



การประเมินพลังงานของกระบวนการแยกสำหรับสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล
โดยการกลั่นสกัดด้วยเอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำ

ENERGY EVALUATION OF SEPARATION PROCESS FOR METHYLAL-
METHANOL MIXTURE BY EXTRACTIVE DISTILLATION WITH LOW
TOXICITY ENTRAINER

นางสาวศิริวรรณ แสงดาว รหัส 58366269
นายอดุลวิทย์ วรรณวงศ์กา รหัส 58366320

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2561



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การประเมินพลังงานของกระบวนการแยกสำหรับสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอลโดยการกลั่นสกัดกับเอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำ

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวศิริวรรณ แสงดาว รหัส 58366269
นายอดุลวิทย์ วรรณวงศ์กา รหัส 58366320

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.วีรวรรณ วีรชัยพิเชษฐ์กุล

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร. วีรวรรณ วีรชัยพิเชษฐ์กุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์.ดร.สมร หิรัญประดิษฐ์กุล)

.....กรรมการ
(ดร.สุทธิพงษ์ ทรงประวัต)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การประเมินพลังงานของกระบวนการแยกสำหรับสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการกลั่นสกัดกับเอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำ		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวศิริวรรณ	แสงดาว	รหัส 58366269
	นายอดุลวิทย์	วรรณรงค์กา	รหัส 58366320
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.วีรวรรณ	วีรชัยพิเชษฐ์กุล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2561		

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประเมินพลังงานของกระบวนการแยกสำหรับสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยการกลั่นสกัดกับเอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำ ที่กำหนดให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อยู่ที่ร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และเพื่อประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำ นอกจากนี้การประเมินพลังงานสำหรับกระบวนการกลั่นสกัดจะใช้เอนเทรเนอร์ที่แตกต่างกัน (เอทานอล ไมน์ เมทิลไพรโรลิดินอน เอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนไกลคอล) มาเปรียบเทียบกับ ไดเมทิลฟอร์มาไมด์

ผลของการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าในกระบวนการกลั่นสกัด สำหรับการใส่โพรพิลีนไกลคอล เมทิลไพรโรลิดินอน กลีเซอรอล เอทานอล ไมน์ และ เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ใช้พลังงานน้อยกว่า การใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นเอนเทรเนอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้โพรพิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ ใช้พลังงานในกระบวนการกลั่นสกัดน้อยที่สุด (91,328.1 กิโลจูลต่อชั่วโมง) ในทางกลับกันในกระบวนการกลั่นสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ใช้พลังงานมากกว่าการใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นเอนเทรเนอร์

Project Title	Energy Evaluation of Separation Process for Methylal-Methanol Mixture by Extractive Distillation with Low Toxicity Entrainer		
Author	Siriwan	Sangdaw	ID 58366269
	Adulwit	Wanwongka	ID 58366320
Project Advisor	Dr.Weerawan	Weerachaipichasgul	
Major	Chemical Engineering		
Department	Industrial Engineering		
Academic year	2018		

Abstract

In this research, the energy evaluation of separation process for methylal-methanol mixture by extractive distillation with low toxicity entrainer given product purity at 99.9 % by weight of methylal has been studied. The objective of this research was to study the optimum conditions by using statistical data analysis and to evaluate the energy consumption in the extractive distillation process for the separation of methylal-methanol mixture using low toxicity entrainer. Moreover, the energy evaluation for the extractive distillation process using the different entrainers (Ethanolamine, n-methyl-2-pyrrolidinone, ethylene glycol, glycerol, tetraethylene glycol and propylene glycol) was compared with dimethylformamide.

Results of simulation process showed that the energy consumption in the extractive distillation process for propylene glycol, n-methyl-2-pyrrolidinone, glycerol, ethanolamine, and ethylene glycol as entrainers was lesser than that of dimethylformamide. The minimum energy consumption in the extractive distillation process was the used of propylene glycol with the value of 91,328.1 kJ/h. On the other hand, the energy consumption in the extractive distillation process by using tetraethylene glycol was higher than that of dimethylformamide.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ ดร.วีรวรรณ วีระชัยพิเชษฐ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รวมถึง รศ.ดร.สมร หิรัญประดิษฐ์กุล และ ดร.สุทธิพงษ์ ทรงประวัติ อาจารย์กรรมการโครงการที่ได้แนะนำ ให้คำปรึกษา และวิธีแก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลและเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอด และขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ ให้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus V 8.8 เพื่อใช้ในการจำลองกระบวนการกลั่นสกัดของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การดูแล อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา

ผู้ดำเนินโครงการ
นางสาวศิริวรรณ แสงดาว
นายอัครวิทย์ วรรณวงศ์กา

เมษายน 2562

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการผลิตเมทิลลัต.....	5
2.2 วิธีการที่ใช้ในการแยกสารผสมอะซิโโทรป.....	6
2.2.1 การกลั่นสลับความดัน.....	6
2.2.2 กระบวนการเยื่อเลือกผ่าน.....	7
2.2.3 กระบวนการโมเลกุลลาร์ซีฟ.....	8
2.2.4 การกลั่นอะซิโโทรปิค.....	8
2.2.5 การกลั่นสกัด.....	9
2.3 การกลั่น.....	10
2.4 การกลั่นสกัด.....	15
2.4.1 แผนทึ่เส้นโค้งรีซีดวอล.....	17
2.4.2 วิธีการเลือกเอนเทรเนอร์.....	19
2.5 คุณสมบัติของสารผสมเมทิลลัต-เมทานอล และสารเอนเทรเนอร์.....	19
2.5.1 เมทิลลัต.....	19
2.5.2 เมทานอล.....	20
2.5.3 ไดมิลฟอ์มาร์ไมด์.....	21
2.5.4 เอทานอลาไมน์.....	23

	หน้า
2.5.5 เมทิลไพรโรลิดีนอน	24
2.5.6 เอทิลีนไกลคอล	25
2.5.7 กลีเซอรอล	26
2.5.8 เตตระเอทิลีนไกลคอล	27
2.5.9 โพรไพลีนไกลคอล	28
2.6 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง	29
2.6.1 การออกแบบประสมกลาง	31
2.7 โปรแกรม Aspen Plus	32
2.8 โปรแกรม Minitab	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
2.9.1 งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการผลิตเมทิลลัลและการเลือกใช้อีเอนเทอร์เนอร์ที่ เหมาะสม	34
2.9.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ RCM และวิธีการทางสถิติมาการทดลองเพื่อหา สภาวะที่เหมาะสม	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ	38
3.1 ขั้นตอนในการดำเนินโครงการ	38
3.1.1 ศึกษากระบวนการผลิตเมทิลลัลและการเกิดอะซิโโทรปของสารผสมเมทิลลัล -เมทานอล	39
3.1.2 ค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการแยกสารผสมประเภทอะซิโโทรป	39
3.1.3 ศึกษากระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล	39
3.1.4 ศึกษาการเลือกใช้อีเอนเทอร์เนอร์และเปรียบเทียบอีเอนเทอร์เนอร์แต่ละชนิด	39
3.1.5 ศึกษาโปรแกรม Aspen Plus V8.8 เพื่อจำลองกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการ แยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล	39
3.1.6 ศึกษาโปรแกรม Minitab 18.1 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบ สนองเพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสม	40
3.1.7 สรุปผลและจัดทำรายงาน	40
3.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	42
4.1 แผนที่เส้นโค้งรีซิดวล	43
4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล	45
4.2.1 เอทานอลาไมน์	47
4.2.1.1 โครงสร้างหอกกลั่นสกัด	47

ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทนเนอร์ของ โครงสร้างหอกลับสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลล 47	47
ข. การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทานอลาไมน์ เป็นแอนเทนเนอร์ของโครงสร้างหอกลับสำหรับความบริสุทธิ์ของ เมทิลลัลล 48	48
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับในกระบวนการ กลั่นแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็น แอนเทนเนอร์ 50	50
4.2.1.2 ปฏิบัติการหอกลับ 52	52
ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลล 52	52
ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทนเนอร์ ของปฏิบัติการหอกลับสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลล 52	52
ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทานอล าไมน์เป็นแอนเทนเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสำหรับความ บริสุทธิ์ของเมทิลลัลล 53	53
ข. พลังงาน 55	55
ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทนเนอร์ ของปฏิบัติการหอกลับสำหรับพลังงาน 56	56
ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทานอล าไมน์เป็นแอนเทนเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสำหรับ พลังงาน 57	57
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลับใน กระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอลโดยใช้เอทานอลาไมน์ เป็นแอนเทนเนอร์ 58	58
4.2.2 เมทิลไพรโรลิดีนอน 60	60
4.2.2.1 โครงสร้างหอกลับ 60	60
ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นแอนเทนเนอร์ ของโครงสร้างหอกลับสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลล 60	60
ข. การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นแอนเทนเนอร์ของโครงสร้างหอกลับสำหรับ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลล 61	61
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับในกระบวนการ กลั่นแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็น แอนเทนเนอร์ 63	63

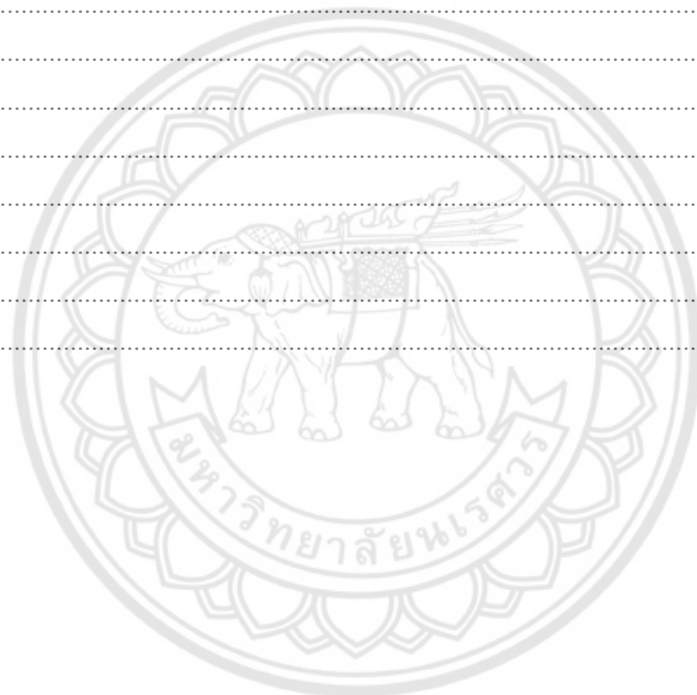
4.2.2.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด	64
ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	65
ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็น เอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของ เมทิลลัล	65
ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัด สำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	66
ข. พลังงาน.....	68
ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็น เอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับพลังงาน	69
ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัด สำหรับพลังงาน	70
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลับสกัดในกระบวนการ การกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็น เอนเทรเนอร์	71
4.2.3 เอทิลีนไกลคอล	73
4.2.3.1 โครงสร้างหอกลับสกัด	73
ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของ โครงสร้างหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	73
ข. การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทิลีนไกลคอล เป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของ เมทิลลัล	74
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดในกระบวนการ การกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์	76
4.2.3.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด	78
ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	78
ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	78
ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	79

ข. พลังงาน.....	82
ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทีลินไกลคอลเป็นแอนเทอร์เนอร์ ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ตสำหรับพลังงาน	82
ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ เอทีลินไกลคอลเป็นแอนเทอร์เนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ตสำหรับ พลังงาน	83
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ตในกระบวนการ การกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทีลินไกลคอลเป็น แอนเทอร์เนอร์	85
4.2.4 ก्लीเซอร์อล	87
4.2.4.1 โครงสร้างหอกลิ้นสก๊ต	87
ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้กลีเซอร์อลเป็นแอนเทอร์เนอร์ของ โครงสร้างหอกลิ้นสก๊ตสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	87
ข. การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้กลีเซอร์อลเป็น แอนเทอร์เนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสก๊ตสำหรับความบริสุทธิ์ของ เมทิลลัล	88
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลิ้นสก๊ตในกระบวนการ การกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้กลีเซอร์อลเป็น แอนเทอร์เนอร์	90
4.2.4.2 ปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ต	92
ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล.....	92
ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้กลีเซอร์อลเป็นแอนเทอร์เนอร์ของ ปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ตสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล.....	92
ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้กลีเซอร์อล เป็นแอนเทอร์เนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ตสำหรับความบริสุทธิ์ของ เมทิลลัล	93
ข. พลังงาน.....	95
ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้กลีเซอร์อลเป็นแอนเทอร์เนอร์ของ ปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ตสำหรับพลังงาน	96
ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้กลีเซอร์อล เป็นแอนเทอร์เนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ตสำหรับพลังงาน.....	97
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสก๊ตในกระบวนการ การกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้กลีเซอร์อลเป็น แอนเทอร์เนอร์	99

4.2.5	เตตระเอทิลีนไกลคอล	101
4.2.5.1	โครงสร้างหอกลิ้นสก็ด	101
	ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ ของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	101
	ข. การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เตตระเอทิลีน ไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดสำหรับความบริสุทธิ์ ของเมทิลลัล.....	102
	ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดในกระบวนการ กลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์	104
4.2.5.2	ปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ด	106
	ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	106
	ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดสำหรับความบริสุทธิ์ของ เมทิลลัล	106
	ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ด สำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	107
	ข. พลังงาน.....	109
	ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดสำหรับพลังงาน	110
	ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ด สำหรับพลังงาน	111
	ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดใน กระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้ เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์.....	112
4.2.6	โพรไพลีนไกลคอล	114
4.2.6.1	โครงสร้างหอกลิ้นสก็ด	114
	ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ ของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	114
	ข. การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้โพรไพลีน ไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดสำหรับความ บริสุทธิ์ของเมทิลลัล	115

ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับในกระบวนการ กลับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็น เอนเทรนเนอร์	118
4.2.6.2 ปฏิบัติการหอกลับ	118
ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	119
ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็น เอนเทรนเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสำหรับความบริสุทธิ์ของ เมทิลลัล	119
ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรนเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับ สำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	120
ข. พลังงาน	122
ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็น เอนเทรนเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสำหรับพลังงาน	122
ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรนเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับ สำหรับพลังงาน	123
ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลับในกระบวนการ การกลับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็น เอนเทรนเนอร์	125
4.3 สภาวะที่เหมาะสมและการประเมินพลังงานรวม	127
4.3.1 สภาวะเหมาะสม	127
4.3.1.1 เอทานอล	127
4.3.1.2 เมทิลโพรโพลิไดโนน	129
4.3.1.3 เอทิลีนไกลคอล	131
4.3.1.4 กลีเซอรอล	133
4.3.1.5 เตตระเอทิลีนไกลคอล	135
4.3.1.6 โพรไพลีนไกลคอล	137
4.3.2 การประเมินพลังงานรวม	138

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	142
5.1 บทสรุป.....	142
5.1.1 ศึกษากระบวนการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการกลั่นสกัด.....	142
5.1.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	142
5.1.3 ประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลของเอนเทอร์เนอร์ที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ	143
5.2 ข้อเสนอแนะ	143
เอกสารอ้างอิง	144
ภาคผนวก ก.....	147
ภาคผนวก ข.....	151
ภาคผนวก ค.....	186
ภาคผนวก ง.....	217
ภาคผนวก จ.....	229
ภาคผนวก ฉ.....	239
ภาคผนวก ช.....	243



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ	4
ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สมการองตนของสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลและเอนเทรนเนอร์	15
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลลัล	20
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทานอล	21
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์	22
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเอทานอลาไมน์	23
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลไพรโรลิดินอน	24
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเอทิลีนไกลคอล	25
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล	26
ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเตตระเอทิลีนไกลคอล	27
ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโพรพิลีนไกลคอล	28
ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยของเอนเทรนเนอร์แต่ละชนิดสำหรับโครงสร้างหกเหลี่ยม	46
ตารางที่ 4.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยของเอนเทรนเนอร์แต่ละชนิดสำหรับปฏิบัติการหกเหลี่ยม	46
ตารางที่ 4.3 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรนเนอร์	127
ตารางที่ 4.4 ผลปฏิบัติงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรนเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม	128
ตารางที่ 4.5 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรนเนอร์	129
ตารางที่ 4.6 ผลปฏิบัติงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดย ใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรนเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม	130
ตารางที่ 4.7 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรนเนอร์	131
ตารางที่ 4.8 ผลปฏิบัติงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดย ใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรนเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม	132
ตารางที่ 4.9 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรนเนอร์	133
ตารางที่ 4.10 ผลปฏิบัติงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดย ใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรนเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม	134
ตารางที่ 4.11 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรนเนอร์	135
ตารางที่ 4.12 ผลปฏิบัติงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรนเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม	136

ตารางที่ 4.13 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์.....	137
ตารางที่ 4.14 ผลพลังงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้โพรไพลีนไกลคอลไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม.....	138
ตารางที่ 4.15 สภาวะที่เหมาะสมและการประเมินพลังงานรวมของเอนเทรเนอร์	139



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการกลั่นสลับความดัน.....	6
รูปที่ 2.2 แผนภาพของกระบวนการเพอแวนพอเรชัน.....	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปร่างโมเลกุลสารซีพีแต่ละชนิด.....	8
รูปที่ 2.4 การกลั่นอะซิโโทริควิวิธพันธ์.....	9
รูปที่ 2.5 กระบวนการในการกลั่นสกัดสารผสมอะซิโโทริคที่มีจุดเดือดต่ำสุด.....	10
รูปที่ 2.6 การกลั่นสารผสมทวิภาค.....	11
รูปที่ 2.7 สมดุลของไอและของเหลวในสารผสมทวิภาค.....	12
รูปที่ 2.8 กระบวนการกลั่นสกัดสารผสมอะซิโโทริคที่มีจุดเดือดต่ำสุด.....	16
รูปที่ 2.9 RCM อย่างง่าย.....	18
รูปที่ 2.10 จุดเอกพจน์.....	18
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเมทิลลัล.....	19
รูปที่ 2.12 โครงสร้างมิติของเมทานอล.....	20
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์.....	22
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเอทานอล.....	23
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเมทิลโพรโรลิดินอน.....	24
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของเอทิลลีนไกลคอล.....	25
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	26
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของเตตระเอทิลลีนไกลคอล.....	27
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของโพรโพลีนไกลคอล.....	28
รูปที่ 2.20 พื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ.....	29
รูปที่ 2.21 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง.....	30
รูปที่ 2.22 CCD สำหรับ 3 Factors.....	32
รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์โปรแกรม Aspen Plus.....	32
รูปที่ 2.24 สัญลักษณ์โปรแกรม Minitab.....	33
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินโครงการ.....	38
รูปที่ 3.2 แผนผังการปฏิบัติงาน.....	41
รูปที่ 4.1 แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลของสารที่เคยนำมาศึกษาเป็นแอนเทรเนอร์เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล -เมทานอล.....	43
รูปที่ 4.2 แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลของสารที่ต้องการนำมาศึกษาเป็นแอนเทรเนอร์เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล -เมทานอล.....	44
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้ เอทานอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกกลั่นสกัด.....	48

รูปที่ 4.4	โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับ	49
รูปที่ 4.5	กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์	51
รูปที่ 4.6	การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับ	53
รูปที่ 4.7	โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับในส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	54
รูปที่ 4.8	การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับ	56
รูปที่ 4.9	โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองพลังงานโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับในส่วนของพลังงาน	57
รูปที่ 4.10	กราฟสถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลับโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์	59
รูปที่ 4.11	การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับ	61
รูปที่ 4.12	โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับ	62
รูปที่ 4.13	กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์	64
รูปที่ 4.14	การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับ	65
รูปที่ 4.15	โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับในส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	67
รูปที่ 4.16	การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับ	69
รูปที่ 4.17	โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองพลังงานโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับในส่วนของพลังงาน	70
รูปที่ 4.18	กราฟสถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลับโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์	72
รูปที่ 4.19	การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับ	74
รูปที่ 4.20	โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับ	75
รูปที่ 4.21	กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์	77

รูปที่ 4.40 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่น	110
รูปที่ 4.41 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองพลังงานโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่นสกัดในส่วนของพลังงาน	111
รูปที่ 4.42 กราฟสถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหากลั่นสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์.....	113
รูปที่ 4.43 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหากลั่นสกัด	115
รูปที่ 4.44 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหากลั่นสกัด.....	116
รูปที่ 4.45 กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหากลั่นสกัดโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์.....	118
รูปที่ 4.46 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่นสกัด	120
รูปที่ 4.47 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่นสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล	121
รูปที่ 4.48 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่น	123
รูปที่ 4.49 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองพลังงานโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่นสกัดในส่วนของพลังงาน	124
รูปที่ 4.50 กราฟสถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหากลั่นสกัดโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์.....	126
รูปที่ 4.51 การใช้พลังงานในกระบวนการกลั่นสกัดของแต่ละเอนเทรเนอร์.....	140

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เมทิลลัล (Methylal) หรือไดเมทอกซีมีเทน (Dimethoxymethane; DMM) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไวไฟสูง กลิ่นคล้ายกับคลอโรฟอร์ม ในปัจจุบันเมทิลลัลถือเป็นสารเคมีที่มีความสำคัญในการนำมาใช้ประโยชน์ในการเป็นสารเติมแต่งในน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อลดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลายจำนวนมากในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องสำอางและน้ำหอม อุตสาหกรรมสารทำความสะอาดและขจัดคราบไขมัน เป็นสารตัวกลางสำหรับการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ เป็นสารกำจัดจุลินทรีย์ในสี เป็นเอนเทรเนอร์ในกระบวนการกลั่นอะซีโอโทรปิก (Azeotropic Distillation) และการสกัดยิ่งยวด (Supercritical Extraction) เป็นต้น เมทิลลัลผลิตได้จากปฏิกิริยาผันกลับระหว่างเมทานอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Veschueren, 1983) ในการแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยกระบวนการแยกทั่วไปก่อน เช่น การกลั่น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลนั้นไม่สามารถแยกโดยใช้การกลั่นแบบปกติได้ เนื่องจากทั้งสองเป็นสารผสมอะซีโอโทรปิกที่จุดเดือดต่ำสุด (Minimum-Boiling Azeotrope) จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคในการแยกสารผสมอะซีโอโทรปิก (Seinosuke & Tanigawa, 2002)

วิธีการแยกสารผสมอะซีโอโทรปิกมีอยู่หลายวิธี ดังนี้ การกลั่นสลับความดัน (Pressure Swing Distillation) กระบวนการเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Process) กระบวนการโมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular Sieve Process) การกลั่นอะซีโอโทรปิก (Azeotropic Distillation) และการกลั่นสกัด (Extractive Distillation) ซึ่งพบว่ากระบวนการเยื่อเลือกผ่านและกระบวนการโมเลกุลลาร์ซีฟ เป็นเทคโนโลยีที่ง่ายและใช้พลังงานน้อย แต่ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพราะต้องใช้เยื่อเลือกผ่านและโมเลกุลลาร์ซีฟจำนวนมาก อีกทั้งยังเกิดการอุดตันได้ง่ายทำให้เสียค่าใช้จ่ายกับเวลาในการทำมาสะอาดและซ่อมบำรุงมาก (สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์ และเดโช ชุนนคร, 2552 และ ชลธิรา บุญฟุ้ง, 2553) ส่วนการกลั่นสลับความดันนั้นนิยมใช้แยกสารผสมอะซีโอโทรปิกเนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวทำละลายและไม่ต้องซ่อมบำรุงบ่อย แต่มีการใช้พลังงานกลซึ่งมีราคาสูงกว่าพลังงานความร้อน ทำให้การกลั่นอะซีโอโทรปิกและการกลั่นสกัด จะได้รับความนิยมมากกว่าการกลั่นสลับความดันเนื่องจากประหยัดพลังงานและสามารถดำเนินการได้ง่ายกว่า แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการกลั่นสกัดกลับได้รับความนิยมมากกว่าการกลั่นแบบอะซีโอโทรปิก เนื่องจากสารที่ใช้เป็นสารเอนเทรเนอร์หรือตัวทำละลายซึ่งจะทำให้สมดุลของไอและของเหลวเปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้แยกสารผสมอะซีโอโทรปิกได้นั้น ในกรณีการกลั่นอะซีโอโทรปิก เอนเทรเนอร์ที่นำมาใช้จะเกิดอะซีโอโทรปิกกับสารผสมตัวใดตัวหนึ่งซ้ำอีก แต่การกลั่นสกัดเอนเทรเนอร์ที่ใช้มีจุดเดือดสูงกว่าองค์ประกอบของสารผสม รวมทั้งมีสัมพรรคภาพทางเคมี (Chemical Affinity) กับองค์ประกอบตัวใดตัวหนึ่งซึ่งเป็นสารที่เราต้องการแยกออกมาจากสารผสมนั้นสูงมาเพื่อลดการระเหยขององค์ประกอบตัวนั้นแล้วจึงนำไปกลั่น ซึ่งสารเอนเทรเนอร์จะไม่เกิดอะซีโอโทรปิกกับองค์ประกอบของสารผสมอีกจึงใช้พลังงานความร้อนน้อยกว่าการกลั่นอะซีโอโทรปิก (IEnergy Guru, 2015)

จะเห็นได้ว่ามีหลายวิธีที่สามารถแยกสารผสมอะซิโอบโรปได้ โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาหลักการของแต่ละวิธี เพื่อเลือกวิธีการที่เหมาะสมและประหยัดพลังงานมากที่สุดที่จะนำมาสร้างแบบจำลองในการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล ซึ่งจากการศึกษาทำให้ทราบว่าวิธีการกลั่นสกัด (Extractive Distillation) เป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานที่สุดและในการกลั่นสกัดนั้นต้องมีการเติมเอนเทรเนอร์ จึงต้องมีการเลือกใช้เอนเทรเนอร์ให้เหมาะสม (Dong et al., 2561) ซึ่งมีเอนเทรเนอร์ที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลอยู่หลายชนิด เอนเทรเนอร์บางชนิดมีความเป็นพิษสูง บางชนิดมีความสัมพันธ์ทางเคมีกับสารที่ต้องการแยกไม่สูงพอ รวมทั้งอาจเป็นอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน ผู้จัดทำจึงเลือกใช้เอนเทรเนอร์ 7 ชนิด ดังนี้

1. ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide; DMF)
2. เอทานอลามีน (Ethanolamine)
3. เมทิลไพร์โรลิดินอน (N-Methyl-2-Pyrrolidinone; NMP)
4. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol)
5. กลีเซอรอล (Glycerol)
6. เตตระเอทิลีนไกลคอล (Tetraethylene Glycol)
7. โพรไพลีนไกลคอล (Propylene Glycol)

โดยมีรายละเอียดที่เป็นเอกสารข้อมูลของสารเคมี (Material Safety Data Sheet: MSDS) ในบทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไว้ด้วย เพื่อป้องกันข้อมูลพื้นฐานและความเป็นอันตรายของสารเคมี ซึ่งสำหรับเอนเทรเนอร์ที่เลือกศึกษา 4 ชนิดแรกได้มีการนำมาใช้เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลด้วยการกลั่นสกัดแล้ว เพราะมีความเป็นพิษต่ำและมีความสามารถในการเป็นเอนเทรเนอร์ได้ดี ส่วนไดเมทิลฟอร์มมาไมด์มีความเป็นพิษค่อนข้างสูงแต่มีความสัมพันธ์ทางเคมีกับสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นเอนเทรเนอร์ในการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล (Dong et al., 2561) สารที่นำมาศึกษาเพิ่มเติมคือ กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรไพลีนไกลคอล เนื่องจากยังไม่มีมีการนำสารทั้ง 3 มาศึกษาทดลองเพื่อใช้เป็นเอนเทรเนอร์ในการกลั่นสกัดแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล ซึ่งกลีเซอรอลเป็นสารที่น่าสนใจเนื่องจากมีโครงสร้างคล้ายกับเอทิลีนไกลคอลและยังมีความเป็นพิษต่ำ ส่วนเตตระเอทิลีนไกลคอลและโพรไพลีนไกลคอลเป็นสารในกลุ่มไกลคอลเช่นเดียวกับเอทิลีนไกลคอล สารทั้งสามตัวมีจุดเดือดสูงกว่าทั้งเมทานอลและเมทิลลัลซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของเอนเทรเนอร์ รวมทั้งยังมีคุณสมบัติในการใช้งานคล้ายกับเอทิลีนไกลคอลและมีความเป็นพิษต่ำ สารทั้งสามจึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาศึกษาเป็นเอนเทรเนอร์ และยิ่งถ้าสามารถนำมาเป็นสารเอนเทรเนอร์ในกระบวนการนี้ได้ จะเป็นประโยชน์อย่างมากเนื่องจากจะทำให้ลดต้นทุนลงและมีความปลอดภัยมากขึ้น (เคมีอุตสาหกรรม, 2561 Safety Data Sheet, 2013 และ กรุงเทพฯเคมี, 2561)

ดังนั้นเพื่อศึกษาสารเคมีที่นำมาใช้เป็นเอนเทรเนอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้พลังงานน้อยที่สุดและมีความเป็นพิษต่ำ จึงทำการศึกษาการประเมินประเมินพลังงานของกระบวนการแยกสำหรับสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยการกลั่นสกัดกับเอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้จะจำลองกระบวนการกลั่นสกัดโดยใช้โปรแกรม

สำเร็จรูป Aspen Plus V8.8 และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 18.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นสกัด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการกลั่นสกัด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ
- 1.2.3 เพื่อประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลของเอนเทอร์เนอร์ที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาการใช้โปรแกรม Aspen Plus V8.8 ในการจำลองกระบวนการการกลั่นสกัด (Extractive Distillation) เพื่อแยกสารผสมเมทานอล-เมทิลลัล
- 1.3.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม Minitab 18.1 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)
- 1.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบการใช้สารเอนเทอร์เนอร์ชนิดต่าง ๆ สำหรับการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทานอล-เมทิลลัล ได้แก่ ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ เอทานอลาไมน์ เมทิลไพรโรลิดีนออน เอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรโพลีนไกลคอล

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

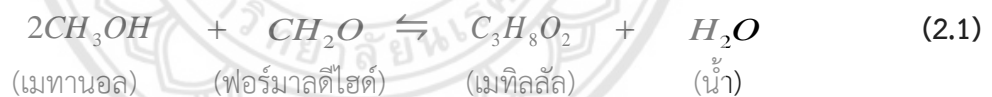
ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พุทธศักราช 2561 ถึง เดือนเมษายน พุทธศักราช 2562

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

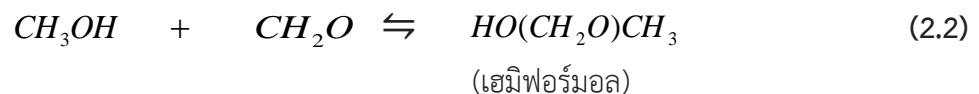
ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กระบวนการผลิตเมทิลลัล ที่จะทำให้เกิดสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล ซึ่งเป็นอะซิโโทรปกันที่จุดเดือดต่ำสุด จากนั้นจะเป็นหลักการพอสังเขปของวิธีการต่างๆ ที่สามารถแยกสารผสมอะซิโโทรปได้ รวมทั้งหลักการของกระบวนการกลั่นสกัดซึ่งเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในงานวิจัยโดยจะกล่าวไปถึงแผนที่เส้นโค้งรีซีคิวลที่ต้องนำมาพิจารณาคุณสมบัติของเอนเทรเนอร์ที่เติมเข้าไปเป็นองค์ประกอบที่สามารถทำให้สารผสมอะซิโโทรปบริสุทธิ์มากขึ้นได้ ต่อมาจะเป็นข้อมูลของสารทั้ง 9 ชนิดคือเอนเทรเนอร์ 7 ชนิดและของเมทิลลัลกับเมทานอล จากนั้นจะเป็นวิธีพื้นผิวตอบสนอง การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง รวมถึงโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในงานวิจัย (Aspen Plus V8.8 และ Minitab 18.1) และส่วนสุดท้ายจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตเมทิลลัล (Methylal Process)

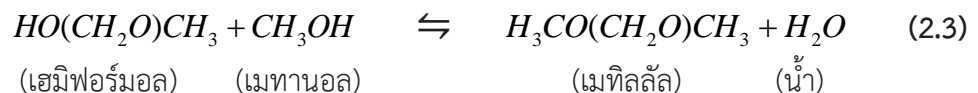
กระบวนการผลิตเมทิลลัลโดยทั่วไปจะสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation Reaction) ของเมทานอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ ในขั้นตอนการสังเคราะห์เมทิลลัลประกอบไปด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ต่อกันแบบอนุกรมโดยใช้กรดวิวิธพันธ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Heterogeneous Acidic Catalyst) จะทำการป้อนเมทานอลกับฟอร์มัลดีไฮด์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนสุด และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังส่วนกลางเครื่องปฏิกรณ์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส จะได้เมทิลลัลและน้ำออกมา ดังสมการที่ 2.1



จากปฏิกิริยาข้างต้น จะเห็นว่าต้องใช้เมทานอล 2 โมลเพื่อทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ 1 โมล หมายความว่าในกระบวนการสังเคราะห์เมทิลลัลจะต้องใช้เมทานอลมากกว่าฟอร์มัลดีไฮด์ โดยมีลำดับการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังต่อไปนี้ ดังสมการที่ 2.2



จากนั้นเฮมิฟอร์มอลจะทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอลจนหมด และได้เมทิลลัลกับน้ำ ดังสมการที่ 2.3



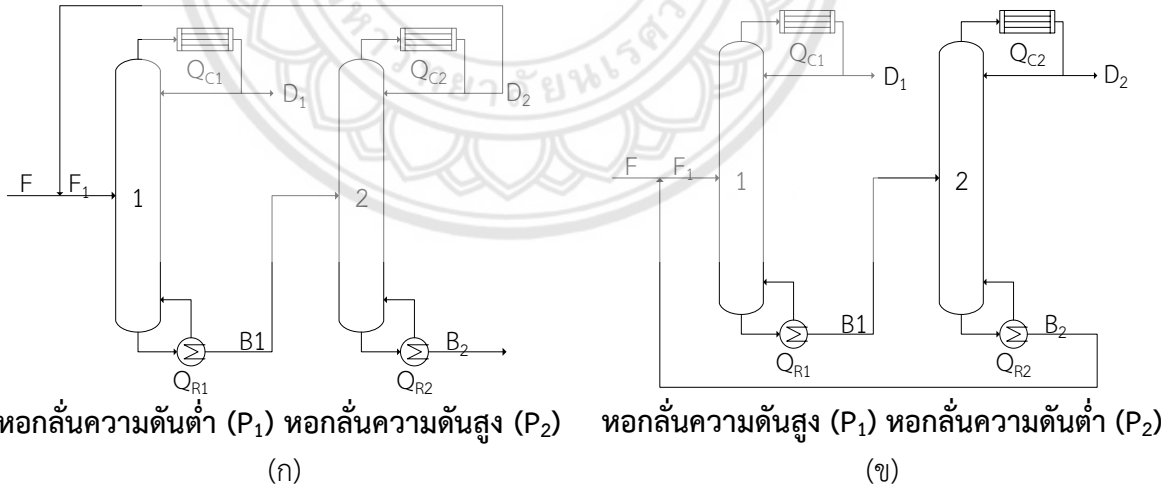
เนื่องจากการเติมเมทานอลที่มากเกินไปและเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างเมทานอลกับเมทิลลัสและน้ำโดยจะสามารถแยกน้ำออกจากเมทานอลกับเมทิลลัสได้ด้วยการกลั่นธรรมดาแต่เมทิลลัสและเมทานอลมีการเกิดเป็นสารอะซีโอโทรปกันที่จุดเดือดต่ำสุด ซึ่งไม่สามารถทำให้เมทิลลัสมีความบริสุทธิ์ที่สูงกว่าร้อยละ 95 ได้ด้วยการกลั่นธรรมดาจึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการแยกสารผสมเมทิลลัส-เมทานอล (Weidert et al., 2016)

2.2 วิธีการที่ใช้ในการแยกสารผสมอะซีโอโทรป

ในการแยกสารผสมอะซีโอโทรปสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

2.2.1 การกลั่นสลับความดัน (Pressure Swing Distillation)

เป็นการกลั่นที่อาศัยหลักการความต่างความดันของหอกกลั่น เมื่อสารผสมอะซีโอโทรปทวิภาค (Binary Azeotrope) สูญเสียความดันหรือมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบร้อยละ 5 โดยโมล หรือมากกว่าในช่วงความดันปานกลาง ควรพิจารณาการใช้ตัวทำละลายโดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายในการกลั่น การกลั่นแบบสลับความดันอาศัยหลักการความต่างความดันของทั้งสองคอลัมน์ โดยการกลั่นแยกสารผสมอะซีโอโทรปที่จุดเดือดต่ำสุด (Minimum-Boiling Azeotrope) ความดันของหอกกลั่นหอที่ 1 จะน้อยกว่าความดันในหอกกลั่นหอที่ 2 (รูปที่ 2.1 (ก)) ส่วนการกลั่นแยกสารผสมอะซีโอโทรปที่จุดเดือดสูงสุด (Maximum-Boiling Azeotrope) ความดันของหอกกลั่นหอที่ 1 จะสูงกว่าความดันในหอกกลั่นหอที่ 2 (รูปที่ 2.1 (ข)) แต่วิธีการนี้สิ้นเปลืองพลังงานมากเพราะต้องใช้พลังงานกลซึ่งมีราคาสูงกว่าพลังงานความร้อน (Seader & Henley, 1998)



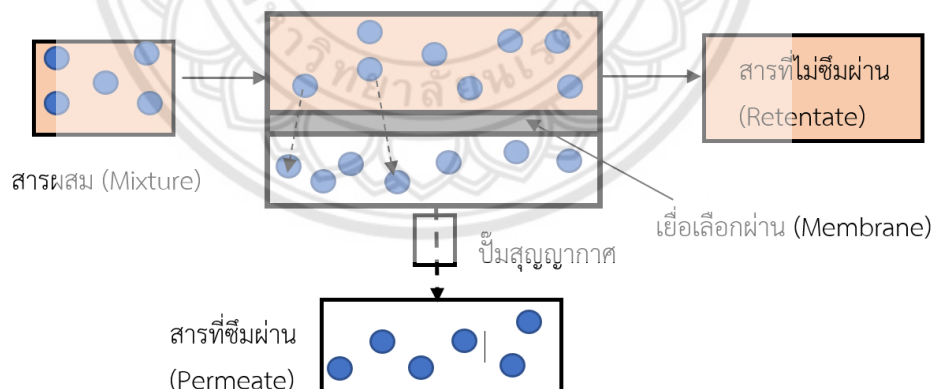
รูปที่ 2.1 (ก) การกลั่นสารผสมอะซีโอโทรปที่มีจุดเดือดต่ำที่สุด และ (ข) การกลั่นสารผสมอะซีโอโทรปที่มีจุดเดือดสูงที่สุด ในกระบวนการกลั่นสลับความดัน

ที่มา: Separation Process Principles, Seader & Henley.

