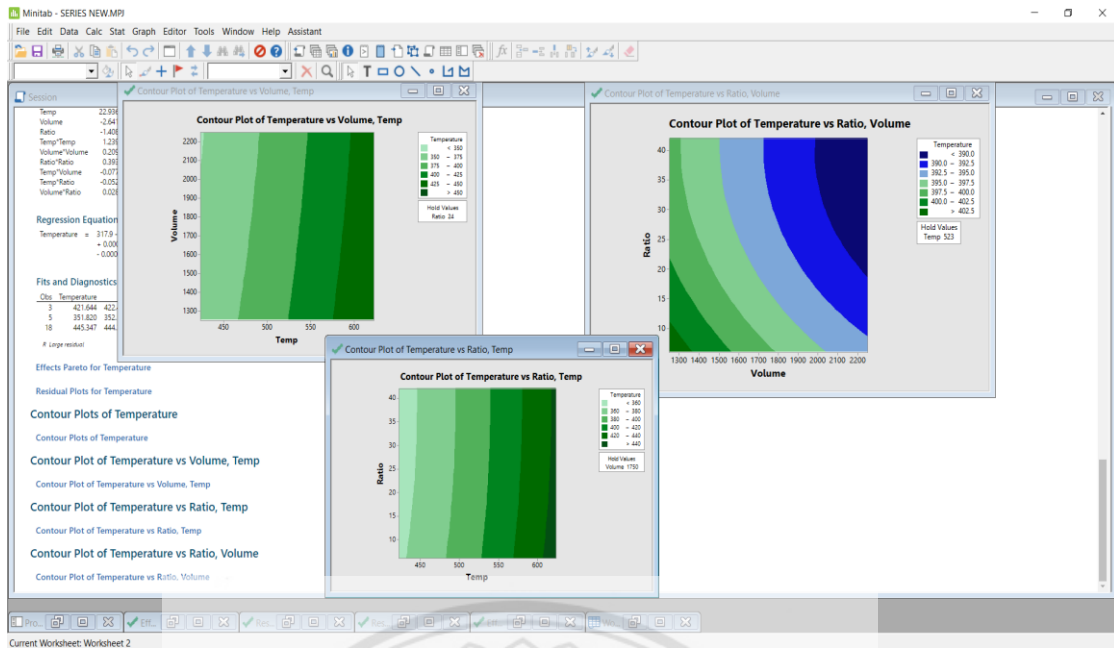
Residual Plots for Conversion

Response Surface Regression: Temperature versus Temp, Volume, Ratio

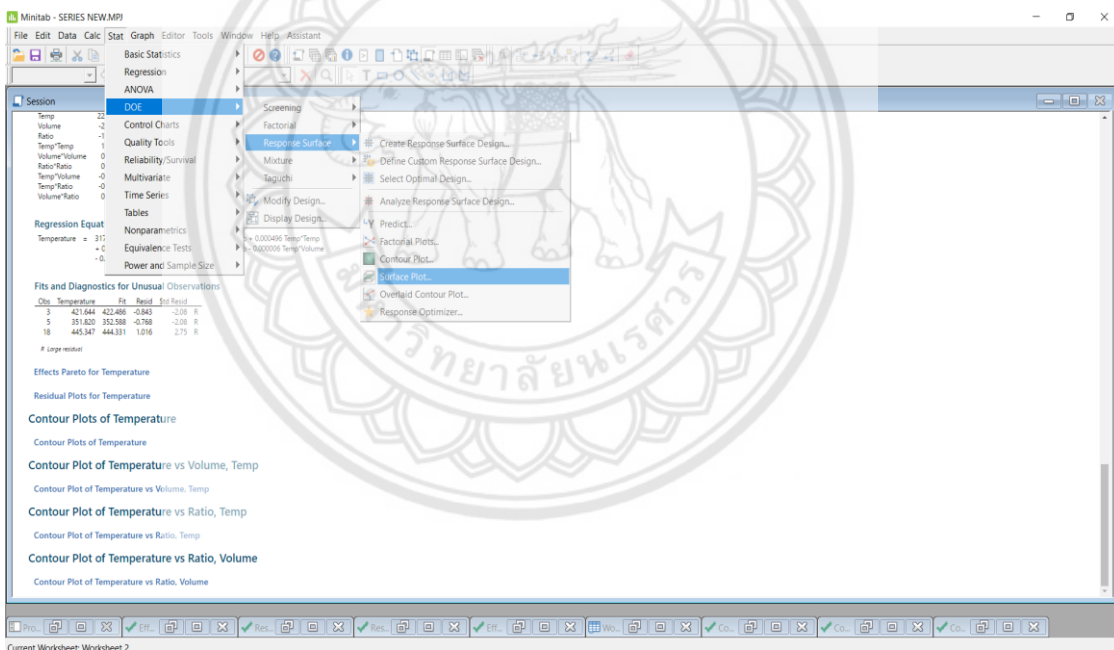
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	8599.38	955.48	2339.21	0.000
Linear	3	8560.07	2853.36	6938.16	0.000
Temp	1	8416.71	8416.71	19563.90	0.000
Volume	1	111.62	111.62	279.71	0.000
Ratio	1	31.74	31.74	78.86	0.000
Square	3	392.1	130.7	304.1	0.000
Temp*Temp	1	38.61	38.61	89.84	0.000
Volume*Volume	1	1.10	1.10	2.56	0.141
Ratio*Ratio	1	3.89	3.89	9.64	0.013
2-Way Interaction	3	0.08	0.03	0.06	0.980

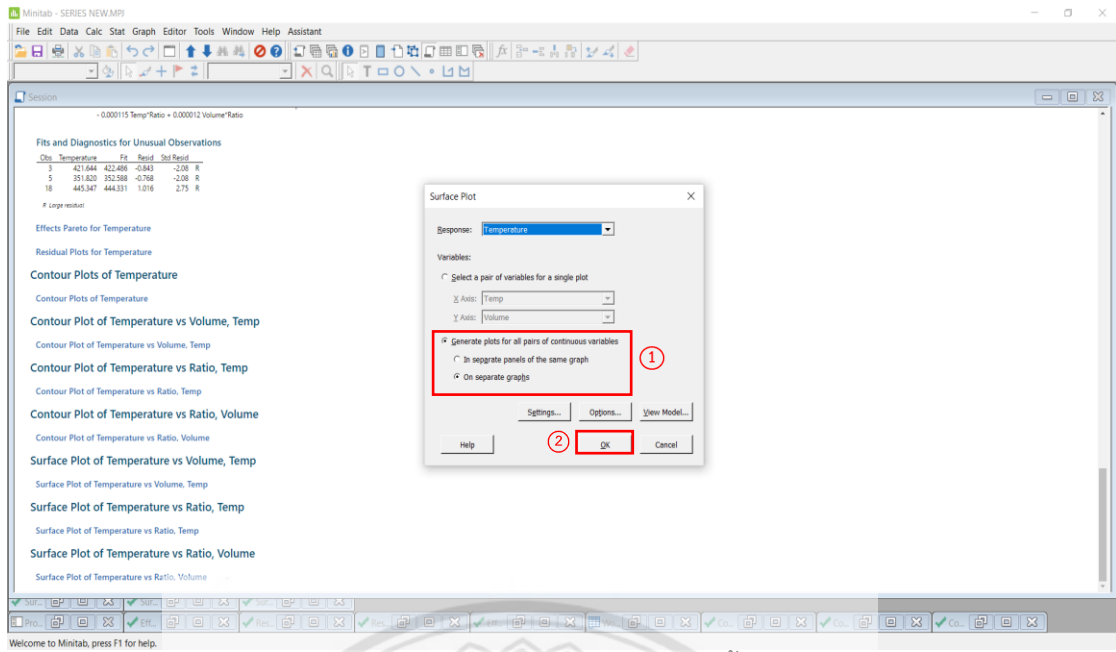
รูปที่ ข.14 การกำหนดข้อมูลที่ต้องการให้แสดงกราฟโครงร่าง