จากรูปที่ 2.1	Q_{C1} Q_{C2}	คือ พลังงานของเครื่องควบแน่นหอทที่ 1 และหอทที่ 2 ตามลำดับ
	Q_{R1} Q_{R2}	คือ พลังงานของหม้อต้มหอทที่ 1 และหอทที่ 2 ตามลำดับ
	D_1 D_2	คือ สารที่กลั่นได้ทางยอดหอทที่ 1 และหอทที่ 2 ตามลำดับ
	B_1 B_2	คือ สารที่กลั่นได้ทางก้นหอทที่ 1 และหอทที่ 2 ตามลำดับ
	F	คือ สารผสมอะซิโโทรป้อนเข้า (Feed Azeotrope)
	F1	คือ เอนเทรเนอร์ป้อนเข้า

2.2.2 กระบวนการเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Process)

เป็นกระบวนการแยกสารผสม โดยใช้กลไกการซึมผ่านของสารผ่านเยื่อเลือกผ่าน การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านนั้นประหยัดพลังงานและประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้งอุปกรณ์ แต่ยังไม่แพร่หลายในประเทศไทยเพราะการพัฒนาแผ่นเยื่อเองในประเทศยังเป็นศาสตร์ใหม่ ทำให้เทคโนโลยีการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านในประเทศไทยพัฒนาช้า เยื่อเลือกผ่านที่ผลิตในทางการค้ามีประสิทธิภาพการแยกไม่สูงมากพอ รวมทั้งไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และต้องมีการเลือกแผ่นเยื่อเลือกผ่านให้เหมาะสมกับการแยกสารผสม นอกจากนี้ยังอาจเกิดการอุดตันของแผ่นเยื่อตามจุดที่สารละลายหยุดนิ่งหรือไหลช้า การทำความสะอาดและเปลี่ยนแผ่นทำได้ยุ่งยากไม่สะดวกต้องใช้เวลา โดยกระบวนการเยื่อเลือกผ่านมีหลากหลายวิธีการที่ใช้ เช่น ออสโมซิสผันทกลับ (Reverse Osmosis; RO) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration; NF) และอิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis; ED) เป็นต้น แต่วิธีที่ใช้ในการแยกสารผสมอะซิโโทรปคือวิธีเพอแวปพอเรชัน (Pervaporation; PV) สารผสมจะถูกแยกโดยการซึมผ่านเยื่อเลือกผ่าน (รูปที่ 2.2) (Ho & Sirkar,1992)



รูปที่ 2.2 แผนภาพของกระบวนการเพอแวปพอเรชัน

ที่มา: <https://www.omicsonline.org/open-access/membranes-with-favorable-chemical-materials-for-pervaporation-process-a-review-2155-9589-1000164.php?aid=83520>, Manshad et al.

2.2.3 กระบวนการโมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular Sieve Process)

โมเลกุลลาร์ซีฟเป็นสารสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นที่ดีมาก ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างในระดับต่ำ (ร้อยละ 10-30) โดยมีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นประมาณร้อยละ 22 ของน้ำหนักตัวเอง โครงสร้างพิเศษทำให้โมเลกุลลาร์ซีฟ มีพื้นผิวสัมผัสประมาณ 7-800 ตารางเมตรต่อ 1 กรัมและมีแรงดึงดูดความชื้นที่สูงมาก เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้สารเคมีอื่น ๆ มาช่วยในการแยก จึงไม่ต้องคำนึงถึงการกำจัดของเสีย แต่วิธีการนี้นิยมใช้ในการแยกเอทานอลออกจากน้ำ เพราะคุณสมบัติของโมเลกุลลาร์ซีฟ คือดูดความชื้นหรือสารประกอบเชิงขั้วก็สามารถดูดซับด้วยไหลสูงแม้มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ แต่เกิดการอุดตันได้ง่าย ต้องใช้โมเลกุลลาร์ซีฟในปริมาณมาก ทำความสะอาดบ่อย และดูดซึมสารที่มีขนาดโมเลกุลที่ใกล้เคียงกันยาก (บริษัท อีทีเอส อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด, 2557) โมเลกุลลาร์ซีฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น ชนิด 3A ชนิด 4A ชนิด 5A และชนิด 13X เป็นต้น (รูปที่ 2.3) โดยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติ รูปร่าง ลักษณะ และขนาดที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิง



(ก)

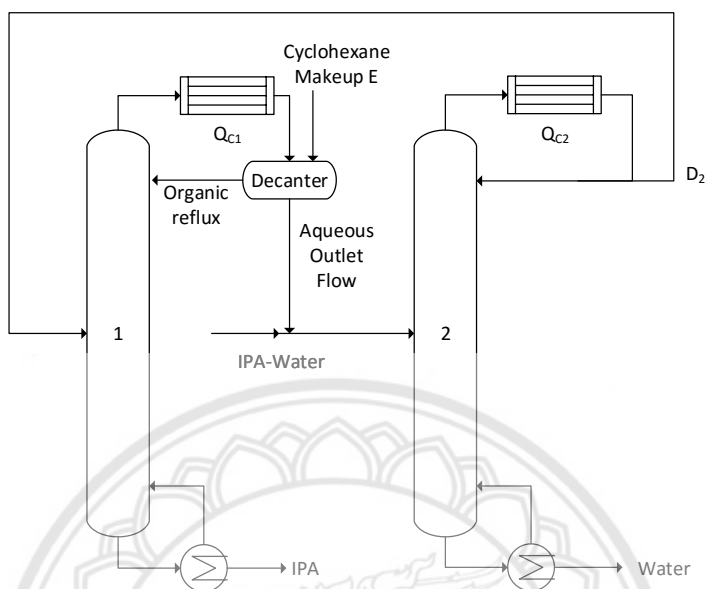
(ข)

รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปร่างโมเลกุลลาร์ซีฟแต่ละชนิด (ก) ชนิด XL-8 Mini ชนิด TE 143 R และชนิด 13X-APG 4x5 ตามลำดับ (ข) ชนิด 3A 1/8 ชนิด 3A 1/16 และชนิด HiSiv 3000 1/16 ตามลำดับ ที่มา: <https://www.obermeier.de/en/products/uop-molecular-sieve>, OBERMEIER.

2.2.4 การกลั่นอะซิโทรปิก (Azeotropic Distillation)

เป็นวิธีการกลั่นแยกสารผสมโดยใช้คุณสมบัติแบบจุดร่วมของสารผสมร่วมกัน กรณีที่ของเหลวผสมที่ต้องการแยกมีจุดอะซิโทรปหรือมีคู่สารที่มีค่าการระเหยสัมพัทธ์ (Relative Volatility) ใกล้เคียงกับ 1 จะไม่สามารถแยกสารให้บริสุทธิ์ได้โดยใช้หอกลั่นเพียงหอเดียว ดังนั้นจึงใช้วิธีเติมเอเทนเทอร์เนอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบตัวที่ 3 (เอเทนเทอร์เนอร์) ที่มีสมบัติระเหยง่ายและสามารถทำให้เกิดสารผสมอะซิโทรปกับองค์ประกอบทั้งสองตัวหรือตัวใดตัวหนึ่ง เมื่อนำไปกลั่นจะได้สารผสมอะซิโทรปจากยอดหอ กลั่นและได้สารที่เกือบจะบริสุทธิ์จากกันหอกลั่น (รูปที่ 2.4) โดยเอเทนเทอร์เนอร์ที่มีอยู่ในสารผสมอะซิโทรปที่ได้จากยอดหอกลั่นสามารถนำไปใช้ใหม่ได้ด้วยวิธีการที่เหมาะสม ในกระบวนการนี้มีความซับซ้อนค่าก่อสร้างแพง ใช้พลังงานในการกลั่นสูงมาก เอเทนเทอร์เนอร์บางชนิดมีความเป็นพิษและติดไฟง่าย

และเกิดสารผสมอะซิโทรอปซ์ ซึ่งอาจต้องกลั่นแยกอีกครั้งเพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการออกไปและนำสารที่ต้องการกลับมาใช้ใหม่ (Seader & Henley, 1998)

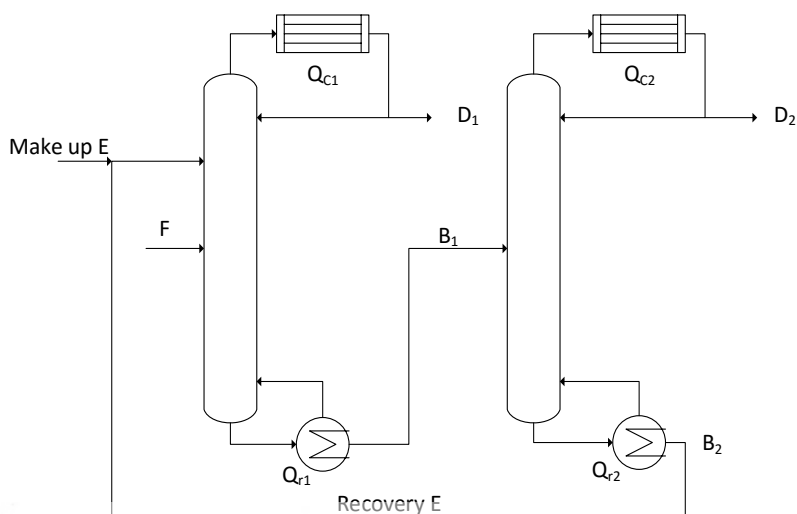


รูปที่ 2.4 การกลั่นอะซิโทรอปิกวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Azeotropic Distillation) ของสารผสมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์-น้ำ โดยใช้ไซโคลเฮกเซนเป็นเอนเทรเนอร์ ที่มา: <https://bit.ly/2W66U8V>, Arifin & Chien.

จากรูปที่ 2.4 Q_{c1} Q_{c2} คือ พลังงานของเครื่องควบแน่นที่ 1 และที่ 2
 D_2 คือ สารที่กลั่นได้ทางยอดหอ
 E คือ เอนเทรเนอร์ (Entrainer)

2.2.5 การกลั่นสกัด (Extractive Distillation)

จะใช้วิธีเดียวกับการกลั่นแบบอะซิโทรอปิกกล่าวคือ ใช้องค์ประกอบตัวที่ 3 ในการทำให้สมดุลของไอและของเหลวเปลี่ยนแปลงไปเพื่อแยกของผสม กรณีของการกลั่นแบบอะซิโทรอปิก สารเอนเทรเนอร์จะทำให้เกิดอะซิโทรอปิกบอนด์ประกอบตัวใดตัวหนึ่งในของผสม แต่ในกรณีของการกลั่นสกัดจะเติมสารเอนเทรเนอร์ที่มีจุดเดือดสูงกว่าองค์ประกอบของสารผสม (รูปที่ 2.5) โดยจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาจากยอดหอและก้นหอเป็นสารผสมซึ่งสามารถนำไปกลั่นแยกเพื่อนำเอนเทรเนอร์กลับมาใช้ในกระบวนการใหม่ได้ และเอนเทรเนอร์ยังมีความสัมพันธ์ทางเคมีกับองค์ประกอบตัวใดตัวหนึ่งในองค์ประกอบทั้งสองนั้นสูงมาก เพื่อลดการระเหยขององค์ประกอบตัวใดตัวหนึ่งแล้วจึงนำไปกลั่น การกลั่นสกัดโดยทั่วไปจะมีความสิ้นเปลืองความร้อนน้อยกว่าการกลั่นแบบอะซิโทรอปิกและสามารถแยกเอนเทรเนอร์ออกมาได้ง่ายกว่า (Seader & Henley, 1998)

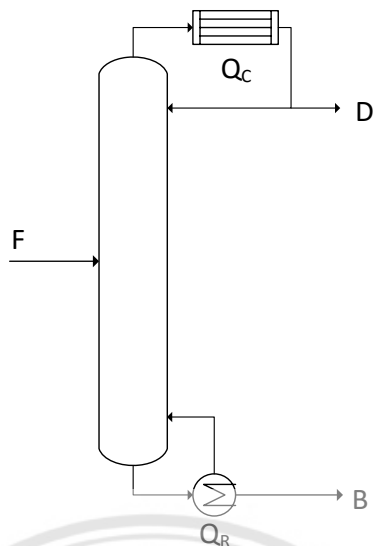


รูปที่ 2.5 กระบวนการในการกลั่นสกัดสารผสมอะซิโโทรปที่มีจุดเดือดต่ำสุด
ที่มา: Separation Process Principles, Seader & Henley.

จากรูปที่ 2.5	Q_{C1}	Q_{C2}	คือ พลังงานของเครื่องควบแน่นหอที่ 1 และหอที่ 2 ตามลำดับ
	Q_{R1}	Q_{R2}	คือ พลังงานของหม้อต้มหอที่ 1 และหอที่ 2 ตามลำดับ
	D_1	D_2	คือ สารที่กลั่นได้ทางยอดหอที่ 1 และหอที่ 2 ตามลำดับ
	B_1	B_2	คือ สารที่กลั่นได้ทางก้นหอที่ 1 และหอที่ 2 ตามลำดับ
	F		คือ สารผสมอะซิโโทรป
	E		คือ เอเรเทรเนอร์

2.3 การกลั่น (Distillation)

การกลั่นเป็นการแยกสารผสมที่มีตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไป โดยการใช้ความแตกต่างในการระเหย กลายเป็นไอที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน การกลั่นเป็นวิธีที่นิยมใช้มากในการแยกสารเคมีที่ผสมกันอยู่ จะทำให้สารเกิดความสุกใสมากขึ้น เช่น การกลั่นปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และเครื่องดื่ม เป็นต้น (Seader & Henly, 1998) (รูปที่ 2.7) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่อยู่ในสารผสม เช่น ถ้าสารผสมมี 2 องค์ประกอบ ก็จะสามารถแยกผลิตภัณฑ์ได้ 2 ผลิตภัณฑ์ และถ้าสารผสมมีมากกว่า 2 องค์ประกอบ ก็จะได้ผลิตภัณฑ์มากกว่า 2 ผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นจะถูกบังคับให้ออกทางยอดหอกลั่นและก้นหอกลั่นตามความแตกต่างขององค์ประกอบที่ป้อนเข้า การป้อนสารผสมเข้าไปในหอกลั่นสามารถป้อนได้ทั้งของเหลวและของเหลวผสมไอ โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกทางก้นหอกลั่นจะเป็นของเหลวเสมอ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ออกทางยอดหอกลั่นสามารถเป็นได้ทั้งของเหลวและไอหรือทั้งสองก็ได้ ในการแยกสารผสมจะต้องทำให้สารนั้นเกิดเป็น 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคของเหลว และวัฏภาคไอ ไอที่อยู่ทางด้านล่างจะลอยขึ้นทางด้านบนและสัมผัสกับของเหลวในแต่ละชั้นที่ตกลงมาทางด้านล่าง โดยในการสัมผัสกันระหว่างของเหลวและไอจะทำให้เกิดสมดุลของไอและของเหลว (Vapor-Liquid Equilibrium; VLE)



รูปที่ 2.6 การกลั่นของสารผสมทวิภาค (Distillation of a Binary Mixture)
ที่มา: Separation Process Principles, Seader & Henley.

ดุลมวลรวม (Overall Mass Balance)

$$F = D + B \quad (2.10)$$

ดุลส่วนประกอบ (Component Balance)

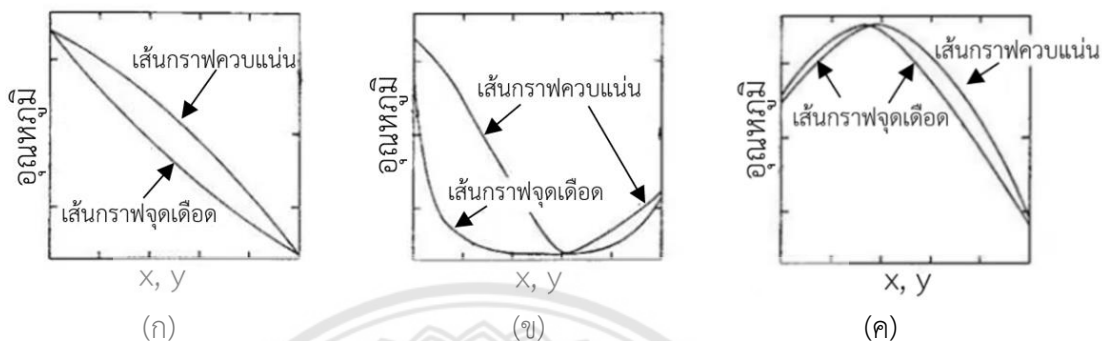
$$Fx_F = Dx_D + Bx_B \quad (2.11)$$

ดุลพลังงาน (Energy Balance)

$$Fh_F + Q_R = Dh_D + Bh_B + Q_C \quad (2.12)$$

- โดยที่ F คือ สารผสมป้อนเข้า (Feed Mixture)
 D คือ สารที่กลั่นได้ทางยอดหอ (Distillate)
 B คือ สารที่กลั่นได้ทางก้นหอ (Bottom)
 Q_R คือ พลังงานของหม้อต้ม
 Q_C คือ พลังงานของเครื่องควบแน่น
 x_D x_B x_F คือ องค์ประกอบ
 h_F h_D h_B คือ เอนทาลปี

สมดุลของไอและของเหลวในสารผสมทวิภาค (Binary Mixture) ภายใต้ความดันคงที่ โดยทั่วไปจะแสดงด้วยเส้นกราฟจุดเดือด-เส้นกราฟควบแน่น (รูปที่ 2.7) โดยให้แกนนอนเป็นสัดส่วนโดยโมลของไอและของเหลว (x = สัดส่วนโดยโมลของของเหลว และ y = สัดส่วนโดยโมลของไอ) และให้แกนตั้งเป็นอุณหภูมิ หรือที่เรียกว่าแผนภาพ Tx-y (Tx-y Diagram) (IEnergy Guru, 2015)



รูปที่ 2.7 สมดุลของไอและของเหลวในสารผสมทวิภาค (ก) สมดุลของไอและของเหลวในระบบทั่วไป (ข) สมดุลของไอและของเหลวในระบบสารผสมอะซิโโทรปที่มีจุดเดือดต่ำสุด (Minimum-Boiling Azeotrope) (ค) สมดุลของไอและของเหลวในระบบสารผสมอะซิโโทรปที่มีจุดเดือดสูงสุด (Maximum-Boiling Azeotrope)
ที่มา: <https://ienergyguru.com/2015/09/distillation-การกลั่น>, IEnergyGuru.

จุดประสงค์ในการกลั่นคือเพื่อต้องการแยกสารผสมให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกมาจากทางยอดหอกลั่นและ/หรือ ออกมาทางก้นหอกลั่น โดยความสามารถในการแยกจะขึ้นอยู่กับค่าการระเหยสัมพัทธ์ (Relative Volatility) ซึ่งค่าการระเหยสัมพัทธ์เป็นคุณสมบัติของสมดุลของไอและของเหลว (สมการ 2.4)

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (2.4)$$

โดย K_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Distribution Coefficient) ขององค์ประกอบสาร i ในสมดุลระหว่างวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลว

ถ้า $K_i = 1$ จะมีองค์ประกอบสาร i ในวัฏภาคไอเท่ากับวัฏภาคของเหลว

$K_i > 1$ จะมีองค์ประกอบสาร i มากในวัฏภาคไอ

$K_i < 1$ จะมีองค์ประกอบสาร i น้อยในวัฏภาคไอเมื่อเทียบกับวัฏภาคของเหลว

ในกรณีที่ K_i มีค่าสูงก็จะมีแรงผลักดันมากขึ้นทำให้สามารถกลั่นได้ง่ายขึ้น อัตราส่วนของค่าการระเหยสัมพันธ์ ขององค์ประกอบ i และ j โดยค่าการระเหยสัมพันธ์ (Relative Volatility; α_{ij}) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการกลั่นแยกสารผสม เมื่อเปรียบเทียบค่าการระเหยขององค์ประกอบ i และค่าความสัมพันธ์ขององค์ประกอบ j จะได้สมการดังนี้ (สมการที่ 2.5)

$$\alpha_{ij} = \frac{K_i}{K_j} \quad (2.5)$$

$\alpha_{ij} > 1$ องค์ประกอบของสาร i มีการระเหยมากกว่าองค์ประกอบของสาร j

$\alpha_{ij} < 1$ องค์ประกอบของสาร i มีการระเหยน้อยกว่าองค์ประกอบของสาร j

จากกฎของเรอท์ (Raoult's Law) ในกรณีที่คิดเป็นสารในอุดมคติ ($\gamma = 1$) จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้ (สมการที่ 2.6)

$$y_i = \frac{P_i^{sat}}{P} x_i \quad (2.6)$$

ในกรณีที่สารนั้นไม่เป็นสารในอุดมคติจะมีความซับซ้อนมากกว่าคิดเป็นสารในอุดมคติ จึงต้องมีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (Activity Coefficient; γ) (สมการที่ 2.7) ซึ่งค่า γ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้น สามารถหาค่า γ ได้จากการทดลองแบบจำลองสัมประสิทธิ์แอกติวิตี หลายวิธี เช่น Wilson NRTL UNIFAC และ UNIQUAC เป็นต้น (เลอสรวง เมฆสุด, 2552)

$$y_i = \gamma_i \frac{P_i^{sat}}{P} x_i \quad (2.7)$$

โดยที่ y_i คือ สัดส่วนโดยโมลของสาร i ในวัฏภาคไอ
 x_i คือ สัดส่วนโดยโมลของสาร i ในวัฏภาคของเหลว
 P คือ ความดันรวม
 P_i^{sat} คือ ความดันไออิ่มตัวของสาร i
 γ_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของสาร i

โดยผู้จัดทำได้ใช้วิธี UNIFAC (Universal Functional Activity Coefficient) ในการคำนวณค่า γ ของของเหลว ในรูปแบบของ UNIFAC สามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์เทียบกับจำนวนโมลของสาร (สมการที่ 2.8)

$$\ln \gamma_i = 1 - V_i + \ln V_i - 5q_i \left(1 - \frac{V_i}{F_i} + \ln \left(\frac{V_i}{F_i} \right) \right) + \sum_k V_k^{(i)} (\ln \Gamma_k - \ln \Gamma_k^{(i)}) \quad (2.8)$$

โดยที่

$$V_i = \frac{r_i^{3/4}}{\sum_j x_j r_j^{3/4}}$$

$$V_i = \frac{r_i}{\sum_j x_j r_j}$$

$$r_i = \sum V_i^{(i)} R_k$$

$$F_i = \frac{q_i}{\sum_j x_j q_j}$$

$$q_i = \sum V_k^i Q_k$$

เมื่อ r_i และ R_i คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของสารบริสุทธิ์และหมู่ฟังก์ชัน
 q_i และ Q_i คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวภายนอกของโมเลกุลของสารบริสุทธิ์ และหมู่ฟังก์ชัน
 พารามิเตอร์ R_i และ Q_i สามารถหาได้จากตารางในเอกสารต่างๆ
 (สุจิตรา ดวงศรี, 2554)

สำหรับความดันไออิ่มตัวของสาร i จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการองตน (Antoine's Equation) (วงศ์ ปวราจารย์ และอาทิตย์วรรณ โชติพลกษ์, 2558) ดังสมการที่ 2.9

$$\log_{10} P_i^{sat} = A_i - \frac{B_i}{C_i + T} \quad (2.9)$$

โดย A_i B_i C_i คือ ค่าคงที่ในสมการองตนของสาร i
 P_i^{sat} คือ ความดันไออิ่มตัวของสาร i (มิลลิเมตรปรอท; mmHg)
 T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส; °C)

จากสมการที่ 2.9 ในการหาความดันไออิ่มตัว (P_i^{sat}) ของสารแต่ละชนิด จะต้องรู้ค่าคงที่สมการองตนในอุณหภูมิที่ต้องการก่อน โดยผู้จัดทำได้ทำการศึกษาสารอยู่ 9 สาร โดยจะมีค่าคงที่ของสมการองตน (ตารางที่ 2.1) (Luyben, 1992)

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สมการองตนของสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลและเอนเทรนเนอร์

ลำดับ	ชื่อสาร	A_i	B_i	C_i
1	เมทิลลัล	7.16103	1197.95	238.031
2	เมทานอล	8.09126	1582.91	239.096
3	ไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์	7.10850	1537.78	210.390
4	เอทานอลาไมน์	8.36214	2117.92	215.389
5	เมทิลไพโรโรลิดินอน	7.54826	1979.68	222.200
6	เอทิลีน ไกลคอล	9.69941	3147.10	264.240
7	กลีเซอรอล	9.90788	3821.36	253.806
8	เตตระเอทิลีน ไกลคอล	9.07325	2968.08	171.457
9	โพรพิลีน ไกลคอล	9.18762	2651.27	232.783

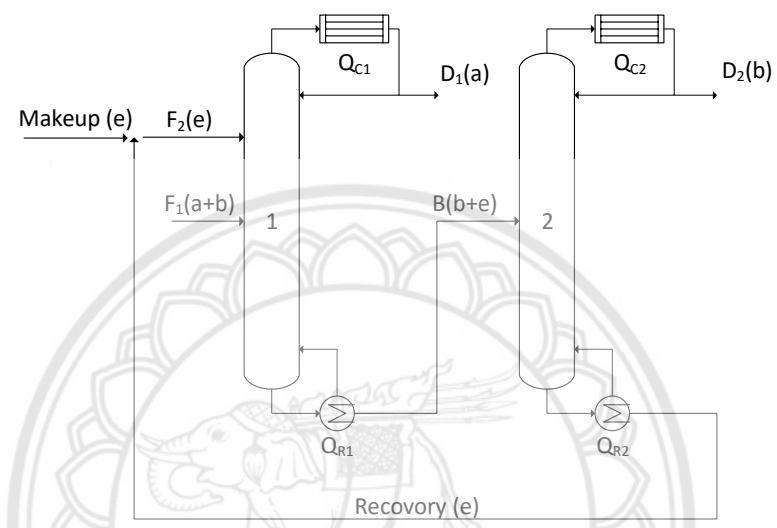
ที่มา: <https://bit.ly/2UUTrEL>, TEACHERS.

2.4 การกลั่นสกัด (Extractive Distillation)

การกลั่นสกัดเป็นวิธีการที่ถูกใช้ในการแยกสารผสมอะซิโโทรป โดยการกลั่นสกัดสามารถกลั่นได้ทั้งสารผสมอะซิโโทรปที่มีจุดเดือดต่ำสุด (Minimum-Boiling Azeotrope) และสารผสมอะซิโโทรปที่มีจุดเดือดสูงสุด (Maximum-Boiling Azeotrope) และใช้ในการแยกสารผสมอื่น ๆ ที่องค์ประกอบหลักมีค่าการระเหยสัมพัทธ์ (Relative Volatility) ต่ำกว่าหรือใกล้เคียง 1 (Sun et al., 2018) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมา โดยการกลั่นสกัดจะเพิ่มองค์ประกอบตัวที่ 3 หรือที่เรียกว่าเอนเทรนเนอร์ลงไปเพื่อช่วยให้สารผสมมีการแยกกันได้ดีขึ้น ถ้าสารผสมที่ป้อนเข้าในหอกลั่นเป็นอะซิโโทรปที่มีจุดเดือดต่ำสุด เอนเทรนเนอร์จะต้องมีความสามารถในการระเหยต่ำกว่าองค์ประกอบหลักที่เราต้องการแยกในสารผสมป้อนเข้า และเอนเทรนเนอร์จะถูกป้อนเข้าทางภาคด้านบนเหนือชั้นป้อนเข้าหลักแต่ไม่ถึงภาคบนสุดของหอกลั่น เอนเทรนเนอร์ที่เป็นของเหลวจะตกลงสู่ก้นหอ และจะมีเอนเทรนเนอร์ส่วนน้อยที่กลายเป็นไอลอยขึ้นทางยอดหอ ถ้าสารผสมที่ป้อนเข้าในหอกลั่นเป็นอะซิโโทรปที่มีจุดเดือดสูง เอนเทรนเนอร์จะถูกป้อนเข้าไปในชั้นเดียวกันกับชั้นป้อนเข้าหลัก เอนเทรนเนอร์และสารผสมที่ป้อนเข้าจะต้องมีความแตกต่างกัน โดยเอนเทรนเนอร์จะไปเพิ่มค่าการระเหยสัมพัทธ์ให้กับองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่ง หรือทั้งสององค์ประกอบ และจะต้องไม่ทำให้เกิดอะซิโโทรปขึ้นอีก รวมไปถึงเอนเทรนเนอร์จะต้องมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ โดยทั่วไปจะใช้อัตราส่วนโมลระหว่างเอนเทรนเนอร์และสารผสมป้อนเข้าใน อัตราส่วน 1 ต่อ 1 เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยการกลั่นสกัดสามารถกลั่นได้ทั้งแบบเบสท์และกลั่นแบบต่อเนื่อง ผู้จัดทำได้ใช้การกลั่นสกัดแบบต่อเนื่องในการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ (Seader & Henley, 1998)

ในการกลั่นสกัดแบบต่อเนื่องจะใช้ 2 หอกลั่น หอกลั่นที่ 1 จะเป็นหอกลั่นสกัดใช้แยกสารผสมอะซิโโทรปโดยมีการเติมเอนเทรนเนอร์เพื่อช่วยให้สารผสมอะซิโโทรปแยกออกจากกันได้ดีขึ้น ส่วนหอกลั่นที่ 2 เป็นหอกลั่นปกติใช้เพื่อแยกเอนเทรนเนอร์นำกลับมาใช้ในหอกลั่นที่ 1 (รูปที่ 2.8) สารผสม a และ b เป็นสารผสมอะซิโโทรปที่มีจุดเดือดต่ำสุดจะถูกป้อนเข้าในหอกลั่นที่ 1 (หอกลั่นสกัด) โดยมีการ

ป๋ อ น
 สาร e (เอนเทรเนอร์) เข้าไปในทางด้านบนของสายสารผสมป้อนเข้าแต่ไม่ถึงถาดบนสุดของหอกถันที่ 1 เพื่อทำให้สารผสมอะซิโทรปสามารถแยกออกจากกันได้ดีขึ้น โดยสาร a ที่มีจุดเดือดต่ำสุดจะถูกแยกออกมาทางยอดหอกถันที่ 1 ส่วนสาร b และ e ที่มีจุดเดือดสูงจะผสมกันออกทางก้นหอกถันที่ 1 เข้าไปในหอกถันที่ 2 เพื่อแยกสาร b และ e ออกจากกัน สาร b ที่มีจุดเดือดต่ำกว่าสาร e จะแยกออกทางยอดหอกถันที่ 2 ส่วนสาร e จะออกทางก้นหอกถันที่ 2 แล้วสามารถนำสาร e กลับไปใช้ใหม่ได้ในหอกถันที่ 1



รูปที่ 2.8 กระบวนการกลั่นสกัดสารผสมอะซิโทรปที่มีจุดเดือดต่ำสุด
 ที่มา: Separation Process Principles, Seader & Henley.

ดุลมวลรวม (Overall Mass Balance)

$$F_1 + F_2 = D_1 + D_2 \tag{2.13}$$

ดุลองค์ประกอบ (Component Balance)

$$F_1 x_{F_1,i} + F_2 x_{F_2,i} = D_1 x_{D_1,i} + D_2 x_{D_2,i} \tag{2.14}$$

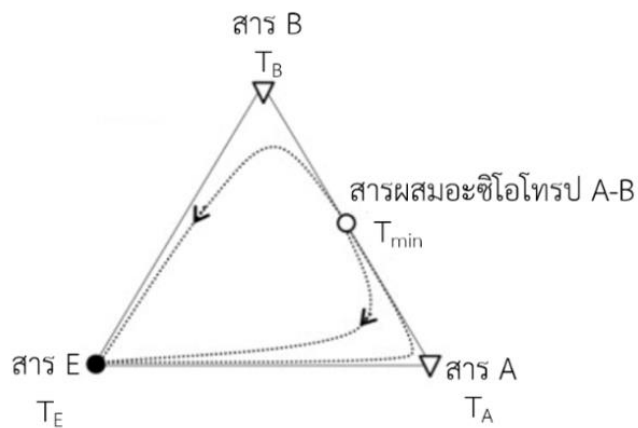
ดุลพลังงาน (Energy Balance)

$$Q_{R1} + Q_{R2} + F_1 h_{F_1} + F_2 h_{F_2} = D_1 h_{D_1} + D_2 h_{D_2} + Q_{C1} + Q_{C2} \tag{2.15}$$

โดยที่	F_1	คือ สารผสมป้อนเข้า (Feed Mixture)
	F_2	คือ เอนเทรนเนอร์ป้อนเข้า (Feed Entrainer)
	$D_1 D_2$	คือ สารที่กลั่นได้ทางยอดหอที่ 1 และหอที่ 2 ตามลำดับ
	$Q_{R1} Q_{R2}$	คือ พลังงานของหม้อต้มหอที่ 1 และหอที่ 2 ตามลำดับ
	$Q_{C1} Q_{C2}$	คือ พลังงานของเครื่องควบแน่นหอที่ 1 และหอที่ 2 ตามลำดับ
	$x_{F1} x_{F2} x_{D1} x_{D2}$	คือ องค์ประกอบ
	$h_{F1} h_{F2} h_{D1} h_{D2}$	คือ เอนทาลปี

2.4.1 แผนที่เส้นโค้งรีซิควอล (Residue Curve Map; RCM)

RCM ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการแยกสารที่ไม่ใช่สารในอุดมคติ เช่น ใช้ในการกลั่นสกัดและการกลั่นอะซิโโทรอปิกทั้งแบบเอกพันธ์กับวิวิธพันธ์ RCM เป็นการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติทางกายภาพของสาร โดยใช้ข้อมูลสมดุลอไอและของเหลว สมดุลของเหลวและของเหลว และความสามารถในการละลาย (Sun et al., 2018) RCM ที่ใช้ในระบบไตรภาค (Ternary System) จะถูกแสดงในรูปแบบกราฟสามเหลี่ยม พิกัดจุดที่อยู่ตามมุมของกราฟสามเหลี่ยมเป็นองค์ประกอบของสารที่มีความบริสุทธิ์ ในการสร้าง RCM จะต้องพิจารณาชุดของกระบวนการกลั่นในสถานะเดียวอย่างง่าย (Simple Single Stage) สารผสมที่เข้าไปในหม้อต้มจะถูกเพิ่มความร้อน สารผสมบางส่วนกลายเป็นไอออกไป จะสามารถเพิ่มเส้นการเคลื่อนที่ (Trajectory) ของสัดส่วนของเหลวบน RCM ได้ การใช้ RCM จะมีการเติมสารบริสุทธิ์ (สาร E) เข้าไปในระบบ โดยจะมีหนึ่งสารผสมอะซิโโทรอปทวิภาค (Binary Azeotrope) ที่มีจุดเดือดต่ำสุดอยู่ระหว่างองค์ประกอบของสาร A และสาร B (รูปที่ 2.9) องค์ประกอบของสารบริสุทธิ์และสารผสมอะซิโโทรอปจะมีจุดเสถียรบน RCM ตรงขอบของ RCM เป็นเส้นโค้งรีซิควอลสำหรับสารผสมเอกพันธ์ เส้นโค้งรีซิควอลเป็นการเคลื่อนที่จากจุดที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังจุดที่มีอุณหภูมิสูงเสมอ ที่ปลายทางของรีซิควอลในสาร E จะมีความบริสุทธิ์สูงเพราะว่าสาร E เป็นสารที่มีจุดเดือดสูงสุด (Luyben, 1992)



รูปที่ 2.9 RCM อย่างง่าย

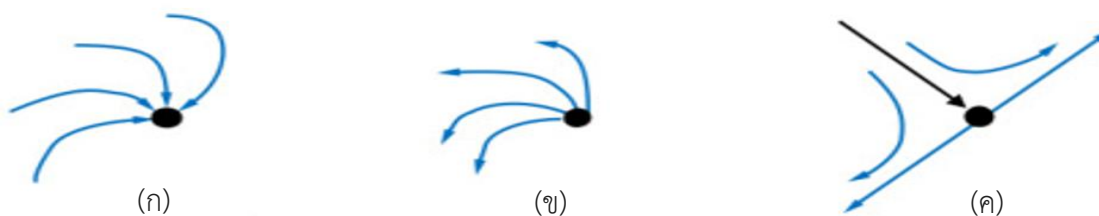
ที่มา: Extractive Distillation: Advances in Aonceptual Design, Solvent Selection, and Separation strategies, Sun et al.

บนกราฟสามเหลี่ยมจะเป็นการรวมจุดที่มีองค์ประกอบของสารบริสุทธิ์และจุดอะซีโอโทรป ทั้งสารผสมอะซีโอโทรปไตรภาคจะอยู่บนขอบของกราฟสามเหลี่ยมและสารผสมอะซีโอโทรปไตรภาค (Ternary Azeotrope) จะอยู่ภายในกราฟสามเหลี่ยม เรียกว่าจุดเอกพจน์ (Singular Points) ของเส้นโค้งรีซีตวลเพราะบริเวณจุดเหล่านี้จะมีพฤติกรรมของเส้นโค้งรีซีตวลเป็นไปตาม 2 ค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalues) ดังนั้น ค่าลักษณะเฉพาะที่เป็นบวกและค่าลักษณะเฉพาะที่เป็นลบ (รูปที่ 2.10) โดยค่าลักษณะเฉพาะจะมีอยู่ 3 กรณี

กรณีที่ 1 สารทั้งสองมีค่าลักษณะเฉพาะเป็นลบ สารผสมอะซีโอโทรปจะเป็นแบบโหนดเสถียร (Stable Node)

กรณีที่ 2 สารทั้งสองมีค่าลักษณะเฉพาะเป็นบวก สารผสมอะซีโอโทรปจะเป็นแบบโหนดไม่เสถียร (Unstable Node)

กรณีที่ 3 มีหนึ่งสารมีค่าลักษณะเฉพาะเป็นทั้งลบและอีกหนึ่งสารมีค่าลักษณะเฉพาะเป็นบวก สารผสมอะซีโอโทรปจะเป็นแบบอาน (Saddle) (Seader & Henley, 1998)



รูปที่ 2.10 จุดเอกพจน์ (ก) โหนดความเสถียร (ข) โหนดไม่เสถียร (ค) อาน

ที่มา: Extractive Distillation: Advances in Aonceptual Design, Solvent Selection, and Separation strategies, Sun et al.

2.4.2 วิธีการเลือกเอนเทรเนอร์ (Dong et al., 2018)

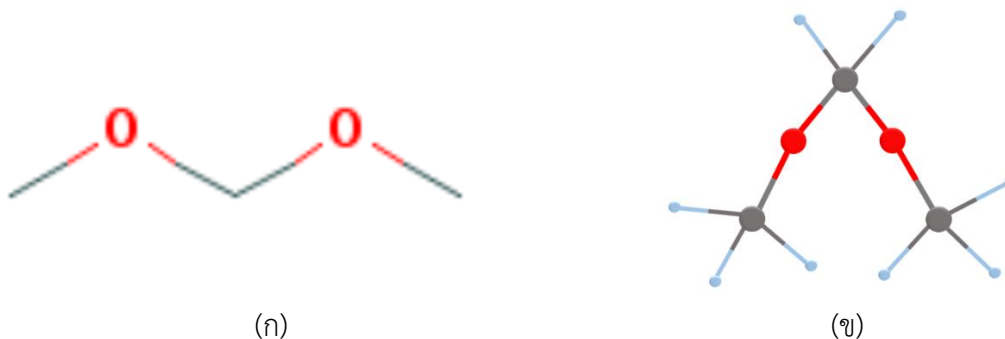
ในการเลือกสารที่จะใช้เป็นเอนเทรเนอร์สำหรับการแยกสารผสมอะซิโทรัปจะต้องคำนึงถึง

1. มีความเป็นพิษต่ำหรือไม่มีความพิษ เพราะอาจจะไปปนเปื้อนกับผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการได้ บางผลิตภัณฑ์นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อาจผลิตก่อผลเสียต่อผู้ทำงานและผู้บริโภคได้
2. จุดเดือดสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการหรือมากกว่าสารผสม เพราะในกระบวนการกลั่นสกัดเราต้องการแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการขึ้นบนยอดหอ ถ้าจุดเดือดของเอนเทรเนอร์ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกันจะทำให้เอนเทรเนอร์ผสมกับผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการ
3. มีความเสถียรทางความร้อน เพราะถ้าเกิดปัญหาอุณหภูมิแกว่ง เอนเทรเนอร์ก็ยังคงเดิมไม่แยกกับสารที่ผสม
4. ฟื้นตัวได้ง่าย เพราะต้องการกลับไปใช้ใหม่ในการแยกสารผสม
5. ค่าการระเหยสัมพัทธ์ (Relative Volatility) สูงกว่าระหว่างสารที่ต้องการ
6. ไม่ทำให้เกิดอะซิโทรัปกับสารใดสารหนึ่งในสารผสมมีความสามารถในการเป็นตัวทำละลายสูง

2.5 คุณสมบัติของสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล และสารเอนเทรเนอร์

2.5.1 เมทิลลัล (Methylal)

เมทิลลัล (Methylal) ฟอรั่มัลดีไฮด์ไดเมทิลอะซิตาล (Formaldehyde Dimethyl Acetal) หรือไดเมทอกซีมีเทน (Dimethoxymethane; DMM) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไวไฟสูง ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายกับคลอโรฟอร์ม ในปัจจุบัน เมทิลลัล ถือเป็นสารเคมีที่มีความสำคัญในการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิงและสารเติมแต่งในน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลาย จำนวนมากในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเครื่องสำอางและน้ำหอม อุตสาหกรรมสารทำความสะอาดและขจัดคราบไขมัน ใช้เป็นสารตัวกลางสำหรับการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ ใช้เป็นสารกำจัดจุลินทรีย์ในสี ใช้เป็นเอนเทรเนอร์ในกระบวนการกลั่นแยกแบบอะซิโทรัปิก และการสกัดแบบซูเปอร์คริติคอลเป็นต้น (Weidert et al., 2016)



รูปที่ 2.11 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติ ของเมทิลลัล
ที่มา: <https://bit.ly/2UIWA4Y>, U.S.National Library of Medicine.

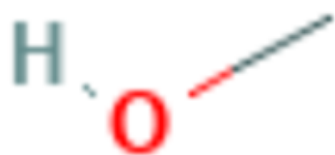
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลลัล

คุณสมบัติ		เมทิลลัล
สูตรทางเคมี		$C_3H_8O_2$ หรือ $CH_2(OCH_3)_2$
มวลโมเลกุล (g/mole)		76.1
จุดเดือด (°C)		41.5
จุดหลอมเหลว (°C)		-104.8
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง (°C)		237
จุดวาบไฟ (°C)	ปิดถ้วย	-32
	เปิดถ้วย	0.4
ขีดจำกัดในการไวไฟ (%)	ต่ำกว่า	1.6
	สูงกว่า	17.6
ความหนาแน่น (kg/m ³)		860
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)		0.86
ความดันไอที่อุณหภูมิ 20°C (kPa)		44
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)		2.6
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้		CO และ CO ₂

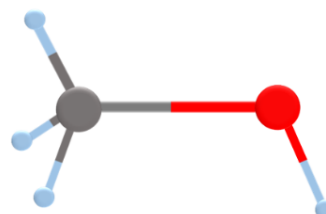
ที่มา: <https://bit.ly/2ZALgM7>, Science Lab.

2.5.2 เมทานอล (Methanol)

เมทานอล (Methanol) วูดแอลกอฮอล์ (Wood Alcohol) คาร์บินอล (Carbinol) หรือ เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถกินไม่ได้ นิยมใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เช็ดล้างพลาสติก เป็นส่วนผสมทำกาวสำหรับในไม้อัด ส่วนผสมในไบโอดีเซล เป็นตัวทำละลายในสีและน้ำมันขัดเงา ใช้เป็นสารต้านการเยือกแข็ง (Anti-freeze) เพื่อใช้ป้องกันการแข็งตัวของน้ำในหม้อน้ำรถ และยังเป็นส่วนผสมหลักในการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์ (บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด, 2553)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.12 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติของเมทานอล

ที่มา: <https://bit.ly/2kfP7Jc>, U.S.National Library of Medicine.

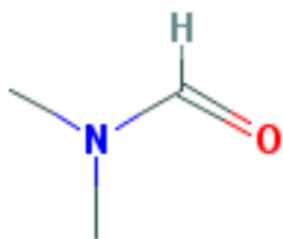
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทานอล

คุณสมบัติ		เมทานอล
สูตรทางเคมี		CH_3OH หรือ CH_4O
มวลโมเลกุล (g/mole)		32.04
จุดเดือด (°C)		64.5
จุดหลอมเหลว (°C)		-97.8
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง (°C)		464
จุดวาบไฟ (°C)	ปิดถ้วย	12
	เปิดถ้วย	16
ขีดจำกัดในการไวไฟ (%)	ต่ำกว่า	6
	สูงกว่า	36.5
ความหนาแน่น (kg/m ³)		792
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)		0.7915
ความดันไอที่อุณหภูมิ 20°C (kPa)		12.3
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)		1.11
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้		CO และ CO ₂

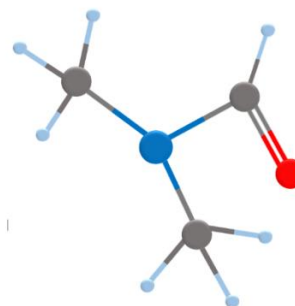
ที่มา: <https://bit.ly/22WAbkU>, Science Lab.

2.5.3 ไดมethylฟอร์มามิเด (Dimethylformamide; DMF)

ไดเมทิลฟอร์มามิเด (Dimethylformamide) เป็นของเหลวไม่มีสี สามารถละลายได้ในน้ำ และของเหลวอินทรีย์ส่วนใหญ่ ไดเมทิลฟอร์มามิเดที่มีความบริสุทธิ์สูงจะไม่มีกลิ่น แต่ถ้ามีความบริสุทธิ์ต่ำจะมีกลิ่นคล้ายปลา ซึ่งมาจากไดเมทิลเอมีนที่ปนเปื้อนอยู่ นิยมใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับไวนิลเรซิน อะเซทิลีน บิวตะไดอิน ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน การสังเคราะห์สารอินทรีย์ และใช้เป็นตัวกลางในการทำละลายในอุตสาหกรรม (บริษัท ศักย์พิรุณณ์ เคมีคอล จำกัด, 2561 และ UNION PEDIA, 2018)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติ ของไดเมทิลฟอร์มามิเด
ที่มา: <https://bit.ly/2UWLFyA>, U.S.National Library of Medicine.

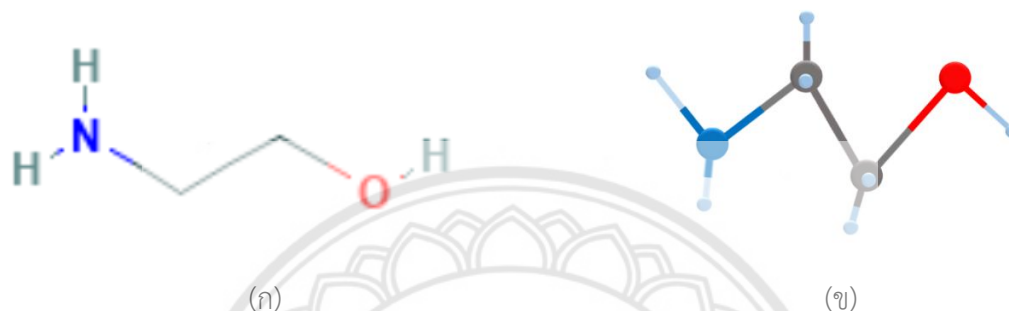
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไดเมทิลฟอร์มามิเด

คุณสมบัติ		ไดเมทิลฟอร์มามิเด
สูตรทางเคมี		$HCON(CH_3)_2$ หรือ C_3H_7NO
มวลโมเลกุล (g/mole)		73.09
จุดเดือด (°C)		153
จุดหลอมเหลว (°C)		-61
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง (°C)		445
จุดวาบไฟ (°C)	ปิดถ้วย	57.778
	เปิดถ้วย	67
ขีดจำกัดในการไวไฟ (%)	ต่ำกว่า	2.2
	สูงกว่า	15.2
ความหนาแน่น (kg/m ³)		944
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)		0.949
ความดันไอที่อุณหภูมิ °C (kPa)		0.3
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)		2.51
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้		CO CO ₂ NO และ NO ₂

ที่มา: <https://bit.ly/2UVn9ZP>, Science Lab.

2.5.4 เอทานอลาไมน์ (Ethanolamine)

เอทานอลาไมน์ (Ethanolamine) โคลาไมน์ (Colamine) กลีเซอรอล (Glycerol) โอลาไมน์ (Olamine) หรือเบต้าเอทานอลาไมน์ (Beta-Ethanolamine) เป็นของเหลวไม่มีสี มีสมบัติเป็นเบสอ่อนๆ ติดไฟง่าย มีกลิ่นคล้ายกับแอมโมเนีย นิยมใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิต น้ำยาซักผ้า น้ำยาขัดเงา เวชภัณฑ์ และช่วยป้องกันการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารควบคุมค่า pH ในเครื่องสำอางและการเตรียมสารเนื้อผสม (บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด, 2553)



รูปที่ 2.14 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติของเอทานอลาไมน์
ที่มา: <https://bit.ly/2vnwCU5>, U.S.National Library of Medicine.

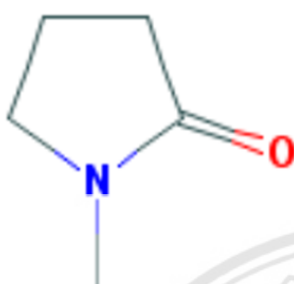
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเอทานอลาไมน์

คุณสมบัติ		เอทานอลาไมน์
สูตรทางเคมี		C_2H_7NO หรือ $H_2NCH_2CH_2OH$
มวลโมเลกุล (g/mole)		61.08
จุดเดือด ($^{\circ}C$)		170.8
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)		10.3
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง ($^{\circ}C$)		410
จุดวาบไฟ ($^{\circ}C$)	ปิดถ้วย	86
	เปิดถ้วย	93.34
ขีดจำกัดในการไวไฟ (%)	ต่ำกว่า	3
	สูงกว่า	23.5
ความหนาแน่น (g/cm^3)		1.01
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)		1.018
ความดันไอที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ (kPa)		0.1
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)		2.1
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้		CO CO ₂ NO และ NO ₂

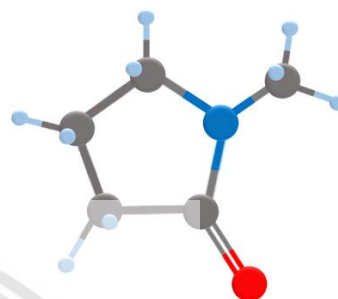
ที่มา: <https://bit.ly/2DDhAo9>, Science Lab.

2.5.5 เมทิลไพร์โรลิดินอน (N-Methyl-2-pyrrolidinone)

เมทิลไพร์โรลิดินอน (N-Methyl-2-pyrrolidinone) หรือเมทิลไพร์โรลิดอน (N-Methyl Pyrrolidone) เป็นของเหลว มีจุดเดือดสูง มีการระเหยต่ำ สามารถละลายได้ดีในสารอินทรีย์และอนินทรีย์หลายชนิด ละลายในน้ำได้ทุกอุณหภูมิ มีความเสถียรทางเคมี ทนความร้อนได้ดี นิยมใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับพอลิเมอร์ เคลือบเรซิน และใช้เป็นตัวกลางในการสกัด เป็นต้น (EASTMAN, 2018)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.15 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติ ของเมทิลไพร์โรลิดินอน
ที่มา: <https://bit.ly/2L1mi57>, U.S.National Library of Medicine.

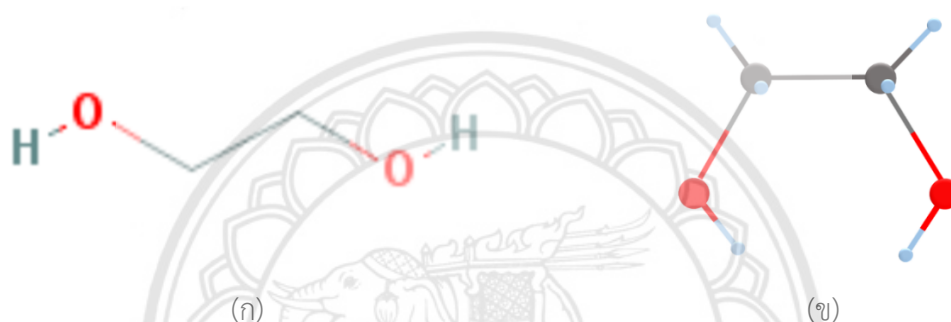
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลไพร์โรลิดินอน

คุณสมบัติ	เมทิลไพร์โรลิดินอน	
สูตรทางเคมี	C_5H_9NO	
มวลโมเลกุล (g/mole)	99.14	
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	202	
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	-24	
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง ($^{\circ}C$)	346.11	
จุดวาบไฟ ($^{\circ}C$)	ปิดถ้วย	92.778
	เปิดถ้วย	95.556
ขีดจำกัดในการไวไฟ (%)	ต่ำกว่า	1.3
	สูงกว่า	9.5
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.03	
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)	1.026	
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)	3.4	
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้	CO CO ₂ NO และ NO ₂	

ที่มา: <https://bit.ly/2DzErkG>, Science Lab.

2.5.6 เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol)

เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) เอทิลีนไดไฮเดรท (Ethylene Dihydrate) ไกลคอล แอลกอฮอล์ (Glycol Alcohol) หรือโมโนเอทิลีนไกลคอล (Monoethylene Glycol) เป็นสารเคมีในกลุ่ม ไกลคอล นิยมใช้เป็นสารโมโนเมอร์ของพลาสติกแข็ง (Polyethylene Terephthalate หรือ PET) และเป็นสารต้านการเยือกแข็ง(Anti-freeze) เพื่อป้องกันการแข็งตัวจากความเย็น เมื่อกินเอทิลีนไกลคอล เข้าไปจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย โดยร่างกายจะเปลี่ยนเอทิลีนไกลคอล เป็นสารเคมีกลุ่ม อัลดีไฮด์ (Aldehyde) ซึ่งมีพิษรุนแรง และทำให้เกิดภาวะเลือดเป็นกรด (Acidosis) การรักษาพิษจากการ ได้รับเอทิลีนไกลคอลวิธีหนึ่งคือการให้เอทานอลแก่ผู้ป่วย (Ethanol Therapy) (วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, 2555)



รูปที่ 2.16 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติ ของเอทิลีนไกลคอล
ที่มา: <https://bit.ly/2ZB2mcJ>, U.S.National Library of Medicine.

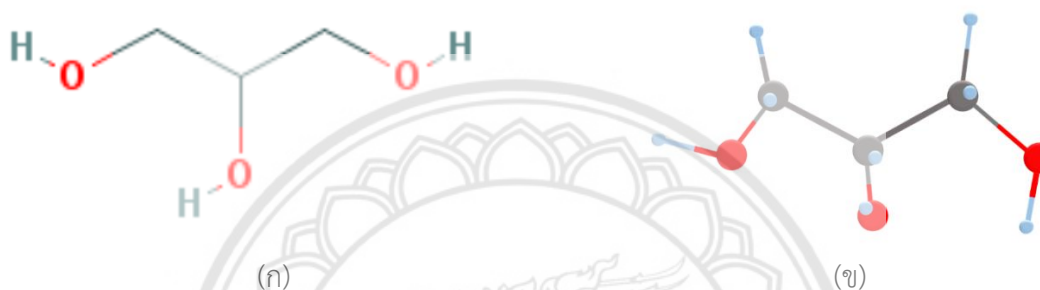
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเอทิลีนไกลคอล

คุณสมบัติ		เอทิลีนไกลคอล
สูตรทางเคมี		$C_2H_6O_2$
มวลโมเลกุล (g/mole)		62.07
จุดเดือด ($^{\circ}C$)		197.6
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)		-13
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง ($^{\circ}C$)		398
จุดวาบไฟ ($^{\circ}C$)	ปิดถ้วย	111
ขีดจำกัดในการไวไฟ (%)	ต่ำกว่า	3.2
ความหนาแน่น (g/cm^3)		1.11
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)		1.1088
ความดันไอที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}C$ (kPa)		0.008
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)		2.14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้		CO และ CO_2

ที่มา: <https://bit.ly/2UViF5s>, Science Lab.

2.5.7 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerin) เป็นของเหลวใส ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิโออล (Polyol) ในโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 3 หมู่ จึงทำให้ละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการดูดจับน้ำได้ดี (Hydroscopic) กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบหลักในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งได้จากการรวมตัวของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน (Fatty Acid) 3 โมเลกุล นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ เช่น เป็นสารเพิ่มความหวาน ใช้สารที่ป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งโดยลดจุดเยือกแข็ง (Freezing Point) ให้ต่ำลงและใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ เป็นต้น (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์เกียรติคุณ และ นิธิ รัตนาปนนท์, 2553)



รูปที่ 2.17 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติ ของกลีเซอรอล
ที่มา: <https://bit.ly/2Pyv7Co>, U.S.National Library of Medicine.

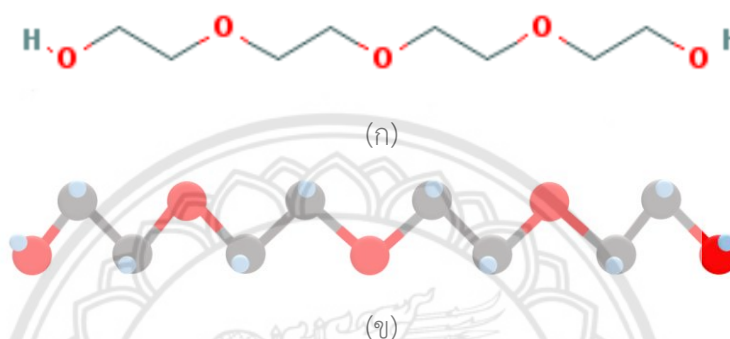
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล

คุณสมบัติ		กลีเซอรอล
สูตรทางเคมี		$C_3H_5(OH)_3$ หรือ $C_3H_8O_3$
มวลโมเลกุล (g/mole)		92.09
จุดเดือด ($^{\circ}C$)		290
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)		19
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง ($^{\circ}C$)		370
จุดวาบไฟ ($^{\circ}C$)	ปิดถ้วย	160
	เปิดถ้วย	199
ขีดจำกัดในการไวไฟ (%)	ต่ำกว่า	0.9
ความหนาแน่น (g/cm^3)		1.26
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)		1.2636
ความดันไอที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ (kPa)		0
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)		3.17
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้		CO CO ₂ และควีนพิษ

ที่มา: <https://bit.ly/2L0UH0w>, Science Lab.

2.5.8 เตตระเอทิลีนไกลคอล (Tetraethylene Glycol)

เตตระเอทิลีนไกลคอล (Tetraethylene Glycol) หรือเตตระไกลคอล (Tetraglycol) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีการระเหยต่ำ สามารถละลายในน้ำและสารอินทรีย์ได้หลายชนิด เตตระเอทิลีนไกลคอล มีคุณสมบัติคล้ายกับไตรเอทิลีนไกลคอล และไตรเอทิลีนไกลคอล (Triethylene Glycol) มีการใช้ประโยชน์จากเตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นจำนวนมาก เช่น กระจกนิรภัย เป็นตัวทำละลายในการแยกอะโรมาติกและพาราฟินไฮโดรคาร์บอน และใช้แยกในเยื่อเลือกผ่าน (Separation Membranes) เป็นต้น (Safety Data Sheet, 2013)



รูปที่ 2.18 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติ ของเตตระเอทิลีนไกลคอล
ที่มา: <https://bit.ly/2XP3FTL>, U.S.National Library of Medicine.

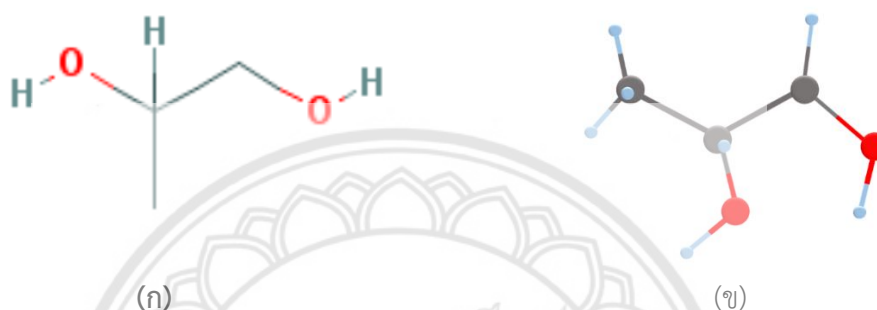
ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเตตระเอทิลีนไกลคอล

คุณสมบัติ		เตตระเอทิลีนไกลคอล
สูตรทางเคมี		$C_8H_{18}O_5$
มวลโมเลกุล (g/mole)		194.227
จุดเดือด (°C)		327.3
จุดหลอมเหลว (°C)		-9.4
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง (°C)		358
จุดวาบไฟ (°C)	ปิดถ้วย	204
	เปิดถ้วย	202
ความหนาแน่น (g/cm ³)		1.12
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)		1.1247
ความดันไอ @20°C (mmHg)		<0.01
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)		6.7

ที่มา: <https://bit.ly/2XP3FTL>, Science Lab.

2.5.9 โพรไพลีนไกลคอล (Propylene Glycol)

โพรไพลีนไกลคอล (Propylene Glycol) หรือโพรเพนไดออล (1,2-Propanediol) เป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความหนืดเล็กน้อย มี pH ในระดับปานกลาง สามารถละลายในน้ำ และแอลกอฮอล์ เป็นสารเคมีที่ได้จากการสังเคราะห์ จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโพรไพลีนออกไซด์ (Propylene Oxide) กับน้ำ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์กลุ่มยา ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารของคนและอาหารของสัตว์ และใช้เป็นสารต้านการเยือกแข็ง (Anti-Freeze) เป็นต้น (กรุงเทพเคมี, 2561)



รูปที่ 2.19 (ก) โครงสร้าง 2 มิติ และ (ข) โครงสร้าง 3 มิติ ของโพรไพลีนไกลคอล
ที่มา: <https://bit.ly/2IKTD2h>, U.S.National Library of Medicine.

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโพรไพลีนไกลคอล

คุณสมบัติ	โพรไพลีนไกลคอล	
สูตรทางเคมี	$C_3H_8O_2$ หรือ $CH_3CHOHCH_2OH$	
มวลโมเลกุล (g/mole)	76.095	
จุดเดือด (°C)	188	
จุดหลอมเหลว (°C)	-59	
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟเอง (°C)	371	
จุดวาบไฟ (°C)	ปิดถ้วย	99
	เปิดถ้วย	107
ขีดจำกัดในการไวไฟ (%)	ต่ำกว่า	2.6
	สูงกว่า	12.5
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.04	
ความถ่วงจำเพาะ (Water = 1)	1.036	
ความดันไอ @20°C (mmHg)	0.08	
ความหนาแน่นไอ (Air = 1)	2.62	
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้	CO และ CO ₂	

ที่มา: <https://bit.ly/1KluMgi>, Science Lab.

2.6 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ ที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่พื้นผิวตอบสนองที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และผู้ทดลองมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมของพื้นผิวตอบสนอง เช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของ x_1 และ x_2 จะสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.16)$$

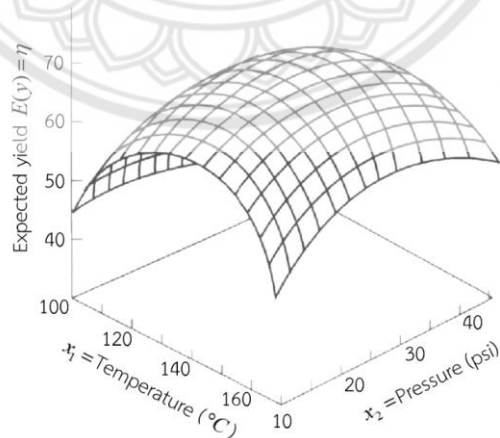
โดยที่ ε คือ ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชิงวิศวกรรม และมีผลกระทบต่อผลตอบสนอง

$f(x_1, x_2)$ คือ ค่าคาดหวังของผลตอบสนอง (Expected Response; $E(y)$)

ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการพื้นผิวตอบสนองได้ คือ

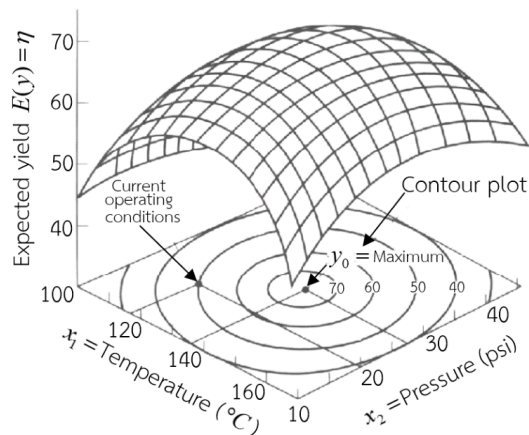
$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.17)$$

โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปของกราฟฟิก 3 มิติ (รูปที่ 2.20) ซึ่ง η (ค่าคาดหวังของผลตอบสนอง) จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้นโดยมากแล้วจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง (รูปที่ 2.21) ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบสนองที่เท่ากับค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.20 พื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ

ที่มา: <https://bit.ly/2W9LQCX>, สันติ พุ่มกระจ่าง.



รูปที่ 2.21 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง

ที่มา: <https://bit.ly/2W9LQCX>, สันติ พุ่มกระจ่าง.