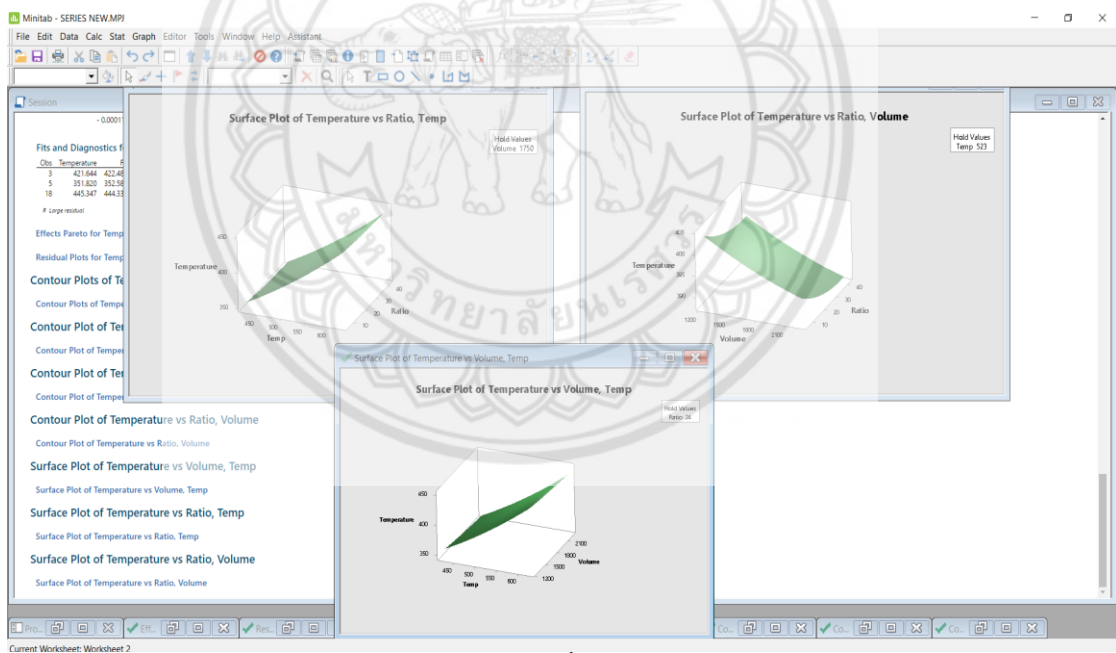
รูปที่ ข.15 กราฟโครงร่าง



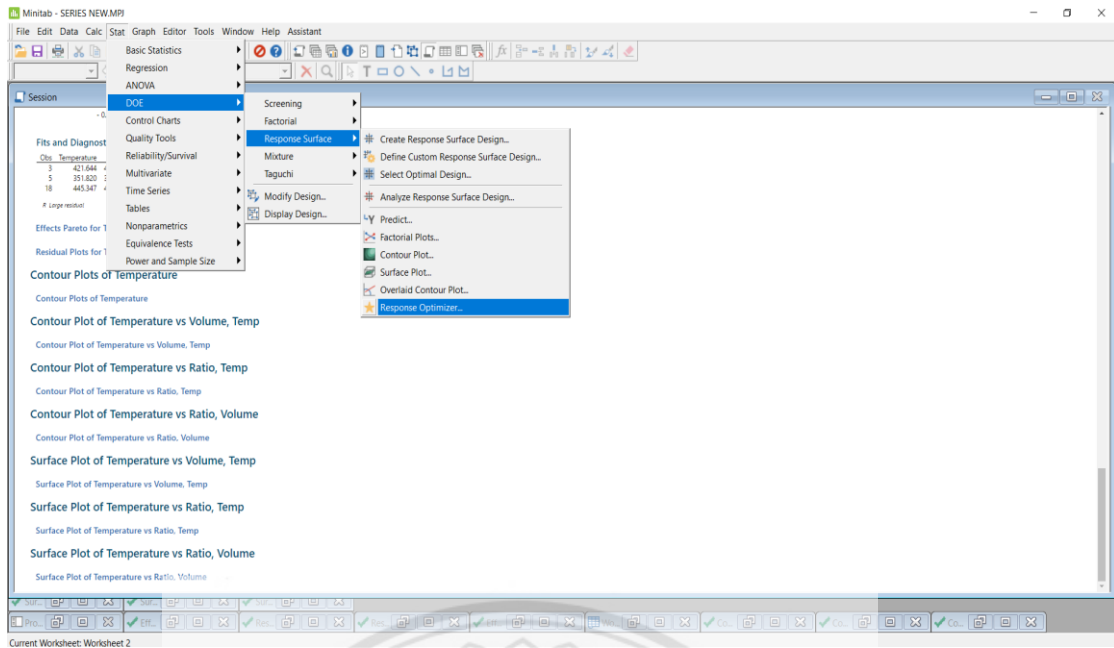
รูปที่ ข.16 วิธีการเข้าสู่การแสดงกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง



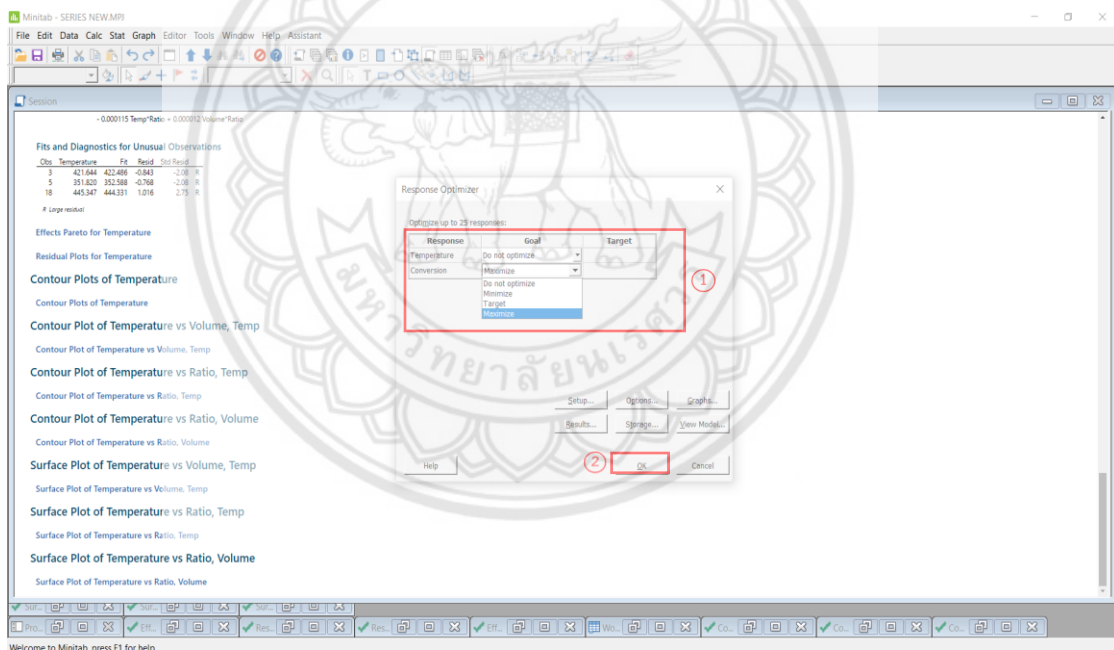
รูปที่ ข.17 กำหนดข้อมูลที่ต้องการแสดงกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง



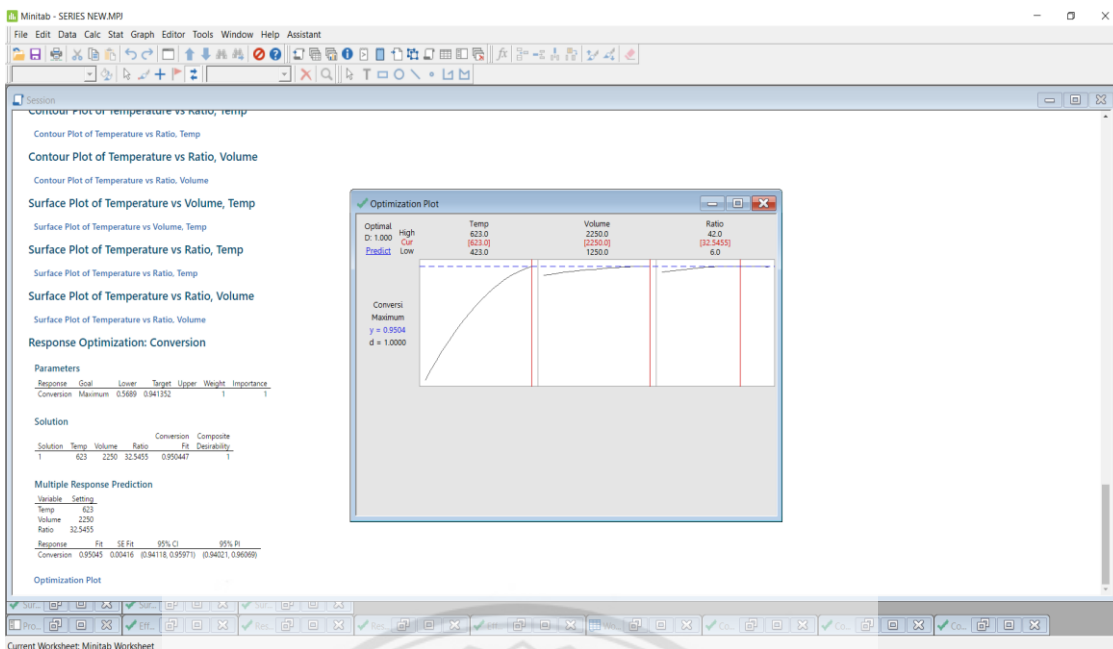
รูปที่ ข.18 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง



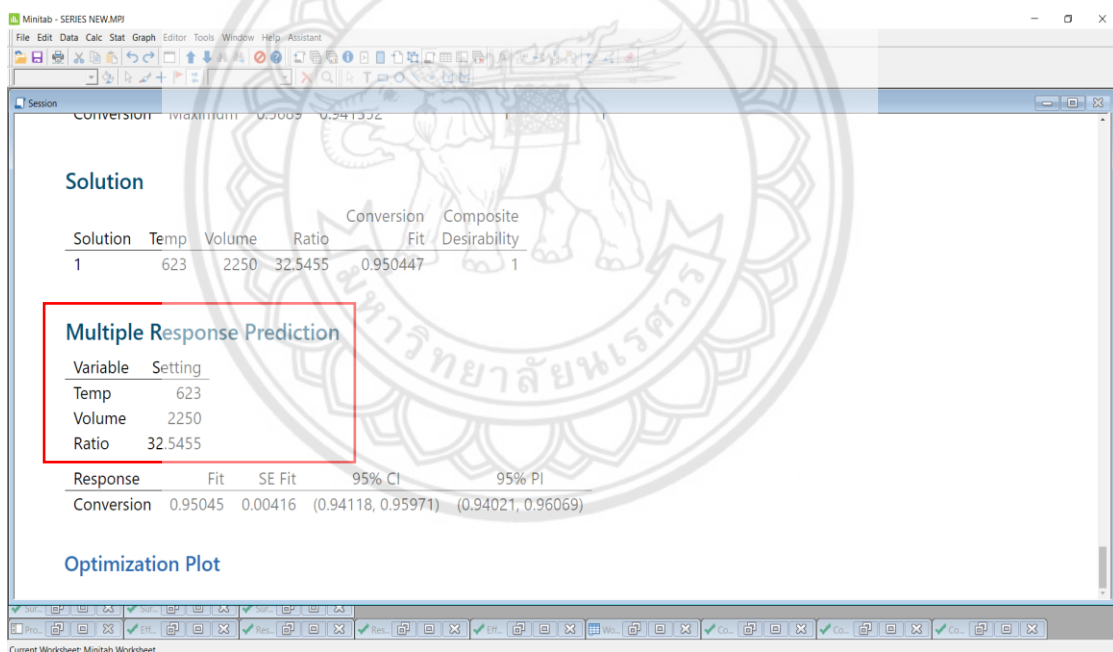
รูปที่ ข.19 วิธีการเข้าสู่การแสดงผลข้อมูลสถานะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์



รูปที่ ข.20 กำหนดผลที่ต้องการในการหาสถานะที่เหมาะสม



รูปที่ ข.21 สภาวะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์



รูปที่ ข.22 หน้าต่างแสดงผลการหาสภาวะที่เหมาะสม



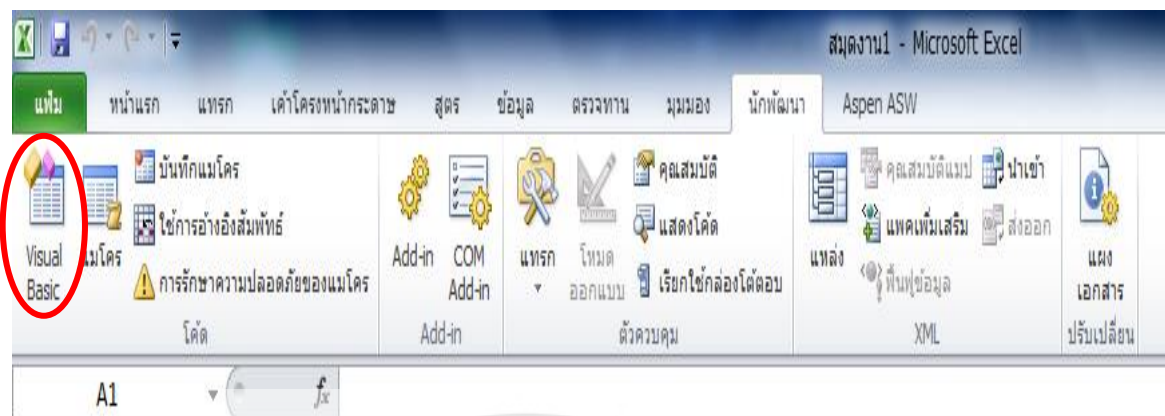
ภาคผนวก ค

คู่มือการแนะนำการใช้งาน Visual Basic for Applications

มหาวิทยาลัยบูรพา

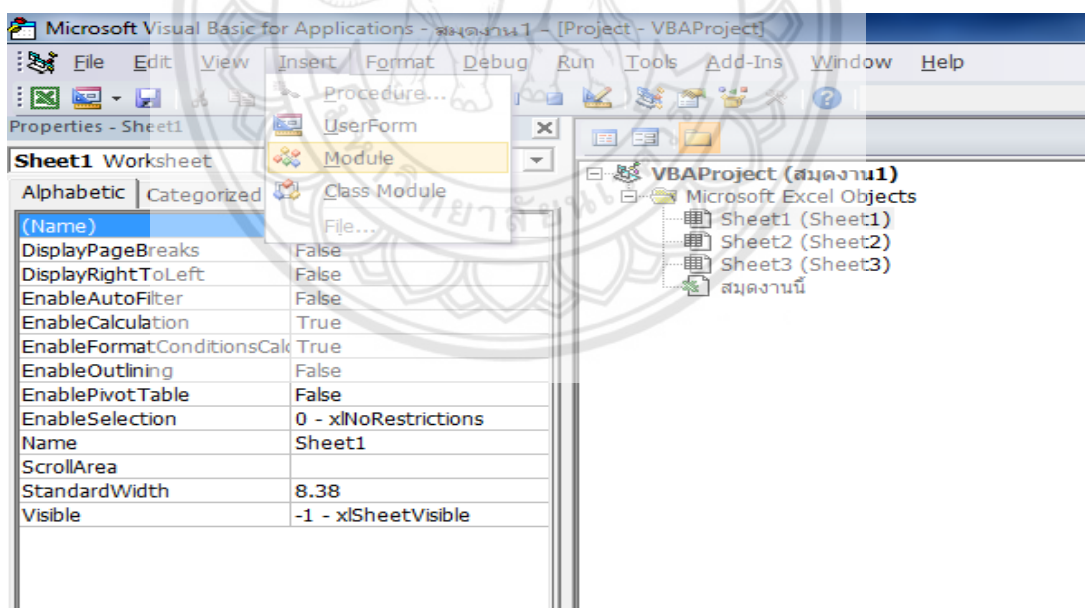
ค.1 การเปิดใช้งาน Visual Basic for Applications

ค.1.1 คลิกที่นักพัฒนา (Developer) และเลือก Visual Basic



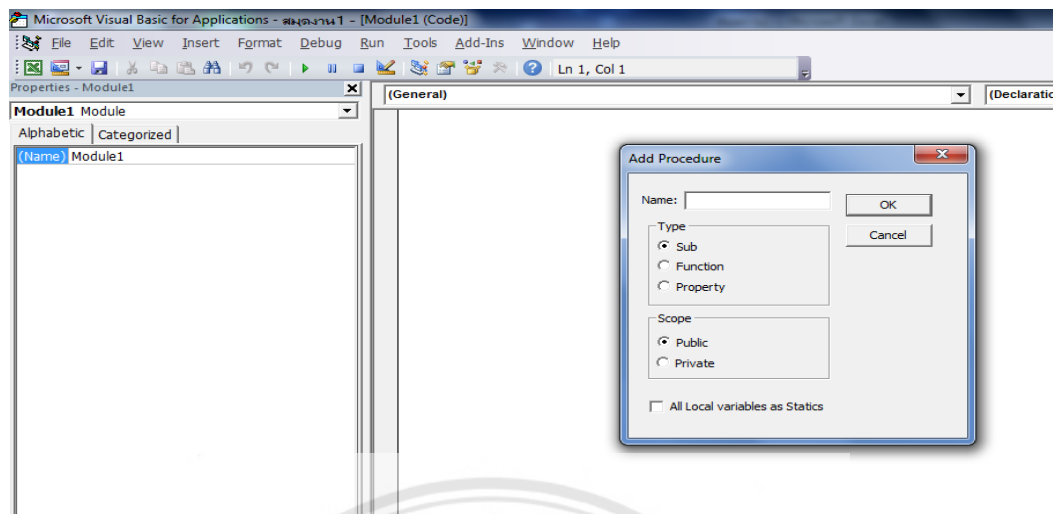
รูปที่ ค.1 วิธีการเปิด Visual Basic for Applications (VBA)

ค.1.2 เมื่อหน้าต่าง Visual Basic for Applications ปรากฏขึ้น คลิก Insert จากนั้นเลือก Module และปรากฏหน้าต่าง Module1 ขึ้นมา