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนมากมักจะไม่นำความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นแรกคือผู้ทดลองต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับ 1 (First Order Mathematical Model)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.18)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ ต้องใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้นคือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับ 2 (Second Order Mathematical Model)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j < i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.19)$$

- โดยที่ β_0 คือ ค่าคงที่ของสมการ และเป็นจุดตัดแกน y ของสมการ
 β_i คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งของผลกระทบหลักปัจจัยที่ i
 β_{ii} คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อันดับสองของผลกระทบหลักปัจจัยที่ i
 β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของผลกระทบร่วมระหว่างหลักปัจจัยที่ i และ j
 ε คือ ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชิงวิศวกรรม และมีผลกระทบต่อผลตอบสนอง

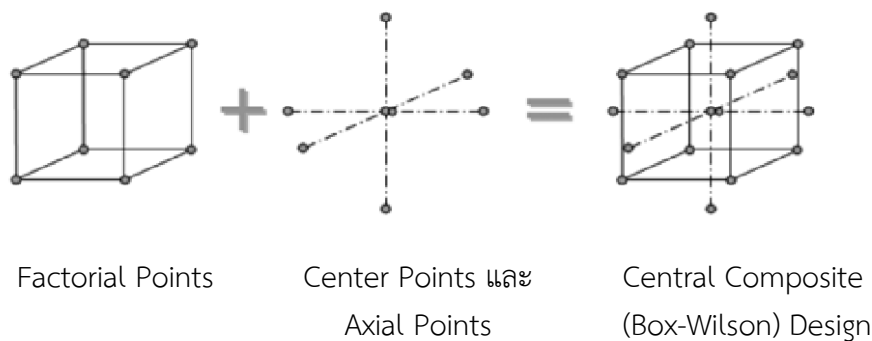
ปัญหาเกี่ยวกับวิธีพื้นผิวตอบสนองส่วนมากจะใช้แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่งหรือกำลังสองในการหาผลตอบสนอง แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่สนใจมีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวตอบสนองมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองอยู่ด้วยกันหลาย ได้แก่ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด แบบจำลองอันดับหนึ่ง แบบจำลองอันดับสอง โดยที่การออกแบบจำลองอันดับสองจะเป็นการเน้นที่การสร้างแบบจำลองเชิงเส้นโค้งหรือควอดราติก (Quadratic Response Surface) (สันติ พุ่มกระจ่าง, 2552)

โดยวิธีพื้นผิวตอบสนองมีวิธีการออกแบบอยู่หลายวิธี เช่น การออกแบบการทดลองประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) แผนแบบสมอลคอมโพสิต (Small Composite Design; SCD) แผนแบบบ็อกซ์-เบห์นกิน (Box-Behnken design, BBD) แผนแบบยูนิฟอร์มเชล (Uniform shell design, USD) และ แผนแบบไฮบริด (Hybrid design) เป็นต้น โดยในการศึกษาการประเมินพลังงานของกระบวนการแยกสำหรับสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยการกลั่นสกัดกับเอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำนี้ ได้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงเนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เหมาะสมกับกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ และจำนวนครั้งในการทดลองน้อย ยังมีหากมีปัจจัยศึกษาตั้งแต่ 4 ปัจจัยขึ้นจะมีประสิทธิภาพดีกว่าการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นกิน

2.6.1 การออกแบบประสมกลาง (Central Composite Design; CCD หรือ Box-Wilson Design)

ในการทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment ; DOE) ต้องการศึกษาระบบการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic Relationship) กล่าวคือ เมื่อตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดค่า ผลการตอบสนองอาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแทน สามารถพบกระบวนการต่าง ๆ ที่มีลักษณะเช่นนี้ได้อยู่บ่อย ๆ ในหลายอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการทางเคมี และกระบวนการแปรรูปโลหะ เป็นต้น การออกแบบประสมกลางเป็นการทดลองที่ 3 ระดับ (นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ -1, 0, +1) จะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาตัวแปรละ 3 ค่า แต่แทนที่จะปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial กลับเลือกบาง Runs หรือบางสถานะของการทดลองที่จำเป็นเพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดยแบบที่ได้จะยังคงมีทั้ง Main Effect, Interaction และ Quadratic Terms โดยใช้ทรัพยากรไม่มากจนเกินไป ตัวอย่างของการออกแบบประสมกลางสำหรับการศึกษาตัวแปร 3 ตัว (รูปที่ 2.22) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

1. Factorial Points ซึ่งในที่นี้เป็นกรณีนำ 2^k Factorial มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง
2. Axial Points เป็นการปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่กำหนดให้ค่าตัวแปรอื่น อยู่ที่ค่ากลาง (หรือค่า 0)
3. Center Points เป็นการปรับค่าของตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง (หรือค่า 0) (จรัญ ทรัพย์เสรี, 2552)

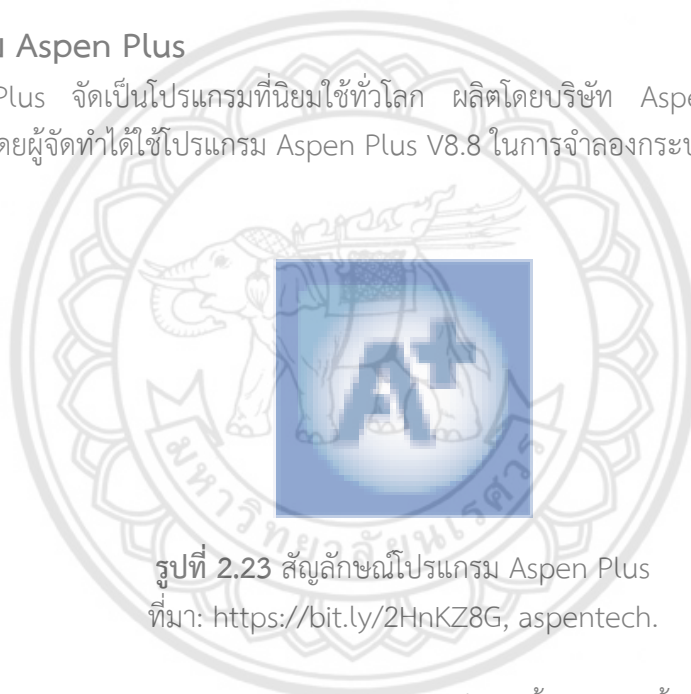


รูปที่ 2.22 CCD สำหรับ 3 Factors

ที่มา: file:///C:/Users/SONY%202015/Downloads/FQ145_p72-74.pdf, จริญญา ทรัพย์เสรี.

2.7 โปรแกรม Aspen Plus

Aspen Plus จัดเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ทั่วโลก ผลิตโดยบริษัท AspenTech, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยผู้จัดทำได้ใช้โปรแกรม Aspen Plus V8.8 ในการจำลองกระบวนการกลั่นสกัด



รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์โปรแกรม Aspen Plus

ที่มา: <https://bit.ly/2HnKZ8G>, aspentech.

ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมแอสเพนพลัสแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. การสร้างแผนผังการไหลของกระบวนการ (Process Flowsheet)
 - 1.1 กำหนดอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมด
 - 1.2 กำหนดกระแสไหล (Streams) ที่เชื่อมต่อไปยังแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการ
 - 1.3 เลือกแบบจำลองของอุปกรณ์จาก Aspen Plus Model Library แล้ววางบนแผนผังการไหลของกระบวนการ
 - 1.4 ตั้งชื่อกระแสการไหลที่อยู่บนแผนผังการไหลของกระบวนการเชื่อมต่อเข้ากับแต่ละอุปกรณ์
2. ระบุองค์ประกอบทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการ โดยเลือกจาก Aspen Plus Databanks หรือสามารถระบุเอง
3. ระบุวิธีการที่จะใช้คำนวณหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบที่ผสมอยู่ในกระบวนการ

4. กระแสการไหลที่ป้อนเข้ากระบวนการต้องระบุองค์ประกอบ อัตราการไหล อุณหภูมิ และความดัน

5. ระบุสถานะสำหรับแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการ

เมื่อทำครบทั้ง 5 ขั้นตอนก็สามารถสั่งให้โปรแกรมคำนวณ (Run) หาค่าต่างๆของกระบวนการออกมาโดยผลการคำนวณของโปรแกรมแอสเพนพลัสเป็นแบบดุลมวล (Material Balance) ในสถานะเชิงสถิต (Steady State) หลังจากคำนวณเสร็จและไม่มีความผิดพลาด (Error) เกิดขึ้น จะแสดงข้อความ Results Available สามารถดูผลการคำนวณโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ผลการคำนวณในกระแสต่างๆ กับผลการคำนวณของแต่ละอุปกรณ์ (ณัฐชา เพ็ชรยิ้ม, 2553)

2.8 โปรแกรม Minitab



รูปที่ 2.24 สัญลักษณ์โปรแกรม Minitab

ที่มา: <https://bit.ly/2ZAyYmW>, M.Umer.

Minitab เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและประมวลผลทางสถิติ ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จะถูกเก็บในรูปแบบของแผนผังงานสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท เช่น งานเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพ โดยโปรแกรม Minitab สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพื้นฐาน วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติขั้นสูง การออกแบบการทดลอง การประเมินกระบวนการ และการสร้างเครื่องมือควบคุมคุณภาพ เป็นต้น (Wisittipanich, 2015)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตเมทิลลัลและการเลือกใช้เอนเทรเนอร์ที่เหมาะสม

ในปี ค.ศ. 2016 Jan-Oliver Weidert และคณะ (Weidert et al., 2016) ได้ทำการศึกษาเรื่องการพัฒนาแบบเบ็ดเสร็จปฏิกิริยา-กระบวนการกลั่นสำหรับการผลิตเมทิลลัล กล่าวไว้ว่าในกระบวนการสังเคราะห์เมทิลลัล สังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation Reaction) ของเมทานอลกับฟอร์มัลดีไฮด์มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ซึ่งจะทำการป้อนเมทานอลกับฟอร์มัลดีไฮด์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนสุด และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังส่วนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ จะเมทิลลัลและน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ และต้องใช้เมทานอล 2 โมลเพื่อทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ 1 โมล นั้นหมายความว่าในกระบวนการสังเคราะห์เมทิลลัลใช้เมทานอลมากกว่าฟอร์มัลดีไฮด์ โดยขั้นแรกเมทานอลจะทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ได้เป็นเฮมิฟอร์มัล (Hemiformal) จากนั้นเฮมิฟอร์มัลทำปฏิกิริยาต่อจนหมดกับเมทานอลได้เมทิลลัลและน้ำ เนื่องจากการเติมเมทานอลที่มากเกินไป และเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างเมทานอลกับเมทิลลัลและน้ำ และสามารถทำการกลั่นแยกน้ำออกมาจากสารผสมด้วยวิธีการกลั่นแบบธรรมดาได้ ส่วนสารผสมเมทิลลัลกับเมทานอลนั้นเป็นอะซิโโทรปกันที่จุดเดือดต่ำสุด ไม่สามารถกลั่นแยกด้วยวิธีการกลั่นแบบธรรมดาได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการกลั่นแบบสลัความดันในการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลและน้ำ

ในปี ค.ศ. 2016 Yichun Dong และคณะ (Dong et al., 2018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลด้วยวิธีการกลั่นสกัดโดยใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethylformamide; DMF) บวกไอออนของเหลว (Ionic Liquid) เป็นสารเอนเทรเนอร์เพื่อแทนไดเมทิลฟอร์มาไมด์บริสุทธิ์แบบเดิมที่ใช้กันสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล ไอออนของ [EMIM]⁺[Ac]⁻ อาจมีแนวโน้มที่จะถูกเลือกเป็นสารเอนเทรเนอร์มากที่สุด โดยใช้ COSMO-RS ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งจะพิจารณาความผันผวนสัมพัทธ์และความสามารถในการละลายร่วมกัน ซึ่งจากการทดสอบสมดุลไอและของเหลว แสดงให้เห็นว่าการระเหยของเมทิลลัลต่อเมทานอลจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจนเมื่อเติม [EMIM]⁺[Ac]⁻ เข้าไปในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ นอกจากนี้แบบจำลอง UNIFAC-Lei ที่ใช้ในระบบเมทิลลัล-เมทานอล-ไดเมทิลฟอร์มาไมด์-ไอออนของเหลว ทำให้ได้รับความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีความสอดคล้องกัน ที่เข้าสู่ระยะสมดุล (Equilibrium; EQ) ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ตามหลักการของเทอร์โมไดนามิกส์ การจำลองกระบวนการมีการพัฒนาไปในทางที่ดีขึ้น คือพบว่าค่าภาวะความร้อนโดยรวมของหม้อต้มลดลง 9.25% โดยใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ผสมกับ [EMIM]⁺[Ac]⁻ เป็นเอนเทรเนอร์เมื่อเทียบกับใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์บริสุทธิ์เป็นเอนเทรเนอร์ ซึ่งก็หมายถึงการมีการประหยัดพลังงานมากขึ้นกว่าเดิม

ในปี ค.ศ. 2017 Yichun Dong และคณะ (Dong et al., 2018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกลั่นแยกสารผสมเมทานอลกับเมทิลลัลด้วยวิธีการกลั่นสกัด และใช้เอทิลีนไกลคอล (EG) เป็นสารเอนเทรเนอร์ โดยใช้ COSMO-RS ในการจำลองกระบวนการกลั่นสกัด เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นสกัด รวมทั้งวัดความสามารถในการเป็นสารเอนเทรเนอร์ที่เหมาะสมของเอทิลีนไกลคอล และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเอทิลีนไกลคอลยังมีน้อยเนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ จากการทดสอบสมดุลของไอและของเหลว แสดงให้เห็นว่าการระเหยของเมทิลลัลต่อเมทานอล มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้ เอทิลีนไกลคอลเป็นสารเอนเทรเนอร์ โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรมีความสอดคล้องกันกับข้อมูลที่ได้จากการเปรียบเทียบสมดุลของไอและของเหลว โดยใช้แบบจำลอง UNIFAC ด้วยซอฟต์แวร์จำลองกระบวนการ (Aspen Plus V8.4) ซึ่งสภาวะการทำงานที่เหมาะสมได้จากการวิเคราะห์ความไว โดยทำการจำลองกระบวนการโดยใช้แบบจำลองที่มีความแม่นยำ ผลการทดลองพบว่า เอทิลีนไกลคอลมีประสิทธิภาพในการแยกสารผสมเมทานอล-เมทิลลัล นอกจากนี้แบบจำลอง COSMO-RS ยังมีข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกการแยกอีกด้วย และเมื่อนำเอทิลีนไกลคอลมาเปรียบเทียบการใช้งานกับสารอื่น ๆ ที่นิยมนำมาใช้เป็นเอนเทรเนอร์ในการแยกสารผสมเมทานอล-เมทิลลัล ได้แก่ ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เอทานอลาไมน์เมทิลไพรโรลิดีนोन (NMP) และ ซัลโฟแลน (Sulfolane) พบว่าแนวโน้มค่าการเลือกเกิด (Selectivity) ของเมทิลลัลไปยังเมทานอล คือ DMF>NMP>EG>เอทานอลาไมน์>ซัลโฟแลน ขณะที่แนวโน้มค่าความสามารถในการจุตัวทำละลาย (Solvent Capacity) คือ เอทานอลาไมน์>EG>NMP>DMF>ซัลโฟแลน นั้นหมายความว่าเอนเทรเนอร์ที่มีค่าการเลือกเกิด (Selectivity) สูงไม่ได้แปลว่ามีความสามารถในการจุตัวทำละลายได้สูงเสมอไป โดยในกลุ่มสารเอนเทรเนอร์ที่กล่าวมานี้ เอทิลีนไกลคอลมีทั้งค่าการเลือกเกิดและค่าความสามารถในการจุตัวทำละลาย (Solvent Capacity) ที่เหมาะสม จึงได้รับคัดเลือกให้เป็นสารเอนเทรเนอร์ที่มีความเหมาะสมที่สุด

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ RCM และวิธีการทางสถิติมาวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

ในปี ค.ศ. 2000 L. Jimé'nez และคณะ (Jimé'nez et al., 2001) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์หน่วยการกลั่นที่มีปฏิริยาร่วม และหน่วยการกลั่นสกัดด้วย RCM โดยจุดมุ่งหมายของงานนี้คือการมุ่งเน้นในการวิเคราะห์การกลั่นที่มีปฏิริยาร่วม (Reactive Distillation) และการกลั่นสกัด (Extractive Distillation) รวมทั้งระบบการกู้คืนตัวทำละลาย ซึ่ง RCM สามารถให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าและให้ความช่วยเหลือด้านการออกแบบสำหรับกระบวนการแยกต่าง ๆ ในการกลั่นด้วยปฏิริยา ได้ถูกรวมไว้แล้ว เทคนิคกราฟิกเหล่านี้ช่วยให้สามารถเลือกการออกแบบได้เร็วขึ้นโดยการแสดงภาพบนพื้นที่องค์ประกอบทั้งหมด และยังช่วยให้วิศวกรสามารถตรวจสอบข้อจำกัดในการแยกได้ง่ายขึ้น ผลการจำลองแสดงผลของปฏิริยาในโครงสร้างไดอะแกรม ของการดำรงอยู่และตำแหน่งของโหนด รวมทั้งอาน (Saddles) และขอบเขตการกลั่น (Separatrices or Surfaces) เทคนิคการสังเคราะห์และเทคนิคการกลั่นขั้นสูงซึ่งได้รับการสนับสนุนโดยเครื่องมือซอฟต์แวร์ที่มีอยู่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาเป็นกรณีศึกษาสำหรับการกลั่นสกัด รวมทั้งอิทธิพลของเอนเทรเนอร์ ในระบบปฏิริยา และการวิเคราะห์การกลั่นที่มีปฏิริยาร่วมแบบต่อเนื่อง

ในปี ค.ศ. 2016 พจนารถ สุวรรณรุจิ และ จันท์ทิพย์ เศรษฐยานนท์ (พจนารถ สุวรรณรุจิ และ จันท์ทิพย์ เศรษฐยานนท์, 2559) ได้ทำการศึกษา เรื่องการย้อมผ้าใยสังเคราะห์ PLA (Poly Lactic Acid) ด้วยสีครามธรรมชาติ โดยได้นำวิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง มาใช้วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการนำมาย้อมบนผ้า PLA ซึ่งวิธีการพื้นผิวตอบสนองเป็นเทคนิคทางสถิติมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการย้อมที่เกิดขึ้นทำให้ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการย้อม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของสี ในการนำสีไปย้อมบนผ้า PLA จากนั้นนำมาสร้างเป็นสมการและแผนภาพคอนทัวร์ แล้วนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวไปใช้จริงในการผลิตผ้า PLA ที่ย้อมด้วยสีครามธรรมชาติ โดยการหาสภาวะในการย้อมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง โดยพิจารณา 3 ปัจจัย 5 ระดับ สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic Model) ระหว่างปัจจัยอุณหภูมิ ระยะเวลา และความเข้มข้นของสีกับค่าตอบสนองหรือค่าความเข้มสี ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการย้อมเส้นใย PLA ด้วยสีครามธรรมชาติด้วยการใช้เทคนิคทางสถิติมาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ คือ การย้อมที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 56 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของสีครามร้อยละ 13 ซึ่งสามารถย้อมได้ความเข้มสี (K/S) เท่ากับ 3.050 ขณะที่ความเข้มสีที่ได้จากการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์เท่ากับ 3.187 ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างกันที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ รวมทั้งมีความคงทนต่อการซักดีมากและสีไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฉดและความเข้ม อีกทั้งยังมีความคงทนต่อการขัดถูดีมากทั้งในขณะแห้งและเปียก

ในปี ค.ศ.2016 กาญจนา ชันทะกะพันธ์ และ เยวภา สุขพรมมา (กาญจนา ชันทะกะพันธ์ และ เยวภา สุขพรมมา, 2559) ได้ทำการศึกษาเรื่องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์จากขิง โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยออกแบบการทดลองแบบกล่องเบห์นเคน (Box Behnken Design) แบบ 3 ตัวแปร ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของตัวทำละลาย อุณหภูมิและเวลา ในการสกัด รวมถึงทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดด้วยเทคนิค DPPH Radical Scavenging Assay ผลการวิจัยพบว่า สภาวะที่เหมาะสมสามารถสกัดฟีนอลิกจากขิงได้สูงสุดร้อยละ 2.23 โดยน้ำหนัก คือที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้เอทานอลร้อยละ 77 โดยปริมาตร และสภาวะที่เหมาะสมสามารถ สกัดฟลาโวนอยด์จากขิงได้สูงสุดร้อยละ 2.19 โดยน้ำหนัก คือที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลาในการ สกัด 3 ชั่วโมง ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 80 โดยปริมาตร ทั้งนี้สารสกัดขิงที่ได้มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด เท่ากับร้อยละ 62.52 โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะการสกัดที่อุณหภูมิ 49 องศา เซลเซียส เวลาในการสกัดนาน 6 ชั่วโมง และความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 74 โดยปริมาตร ค่าความน่าเชื่อถือ (r^2) จากสมการสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายผลได้การสกัด ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และความสามารถการต้านอนุมูลอิสระ คือ 0.93 0.94 และ 0.91 ตามลำดับ การวิเคราะห์รูปพื้นผิวตอบสนองพบว่า เวลาในการสกัดเป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญมากที่สุดต่อผลได้การสกัดของฟีนอลิก ส่วนความเข้มข้นของเอทานอลมีผลมากที่สุดต่อฟลาโวนอยด์และความสามารถในการยับยั้งฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากขิง

ในปี ค.ศ. 2018 อภาภรณ์ จันทร์ปรีกษ์ และคณะ (อภาภรณ์ จันทร์ปรีกษ์ และคณะ, 2561) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ (โรบัสต้า/อะราบิก้า) ด้วย เฮกเซน โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Minitab R17 ซึ่งทำการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการสกัด อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกาแฟ และเวลาในการสกัด โดยแต่ละปัจจัยมี 5 ระดับรอบ CCD จำนวนเงื่อนไขในการทดลองคือ 20 การทดลอง วิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบจำลองสหสัมพันธ์กำลังสองไม่เป็นเส้นตรง ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยคือ ที่อุณหภูมิ 46.97 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกาแฟ 8.14 mL/g เวลาในการสกัด 27.22 นาที และทุกปัจจัยมีสหสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยปริมาณน้ำมันที่สกัดได้สูงสุด คือ ร้อยละ 13.04 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความแม่นยำสูงกับค่าทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 ขั้นตอนในการดำเนินโครงการ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินโครงการ

3.1.1 ศึกษากระบวนการผลิตเมทิลลัลและการเกิดอะซิโโทรปของสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล

ศึกษากระบวนการผลิตและการแยกเมทิลลัลเพื่อให้ทราบถึงปัญหาจากการเกิดอะซิโโทรปของสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล

3.1.2 ค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการแยกสารผสมประเภทอะซิโโทรป

ค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับการแยกสารผสมอะซิโโทรปและเลือกวิธีที่นิยมใช้แยกสารผสมอะซิโโทรป ได้แก่ การกลั่นสลับความดัน กระบวนการเยื่อเลือกผ่าน กระบวนการโมเลกุลลาร์ซีฟ การกลั่นแบบอะซิโโทรปิก และการกลั่นสกัด โดยนำวิธีการแยกสารผสมอะซิโโทรปที่ได้ทำการค้นคว้าหาข้อมูล มาเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย แล้วทำการเลือกวิธีที่เหมาะสมและประหยัดพลังงานมากที่สุด

3.1.3 ศึกษากระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล

ศึกษาหลักการและขั้นตอนวิธีการกลั่นสกัด (Extractive Distillation) การเลือกเอนเทรเนอร์ ขั้นตอนในการกลั่น และการได้มาของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แล้วนำหลักการที่ศึกษามาพิจารณาเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงการประหยัดพลังงานเป็นสำคัญ

3.1.4 ศึกษาการเลือกใช้อเอนเทรเนอร์และเปรียบเทียบเอนเทรเนอร์แต่ละชนิด

ศึกษาหลักการเลือกเอนเทรเนอร์ที่เหมาะสมกับการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัลกับเมทานอล ได้แก่ ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ เอทานอลาไมน์ เมทิลไพโรโรลิดินอน เอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรไพลีนไกลคอล โดยสารแต่ละตัวมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ในขณะเดียวกันก็มีคุณสมบัติที่สามารถเป็นเอนเทรเนอร์ได้ตามหลักการเลือกเอนเทรเนอร์ของการกลั่นสกัด และสารแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันเมื่อนำมาใช้เป็นเอนเทรเนอร์ ดังนั้นจึงศึกษาเปรียบเทียบหาเอนเทรเนอร์ที่เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อกระบวนการกลั่นสกัดแยกสารผสมเมทิลลัลกับเมทานอลที่เราต้องการ

3.1.5 ศึกษาโปรแกรม Aspen Plus V8.8 เพื่อจำลองกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล

ศึกษาการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus V8.8 เพื่อใช้จำลองกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยโปรแกรมสามารถจำลองกระบวนการกลั่นและกระบวนการต่างๆ ทางวิศวกรรมเคมีได้ดี ที่สำคัญสะดวกต่อการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการกลั่นสกัด เช่น ความดัน อุณหภูมิ และอัตราการป้อนเข้าของสาร โดยไม่ต้องทำการทดลองให้สิ้นเปลืองพลังงานและสาร ทำให้สามารถหาสถานะที่เหมาะสมในการดำเนินการได้ เพื่อเป็นประโยชน์และป้องกันการเกิดข้อผิดพลาดในการสร้างแบบจำลองกระบวนการกลั่นสกัด

3.1.6 ศึกษาโปรแกรม Minitab 18.1 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหา สถานะการดำเนินการที่เหมาะสม

ศึกษาการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติ ที่นำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการกลั่นสกัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกลั่นสกัด ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการป้อนเข้าของสารผสม และความดัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นสมการและแผนภาพคอนทัวร์ โดยการออกแบบประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เพื่อนำสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลไปใช้จริงในการกลั่นสกัดแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล

3.1.7 สรุปผลและจัดทำรายงาน

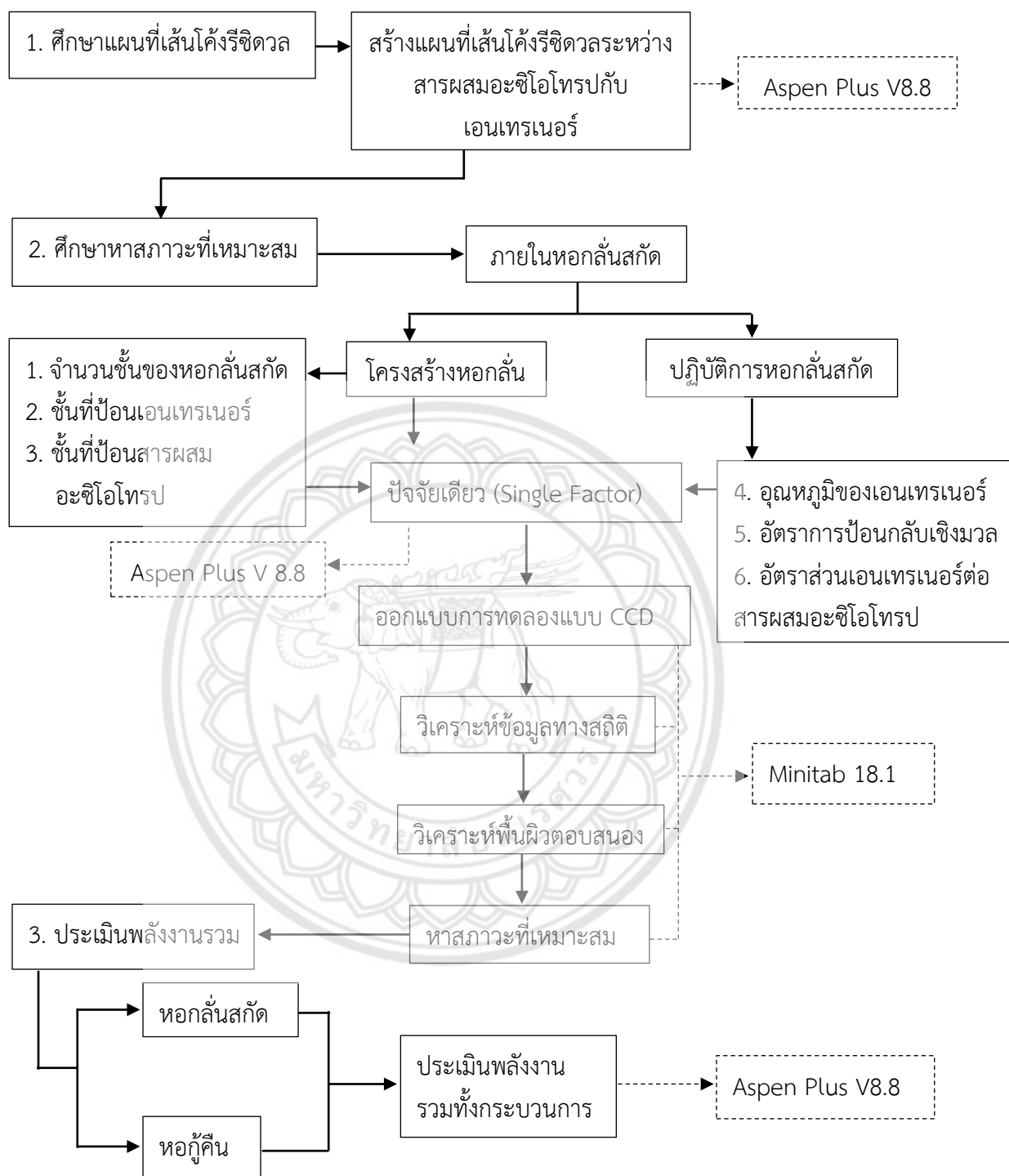
3.1.7.1 สรุปผลกระบวนการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการกลั่นสกัด

3.1.7.2 สรุปผลการหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.1.7.3 สรุปผลการประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลของเอนเทอร์เนอร์ที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ

3.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

ในขั้นตอนการปฏิบัติงานจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาแผนที่เส้นโค้งรีซิดิวล จะใช้โปรแกรม Aspen Plus V8.8 ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาหาสถานะที่เหมาะสม จะใช้ทั้งโปรแกรม Aspen Plus V8.8 และ Minitab 18.1 และขั้นตอนที่ 3 ประเมินพลังงาน จะใช้โปรแกรม Aspen Plus V8.8 ซึ่งจะแสดงเป็นแผนผังขั้นตอนการปฏิบัติงาน ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังการปฏิบัติงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล จะแสดงผลของการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล ให้ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลร้อยละ 99.9 โดยใช้เอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำ ซึ่งศึกษาและวิเคราะห์เอนเทรเนอร์ทั้งหมด 6 สาร ได้แก่ เอทานอล ไมน์ เมทิลไพโรโรลิดินอน เอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรโพลีนไกลคอล เปรียบเทียบกับไดเมทิลฟอร์มาไมด์ที่มีการนำมาใช้เป็นเอนเทรเนอร์ในการกลั่นสกัดแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยในการศึกษาของแต่ละเอนเทรเนอร์จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาแผนที่เส้นโค้งรีซิวดิว (Residue Curve Map; RCM) โดยในการกลั่นสกัดจำเป็นต้องศึกษาแผนที่เส้นโค้งรีซิวดิวของสารผสมอะซิโพรปที่ต้องการแยกกับเอนเทรเนอร์ที่เติมลงไป เพื่อนำคุณสมบัติทางกายภาพของสารไปใช้ประโยชน์ โดยใช้ข้อมูลสมมูลไอและของเหลว

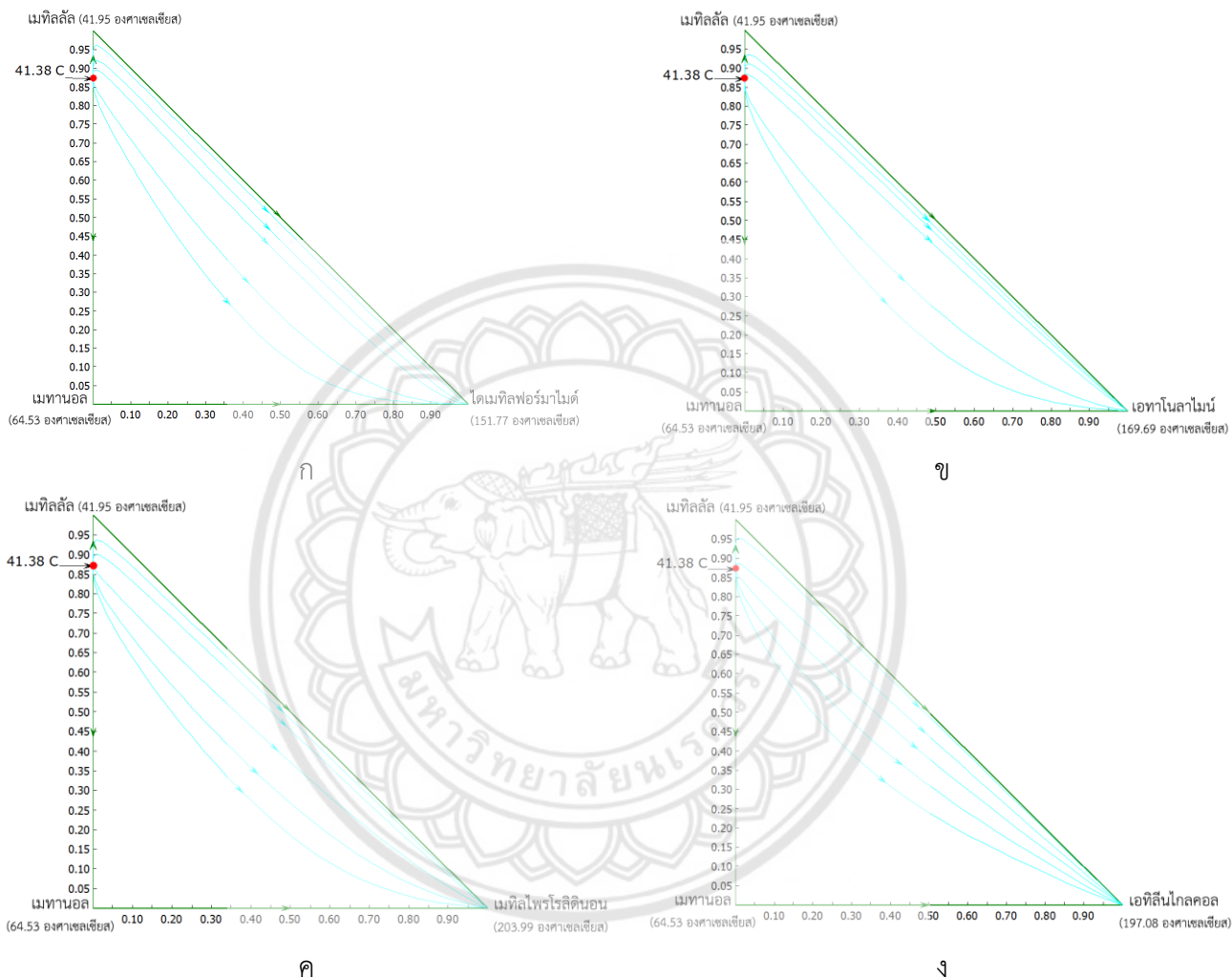
ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ในขั้นตอนหาสภาวะที่เหมาะสมจะแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 โครงสร้างหอกลั่นสกัด ศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด (Total Stages) ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโพรป (Azeotrope Feed Stage) และชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ (Entrainer Feed Stage) ส่วนที่ 2 ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด ศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโพรป (S/F) และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (Mass Reflux Ratio) ซึ่งทั้งสองส่วนมีความเชื่อมโยงกัน โดยส่วนโครงสร้างของหอกลั่นจะทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพียงความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล สำหรับการวิเคราะห์ผลทางสถิติของส่วนปฏิบัติการหอกลั่นสกัดจะวิเคราะห์ทั้งความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพลังงาน โดยกำหนดให้ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลร้อยละ 99.9 โดยมวล และต้องใช้พลังงานต่ำที่สุด เมื่อหาสภาวะที่เหมาะสมครบแล้วจึงสามารถประเมินพลังงานในกระบวนการกลั่นสกัดได้

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาและประเมินพลังงานรวมสำหรับหอกู้คืน (Recovery Column) หลังจากที่ทำหาสภาวะที่เหมาะสมของหอกลั่นสกัดแล้ว จะต้องทำการแยกเอนเทรเนอร์ออกจากเมทานอลเพื่อนำเอนเทรเนอร์กลับไปใช้ใหม่ในหอกลั่นสกัดซึ่งต้องได้ความบริสุทธิ์ของเอนเทรเนอร์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.9 โดยมวล และต้องใช้พลังงานต่ำซึ่งในขั้นตอนนี้จะสามารถประเมินพลังงานรวมทั้งหมดในกระบวนการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลได้

หลังจากที่ทราบว่าสารที่ต้องการนำมาใช้เป็นเอนเทรเนอร์สามารถแยกเมทิลลัลออกจากเมทานอลให้มีความบริสุทธิ์สูงได้แล้ว จะทำการศึกษาปัจจัยเดียว (Single Factor) ก่อนที่จะเข้าขั้นตอนที่ 2 เพื่อหาขอบเขตในการวิเคราะห์ผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus V8.8 มีทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโพรป ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโพรป และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ภาคผนวก ข)

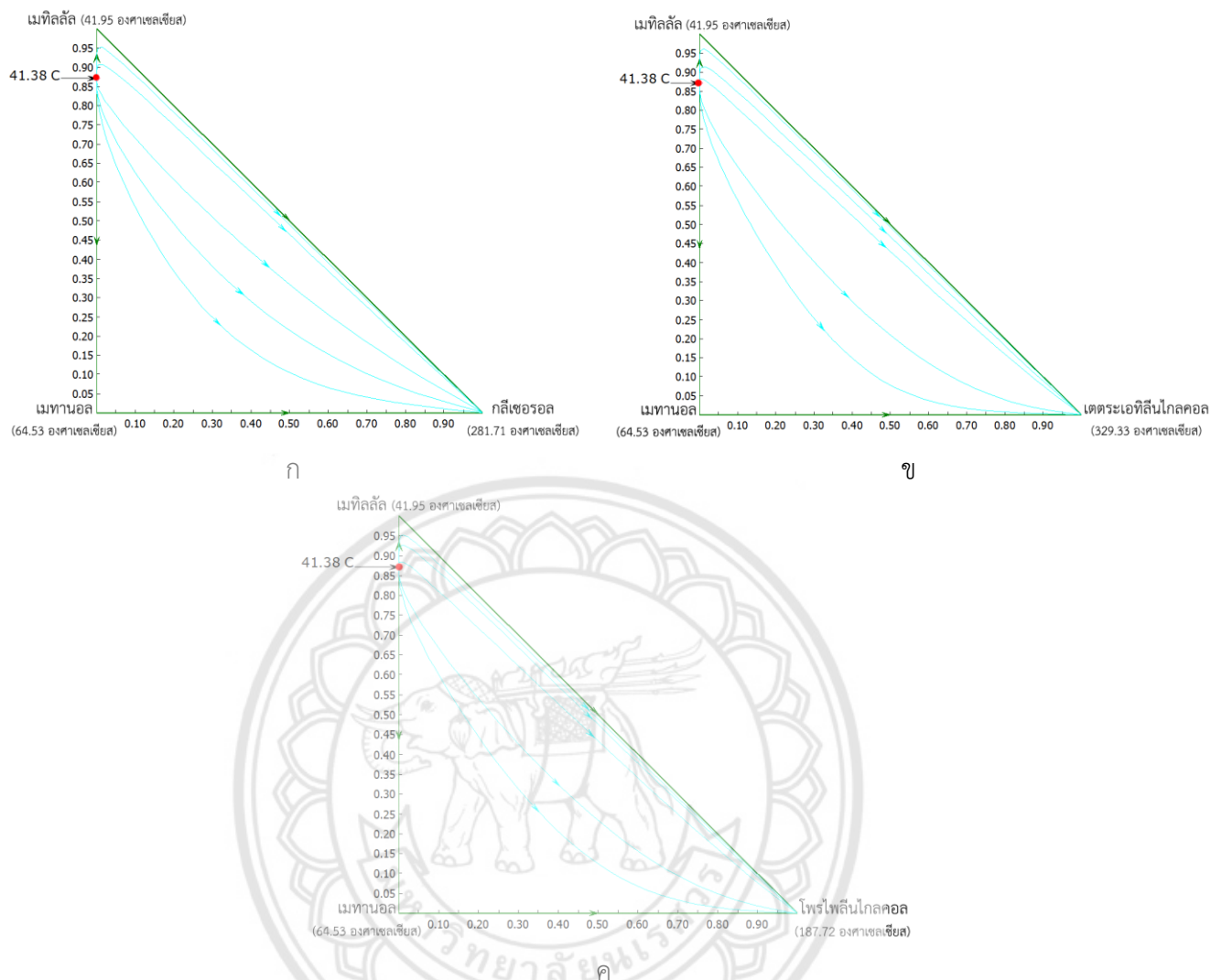
4.1 แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวล (Residue Curve Map; RCM)

หลังจากได้สารที่สนใจนำไปใช้เอนเป็นเอนเทอร์เนอร์เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลแล้ว ต้องทำการศึกษาว่าสารที่สนใจนั้นสามารถแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลได้หรือไม่ โดยสามารถตรวจสอบได้จากแผนที่เส้นโค้งรีซิดิวล ดังแสดงในรูป 4.1-4.2



รูปที่ 4.1 แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลของสารที่เคยนำมาศึกษาเป็นเอนเทอร์เนอร์เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล

- เมทานอล (ก) แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลสำหรับใช้ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์เป็นเอนเทอร์เนอร์
- (ข) แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลสำหรับใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทอร์เนอร์
- (ค) แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลสำหรับใช้เมทิลโพรพิลิตอนเป็นเอนเทอร์เนอร์
- (ง) แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลสำหรับใช้เอทิลินไกลคอลลเป็นเอนเทอร์เนอร์



รูปที่ 4.2 แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลของสารที่ต้องการนำมาศึกษาเป็นเอนเทรเนอร์เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัค-เมทานอล (ก) แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลสำหรับใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ (ข) แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลสำหรับใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ (ค) แผนที่เส้นโค้งรีซิดิวลสำหรับใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นสารที่ต้องการนำมาศึกษาเป็นเอนเทรเนอร์เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัค-เมทานอล จะมีเมทิลลัคและเมทานอลเป็นสารผสมมีจุดอะซิโทรปที่ความบริสุทธิ์โดยคิดเป็นร้อยละของเมทิลลัค 94.12 และเมทานอล 5.88 ที่อุณหภูมิ 41.38 องศาเซลเซียส จึงนำ เอทานอล ไม่น เมทิลโพรโพลิไดนอล เอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรไพลีนไกลคอล มาช่วยในการกลั่นทำให้เมทิลลัคมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยแต่ละสารที่นำมาศึกษาเป็นเอนเทรเนอร์ มีจุดเดือด 169.69 องศาเซลเซียส 203.99 องศาเซลเซียส 197.08 องศาเซลเซียส 281.71 องศาเซลเซียส 329.33 องศาเซลเซียส และ 187.72 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อนำมากลั่นแยกสารที่จะระเหยก่อนคือเมทิลลัค โดยมีจุดอะซิโทรปหรือเรียกว่า จุดเอกพจน์ (Singular Point) ของเส้นโค้งรีซิดิวล ซึ่งแสดงพฤติกรรม

ของเส้นโค้งรีซิดิวลเป็นแบบโหนดไม่เสถียร (Unstable Node) เนื่องจากสารทั้งสองมีค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalues) เป็นบวก ดังรูปภาพที่ 2.10 (ข) กล่าวคือสารผสมเกิดอะซิโตนที่จุดเดือดต่ำสุด และจะเห็นว่าเส้นโค้งรีซิดิวลมีทิศทางที่บ่งบอกว่ากลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนไกลคอล สามารถแยกสารผสมอะซิโตนหรือแยกเมทิลลัลออกจากเมทานอลได้ แสดงให้เห็นว่าสารทั้ง 6 ชนิด สามารถนำมาเป็นเอนเทรเนอร์ในการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลได้

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล

จากการศึกษาการใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นเอนเทรเนอร์ของ Y. Dong และคณะ (Dong et al., 2018) พบว่าการนำเอาสภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยของ Dong และคณะ ไปจำลองกระบวนการในโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus V8.8 ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลเพียงร้อยละ 99.4 ใช้พลังงาน 102,665 กิโลจูลต่อชั่วโมง แต่ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพลังงานของ Y. Dong และคณะ ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลร้อยละ 99.9 และใช้พลังงาน 101,016 กิโลจูลต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากใช้วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตี (Activity Coefficient; γ) ที่แตกต่างกัน และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus คนละรุ่นกัน (Dong และคณะ ใช้ Aspen Plus V8.4 สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ Aspen Plus V8.8)

การหาสภาวะที่เหมาะสมของเอนเทรเนอร์แต่ละชนิด ประกอบด้วย เอทานอลาไมน์ เมทิลไพรโรลิดีนอน เอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนไกลคอล จะทำการศึกษาทั้งหมด 6 ปัจจัย โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 โครงสร้างหอกกลับสกัด จะทำการวิเคราะห์เพียงความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล มีทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบด้วย จำนวนชั้นหอกกลับสกัด ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตน และชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ ส่วนที่ 2 ปฏิบัติการหอกกลับสกัด ทำการวิเคราะห์ทั้งความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพลังงาน มีทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบด้วย อุณหภูมิเอนเทรเนอร์ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตน และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมการใช้เอนเทรเนอร์ที่แตกต่างกันทั้ง 6 ชนิด มีเอทานอลาไมน์ เมทิลไพรโรลิดีนอน เอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนไกลคอล ถูกนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Dong และคณะต่อไป

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยของเอนเทอร์เนอร์แต่ละชนิดสำหรับโครงสร้างหอกลั่นสกัด

เอนเทอร์เนอร์	โครงสร้างหอกลั่นสกัด								
	x_1			x_2			x_3		
	จำนวนชั้นหอกลั่นสกัด			ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซีโโทโรป			ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		
	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
เอทาลาไมน์	9	10	11	6	7	8	3	4	5
เมทิลไพรโรลิดีนอน	19	22	25	8	10	12	4	5	6
เอทิลีนไกลคอล	20	22	24	12	14	16	6	8	10
กลีเซอรอล	10	11	12	7	8	9	3	4	5
เตตระเอทิลีนไกลคอล	15	18	21	9	11	13	4	5	6
โพรไพร์ลีนไกลคอล	9	10	11	6	7	8	3	4	5

ตารางที่ 4.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยของเอนเทอร์เนอร์แต่ละชนิดสำหรับปฏิบัติการหอกลั่นสกัด

เอนเทอร์เนอร์	ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด								
	x_4			x_5			x_6		
	อุณหภูมิเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)			อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซีโโทโรป			อัตราการป้อนกลับเชิงมวล		
	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
เอทาลาไมน์	50	75	100	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0
เมทิลไพรโรลิดีนอน	50	75	100	0.6	0.9	1.2	1.2	1.6	2
เอทิลีนไกลคอล	50	75	100	0.5	0.75	1	1.8	1.9	2
กลีเซอรอล	50	75	100	0.8	1.1	1.4	0.6	0.9	1.2
เตตระเอทิลีนไกลคอล	50	75	100	0.9	1.2	1.5	1	1.2	1.4
โพรไพร์ลีนไกลคอล	50	75	100	0.5	0.75	1	0.6	0.9	1.2

4.2.1 เอทานอลาไมน์ (Ethanalamine)

ในการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างหอกลับสกัด และปฏิบัติการหอกลับสกัด

4.2.1.1 โครงสร้างหอกลับสกัด

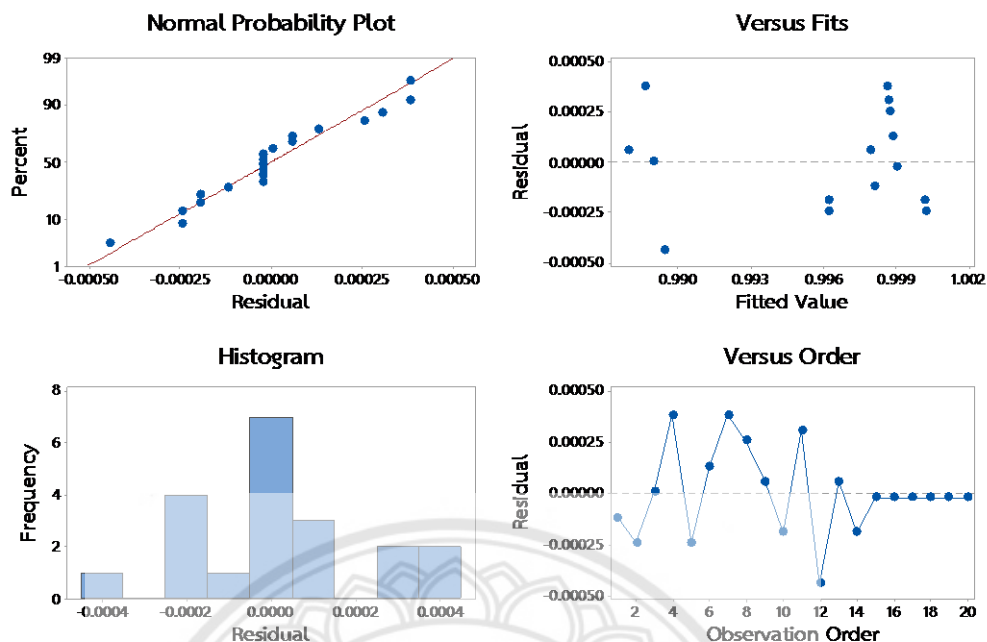
จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 จำนวนชั้นของหอกลับสกัดทำการศึกษานี้ในช่วง 9-11 ชั้น ปัจจัยที่ 2 ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทโรปทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 6-8 และปัจจัยที่ 3 ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 3-5 สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.1

$$y_1 = 0.9407 + 0.01421 x_1 - 0.00522 x_2 - 0.00040 x_3 - 0.001239 x_1^2 - 0.001239 x_2^2 - 0.000489 x_3^2 + 0.001875 x_1 x_2 + 0.000125 x_1 x_3 + 0.000375 x_2 x_3 \quad (4.1)$$

โดยที่	y_1	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_1	คือ จำนวนชั้นหอกลับสกัด
	x_2	คือ ชั้นป้อนสารผสมอะซิโโทโรป
	x_3	คือ ชั้นป้อนสารเอนเทรเนอร์

ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดโดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.3



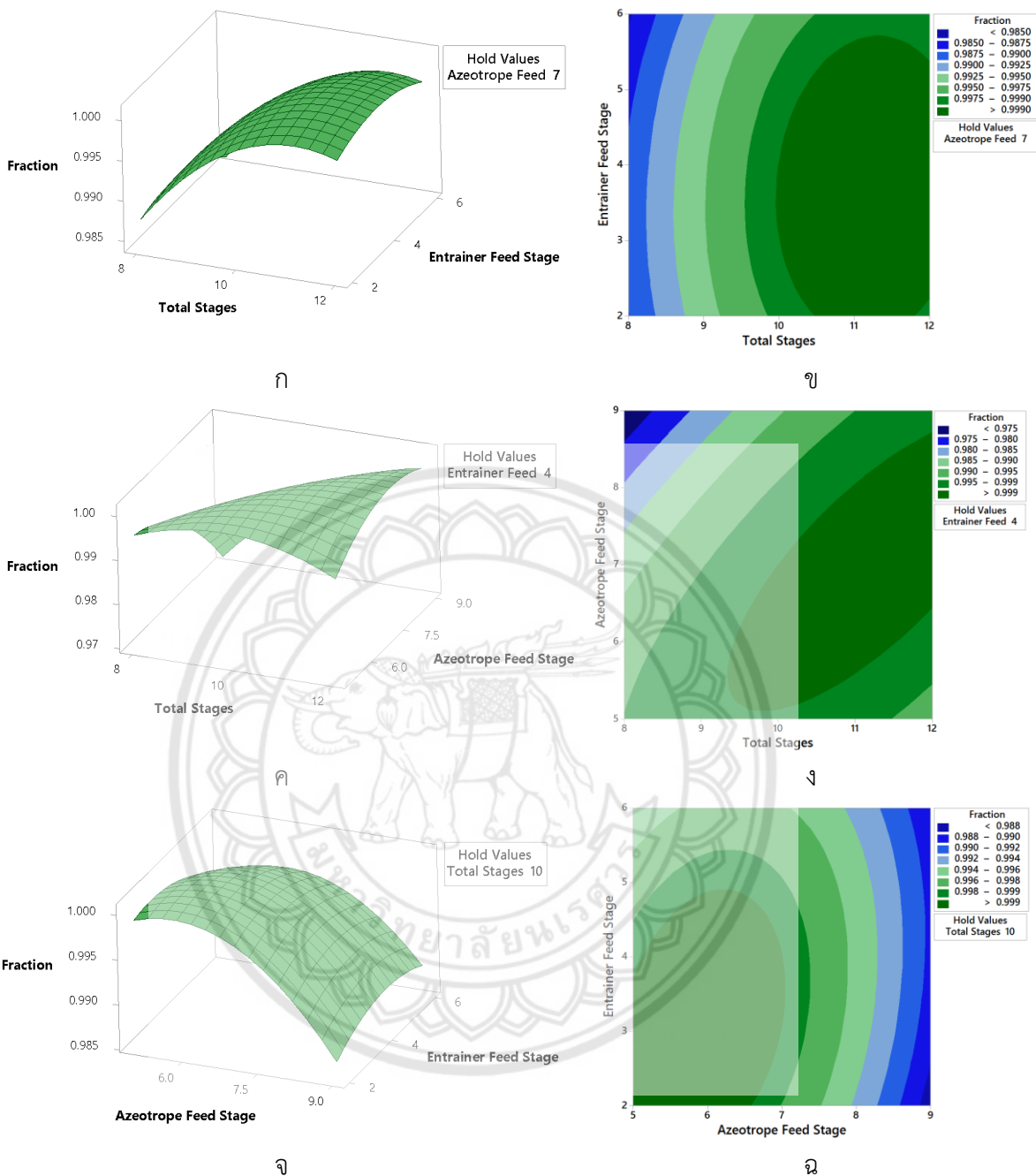
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลั่นสกัด

จากรูปที่ 4.3 สามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะเป็นจุดเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงและการกระจายตัวรวมกันที่บริเวณศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะไม่มีการกระจายตัวในช่วง 0.990-0.996 มีการกระจายทางบวกมากกว่าทางลบในช่วงก่อนถึง 0.990 และมีการกระจายทางลบที่กว้างกว่าทางบวกในช่วง 0.996-1
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุมขึ้นและลงที่ไม่แน่นอนในช่วง 0-14 และค่าสุมเท่าเดิมในช่วง 15-20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ข. การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลั่นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลั่นสกัด แสดงในรูปที่ 4.4 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลั่นสกัดและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลั่นสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป และความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์



รูปที่ 4.4 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์ สำหรับโครงสร้างหอกลั่นสกัด (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ระหว่างจำนวนชั้นของหอกลั่นสกัดและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างจำนวนชั้นของหอกลั่นสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตรป (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

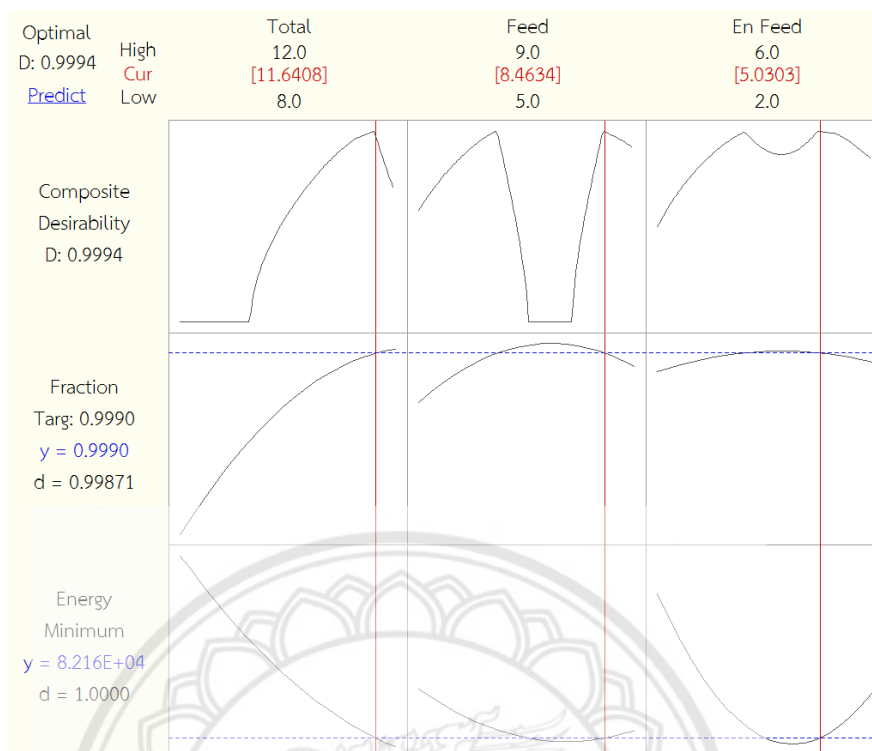
จากรูปที่ 4.4 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์ และชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปคือชั้นที่ 7 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์และชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.4 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์ และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์คือชั้นที่ 4 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์กับชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล จะเห็นได้ว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงจำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์ 10-12 ชั้น และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปชั้นที่ 6-8 โดยเมื่อทำการป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปในชั้นที่ 5 จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากในชั้นที่ 5 มีการป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปไปสลับกับชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์เกินไปจึงทำให้ระยะทางในการเกิดสมดุล (Equilibrium) ไม่มากพอ ส่วนถ้าป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปในชั้นที่ 10 เป็นต้นไป ก็ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลงเช่นกัน เนื่องจากถาดที่ 10 เป็นต้นไปมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 44.829 องศาเซลเซียสขึ้นไปเมทานอลจึงสามารถระเหยกลายเป็นไอได้บางส่วนแม้จะไม่ถึงจุดเดือดของเอทานอลก็ตาม ดังนั้นในช่วงชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปชั้นที่ 6-8 จึงมีความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลสูงที่สุด ส่วนจำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์ที่มีจำนวนชั้นต่ำกว่า 10 ชั้นจะมีความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากชั้นของหอกลับสัปดาห์น้อยเกินไปอุณหภูมิของแต่ละชั้นจึงใกล้เคียงกันทำให้เมทานอลบางส่วนสามารถระเหยกลายเป็นไอขึ้นไปบนยอดหอกลับสัปดาห์พร้อมกับเมทิลลัล เมทิลลัลจึงมีความบริสุทธิ์ลดลง

จากรูปที่ 4.4 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้จำนวนชั้นของหอกลับสัปดาห์คงที่เท่ากับชั้นที่ 10 ซึ่งชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปกับชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์มีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล พบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดในชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ชั้นที่ 2-4 และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปในชั้นที่ 6 ถ้าป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปที่ชั้นที่ 5 และชั้นที่ 7 ก็จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากถ้าป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปในชั้นที่ 5 ก็จะทำให้จำนวนครั้งที่เกิดสมดุลน้อยเกินไป ส่วนถ้าป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปตั้งแต่ชั้นที่ 7 เป็นต้นไปก็จะทำให้ระยะห่างของชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์กับชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปมากเกินไป ไม่เหมาะสมกัน

ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสัปดาห์ในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทานอลเป็นเอนเทอร์เนอร์

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการกลั่นสัปดาห์เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทานอลเป็นเอนเทอร์เนอร์ในส่วนของการกลั่นสัปดาห์สามารถทำได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสภาวะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลั่นสกัดโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.5 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างหอกลั่นสกัดโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์ต้องใช้จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด 11.6408 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 8.4634 และป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 5.0303 โดยกำหนดอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปเท่ากับ 0.5 และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 0.8 โดยโปรแกรมได้คำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 82,160 กิโลจูลต่อชั่วโมง มีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 0.9994 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8-1 (Zvorad, 2004) ถือว่าอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ แต่ในส่วนของโครงสร้างหอกลั่นสกัดเลขทศนิยมต้องปัดทศนิยมขึ้นให้เป็นจำนวนเต็ม จะได้จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด 12 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 9 และป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 6 เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.999 และได้พลังงาน 82,311.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง ซึ่งพลังงานมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 151.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.18 ดังนั้นสามารถนำสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลั่นสกัดนี้ไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.1.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้
 ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ทำการศึกษที่อุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ 2 อัตราส่วน
 เอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ปทำการศึกษในช่วง 0.8-1.2 และปัจจัยที่ 3 อัตราการป้อนกลับ
 เชิงมวลทำการศึกษในช่วง 0.6-1.0 ในส่วนของปฏิบัติการหอกลับสกัดจะทำการวิเคราะห์ทั้งความบริสุทธิ์
 ของเมทิลลัลและพลังงาน

ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

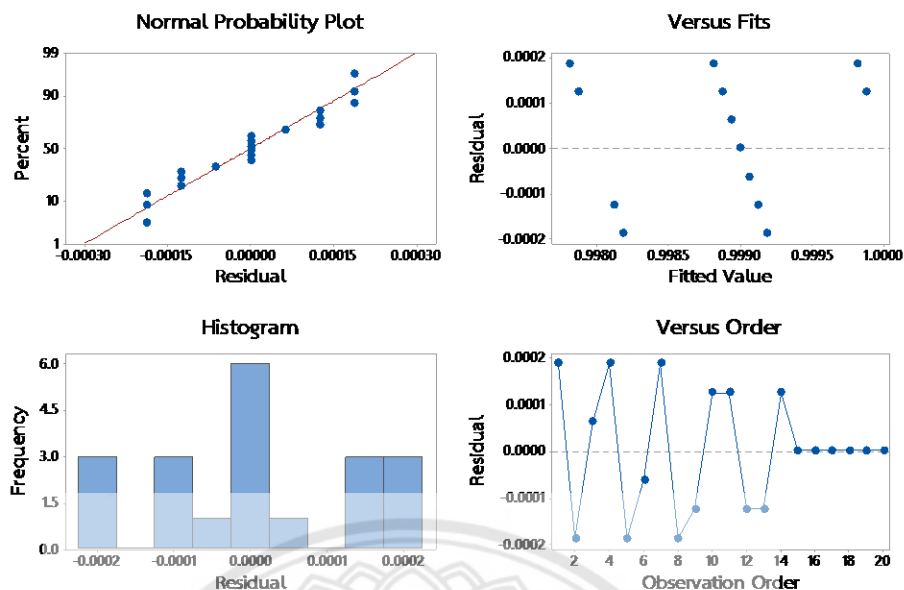
ของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลในส่วนปฏิบัติการหอกลับสกัด สามารถสร้างสมการ
 ถดถอยได้ดังสมการที่ 4.2

$$y_2 = 0.99887 + 0.000023 x_4 - 0.00031 x_5 - 0.00281 x_6 - 0.000000 x_4^2 + 0.000000 x_5^2 \\ + 0.000000 x_6^2 - 0.000025 x_4 x_5 + 0.000025 x_4 x_6 + 0.00313 x_5 x_6 \quad (4.2)$$

โดยที่	y_2	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_4	คือ อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)
	x_5	คือ อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป
	x_6	คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทอร์เนอร์ของ ปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด
 โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทาง
 คณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.6



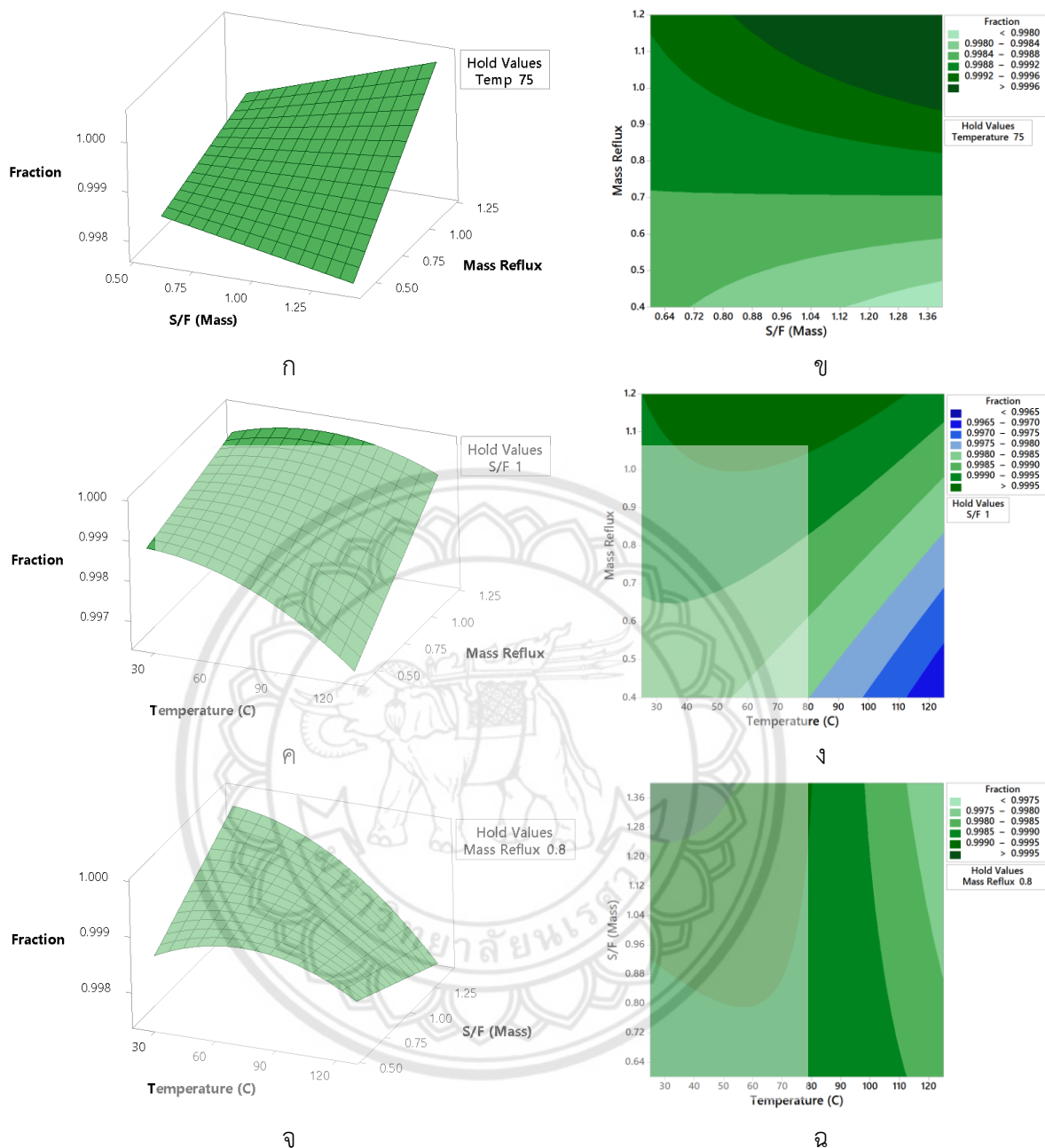
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลิ้นสกัด

จากรูปที่ 4.6 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการกระจายตัวรวมกันเป็นจุด ๆ เรียงกันบนเส้น มีการกระจายตัวเท่าๆ กัน ทั้งทางบวกและทางลบ โดยการกระจายตัวรวมกันมากที่สุดที่จุดศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวหนาแน่นที่สุดและจืดจางที่จุด 0.999 รองลงมาอยู่ที่จุด 0.998 และมีการกระจายตัวน้อยที่สุดที่จุด 1 แต่มีแนวโน้มการกระจายเท่าๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ตี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุมขึ้นและลงที่ไม่แน่นอนในช่วง 0 ถึง 14 และค่าสุมเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในส่วนของคุณภาพของเมทิลลัล แสดงในรูปที่ 4.7 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปกับอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์



รูปที่ 4.7 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตโดยใช้เอทานอลาโนลเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกั่นสกัดในส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลลัต (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อ สารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่างอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่าง อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

จากรูปที่ 4.7 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าอัตราการป้อนกลับเชิงมวลมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.7 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปที่ 1 ซึ่งอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.7 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปกับอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลที่ 0.8 ซึ่งอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปกับอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์มีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ข. ผลงาน

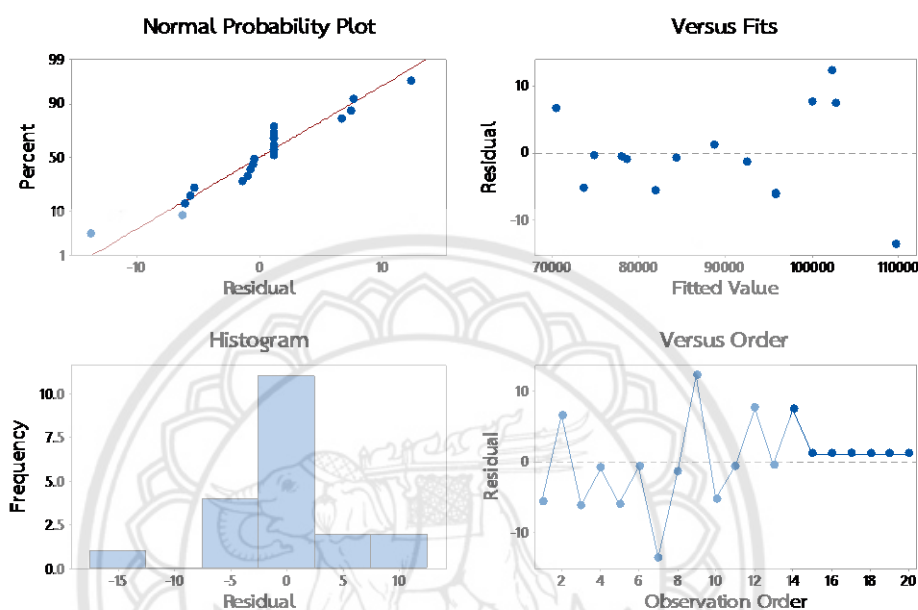
ปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดในส่วนของผลงาน สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.3

$$y_3 = 33450.1 + 44.903x_4 + 45253x_5 + 34968x_6 - 0.29519x_4^2 + 1878.2x_5^2 - 82.7x_6^2 - 286.915x_4x_5 - 0.265x_4x_6 + 50.0x_5x_6 \quad (4.3)$$

โดยที่ y_3 คือ ผลงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
 x_4 คือ อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)
 x_5 คือ อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรป
 x_6 คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.8



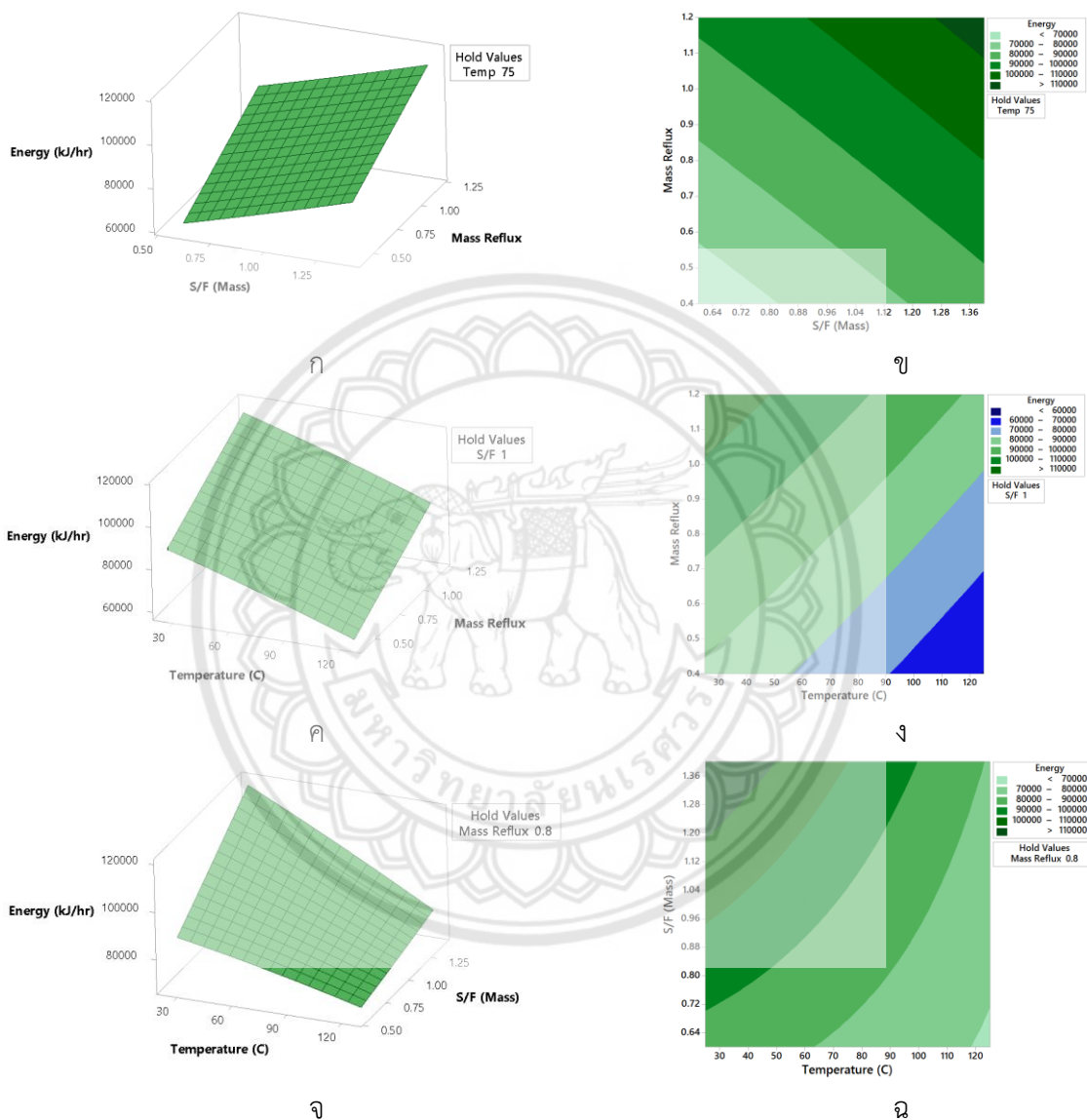
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับ

จากรูปที่ 4.8 สามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการกระจายตัวรวมกันเป็นจุด ๆ เรียงกันบนเส้น มีการกระจายตัวทางลบมากกว่าทางบวก โดยการกระจายตัวรวมกันมากที่สุดอยู่ที่จุดศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่าๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุมขึ้นและลงที่ไม่แน่นอนในช่วง 0 ถึง 14 และค่าสุมเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล แสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองพลังงานโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในส่วนของพลังงาน (ก-ข) โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์และอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

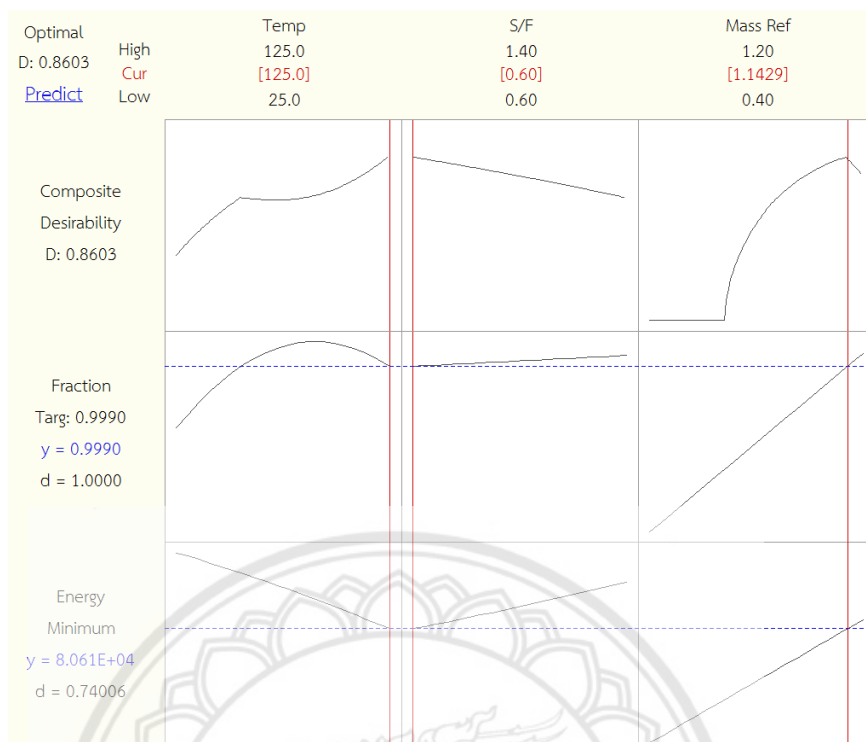
จากรูปที่ 4.9 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโตรปกับอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโตรปกับอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยกพบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.9 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์กับอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโตรปคงที่เท่ากับ 1 ซึ่งอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์กับอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.9 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์กับอัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโตรปที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลที่ 0.8 ซึ่งอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์กับอัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโตรปมีนัยสำคัญกันต่อพลังงาน โดยพบว่าการใช้พลังงานที่ต่ำที่สุดของอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโตรปเท่ากับ 0.56-0.72 และอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ 120 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราส่วน เอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโตรปมากกว่า 0.72 และอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส จะทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้น เนื่องจากพลังงานไม่เพียงพอที่จะให้ให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์สูง

ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหากลั่นสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทอร์เนอร์

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทอร์เนอร์ในส่วนของปฏิบัติการหากลั่นสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสภาวะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟสถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.10 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์ต้องใช้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ 125 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารอะซิโทรปเท่ากับ 0.6 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 1.1429 และใช้สถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดในรูปที่ 4.5 โปรแกรมได้คำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 80,610 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 0.8603 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8-1 (Zvorad, 2004) ถือว่าเป็นช่วงที่สามารถยอมรับได้ เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการประมวลผลมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.999 และได้พลังงาน 80,900.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีค่าพลังงานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 290.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.36 ซึ่งถือมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสามารถนำสถานะที่เหมาะสมทั้งหมดไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.2 เมทิลไพร์โรลิดินอน (N-Methyl-2-Pyrrolidinone; NMP)

ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เมทิลไพร์โรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างหอกลั่นสกัด และปฏิบัติการหอกลั่นสกัด

4.2.2.1 โครงสร้างหอกลั่นสกัด

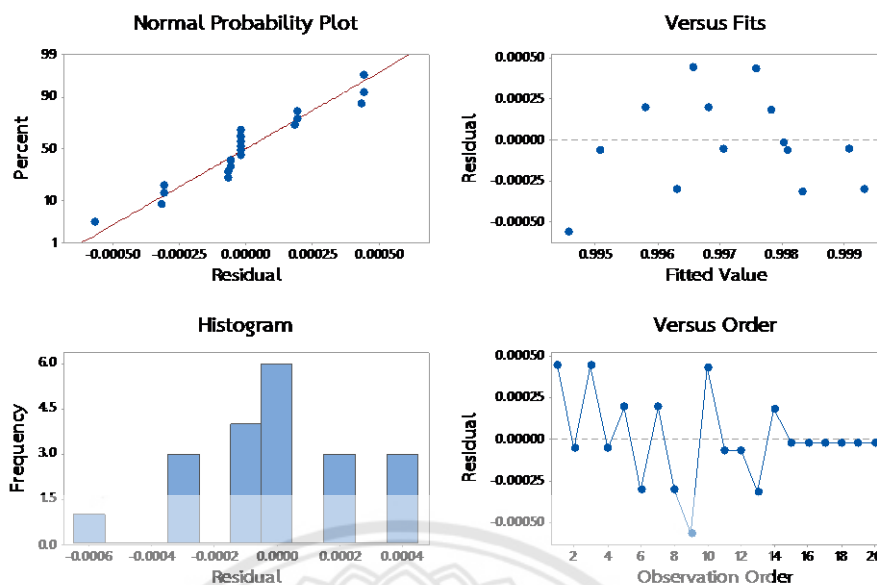
จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัดทำการศึกษาน้ำหนักชั้นในช่วง 19-25 ชั้น ปัจจัยที่ 2 ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนการศึกษาในช่วงชั้นที่ 8-12 และปัจจัยที่ 3 ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ทำการศึกษาน้ำหนักชั้นที่ 4-6 สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.4

$$y_1 = 0.97890 + 0.001806 x_1 - 0.000265 x_2 - 0.00149 x_3 - 0.000054 x_1^2 - 0.000091 x_2^2 + 0.000011 x_3^2 + 0.000083 x_1 x_2 - 0.000000 x_1 x_3 + 0.000125 x_2 x_3 \quad (4.4)$$

โดยที่	y_1	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_1	คือ จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด
	x_2	คือ ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตน
	x_3	คือ ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์

ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เมทิลไพร์โรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลั่นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดโดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.11



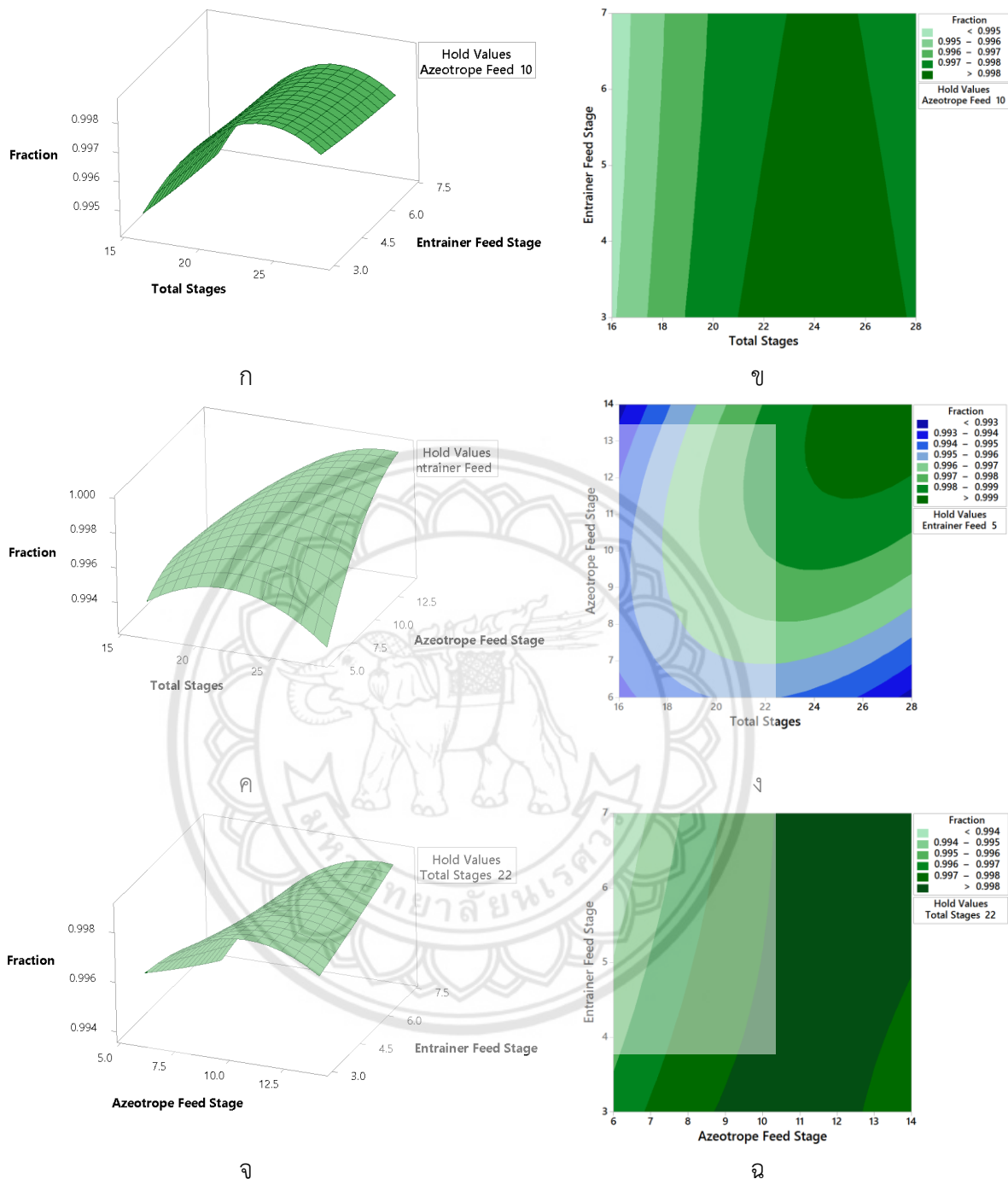
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัทที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกกลั่นสกัด

จากรูปที่ 4.11 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการกระจายตัวเป็นจุดเรียงตัวกันบนเส้นตรงและการกระจายตัวรวมกันมากที่บริเวณศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ทางบวกจะมีการกระจายตัวน้อยกว่าทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุมขึ้นและลงที่ไม่แน่นอนในช่วง 0-14 และค่าสุมเท่าเดิมในช่วง 15-20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ข. การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกกลั่นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัท

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เอทานอลาไมนเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกกลั่นสกัด แสดงในรูปที่ 4.12 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกกลั่นสกัดและชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกกลั่นสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป และความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์



รูปที่ 4.12 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอลเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกกลัน (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความ บริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่างจำนวนชั้นของหอกกลันสกัดและชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์ (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่างจำนวนชั้นของ หอกกลันสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนอง ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและชั้นที่ป้อน เอนเทรเนอร์

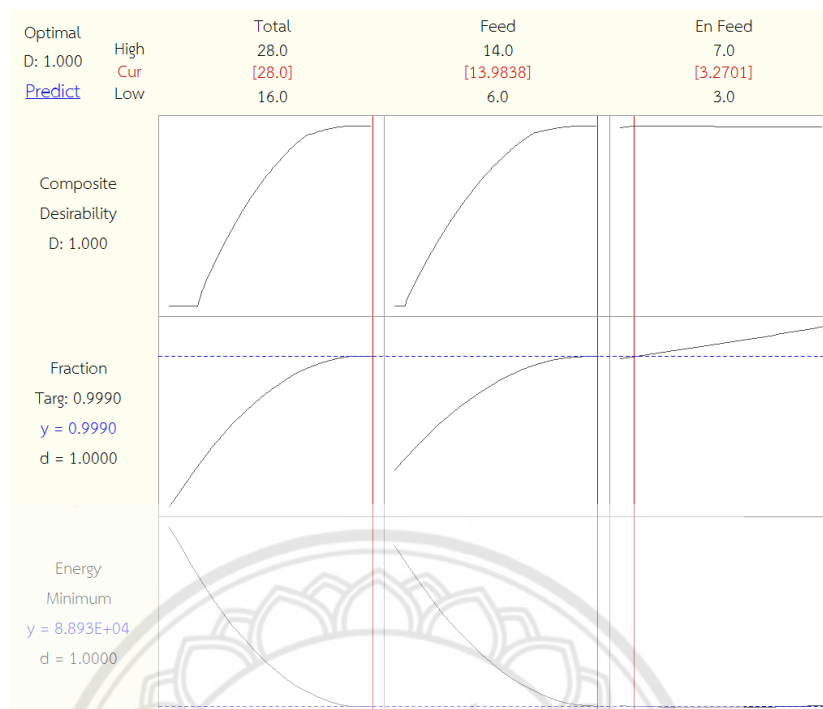
จากรูปที่ 4.13 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสกัด และชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปคือชั้นที่ 10 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าจำนวนชั้นหอกลับสกัดมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.13 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสกัด และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์คือชั้นที่ 5 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล จะเห็นได้ว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงจำนวนชั้นหอกลับสกัด 24-28 และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 12-14 เมื่อทำการป้อนสารผสมอะซิโโทรปในชั้นที่ต่ำกว่า 12 เป็นต้นไป จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากเอนเทรเนอร์ (เมทิลไพรโรลิดินอน) ต้องการมีพื้นที่ในเกิดสมดุลไอและของเหลวกับสารผสมอะซิโโทรป (เมทิลลัล-เมทานอล) หลายๆ ครั้ง เอนเทรเนอร์จึงจะมีประสิทธิภาพในการแยกเมทิลลัลออกจากเมทานอล

จากรูปที่ 4.13 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้จำนวนชั้นของหอกลับสกัดคงที่เท่ากับชั้นที่ 22 ซึ่งชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์ในส่วนของโครงสร้างหอกลับสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสภาวะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลั่นสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นแอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.13 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างหอกลั่นสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นแอนเทรเนอร์ต้องใช้จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด 28 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 13.9838 และป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 3.27 โดยกำหนดอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปเท่ากับ 1 และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 1.2 โดยโปรแกรมคำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 88,930 กิโลจูลต่อชั่วโมง มีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 1 ถือว่าสามารถยอมรับได้ดี แต่ในส่วนของโครงสร้างหอกลั่นสกัดต้องปรับเทคนิคขึ้นให้เป็นจำนวนเต็ม จะได้จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด 28 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 14 และป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 4 เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.999 และได้พลังงาน 88,946.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง ซึ่งพลังงานมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 16.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.18 สามารถนำสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลั่นสกัดนี้ไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.2.2 ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด

จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ 2 อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปทำการศึกษาในช่วง 0.6-1.2 และปัจจัยที่ 3 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลทำการศึกษาในช่วง 1.2-2 ในส่วนของปฏิบัติการหอกลั่นสกัดจะทำการวิเคราะห์ทั้งความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพลังงาน

ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

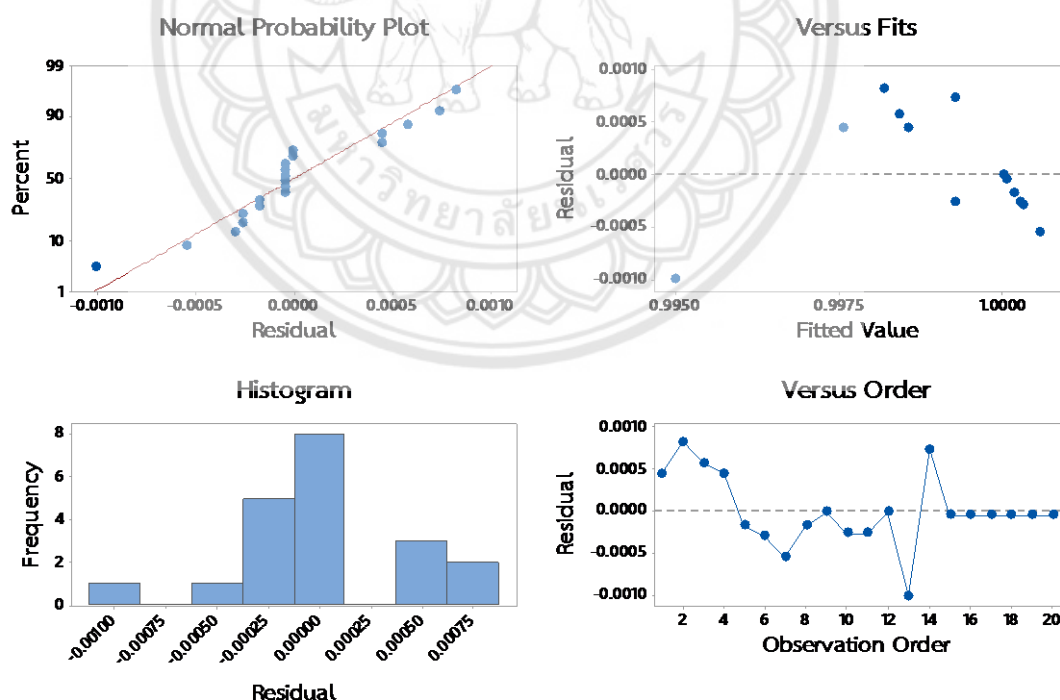
ของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลในส่วนปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ด สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.5

$$y_2 = 0.98607 + 0.000012 x_4 - 0.00108 x_5 + 0.01533 x_6 - 0.000000 x_4^2 + 0.00025 x_5^2 - 0.004545 x_6^2 - 0.000017 x_4 x_5 + 0.000012 x_4 x_6 + 0.00104 x_5 x_6 \quad (4.5)$$

โดยที่ y_2 คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
 x_4 คือ อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)
 x_5 คือ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป
 x_6 คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.14



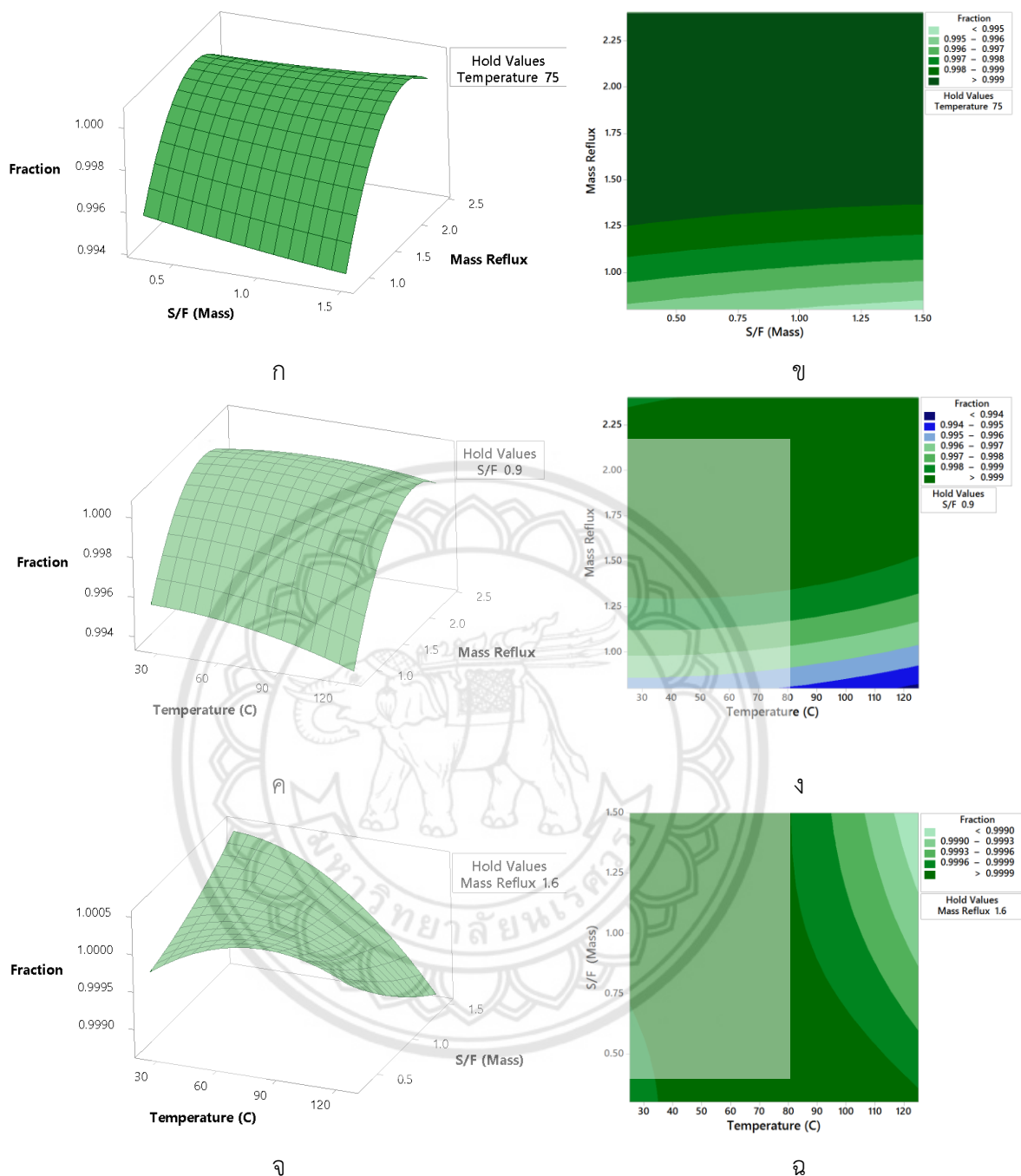
รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสก็ดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ด

จากรูปที่ 4.14 สามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการกระจายตัวรวมกันเป็นจุด ๆ เรียงกันบนเส้น มีการกระจายตัวเท่าๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ โดยการกระจายตัวรวมกันมากที่สุดที่จุดศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่าๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ แต่ไม่สม่ำเสมอกัน ทางบวกจะกระจายตัวกันในช่วง 0.9975-0.9990 ส่วนทางลบจะกระจายตัวรวมกันหนาแน่นที่จุด 1
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุดใกล้ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มช่วง 1-14 ขึ้นลงไม่แน่นอน และมีลักษณะค่าสุ่มเท่ากันตลอดในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เมทิลไพรโรลิ ดินอนเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เมทิลไพรโรลิ ดินอนเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดในส่วนของคุณภาพของเมทิลลัล แสดงในรูปที่ 4.15 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตนและ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตนกับอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์



รูปที่ 4.15 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

จากรูปที่ 4.15 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อุณหภูมิของสารเอนเทอร์เนอร์คงที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าอัตราการป้อนกลับเชิงมวลมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.15 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปคงที่เท่ากับ 0.9 ซึ่งอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าอัตราการป้อนกลับเชิงมวลปัจจัยเดียวมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.15 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปกับอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคงที่ 1.6 ซึ่งอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปกับอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ข. ผลงาน

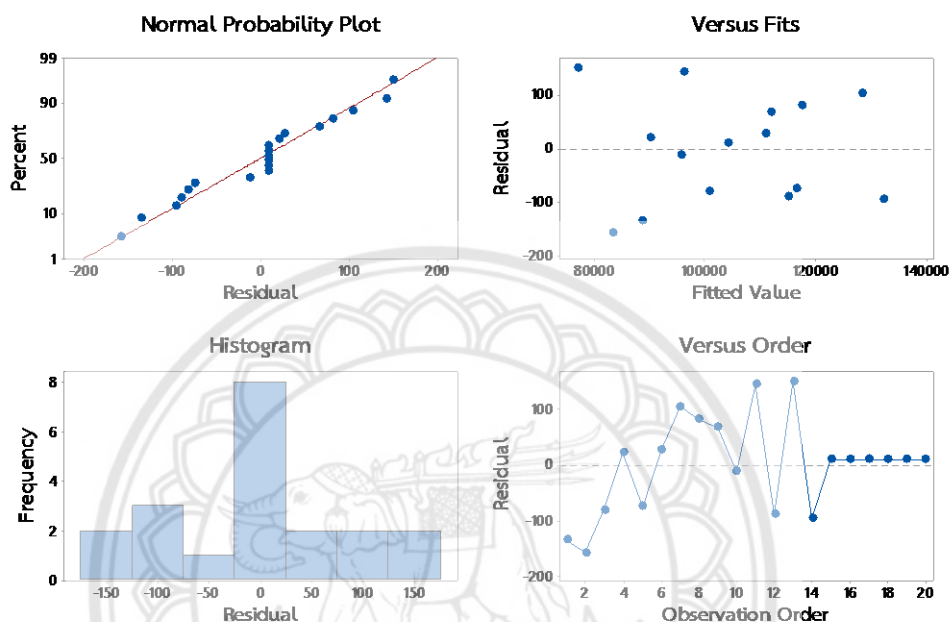
ปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดในส่วนของผลงาน สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.6

$$y_3 = 38120 + 31.0x_4 + 22181x_5 + 33030x_6 - 0.1634x_4^2 + 3950x_5^2 + 639x_6^2 - 176.64x_4x_5 - 5.54x_4x_6 - 278x_5x_6 \quad (4.6)$$

โดยที่ y_3 คือ ผลงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
 x_4 คือ อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)
 x_5 คือ อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรป
 x_6 คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เมทริกซ์โพรโบลิตินอนเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.16



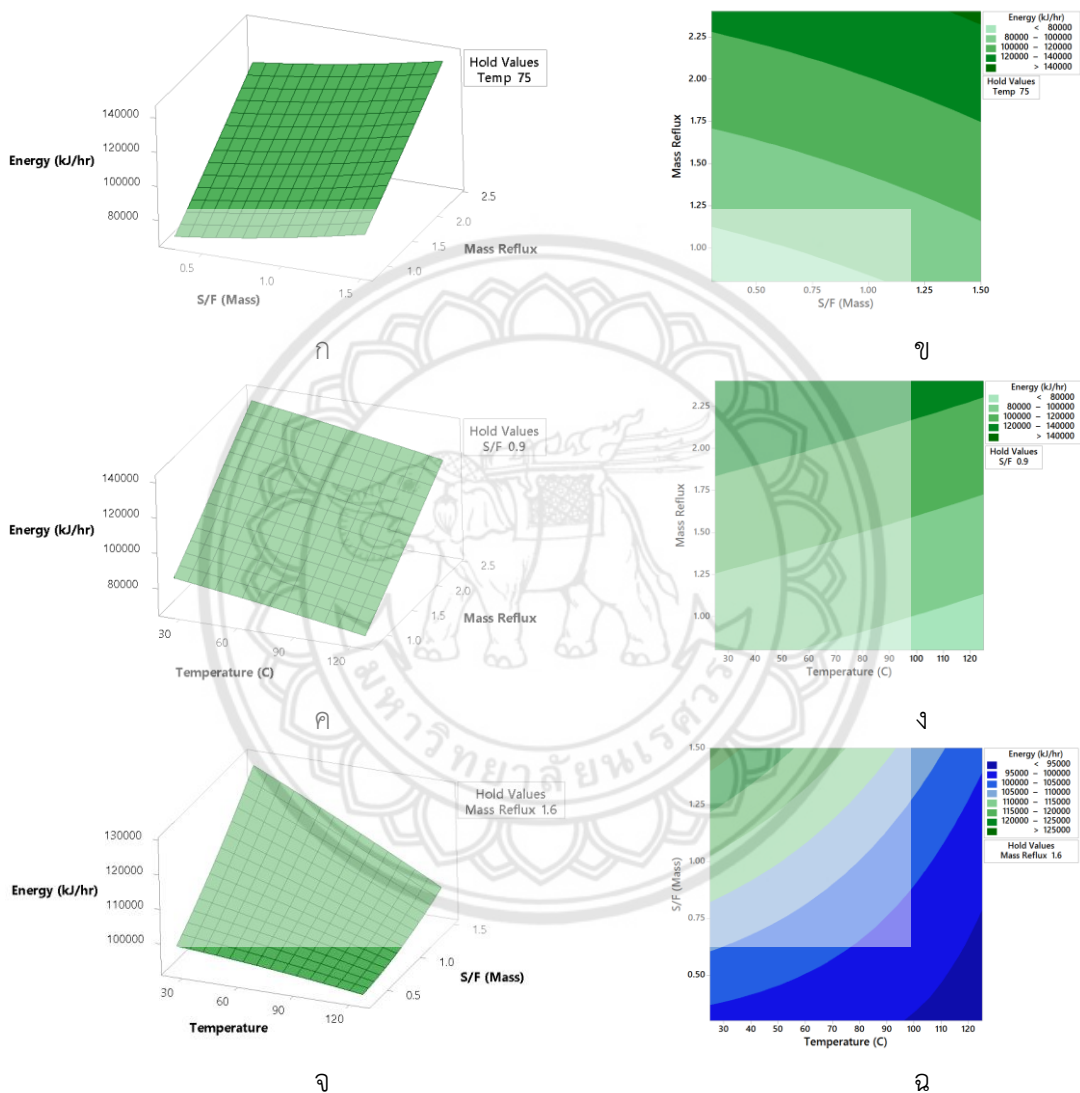
รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานโดยใช้เมทริกซ์โพรโบลิตินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับ

จากรูปที่ 4.16 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการกระจายตัวรวมกันเป็นจุด ๆ เรียงกันบนเส้น มีการกระจายตัวทั้งทางลบและทางบวกเท่า ๆ กัน โดยการกระจายตัวรวมกันมากที่สุดอยู่ที่จุดศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่า ๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มขึ้นและลงที่ไม่แน่นอนในช่วง 0 ถึง 14 และค่าสุ่มเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เมทิลไพรโรลิ ดินอนเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เมทิลไพรโรลิ
ดินอนเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับในส่วนของคุณสมบัติของเมทิลลัส แสดงในรูปที่
4.17



รูปที่ 4.17 โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองพลังโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับ
ปฏิบัติการหอกลับในส่วนของคุณสมบัติของพลังงาน (ก-ข) โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของ
พลังงานระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโทรปและอัตราการป้อนกลับ
เชิงมวล (ค-ง) กราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของ
แอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของ
พลังงานระหว่างอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์และอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสม
อะซิโทรป

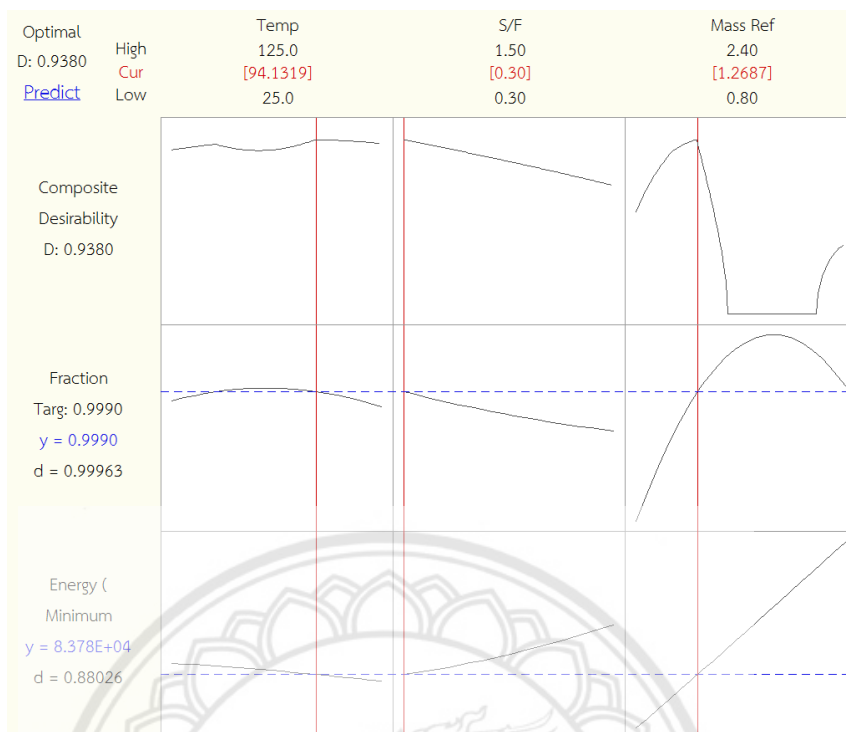
จากรูปที่ 4.17 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนโทรปีคงที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.17 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปคงที่เท่ากับ 0.9 ซึ่งอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.17 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคงที่ 1.6 ซึ่งอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปมีนัยสำคัญกันต่อพลังงาน และพบว่าพลังงานที่ต่ำที่สุดของอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปเท่ากับ 0.25-0.5 และอุณหภูมิของเอนโทรปีอยู่ในช่วง 100-120 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราส่วน เอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปมากกว่า 0.5 และอุณหภูมิของเอนโทรปีต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส จะทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้น เนื่องจากพลังงานไม่เพียงพอที่จะให้ให้เมทิลลีสมีความบริสุทธิ์สูง

ค. การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลีส-เมทานอลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นเอนโทรปี

การหาสถานะที่เหมาะสมของกรกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลีส-เมทานอลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นเอนโทรปีในส่วนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสถานะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟสถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอน เป็นแอนเทอร์เนอร์

จากรูปที่ 4.18 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอนเป็นแอนเทอร์เนอร์ต้องใช้อุณหภูมิของแอนเทอร์เนอร์ 94.1319 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทอร์เนอร์ต่อสารอะซิโตรีบเท่ากับ 0.3 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 1.269 และใช้สถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดในรูปที่ 4.13 โปรแกรมคำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 83,780 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 0.9380 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8-1 (Zvorad, 2004) ถือว่าอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการประมวลผลมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.999 และได้พลังงาน 83,898.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีค่าพลังงานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 118.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.0014 ซึ่งถือมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสามารถใช้สถานะที่เหมาะสมทั้งหมดไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.3 เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol)

ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทนเนอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างหอกลั่นสกัด และปฏิบัติการหอกลั่นสกัด

4.2.3.1 โครงสร้างหอกลั่นสกัด

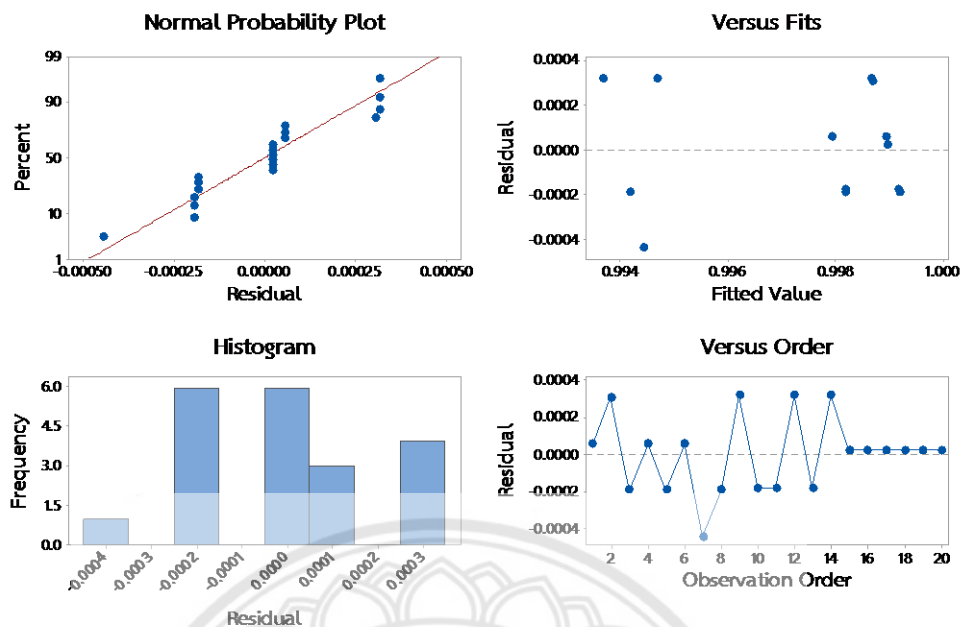
จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัดทำการศึกษาน้ำหนักชั้นในช่วง 20-24 ชั้น ปัจจัยที่ 2 ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 12-16 และปัจจัยที่ 3 ชั้นที่ป้อนแอนเทนเนอร์ทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 6-10 สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.7

$$y_1 = 0.9561 + 0.004187 x_1 + 0.000608 x_3 - 0.001483 x_2 - 0.000159 x_1^2 - 0.000034 x_3^2 - 0.000159 x_2^2 + 0.000000 x_1 x_3 + 0.000250 x_1 x_2 + 0.000000 x_2 x_3 \quad (4.7)$$