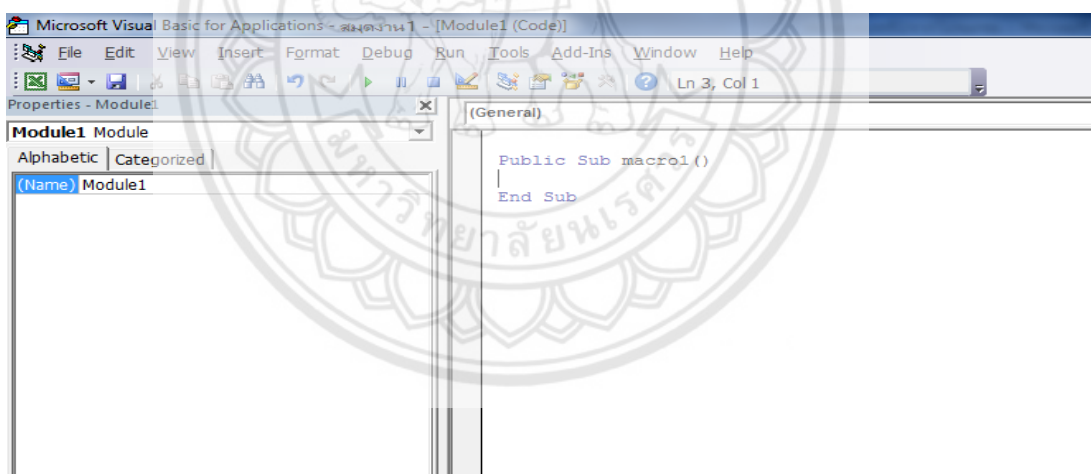
รูปที่ ค.2 หน้าต่างวิธีการสร้าง Module

ค.1.3 คลิก Insert เลือก Procedure และหน้าต่าง Add Procedure จะปรากฏขึ้นมา



รูปที่ ค.3 หน้าต่างวิธีการสร้าง Procedure

ค.1.4 ตั้งชื่อ Procedure คลิก Ok จะหน้าต่างขึ้น เพื่อตั้งชื่อ Procedure



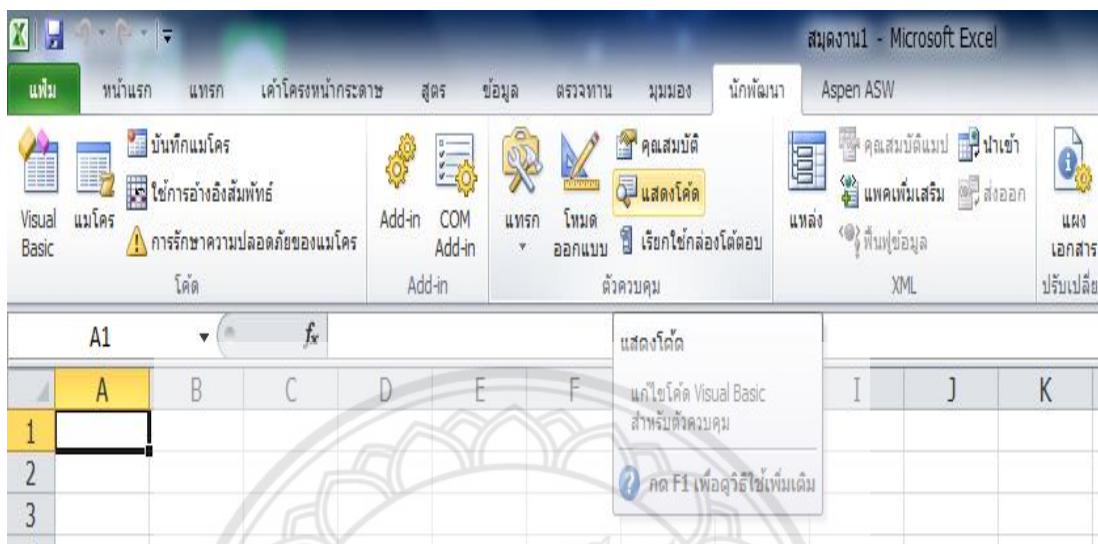
รูปที่ ค.4 หน้าต่างการตั้งชื่อ Procedure

ค.1.5 ทำการสร้าง Procedure

ค.1.6 เมื่อสร้าง Procedure เสร็จเรียบร้อย ให้กลับไปหน้า Microsoft Excel เพื่อทดสอบโปรแกรม

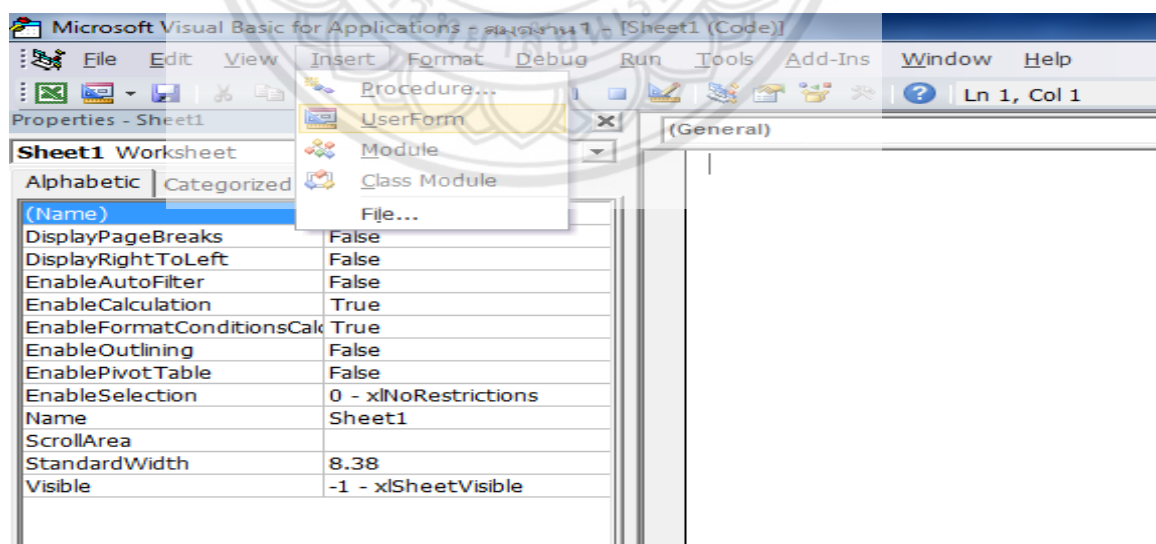
ค.2 User Form

ค.2.1 การเปิดใช้งาน User Form คลิกที่นักพัฒนา (Developer) และเลือกแสดงโค้ด



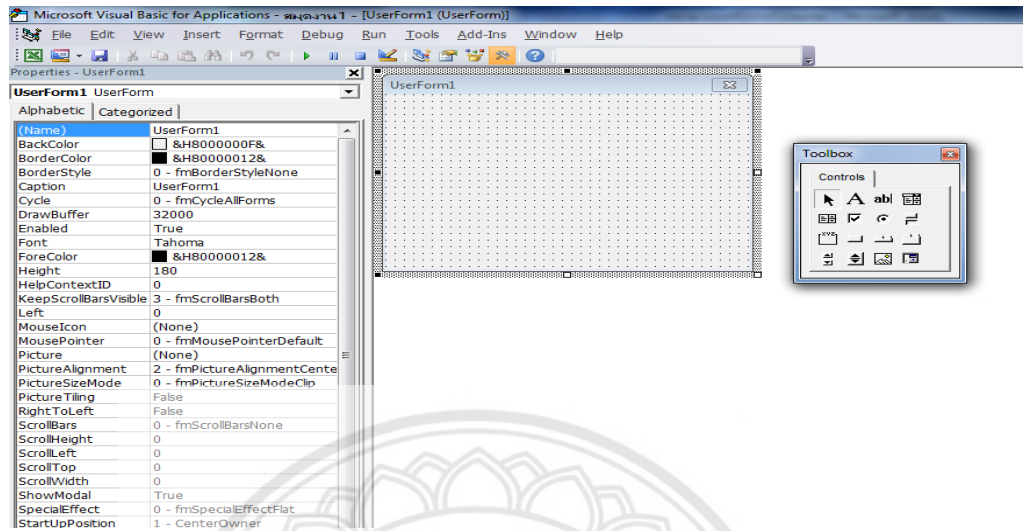
รูปที่ ค.5 วิธีการเปิดหน้าต่าง User Form

ค.2.2 เมื่อหน้าจอแสดงโค้ดปรากฏขึ้น คลิกเลือก Insert และเลือก User Form และจะมีหน้าต่าง User Form 1 ปรากฏขึ้น



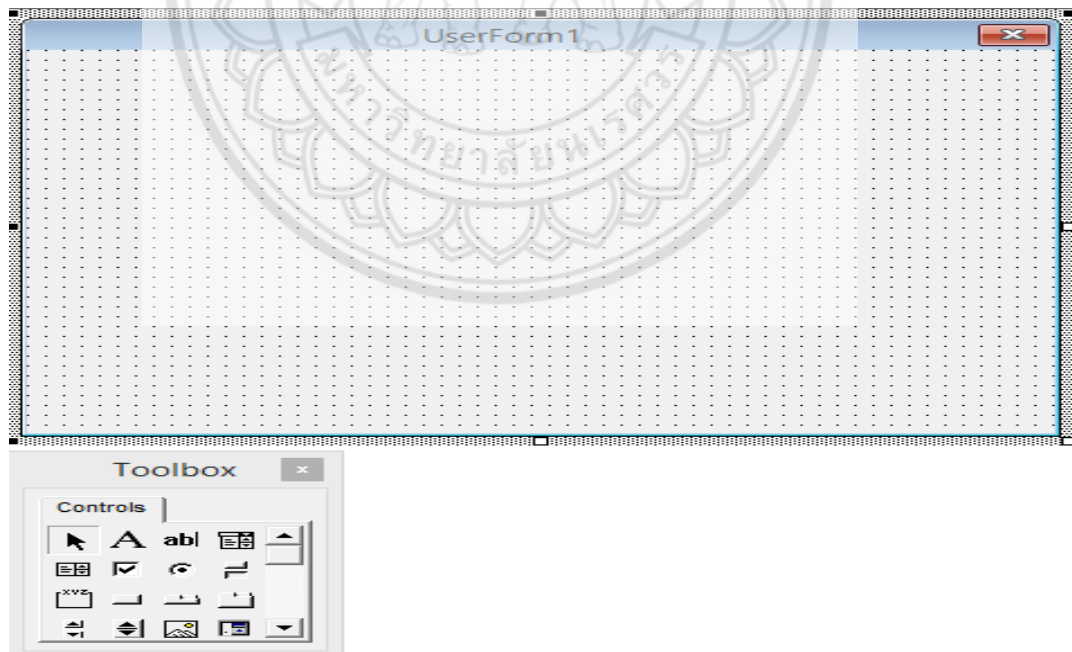
รูปที่ ค.6 หน้าต่างการสร้าง User Form

ค.2.3 หน้าต่าง User Form 1



รูปที่ ค.7 หน้าต่าง User Form 1

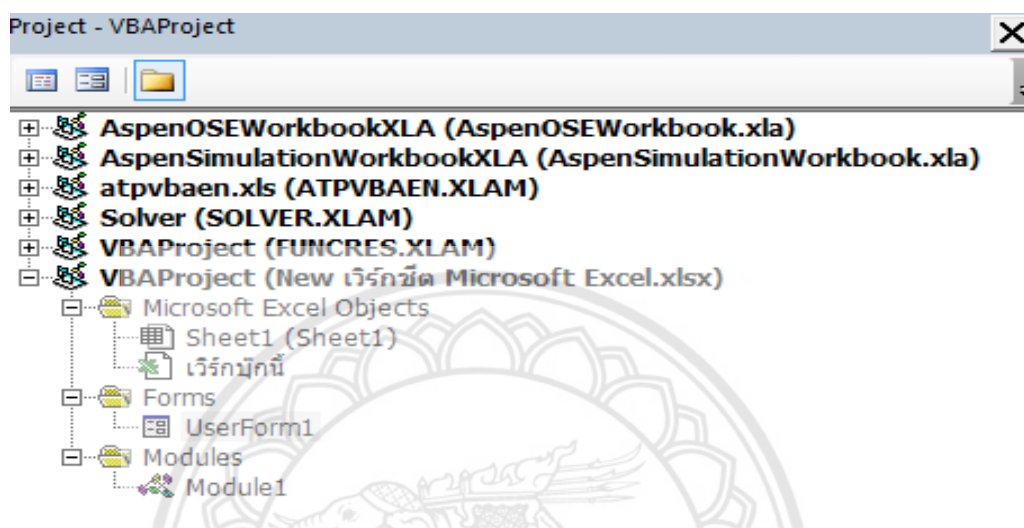
ค.2.4 องค์ประกอบของหน้าต่าง User Form 1



รูปที่ ค.8 องค์ประกอบของหน้าต่าง User Form 1

ค.2.5 Project Explorer

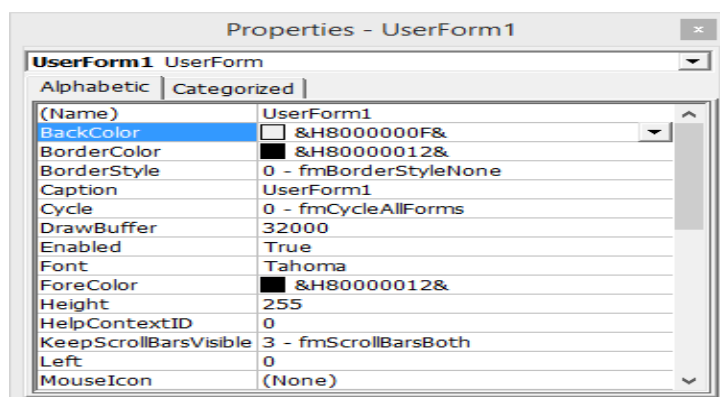
หน้าต่างของ VBA Project เป็นส่วนที่ใช้สำหรับจัดการเกี่ยวกับโปรเจกต์ที่ต้องการสร้าง ซึ่งทำหน้าที่แสดงส่วนประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในโปรเจกต์ เช่น สมุดงาน (Forms Module) และสามารถเลือกใช้งานได้ตามความต้องการที่จะสร้างโปรเจกต์งาน



รูปที่ ค.9 หน้าต่าง Project Explorer

ค.2.6 Properties Window

เป็นหน้าต่างคุณสมบัติที่ใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติให้กับวัตถุที่เลือก โดยหน้าต่างนี้มีองค์ประกอบของคุณสมบัติเปลี่ยนไปตามวัตถุ และสามารถใช้หน้าต่างนี้ในการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัตถุ



รูปที่ ค.10 หน้าต่าง Properties



ตารางที่ ง.1 ความจุความร้อนจำเพาะของไตรกลีเซอไรด์ (กรดโอเลอิก) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
25	20	568.4074
39.8990	20	578.4052
54.7980	20	589.3314
69.6970	20	600.9847
84.5960	20	613.1988
99.4950	20	625.8417
114.3939	20	638.8137
129.2929	20	652.0442
144.1919	20	665.4889
159.0909	20	679.1264
173.9899	20	692.9552
188.8889	20	706.9915
203.7879	20	721.2675
218.6869	20	735.8303
233.5859	20	750.7410
248.4848	20	766.0760
263.3838	20	781.9279
278.2828	20	798.4084
293.1818	20	815.6526
308.0808	20	833.8255
322.9798	20	853.1316
337.8788	20	873.8300
352.7778	20	896.2563
367.6768	20	920.8578

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของไตรกลีเซอไรด์ (กรดโอเลอิก) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
382.5758	20	948.2521
397.4747	20	979.3255
412.3737	20	1,015.4160
427.2727	20	1,058.6690
442.1717	20	1,112.8260
457.0707	20	1,185.1910
471.9697	20	1,292.7450
486.8687	20	1,489.3410
501.7677	20	2,167.1960
516.6667	20	828.6496
531.5657	20	836.6721
546.4646	20	844.5232
561.3636	20	852.2070
576.2626	20	859.7273
591.1616	20	867.0879
606.0606	20	874.2922
620.9596	20	881.3434
635.8586	20	888.2448
650.7576	20	894.9994
665.6566	20	901.6101
680.5556	20	908.0798
695.4545	20	914.4112
710.3535	20	920.6072
725.2525	20	926.6704

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของไตรกลีเซอไรด์ (กรดโอเลอิก) ที่อุณหภูมิต่างๆ

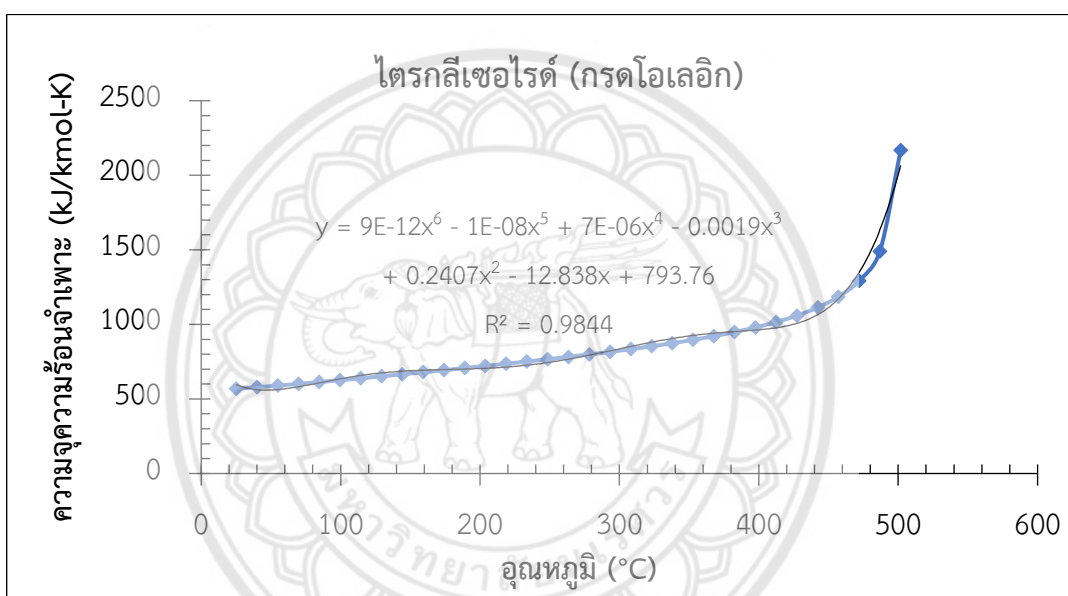
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
740.1515	20	932.6035
755.0505	20	938.4090
769.9495	20	944.0895
784.8485	20	949.6476
799.7475	20	955.0856
814.6465	20	960.4062
829.5455	20	965.6118
844.4444	20	970.7047
859.3434	20	975.6873
874.2424	20	980.5620
889.1414	20	985.3311
904.0404	20	989.9969
918.9394	20	994.5617
933.8384	20	999.0276
948.7374	20	1,003.3970
963.6364	20	1,007.6720
978.5354	20	1,011.8540
993.4343	20	1,015.9470
1,008.3330	20	1,019.9510
1,023.2320	20	1,023.8690
1,038.1310	20	1,027.7020
1,053.0300	20	1,031.4540
1,067.9290	20	1,035.1250
1,082.8280	20	1,038.7180