โดยที่	y_1	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_1	คือ จำนวนชั้นหอกลั่นสกัด
	x_2	คือ ชั้นป้อนสารผสมอะซิโตน
	x_3	คือ ชั้นป้อนสารแอนเทนเนอร์

ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทนเนอร์ของโครงสร้างหอกลั่นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดโดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.19



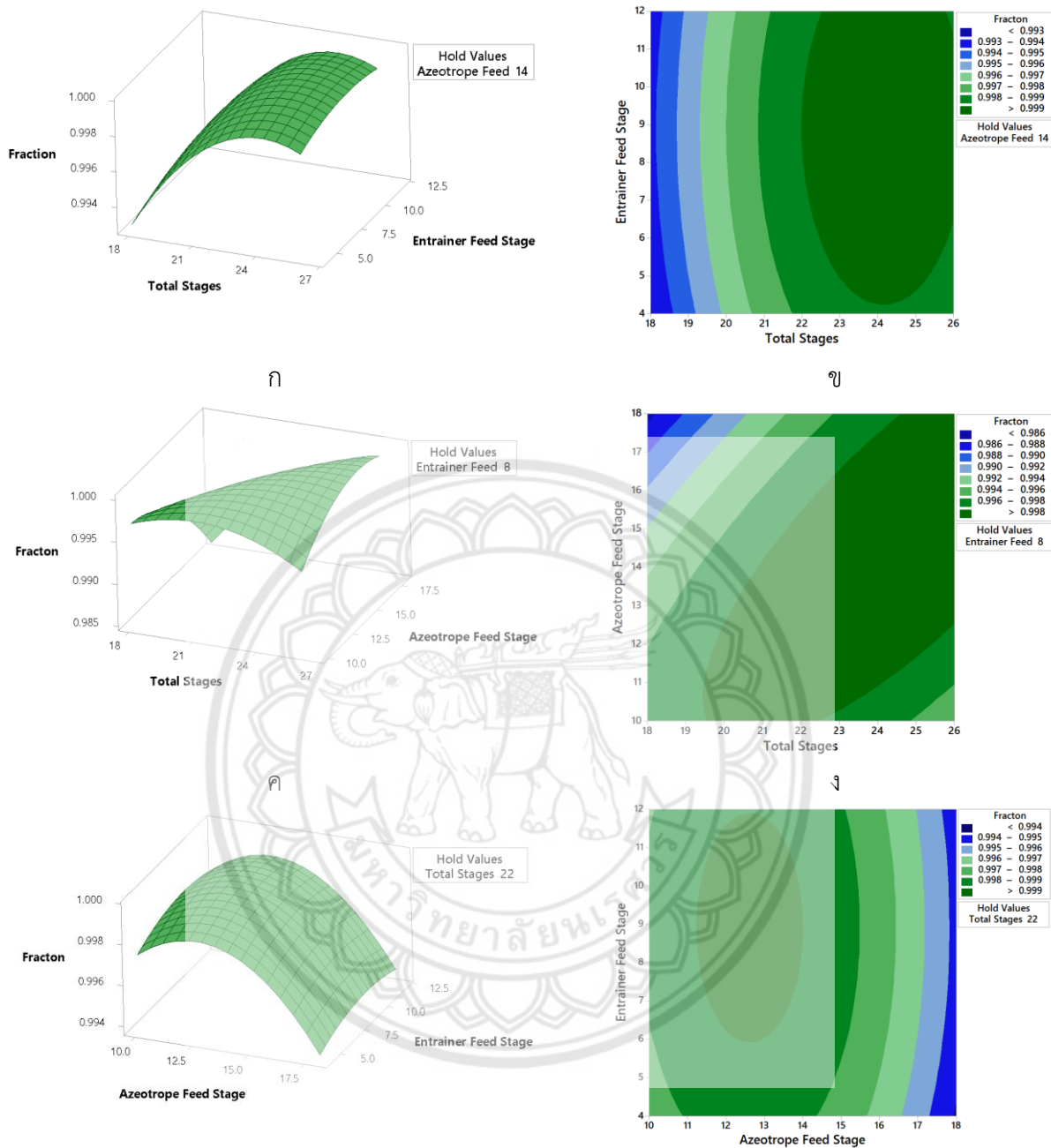
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสกัด

จากรูปที่ 4.19 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะเป็นจุดเรียงตัวกันบนเส้นตรงรวมตัวกันเป็นจุด ๆ โดยมีการกระจายตัวรวมกันหนาแน่นที่สุดที่จุด 0 กระจายตัวรวมกันมากที่สุดประมาณที่จุด -0.00025 รองลงมาคือประมาณที่จุด 0.00025
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted values) มีลักษณะไม่มีการกระจายตัวในช่วง 0.995 ถึง 0.998 และมีการกระจายทางบวกมากกว่าทางลบเล็กน้อย
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุด 0 มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี และมีจุด -0.0002 ที่มีความถี่สูงเท่ากับที่จุด 0
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มในช่วง 1-14 มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน และลักษณะค่าสุ่มในช่วง 15 ถึง 20 มีค่าเท่ากันตลอดซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ข. การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัด แสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับ (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างจำนวนชั้นของหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์ (ค-ง) กราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างจำนวนชั้นของหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรป (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

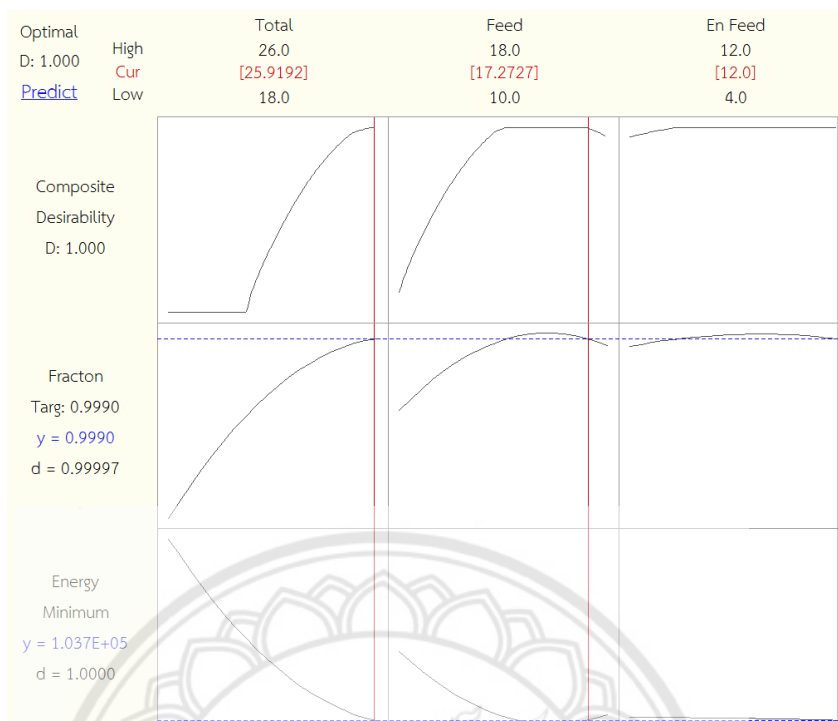
จากรูปที่ 4.20 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสก็ด และชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปคือชั้นที่ 14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนชั้นหอกลับสก็ดและชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าจำนวนชั้นหอกลับสก็ดมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.20 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสก็ด และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์คือชั้นที่ 8 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลับสก็ดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล จะเห็นได้ว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงจำนวนชั้นหอกลับสก็ด 20-26 ชั้น และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปทุกชั้น เมื่อชั้นหอกลับสก็ดที่มีจำนวนชั้นต่ำกว่า 20 ชั้น ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง ส่วนชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปสามารถป้อนได้ทุกชั้น แต่ไม่ควรต่ำกว่าชั้นที่ 10 จะทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์ลดลง เนื่องจากชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปจะใกล้เคียงกับชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์เกินไป ทำให้เกิดสมดุลไอและของเหลวไม่เพียงพอที่จะทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์สูง

จากรูปที่ 4.20 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปและชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้จำนวนชั้นของหอกลับสก็ดคงที่เท่ากับชั้นที่ 22 ซึ่งชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปและชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสก็ดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทีลินไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการกลั่นสก็ดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทีลินไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์ในส่วนของโครงสร้างหอกลับสก็ดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสภาวะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลั่นสกัดโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.21 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างหอกลั่นสกัดโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ต้องใช้จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด 25.9192 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 17.2727 และป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 12 โดยกำหนดอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปเท่ากับ 0.25 และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 2 โดยโปรแกรมได้คำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 103,700 กิโลจูลต่อชั่วโมง และมีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 1 ถือว่าสามารถยอมรับได้ดี แต่ในส่วนของโครงสร้างหอกลั่นสกัดต้องปิดทศนิยมขึ้นให้เป็นจำนวนเต็ม จะได้จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด 26 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 18 และป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 12 เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.999 และได้พลังงาน 103,745 กิโลจูลต่อชั่วโมง ซึ่งพลังงานมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมาณผล 45 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.043 ดังนั้นสามารถนำสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลั่นสกัดนี้ไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.3.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ 2 อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปทำการศึกษาในช่วง 0.5-1 และปัจจัยที่ 3 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลทำการศึกษาในช่วง 1.8-2 ในส่วนของปฏิบัติการหอกลับสกัดจะทำการวิเคราะห์ทั้งความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพลังงาน

ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

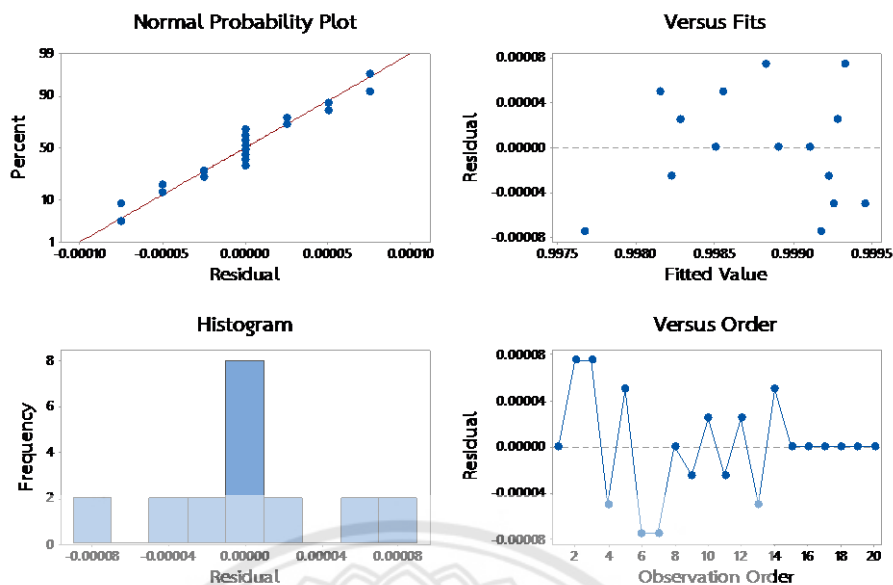
ของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลในส่วนปฏิบัติการหอกลับสกัด สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.8

$$y_2 = 0.98870 - 0.000021 x_4 - 0.01238 x_6 - 0.00650 x_5 - 0.000000 x_4^2 - 0.00375 x_6^2 - 0.000400 x_5^2 + 0.000020 x_4 x_6 - 0.000024 x_4 x_5 + 0.004000 x_5 x_6 \quad (4.8)$$

โดยที่	y_2	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_4	คือ อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)
	x_5	คือ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป
	x_6	คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทิลินไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.22



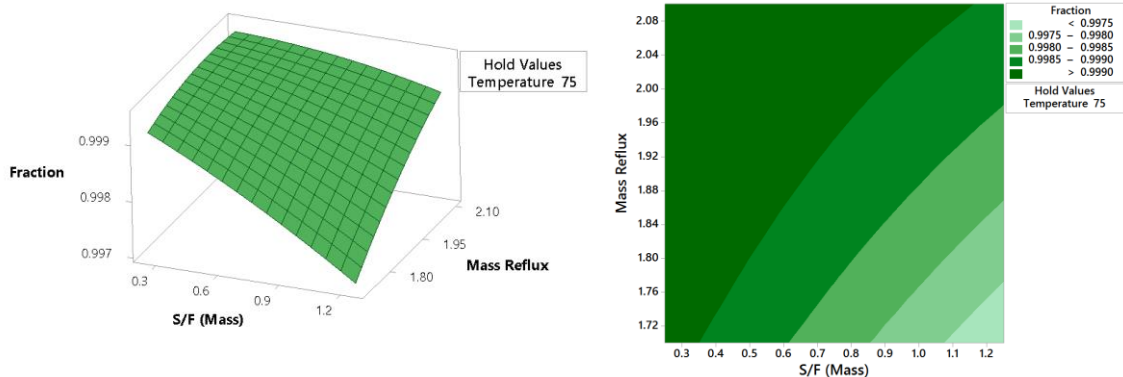
รูปที่ 4.22 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัทที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่นสกัด

จากรูปที่ 4.22 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะที่จุดเรียงตัวกันบนเส้น โดยมีการกระจายตัวรวมกันหนาแน่นมากที่สุดที่จุด 0
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวทั้งทางบวกและทางลบเท่าๆ กัน โดยในช่วง 0.9980–0.9995 มีการกระจายตัวหนาแน่นกว่าช่วงแรก ๆ ถึง จุด 0.9980
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุดศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มในในช่วง 1-14 มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน และค่าสุ่มในช่วง 15 ถึง 20 มีค่าเท่ากันตลอดซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

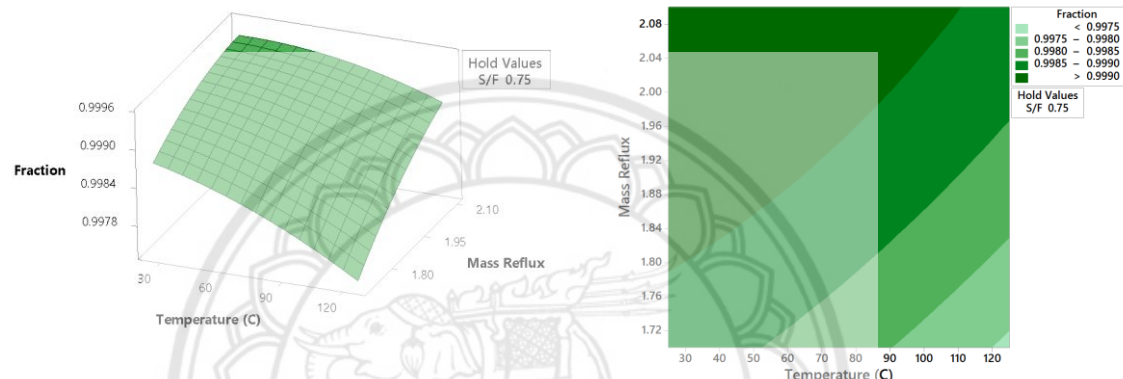
ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัท

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัท แสดงในรูปที่ 4.23 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปกับอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์



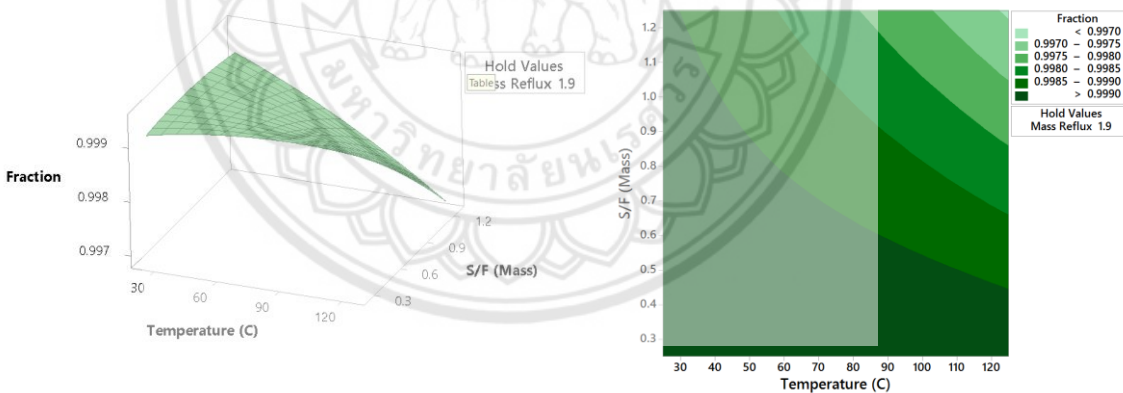
ก

ข



ค

ง



จ

ฉ

รูปที่ 4.23 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกั่นสกัดในส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

จากรูปที่ 4.23 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์คงที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล และพบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรป 0.3-0.9 และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลอยู่ในช่วง 1.72-2.08 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการป้อนกลับเชิงมวลเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปมีช่วงที่ทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์สูงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปจะทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์ลดลง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มอัตราการป้อนกลับเชิงมวลเพื่อนำเมทิลลัลจากยอดหอเข้ามาในหอกลั่นสกัดใหม่ จะทำให้อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.23 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปคงที่เท่ากับ 0.75 ซึ่งอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์มีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล พบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงอัตราการป้อนกลับเชิงมวล 1.8-2.08 และช่วงอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ 30-100 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราการป้อนกลับเชิงมวลน้อยกว่า 1.8 จะทำให้อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปมีช่วงที่ทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์สูงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการนำเอาเมทิลลัลที่อยู่ยอดหอกลับเข้ามาในหอกลั่นสกัดใหม่ เพื่อให้เกิดสมดุลไอและของเหลวอีกครั้งทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ดังนั้นการที่มีอัตราป้อนกลับเชิงมวลของเมทิลลัลน้อยกว่า 1.8 จึงไม่เพียงพอต่อการทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์สูง และเมื่ออุณหภูมิของเอนเทรเนอร์สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ก็ทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์ลดลงเช่นกัน เนื่องจากอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์สูงกว่าค่าที่ทำให้เกิดการป้อนเอนเทรเนอร์เข้าไปจึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกันทำให้อุณหภูมิของหอกลั่นสกัดมีการเปลี่ยนแปลง ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลจึงลดลง ดังนั้นอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์จึงไม่ควรเกิน 100 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.23 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปกับอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคงที่ 1.9 ซึ่งอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์มีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล พบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปเท่ากับ 0.3-1.2 และอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์อยู่ในช่วง 30-120 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่ไม่สูงมากนักจะมีช่วงของอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปมาก แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ให้สูงขึ้น ช่วงของอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโไตรปจะแคบลง

ข. พลังงาน

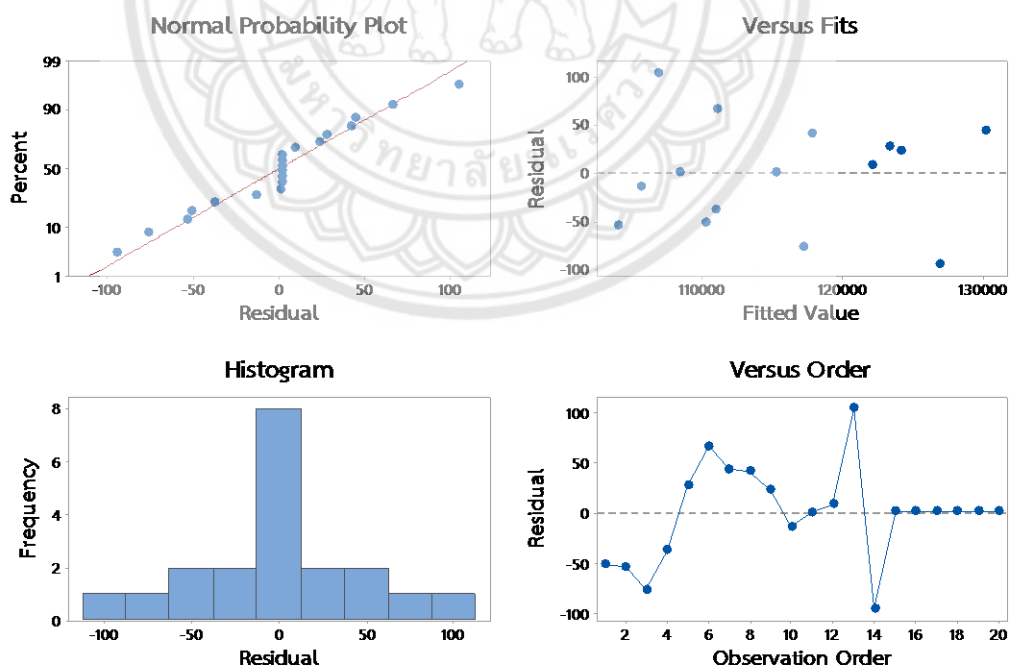
ปฏิบัติการหอกลับสัปดาห์ในส่วนของพลังงาน สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดัง
สมการที่ 4.9

$$y_3 = 38303 + 29.7x_4 + 33135x_6 + 29943x_5 - 0.1334x_4^2 + 602x_6^2 + 6567x_5^2 - 6.51x_4x_6 - 242.10x_4x_5 - 895x_5x_6 \quad (4.9)$$

โดยที่ y_3 คือ พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
 x_4 คือ อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)
 x_5 คือ อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป
 x_6 คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เอทิสันไกลคอลลเป็นเอนเทอร์เนอร์ของ ปฏิบัติการหอกลับสัปดาห์สำหรับพลังงาน

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด
โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.24



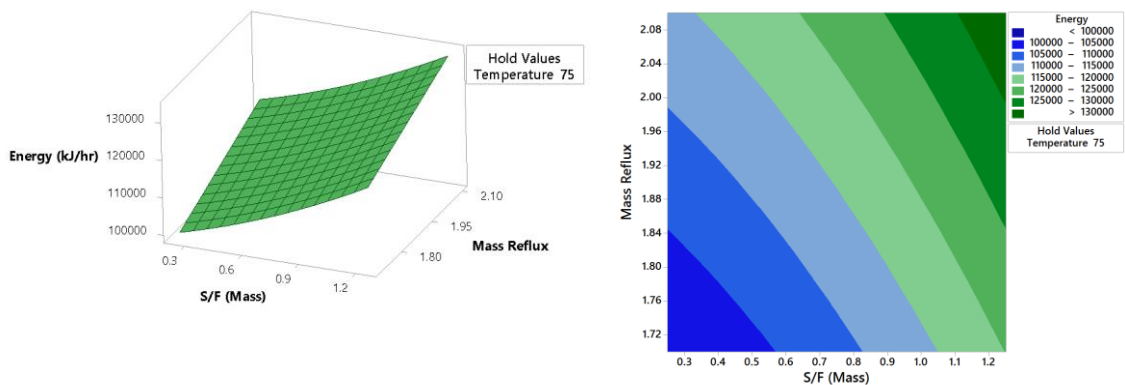
รูปที่ 4.24 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานโดยใช้เอทิสันไกลคอลลเป็นเอนเทอร์เนอร์
สำหรับปฏิบัติการหอกลับสัปดาห์

จากรูปที่ 4.24 สามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะเป็นจุดเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงและการกระจายตัวรวมกันที่บริเวณใกล้เคียงกับศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่าๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มเรียงตัวกับขึ้นลงในช่วง 0 ถึง 14 และค่าสุ่มเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

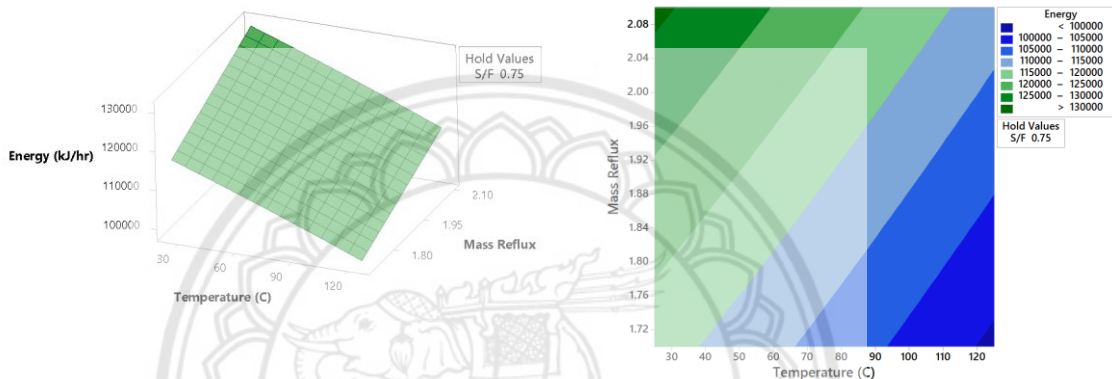
ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล แสดงในรูปที่ 4.25 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแอนเทรเนอร์และอัตราส่วนของแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป



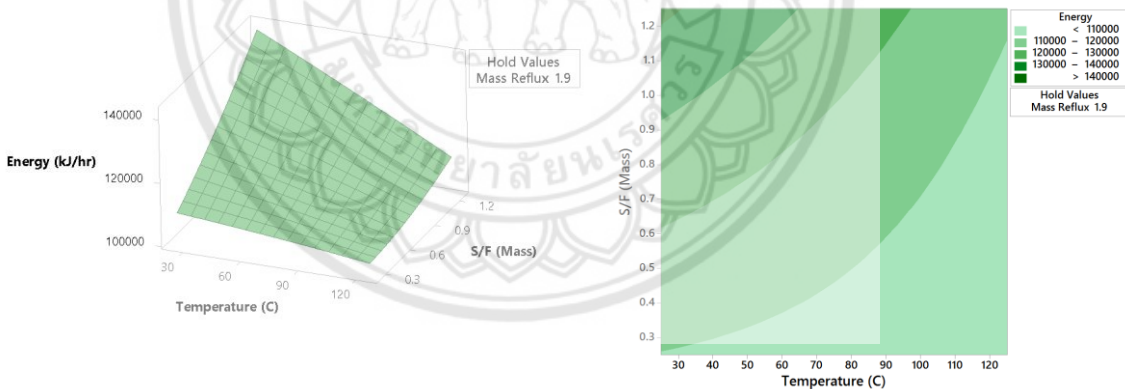
ก

ข



ค

ง



จ

ฉ

รูปที่ 4.25 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองพลังโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลิ้นสัดในส่วนองพลังงาน (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์และอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

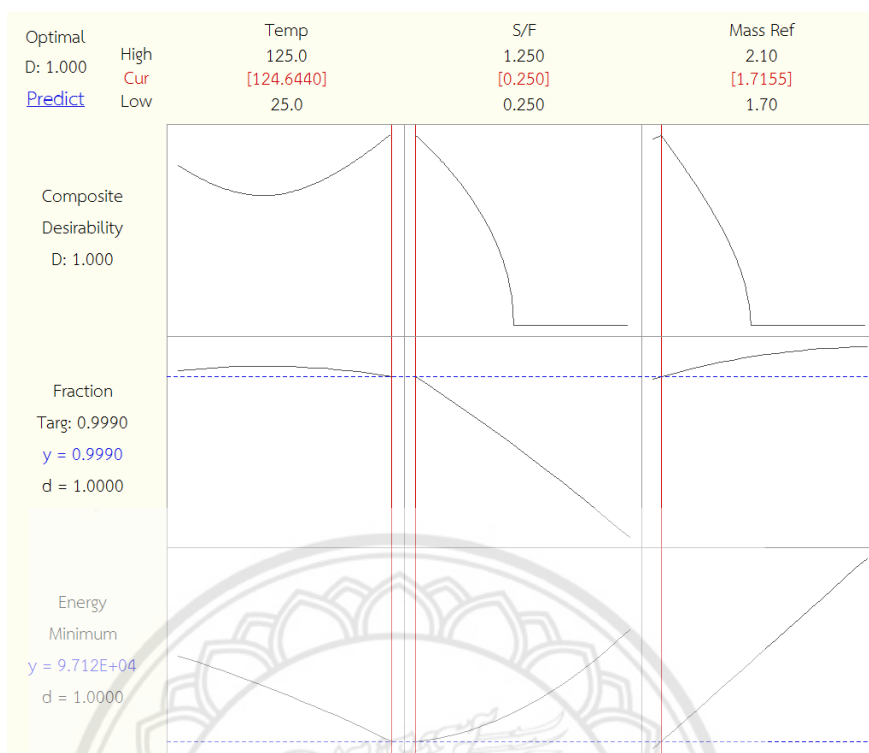
จากรูปที่ 4.25 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์คงที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.25 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปคงที่เท่ากับ 0.75 ซึ่งอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.25 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคงที่ 1.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์กับอัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปมีนัยสำคัญต่อพลังงาน และพบว่าพลังงานที่ต่ำที่สุดของอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปเท่ากับ 0.3-1 และอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ 30-120 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตรปขึ้นเรื่อยๆ จะส่งผลทำให้ต้องใช้อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์มากขึ้นเพื่อทำให้ใช้พลังงานต่ำลง

ค. การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์

การหาสถานะที่เหมาะสมของการกลั่นสก็ดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์ในส่วนของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสถานะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟสถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลับสกัดโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.26 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปฏิบัติการหอกลับสกัดโดยใช้เอทิลีนไกลเป็นเอนเทรเนอร์ต้องใช้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ 124.644 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารอะซิโโทรปเท่ากับ 0.25 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 1.7155 และใช้สถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดในรูปที่ 4.21 โปรแกรมคำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 97,120 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 1 ถือสามารถยอมรับได้ดี เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการประมวลผลมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.999 และได้พลังงาน 97,434.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีค่าพลังงานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 314.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.324 ดังนั้นสามารถนำสถานะที่เหมาะสมทั้งหมดไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.4 กลีเซอรอล (Glycerol)

ในการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทนเนอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างหอกลิ้นสก็ด และปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ด

4.2.4.1 โครงสร้างหอกลิ้นสก็ด

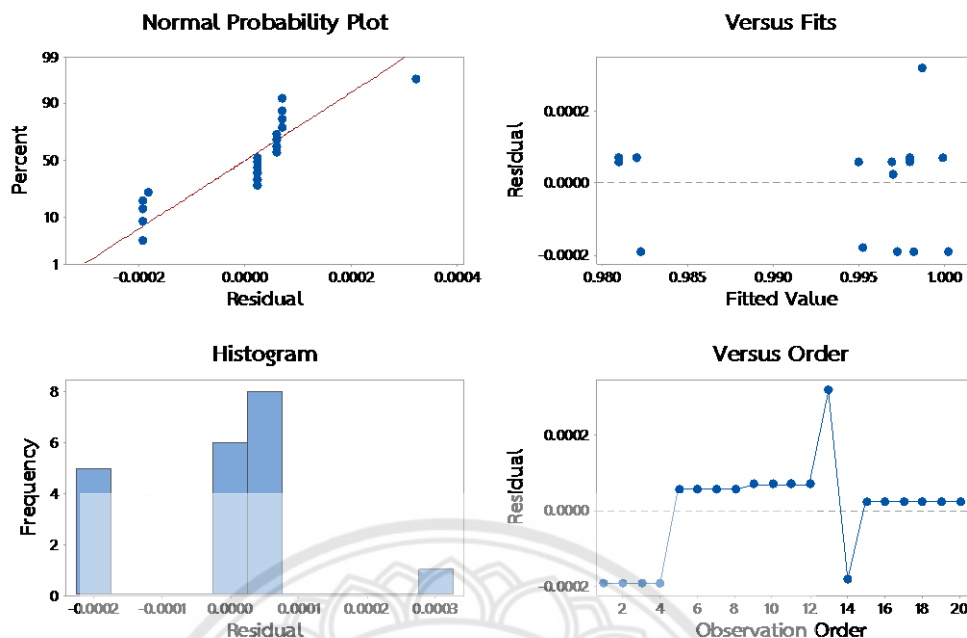
จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 จำนวนชั้นของหอกลิ้นสก็ด ทำการศึกษาจำนวนชั้นในช่วง 10-12 ชั้น ปัจจัยที่ 2 ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรปทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 7-9 และปัจจัยที่ 3 ชั้นที่ป้อนแอนเทนเนอร์ ทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 3-5 สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.10

$$y_1 = 0.96332 + 0.014750 x_1 - 0.012568 x_2 - 0.002784 x_3 - 0.001636 x_1^2 - 0.001761 x_2^2 - 0.000011 x_3^2 + 0.003250 x_1 x_2 + 0.000000 x_1 x_3 + 0.000250 x_2 x_3 \quad (4.10)$$

โดยที่	y_1	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_1	คือ จำนวนชั้นของหอกลิ้นสก็ด
	x_2	คือ ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรป
	x_3	คือ ชั้นที่ป้อนสารแอนเทนเนอร์

ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทนเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดโดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.27



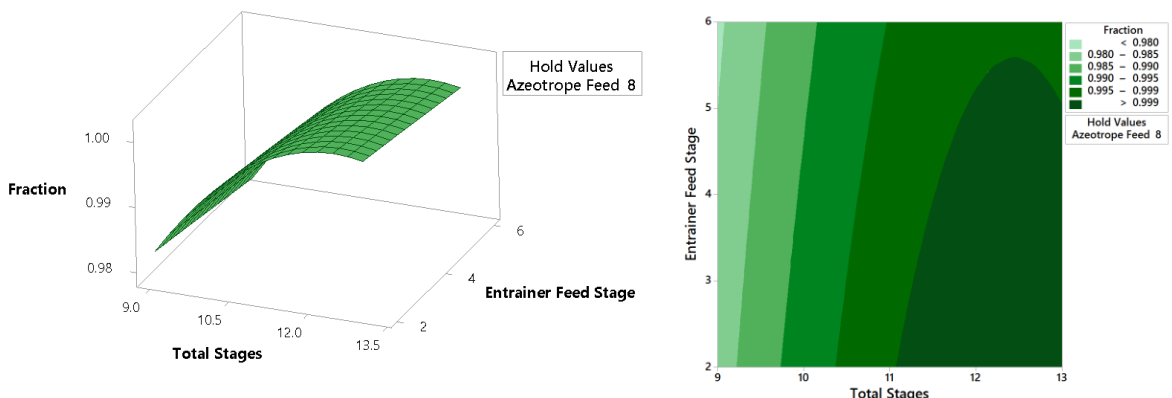
รูปที่ 4.27 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสกัด

จากรูปที่ 4.27 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะที่จุดเรียงตัวกันบนเส้นตรงรวมตัวกันเป็นจุด ๆ โดยมีการกระจายตัวรวมกันหนาแน่นที่สุดที่จุด 0 กระจายตัวรวมกันมากที่สุดที่จุด 0.0001 ร่องลงมาคือที่จุด -0.0002
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะไม่มีการกระจายตัวในช่วง 0.985 ถึง 0.995 มีการกระจายทางบวกมากกว่าทางลบเล็กน้อย
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุดใกล้ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ตี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มเท่ากันตลอดที่ช่วง 1-4 และก็เปลี่ยนค่าสุ่มใหม่ไปเท่ากันที่ช่วง 5-12 และเปลี่ยนค่าสุ่มไปเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง ลักษณะค่าสุ่มที่ 13 และ 14 มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน