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของไตรกลีเซอไรด์ (กรดโอเลอิก) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
1,097.7270	20	1,042.2340
1,112.6260	20	1,045.6750
1,127.5250	20	1,049.0440
1,142.4240	20	1,052.3410
1,157.3230	20	1,055.5680
1,172.2220	20	1,058.7280
1,187.1210	20	1,061.8210
1,202.0200	20	1,064.8490
1,216.9190	20	1,067.8140
1,231.8180	20	1,070.7180
1,246.7170	20	1,073.5610
1,261.6160	20	1,076.3450
1,276.5150	20	1,079.0730
1,291.4140	20	1,081.7440
1,306.3130	20	1,084.3600
1,321.2120	20	1,086.9230
1,336.1110	20	1,089.4340
1,351.0100	20	1,091.8940
1,365.9090	20	1,094.3050
1,380.8080	20	1,096.6670
1,395.7070	20	1,098.9820
1,410.6060	20	1,101.2510
1,425.5050	20	1,103.4740
1,440.4040	20	1,105.6540

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของไตรกลีเซอไรต์ (กรดโอเลอิก) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
1,455.3030	20	1,107.7910
1,470.2020	20	1,109.8860
1,485.1010	20	1,111.9390
1,500	20	1,113.9530



รูปที่ ง.1 ความจุความร้อนจำเพาะของไตรกลีเซอไรต์ (กรดโอเลอิก) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ ง.2 ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
25	20	90.2807
39.8990	20	98.0625
54.7980	20	105.9468
69.6970	20	113.9570
84.5960	20	122.1404
99.4950	20	130.5795
114.3939	20	139.4096
129.2929	20	148.8493
144.1919	20	159.2589
159.0909	20	171.2583
173.9899	20	185.9965
188.8889	20	205.8658
203.7879	20	236.8744
218.6869	20	300.3332
233.5859	20	596.8400
248.4848	20	61.4382
263.3838	20	62.5664
278.2828	20	63.6772
293.1818	20	64.7702
308.0808	20	65.8455
322.9798	20	66.9030
337.8788	20	67.9429
352.7778	20	68.9654
367.6768	20	69.9707

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
382.5758	20	70.9591
397.4747	20	71.9307
412.3737	20	72.8859
427.2727	20	73.8248
442.1717	20	74.7478
457.0707	20	75.6550
471.9697	20	76.5466
486.8687	20	77.4229
501.7677	20	78.2839
516.6667	20	79.1300
531.5657	20	79.9613
546.4646	20	80.7778
561.3636	20	81.5799
576.2626	20	82.3677
591.1616	20	83.1412
606.0606	20	83.9008
620.9596	20	84.6465
635.8586	20	85.3784
650.7576	20	86.0968
665.6566	20	86.8018
680.5556	20	87.4936
695.4545	20	88.1723
710.3535	20	88.8381
725.2525	20	89.4912

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ

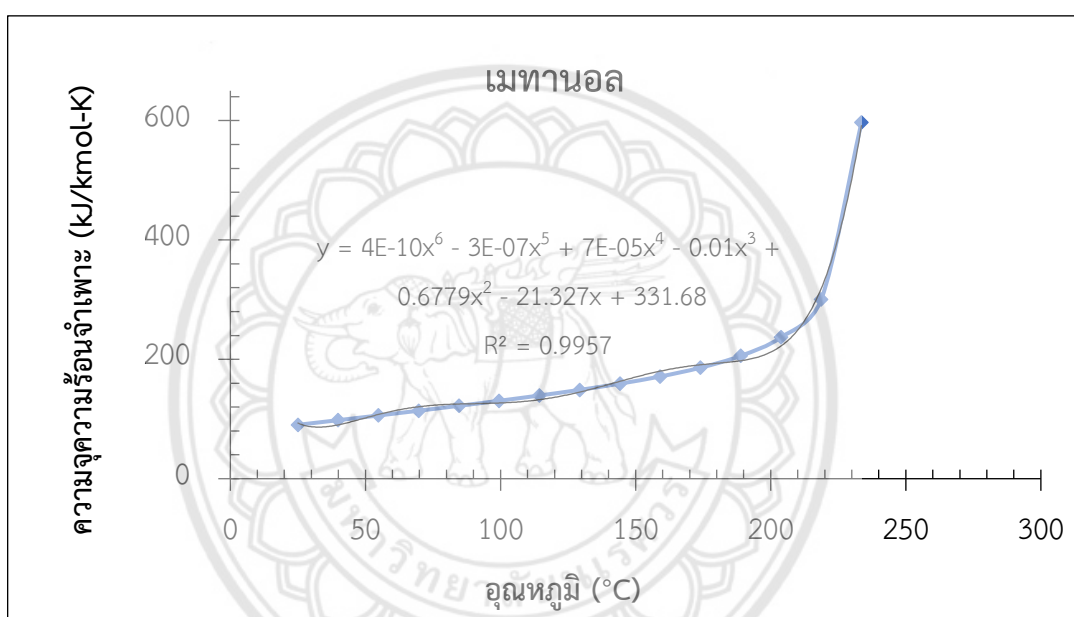
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
740.1515	20	90.1318
755.0505	20	90.7599
769.9495	20	91.3759
784.8485	20	91.9799
799.7475	20	92.5720
814.6465	20	93.1525
829.5455	20	93.7215
844.4444	20	94.2793
859.3434	20	94.8259
874.2424	20	95.3617
889.1414	20	95.8868
904.0404	20	96.4014
918.9394	20	96.9057
933.8384	20	97.3998
948.7374	20	97.8840
963.6364	20	98.3585
978.5354	20	98.8234
993.4343	20	99.2789
1,008.3330	20	99.7253
1,023.2320	20	100.1626
1,038.1310	20	100.5912
1,053.0300	20	101.0110
1,067.9290	20	101.4225
1,082.8280	20	101.8256

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
1,097.7270	20	102.2206
1,112.6260	20	102.6077
1,127.5250	20	102.9871
1,142.4240	20	103.3588
1,157.3230	20	103.7230
1,172.2220	20	104.0800
1,187.1210	20	104.4299
1,202.0200	20	104.7728
1,216.9190	20	105.1089
1,231.8180	20	105.4383
1,246.7170	20	105.7612
1,261.6160	20	106.0777
1,276.5150	20	106.3880
1,291.4140	20	106.6922
1,306.3130	20	106.9905
1,321.2120	20	107.2829
1,336.1110	20	107.5696
1,351.0100	20	107.8508
1,365.9090	20	108.1265
1,380.8080	20	108.3969
1,395.7070	20	108.6621
1,410.6060	20	108.9222
1,425.5050	20	109.1773
1,440.4040	20	109.4275

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
1,455.3030	20	109.6731
1,470.2020	20	109.9139
1,485.1010	20	110.1502
1,500	20	110.3821



รูปที่ ง.2 ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ ง.3 ความจุความร้อนจำเพาะของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
25	20	623.4638
39.8990	20	631.3284
54.7980	20	640.1978
69.6970	20	649.8593
84.5960	20	660.1417
99.4950	20	670.9120
114.3939	20	682.0722
129.2929	20	693.5544
144.1919	20	705.3175
159.0909	20	717.3428
173.9899	20	729.6320
188.8889	20	742.2041
203.7879	20	755.0952
218.6869	20	768.3570
233.5859	20	782.0583
248.4848	20	796.2863
263.3838	20	811.1500
278.2828	20	826.7850
293.1818	20	843.3615
308.0808	20	861.0950
322.9798	20	880.2638
337.8788	20	901.2343
352.7778	20	924.5019
367.6768	20	950.7574

ตารางที่ ง.3 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
382.5758	20	981.0020
397.4747	20	1,016.7570
412.3737	20	1,060.4780
427.2727	20	1,116.4760
442.1717	20	1,193.2440
457.0707	20	1,310.8650
471.9697	20	1,535.8050
486.8687	20	2,486.7420
501.7677	20	866.1304
516.6667	20	874.8041
531.5657	20	883.2823
546.4646	20	891.5694
561.3636	20	899.6694
576.2626	20	907.5861
591.1616	20	915.3234
606.0606	20	922.8849
620.9596	20	930.2743
635.8586	20	937.4951
650.7576	20	944.5507
665.6566	20	951.4446
680.5556	20	958.1802
695.4545	20	964.7608
710.3535	20	971.1897
725.2525	20	977.4702

ตารางที่ ง.3 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ

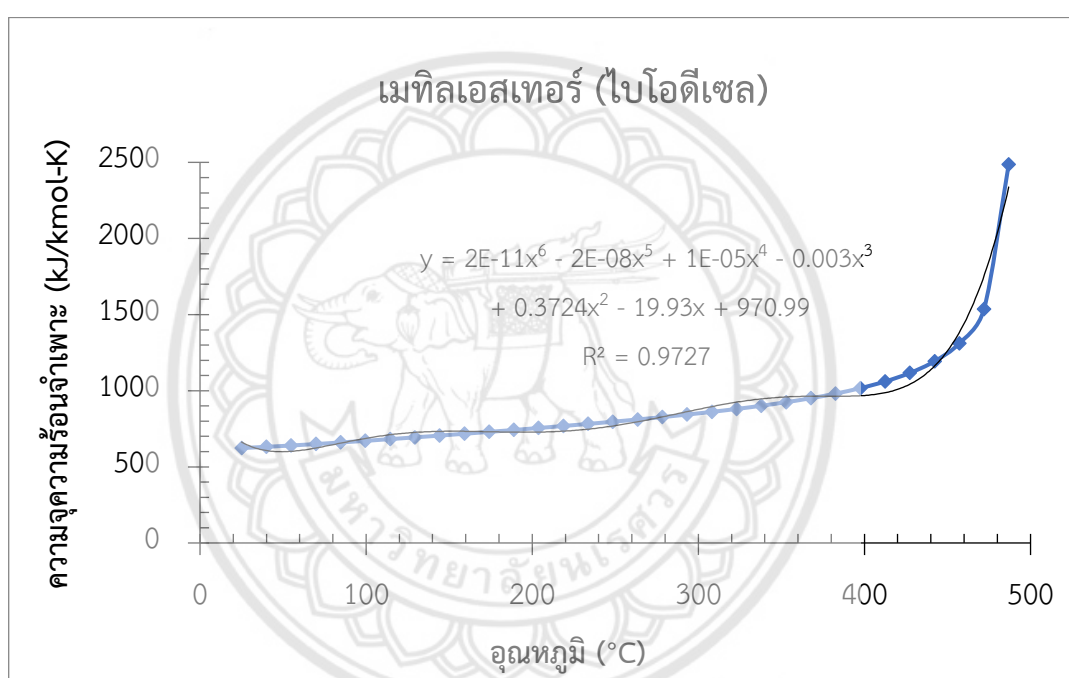
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
740.1515	20	983.6056
755.0505	20	989.5990
769.9495	20	995.4536
784.8485	20	1,001.1720
799.7475	20	1,006.7590
814.6465	20	1,012.2160
829.5455	20	1,017.5460
844.4444	20	1,022.7520
859.3434	20	1,027.8380
874.2424	20	1,032.8070
889.1414	20	1,037.6600
904.0404	20	1,042.4010
918.9394	20	1,047.0320
933.8384	20	1,051.5570
948.7374	20	1,055.9780
963.6364	20	1,060.2970
978.5354	20	1,064.5170
993.4343	20	1,068.6410
1,008.3330	20	1,072.6700
1,023.2320	20	1,076.6080
1,038.1310	20	1,080.4560
1,053.0300	20	1,084.2170
1,067.9290	20	1,087.8940
1,082.8280	20	1,091.4870

ตารางที่ ง.3 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
1,097.7270	20	1,095.0000
1,112.6260	20	1,098.4340
1,127.5250	20	1,101.7920
1,142.4240	20	1,105.0740
1,157.3230	20	1,108.2850
1,172.2220	20	1,111.4240
1,187.1210	20	1,114.4940
1,202.0200	20	1,117.4980
1,216.9190	20	1,120.4350
1,231.8180	20	1,123.3090
1,246.7170	20	1,126.1200
1,261.6160	20	1,128.8710
1,276.5150	20	1,131.5630
1,291.4140	20	1,134.1970
1,306.3130	20	1,136.7750
1,321.2120	20	1,139.2990
1,336.1110	20	1,141.7690
1,351.0100	20	1,144.1870
1,365.9090	20	1,146.5540
1,380.8080	20	1,148.8730
1,395.7070	20	1,151.1430
1,410.6060	20	1,153.3660
1,425.5050	20	1,155.5440
1,440.4040	20	1,157.6770

ตารางที่ ง.3 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
1,455.3030	20	1,159.7660
1,470.2020	20	1,161.8130
1,485.1010	20	1,163.8190
1,500	20	1,165.7850



รูปที่ ง.3 ความจุความร้อนจำเพาะของเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ ง.4 ความจุความร้อนจำเพาะของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
25	20	196.1678
39.8990	20	198.8251
54.7980	20	201.8849
69.6970	20	205.3071
84.5960	20	209.0569
99.4950	20	213.1051
114.3939	20	217.4285
129.2929	20	222.0093
144.1919	20	226.8351
159.0909	20	231.8981
173.9899	20	237.1952
188.8889	20	242.7269
203.7879	20	248.4977
218.6869	20	254.5151
233.5859	20	260.7897
248.4848	20	267.3349
263.3838	20	274.1667
278.2828	20	281.3038
293.1818	20	288.7679
308.0808	20	296.5835
322.9798	20	304.7788
337.8788	20	313.3862
352.7778	20	322.4434
367.6768	20	331.9954

ตารางที่ ง.4 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
382.5758	20	342.0968
397.4747	20	352.8154
412.3737	20	364.2384
427.2727	20	376.4814
442.1717	20	389.7029
457.0707	20	404.1296
471.9697	20	420.0998
486.8687	20	438.1471
501.7677	20	459.1699
516.6667	20	484.8202
531.5657	20	518.5472
546.4646	20	569.1702
561.3636	20	670.3000
576.2626	20	1,837.2810
591.1616	20	215.2542
606.0606	20	216.8745
620.9596	20	218.4806
635.8586	20	220.0741
650.7576	20	221.6565
665.6566	20	223.2291
680.5556	20	224.7929
695.4545	20	226.3490
710.3535	20	227.8980
725.2525	20	229.4407

ตารางที่ ง.4 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ

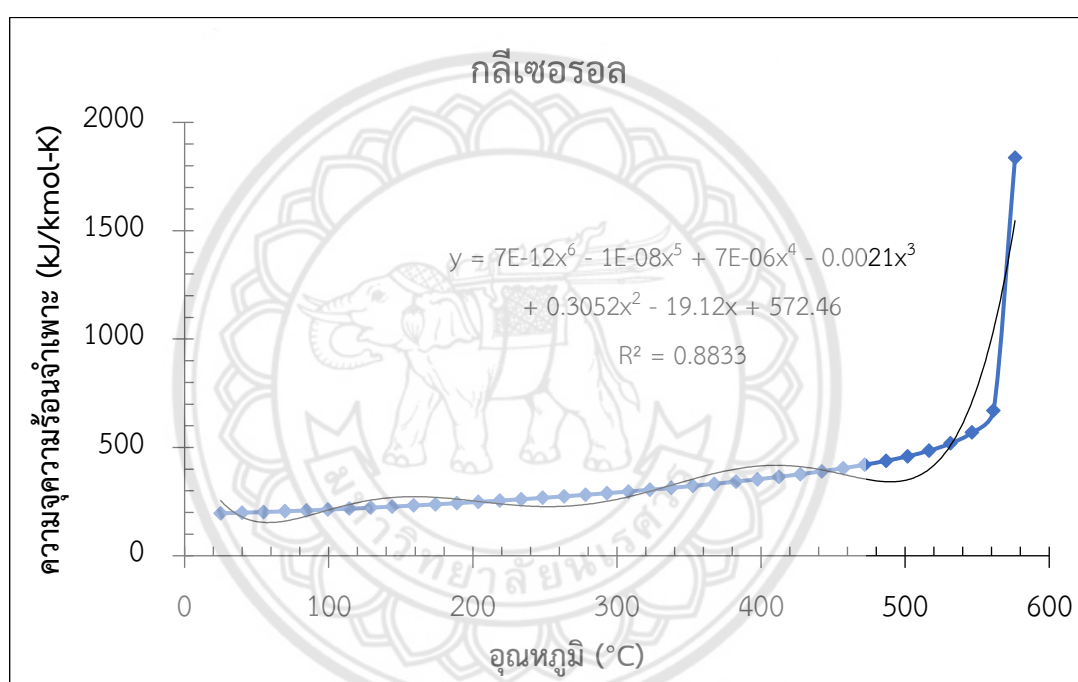
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
740.1515	20	230.9776
755.0505	20	232.5090
769.9495	20	234.0353
784.8485	20	235.5567
799.7475	20	237.0732
814.6465	20	238.5849
829.5455	20	240.0916
844.4444	20	241.5934
859.3434	20	243.0900
874.2424	20	244.5811
889.1414	20	246.0665
904.0404	20	247.5459
918.9394	20	249.0188
933.8384	20	250.4850
948.7374	20	251.9440
963.6364	20	253.3953
978.5354	20	254.8386
993.4343	20	256.2733
1,008.3330	20	257.6990
1,023.2320	20	259.1153
1,038.1310	20	260.5217
1,053.0300	20	261.9176
1,067.9290	20	263.3027
1,082.8280	20	264.6764

ตารางที่ ง.4 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
1,097.7270	20	266.0384
1,112.6260	20	267.3882
1,127.5250	20	268.7253
1,142.4240	20	270.0493
1,157.3230	20	271.3599
1,172.2220	20	272.6566
1,187.1210	20	273.9390
1,202.0200	20	275.2069
1,216.9190	20	276.4598
1,231.8180	20	277.6975
1,246.7170	20	278.9196
1,261.6160	20	280.1258
1,276.5150	20	281.3159
1,291.4140	20	282.4896
1,306.3130	20	283.6467
1,321.2120	20	284.7870
1,336.1110	20	285.9102
1,351.0100	20	287.0162
1,365.9090	20	288.1049
1,380.8080	20	289.1760
1,395.7070	20	290.2294
1,410.6060	20	291.2651
1,425.5050	20	292.2829
1,440.4040	20	293.2827

ตารางที่ ง.4 (ต่อ) ความจุความร้อนจำเพาะของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K)
1,455.3030	20	294.2646
1,470.2020	20	295.2284
1,485.1010	20	296.1740
1,500	20	297.1016



รูปที่ ง.4 ความจุความร้อนจำเพาะของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ



ตารางที่ จ.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองของค่า Conversion สำหรับกระบวนการผลิตไปโอดีเซล

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
อุณหภูมิ (เคลวิน) (X_1)	423	473	523	573	623
ปริมาณของถังปฏิกรณ์เคมี (ลิตร) (X_2)	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250
อัตราส่วนโดยโมล (X_3)	6	15	24	33	42

ตารางที่ จ.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลางและผลการทดลอง Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ปริมาณของถังปฏิกรณ์เคมี (ลิตร)	อัตราส่วนโดยโมล	Conversion	อุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมี (เคลวิน)
1	473	2,000	33	0.7308	369.11
2	523	2,250	24	0.8383	389.07
3	573	1,500	15	0.8735	421.64
4	523	1,750	42	0.8235	391.92
5	423	1,750	24	0.5689	351.82
6	523	1,250	24	0.7812	399.85
7	573	1,500	33	0.8833	419.10
8	523	1,750	24	0.8151	393.54
9	573	2,000	33	0.9031	413.85
10	473	1,500	33	0.6966	374.10
11	523	1,750	24	0.8151	393.54
12	523	1,750	24	0.8151	393.54
13	523	1,750	24	0.8151	393.54
14	473	2,000	15	0.7159	371.33

ตารางที่ จ.2 (ต่อ) การออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลางและผลการทดลอง Conversion และอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี

ปัจจัย					
ลำดับการทดลอง	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂
	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ปริมาตรของถังปฏิกรณ์เคมี (ลิตร)	อัตราส่วนโดยโมล	Conversion	อุณหภูมิขาออกถังปฏิกรณ์เคมี (เคลวิน)
15	523	1,750	24	0.8151	393.54
16	523	1,750	6	0.7898	398.47
17	473	1,500	15	0.6811	376.39
18	623	1,750	24	0.9414	445.35
19	523	1,750	24	0.8151	393.54
20	573	2,000	15	0.8944	416.24

ตารางที่ จ.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ความแปรปรวนของ Conversion สำหรับกระบวนการผลิตไปโอดีเซล

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.14576	0.016196	4,223.34	0
Linear	3	0.139929	0.046643	12,163.14	0
X ₁	1	0.135953	0.135953	35,452.6	0
X ₂	1	0.00313	0.00313	816.29	0
X ₃	1	0.000846	0.000846	220.55	0
Square	3	0.005713	0.001904	496.56	0
X ₁ ²	1	0.005596	0.005596	1,459.19	0
X ₂ ²	1	0.00004	0.00004	10.44	0.009
X ₃ ²	1	0.000104	0.000104	27.16	0
2-Way Interaction	3	0.000119	0.00004	10.31	0.002
X ₁ *X ₂	1	0.000101	0.000101	26.21	0

ตารางที่ จ.3 (ต่อ) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ความแปรปรวนของ Conversion สำหรับ
กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
$X_1 * X_3$	1	0.000018	0.000018	4.63	0.057
$X_2 * X_3$	1	0	0	0.1	0.763
Error	10	0.000038	0.000004		
Lack-of-Fit	5	0.000038	0.000008		
Pure Error	5	0	0		
Total	19	0.145799			
R-sq = 99.97%		R-sq (adj) = 99.95%		R-sq (pred) = 99.78%	

ตารางที่ จ.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ความแปรปรวนของอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์เคมี
สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	8,599.36	955.48	2,223.21	0
Linear	3	8,560.07	2,853.36	6,639.16	0
X_1	1	8,416.71	8,416.71	19,583.9	0
X_2	1	111.62	111.62	259.71	0
X_3	1	31.74	31.74	73.86	0
Square	3	39.21	13.07	30.41	0
X_1^2	1	38.61	38.61	89.84	0
X_2^2	1	1.1	1.1	2.56	0.141
X_3^2	1	3.89	3.89	9.04	0.013
2-Way Interaction	3	0.08	0.03	0.06	0.98
$X_1 * X_2$	1	0.05	0.05	0.11	0.746
$X_1 * X_3$	1	0.02	0.02	0.05	0.828
$X_2 * X_3$	1	0.01	0.01	0.01	0.906

ตารางที่ จ.4 (ต่อ) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ความแปรปรวนของอุณหภูมิขาออกของถังปฏิกรณ์
เคมีสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Error	10	4.3	0.43		
Lack-of-Fit	5	4.3	0.86		
Pure Error	5	0	0		
Total	19	8,603.65			
R-sq = 99.95%		R-sq (adj) = 99.91%		R-sq (pred) = 99.78%	



ภาคผนวก ฉ
โค้ดคำสั่งที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมการจำลองการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง
ที่เป็นอนุกรม



```

Do Until P < 0.00001
  Do Until det > 0
    xj = xj + 0.1
    det = (Fa0 * xi - k * (Fa0 / v0) ^ 1.3887 * (1 - xi) ^ 1.2411 * (Fb0 / Fa0 - 3
* xi) ^ 0.1476 * v) * dt - Na0 * (xi - xj)
  Loop
  Do Until det < 0
    xj = xj - 0.01
    det = (Fa0 * xi - k * (Fa0 / v0) ^ 1.3887 * (1 - xi) ^ 1.2411 * (Fb0 / Fa0 - 3
* xi) ^ 0.1476 * v) * dt - Na0 * (xi - xj)
  Loop
  Do Until det2 < 0
    k = 0.5179 * Exp((-19.6 * 10 ^ 3) / (8.314 * tempi))
    a = tempi - 273.15
    b = tempj - 273.15
    r = tempr - 273.15
    hai = 0.000008 * (a ^ 4 - r ^ 4) / 4 - 0.0035 * (a ^ 3 - r ^ 3) / 3
+ 1.3128 * (a ^ 2 - r ^ 2) / 2 + 529.38 * (a - r)
    haj = 0.000008 * (b ^ 4 - r ^ 4) / 4 - 0.0035 * (b ^ 3 - r ^ 3) / 3
+ 1.3128 * (b ^ 2 - r ^ 2) / 2 + 529.38 * (b - r)
    hbj = 0.003 * b ^ 3 - 0.6432 * b ^ 2 + 156.85 * b - 3942.3
    hcj = 0.0016 * b ^ 3 - 0.5161 * b ^ 2 + 740.71 * b - 20623
    hdj = 0.0006 * b ^ 3 - 0.226 * b ^ 2 + 252.02 * b - 7605.7
    tempj = tempj + 0.1
    det2 = Fa0 * ha0 - Fa0 * (1 - xi) * haj + k * (Fa0 / v0) ^ 1.3887 * (1 -
xi) ^ 1.2411 * (Fb0 / Fa0 - 3 * xi) ^ 0.1476 * v * (-100.17 * 10 ^ 3 + haj + 3 * hbj - 3 * hcj
- hdj) - Na0 * (1 - xi) * (haj - hai) / dt - haj * Na0 * (xi - xj) / dt
  Loop
  Do Until det2 > 0
    k = 0.5179 * Exp((-19.6 * 10 ^ 3) / (8.314 * tempi))
    a = tempi - 273.15

```

```

b = tempj - 273.15
r = tempr - 273.15
hai = 0.000008 * (a ^ 4 - r ^ 4) / 4 - 0.0035 * (a ^ 3 - r ^ 3) / 3
+ 1.3128 * (a ^ 2 - r ^ 2) / 2 + 529.38 * (a - r)
haj = 0.000008 * (b ^ 4 - r ^ 4) / 4 - 0.0035 * (b ^ 3 - r ^ 3) / 3
+ 1.3128 * (b ^ 2 - r ^ 2) / 2 + 529.38 * (b - r)
hbj = 0.003 * b ^ 3 - 0.6432 * b ^ 2 + 156.85 * b - 3942.3
hcj = 0.0016 * b ^ 3 - 0.5161 * b ^ 2 + 740.71 * b - 20623
hdj = 0.0006 * b ^ 3 - 0.226 * b ^ 2 + 252.02 * b - 7605.7
tempj = tempj - 0.01
det2 = Fa0 * ha0 - Fa0 * (1 - xi) * haj + k * (Fa0 / v0) ^ 1.3887 * (1 -
xi) ^ 1.2411 * (Fb0 / Fa0 - 3 * xi) ^ 0.1476 * v * (-100.17 * 10 ^ 3 + haj + 3 * hbj - 3 * hcj
- hdj) - Na0 * (1 - xi) * (haj - hai) / dt - haj * Na0 * (xi - xj) / dt
Loop
P = Abs(xi - xj) / xj * 100
xi = xj
tempi = tempj
Loop

```