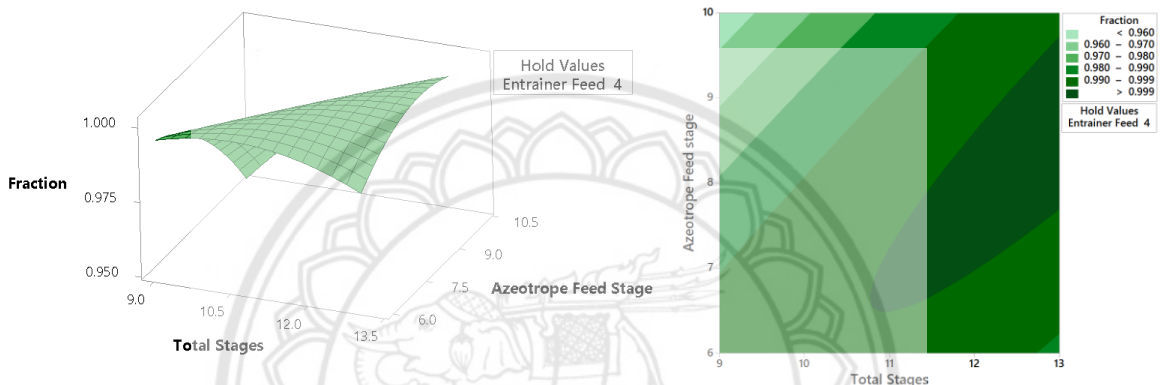
ข. การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัด แสดงในรูปที่ 4.28



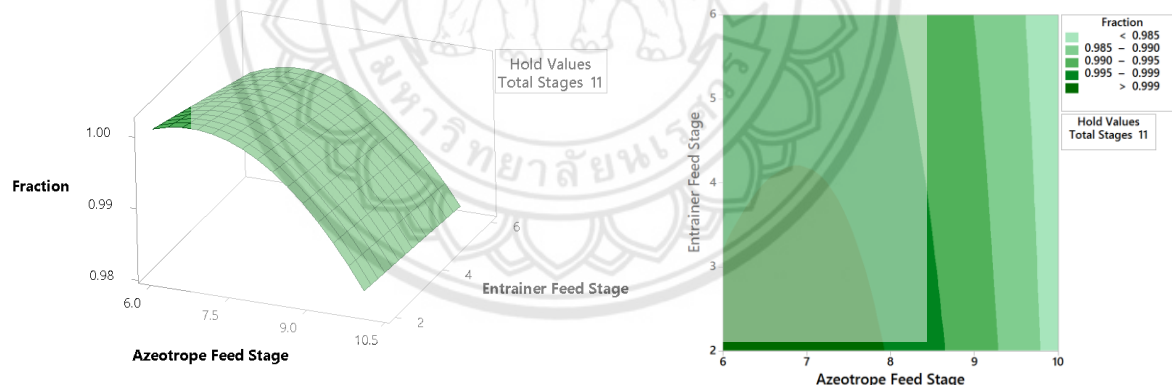
ก

ข



ค

ง



จ

ฉ

รูปที่ 4.28 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ สำหรับโครงสร้างหอกลับ (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ระหว่างจำนวนชั้นของหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์ (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างจำนวนชั้นของหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรป (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

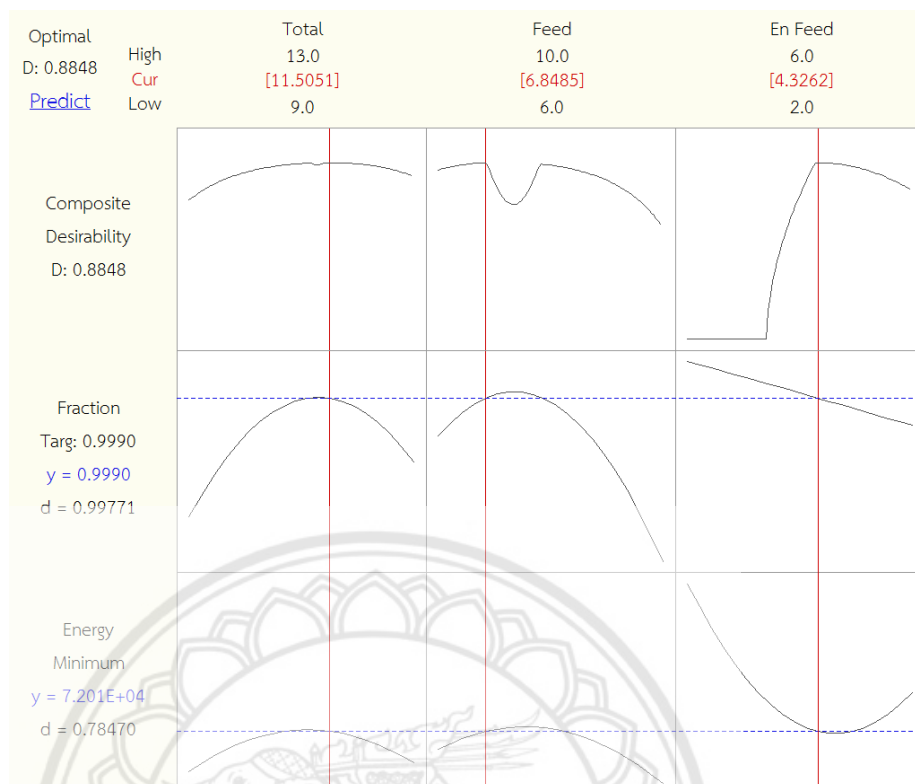
จากรูปที่ 4.28 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนคือชั้นที่ 8 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.28 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์คือชั้นที่ 4 ซึ่งจำนวนชั้นของหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนมีความสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล และพบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงจำนวนชั้นหอกลับสกัด 11-13 ชั้น และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนชั้นที่ 7-9 โดยเมื่อทำการป้อนสารผสมอะซิโตนในชั้นที่ 6 ลงไป จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากในชั้นที่ 6 มีการป้อนสารผสมอะซิโตนไปใกล้กับชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์เกินไปจึงทำให้ระยะทางในการเกิดสมดุล (Equilibrium) ไม่มากพอ ส่วนถ้าป้อนสารผสมอะซิโตนในชั้นที่ 10 เป็นต้นไป ก็ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลงเช่นกัน เนื่องจากถาดที่ 10 เป็นต้นไปมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 55.3598 องศาเซลเซียสขึ้นไป เมทานอลจึงสามารถระเหยกลายเป็นไอได้บางส่วนแม้จะไม่ถึงจุดเดือดของเอทานอลก็ตามดังนั้นในช่วงชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนชั้นที่ 6-8 จึงมีความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุด

จากรูปที่ 4.28 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้จำนวนชั้นของหอกลับสกัดคงที่เท่ากับชั้นที่ 11 ซึ่งชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์มีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดในชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ชั้นที่ 2-3 และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนชั้นที่ 6-7 ถ้าป้อนสารผสมอะซิโตนที่ชั้นที่ 8 เป็นต้นไป จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากจะทำให้ระยะห่างของชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์กับชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนมากเกินไปไม่เหมาะสมกัน และถ้าป้อนเอนเทรเนอร์ในชั้นที่ 4 เป็นต้นไป ก็จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลงเช่นกัน เนื่องจากในชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตนไปใกล้กับชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์เกินไปจึงทำให้ระยะทางในการเกิดสมดุลไม่มากพอ

ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ในส่วนของการกลั่นสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสภาวะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.29 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างหอกลิ้นโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ต้องใช้จำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัด 11.5051 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 6.8485 และป้อนเอนเทรเนอร์ชั้นที่ 4.3262 โดยกำหนดคณภูมิของเอนเทรเนอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปเท่ากับ 1 และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 0.2 โดยโปรแกรมคำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 72,010 กิโลจูลต่อชั่วโมง มีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 0.8848 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8-1 (Zvorad, 2004) ถือว่าอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ แต่ในส่วนของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดต้องปัดทศนิยมขึ้นให้เป็นจำนวนเต็ม จะได้จำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัด 12 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 7 และป้อนเอนเทรเนอร์ชั้นที่ 5 เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 มาทดสอบพบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.998 และได้พลังงาน 72,095.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง ซึ่งเศษส่วนมวลของเมทิลลัลไม่ได้ตามที่ต้องการและมีพลังงานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 85.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.0012 เนื่องจากจำนวนชั้นที่ใช้ในการจำลองกระบวนการไม่สามารถเป็นทศนิยมได้จึงต้องทำให้จำนวนชั้นเป็นจำนวนเต็มอาจทำให้ผลจากการจำลองกระบวนการมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นสามารถนำสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดนี้ไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.4.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ 2 อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปทำการศึกษาในช่วง 0.8-1.4 และปัจจัยที่ 3 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลทำการศึกษาในช่วง 0.6-1.2 ในส่วนของปฏิบัติการหอกลับสกัดจะทำการวิเคราะห์ทั้งความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพลังงาน

ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

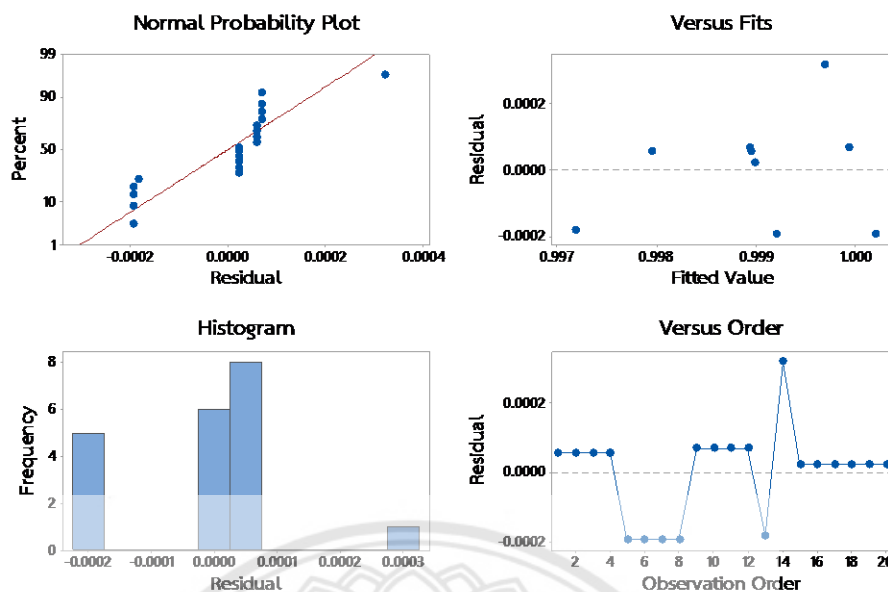
ของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลในส่วนปฏิบัติการหอกลับสกัด สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.11

$$y_2 = 1.00326 - 0.000067 x_4 - 0.00444 x_5 - 0.00074 x_6 + 0.000000 x_4^2 + 0.001263 x_5^2 - 0.001515 x_6^2 - 0.000000 x_4 x_5 + 0.000033 x_4 x_5 + 0.002778 x_5 x_6 \quad (4.11)$$

โดยที่	y_2	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_4	คือ อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)
	x_5	คือ อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป
	x_6	คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทอร์เนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.30



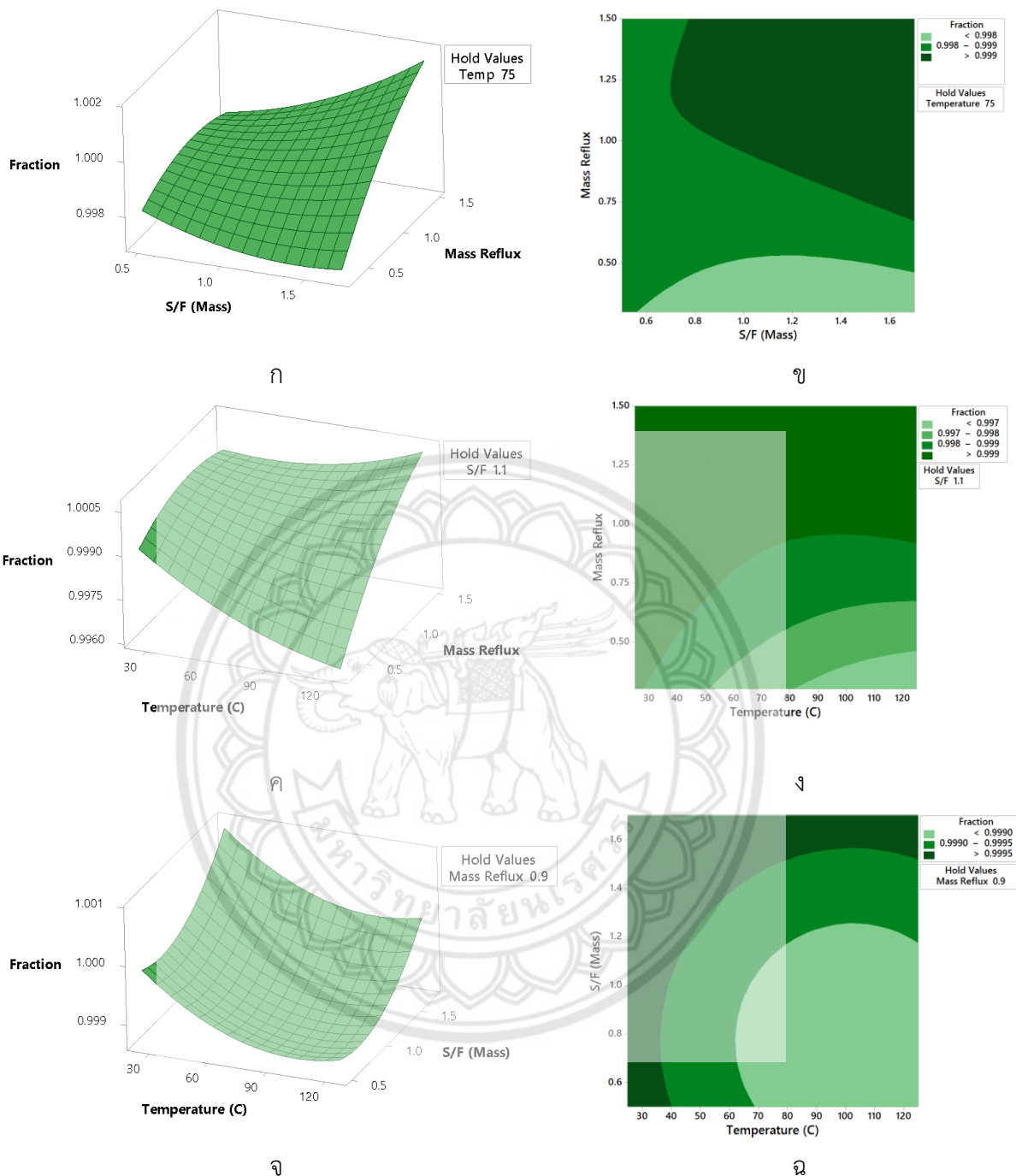
รูปที่ 4.30 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัทที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่นสกัด

จากรูปที่ 4.30 สามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะที่จุดเรียงตัวกันบนเส้นตรงรวมตัวกันเป็นจุด ๆ โดยมีการกระจายตัวรวมกันหนาแน่นที่สุดที่จุด 0 กระจายตัวรวมกันมากที่สุดที่จุด 0.0001 ร่องลงมาคือที่จุด -0.0002
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวทางบวกมากกว่าทางลบเล็กน้อย
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุดใกล้ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุมเท่ากันตลอดที่ช่วง 1-5 และก็เปลี่ยนค่าสุมใหม่ไปเท่ากันที่ช่วง 5-8 จากนั้นก็เปลี่ยนค่าสุมใหม่ไปเท่ากันที่ช่วง 9-12 แล้วเปลี่ยนค่าสุมไปเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง ลักษณะค่าสุมที่ 13 และ 14 มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน

ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัท

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัท แสดงในรูปที่ 4.31 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปกับอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์



รูปที่ 4.31 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์ สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัดในส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์และอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

จากรูปที่ 4.31 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์คงที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล และพบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป 0.8-1.7 และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลอยู่ในช่วง 0.75-1.75 เมื่ออัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปน้อยกว่า 0.8 ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากเอนเทรเนอร์ที่ป้อนเข้าไปมีน้อยกว่าที่จะเปลี่ยนแปลงสมดุลไอและของเหลว (Vapor-Liquid Equilibrium) ของสารผสมอะซิโโทรป ส่งผลให้กลั่นเมทิลลัลได้ความบริสุทธิ์ลดลง และถ้าอัตราป้อนกลับเชิงมวลต่ำกว่า 0.75 ก็ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลงเช่นกัน เนื่องจากอัตราป้อนกลับเชิงมวลเป็นการนำเอาเมทิลลัลที่อยู่ยอดหอกลั่นเข้ามาในหอกลั่นสีกัดใหม่ เพื่อให้เกิดสมดุลไอและของเหลวอีกครั้งทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ดังนั้นการที่มีอัตราป้อนกลับเชิงมวลของเมทิลลัลน้อยกว่า 0.75 จึงไม่เพียงพอต่อการทำให้เมทิลลัลมีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.9

จากรูปที่ 4.31 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปคงที่เท่ากับ 1.1 ซึ่งระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์มีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล และพบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงอัตราการป้อนกลับเชิงมวล 0.75-1.5 และช่วงอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ 30-120 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราการป้อนกลับเชิงมวลน้อยกว่า 0.75 จะทำให้กลั่นได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง (เหมือนกันกับรูปที่ 4.31 (ก-ข) กรณีอัตราป้อนกลับเชิงมวลต่ำกว่า 0.75) โดยอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ในกรณีนี้สามารถใช้ได้ทุกช่วงอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.31 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคงที่ 0.9 ซึ่งอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ข. พลังงาน

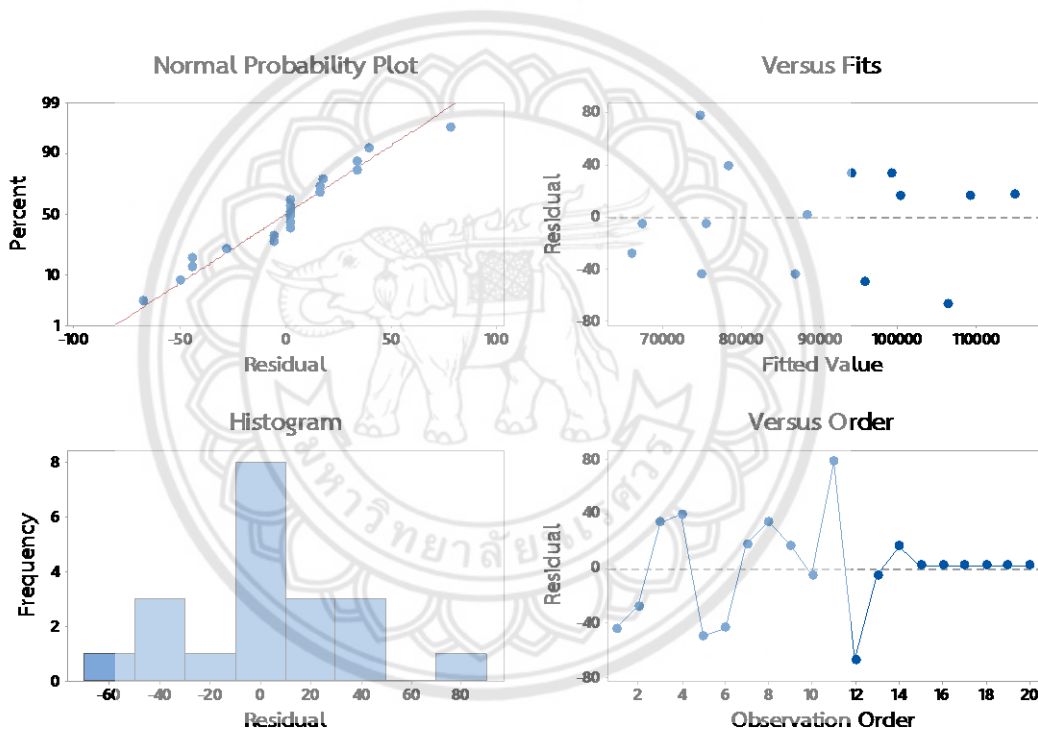
ปฏิบัติการหอกลั่นสีกัดในส่วนของพลังงาน สามารถสร้างสมการถดถอยได้ตั้งสมการที่ 4.12

$$y_3 = 34648 + 22.15x_4 + 29222x_5 + 35047x_6 - 0.1475x_4^2 + 0.6333x_5^2 - 92x_6^2 - 224.75x_4x_5 + 0.07x_4x_6 + 9x_5x_6 \quad (4.12)$$

- โดยที่ y_3 คือ พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
- x_4 คือ อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)
- x_5 คือ อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป
- x_6 คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทอร์เนอร์ของปฏิบัติการหอกลั่นสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.32



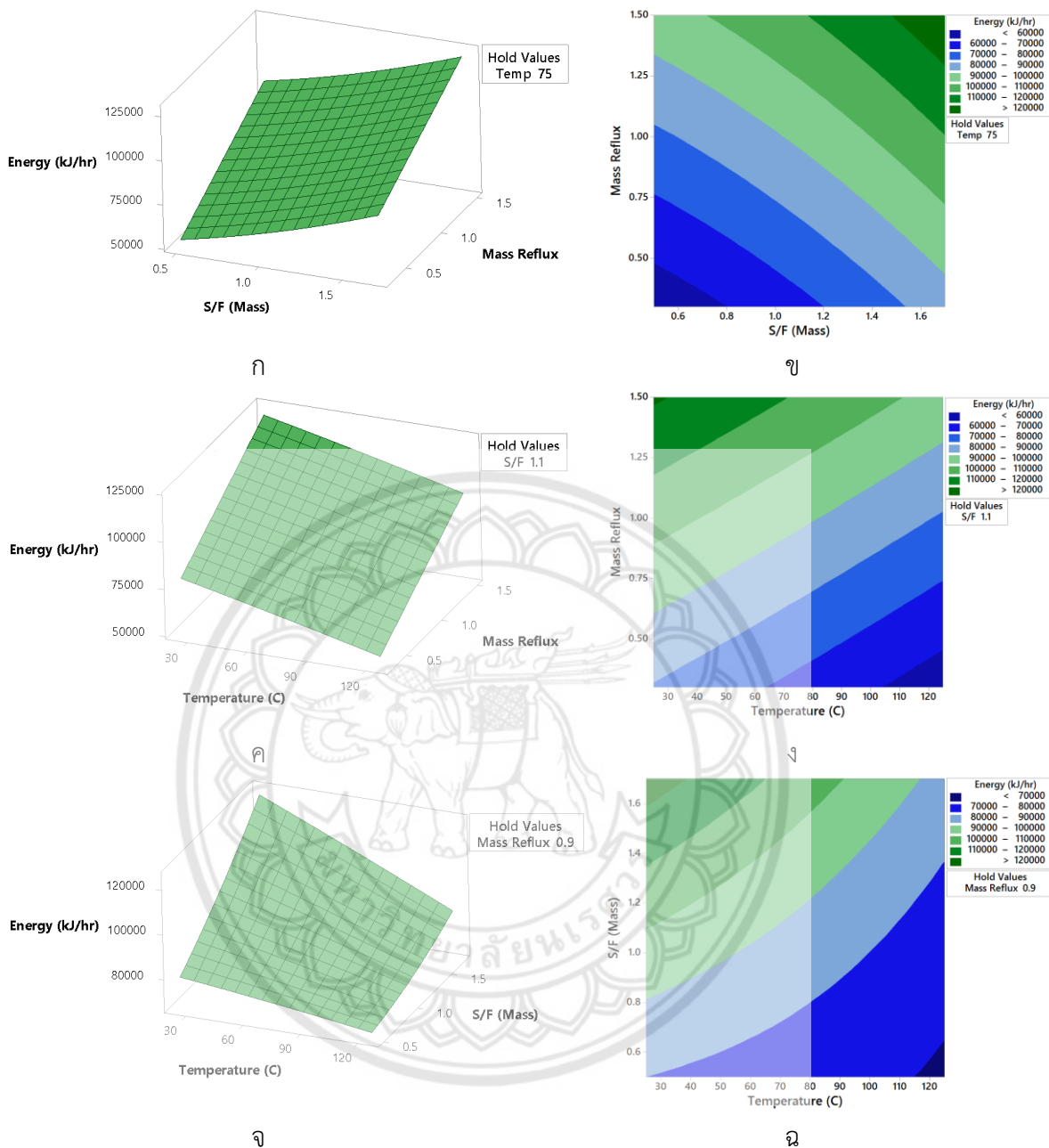
รูปที่ 4.32 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลั่นสกัด

จากรูปที่ 4.32 สามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการกระจายตัวรวมกันเป็นจุด ๆ เรียงกันบนเส้น มีการกระจายตัวทั้งทางลบและทางบวกเท่า ๆ กัน โดยการกระจายตัวรวมกันมากที่สุดอยู่ที่จุดศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่า ๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุมขึ้นและลงที่ไม่แน่นอนในช่วง 0 ถึง 14 และค่าสุมเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล แสดงในรูปที่ 4.33 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทโรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เอนเทรเนอร์และอัตราส่วนของเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทโรป



รูปที่ 4.33 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองพลังโดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการ หอกลั่นสกัดในส่วนของพลังงาน (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของ พลังงานระหว่างอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโตรปและอัตราการป้อนกลับ เชิงมวล (ค-ง) กราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของ แอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของ พลังงานระหว่างอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์และอัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสม อะซิโโตรป

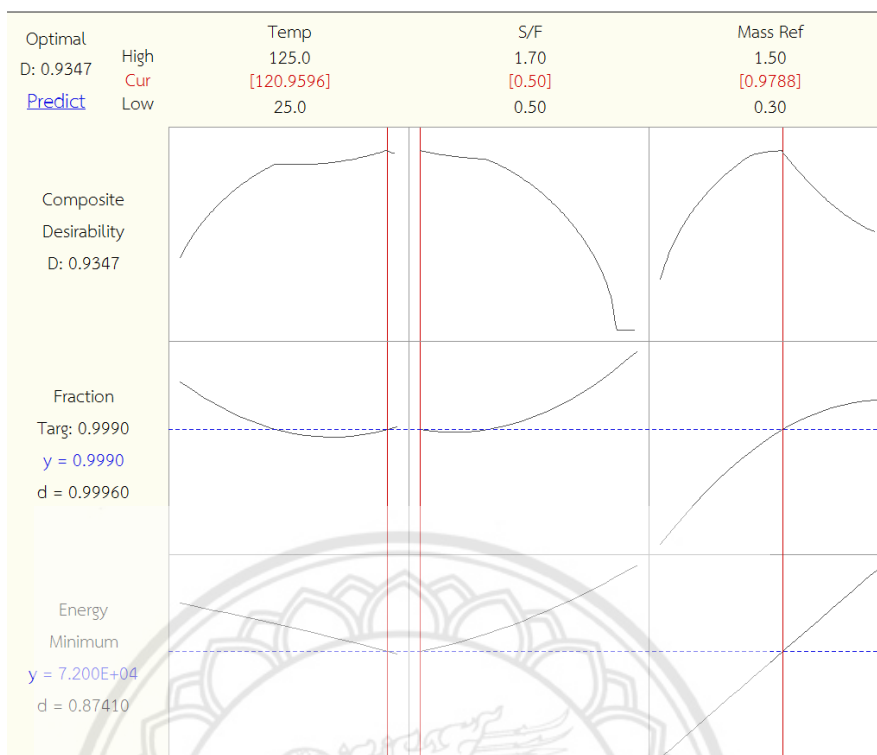
จากรูปที่ 4.33 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนโทรปีคงที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.33 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปคงที่เท่ากับ 1.1 ซึ่งอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.33 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคงที่ 0.9 ซึ่งอุณหภูมิของเอนโทรปีกับอัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปมีนัยสำคัญต่อพลังงาน และพบว่าพลังงานที่ต่ำที่สุดของอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปเท่ากับ 0.5 และอุณหภูมิของเอนโทรปี 120 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปมากกว่า 0.5 และอุณหภูมิของเอนโทรปีต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส จะทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้น เนื่องจากพลังงานไม่เพียงพอที่จะให้ให้เมทิลลีสมีความบริสุทธิ์สูง

ค. การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลีส-เมทานอลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนโทรปี

การหาสถานะที่เหมาะสมของกรกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลีส-เมทานอลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนโทรปีในส่วนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสถานะที่เหมาะสม จะถูกแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 กราฟสภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลั่นสกัดโดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.34 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปฏิบัติการหอกลั่นสกัดโดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์ต้องใช้อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ 120.9596 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปเท่ากับ 0.5 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 0.9788 และใช้สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลั่นสกัดในรูปที่ 4.29 โปรแกรมได้คำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 72,000 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 0.9347 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8-1 (Zvorad, 2004) ถือว่าเป็นช่วงที่สามารถยอมรับได้ เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการประมวลผลมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.999 และมีการใช้พลังงาน 72,242.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีค่าพลังงานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 242.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.34 ซึ่งถือมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสามารถนำสภาวะที่เหมาะสมทั้งหมดไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.5 เตตระเอทิลีนไกลคอล (Tetraethylene Glycol)

ในการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างหอกลับสกัด และปฏิบัติการหอกลับสกัด

4.2.5.1 โครงสร้างหอกลับสกัด

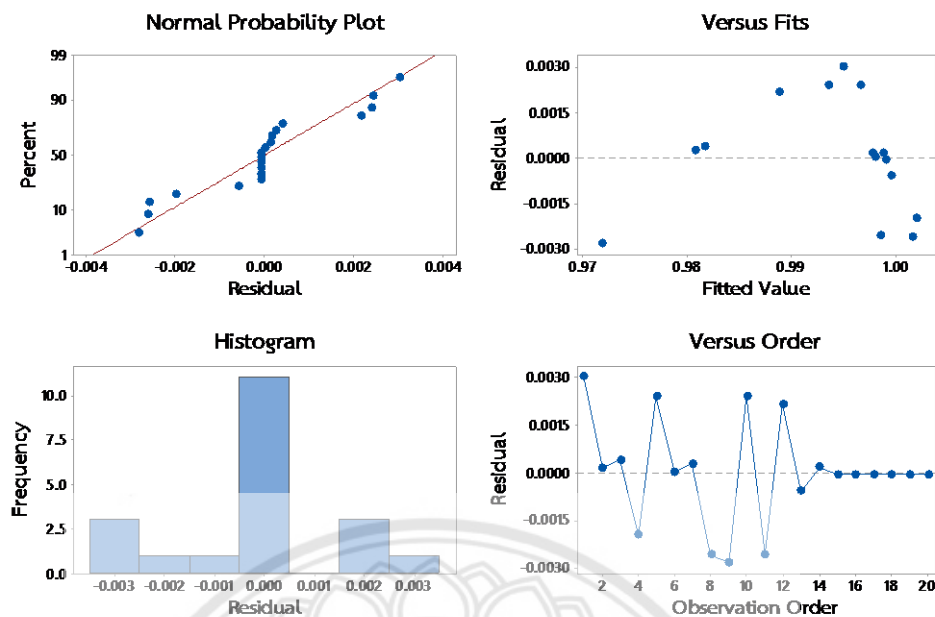
จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 จำนวนชั้นของหอกลับสกัดทำการศึกษาในช่วง 15-21 ชั้น ปัจจัยที่ 2 ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรป ทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 9-13 และปัจจัยที่ 3 ชั้นที่ป้อนสารแอนเทรเนอร์ทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 4-6 สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.13

$$y_1 = 0.9442 + 0.0091x_1 - 0.00653x_2 - 0.00097x_3 - 0.00041x_1^2 - 0.000335x_2^2 - 0.000091x_3^2 + 0.000688x_1x_2 + 0.000042x_1x_3 + 0.000062x_2x_3 \quad (4.13)$$

โดยที่	y_1	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_1	คือ จำนวนชั้นของหอกลับสกัด
	x_2	คือ ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอะโทรป
	x_3	คือ ชั้นที่ป้อนสารแอนเทรเนอร์

ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดโดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.35



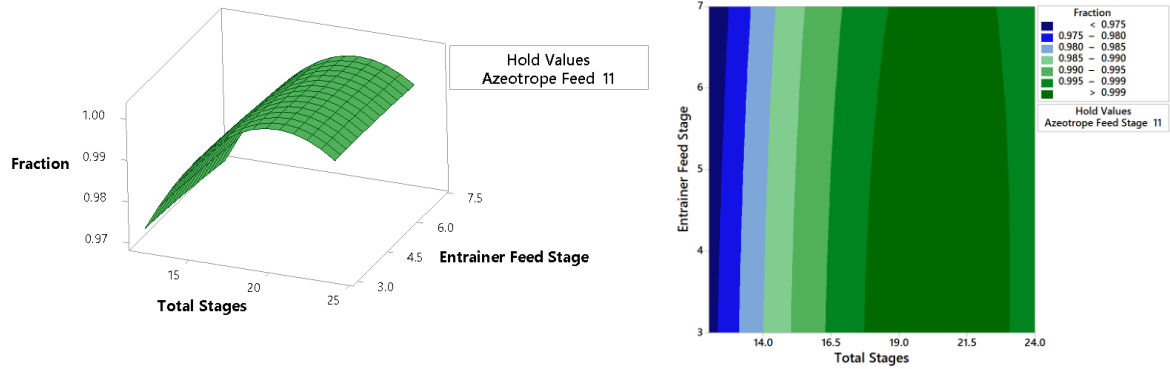
รูปที่ 4.35 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัสที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสกัด

จากรูปที่ 4.35 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะที่จุดเรียงตัวกันบนเส้นตรงรวมตัวกันเป็นจุด ๆ โดยมีการกระจายตัวรวมกันหนาแน่นที่สุดที่จุด 0
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่า ๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ แต่การกระจายตัวไม่ค่อยสม่ำเสมอ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุด 0 มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มในช่วง 1-14 มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน และลักษณะค่าสุ่มในช่วง 15 ถึง 20 มีค่าเท่ากันตลอดซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

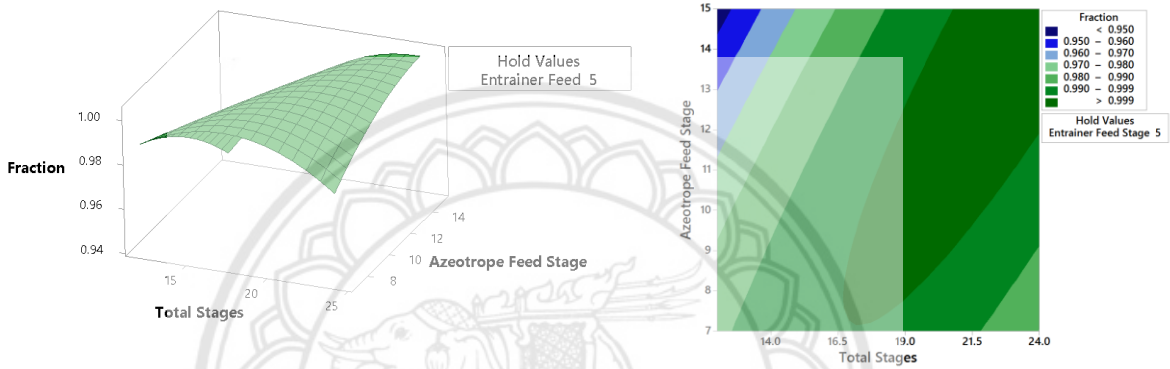
ข. การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัส

การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัด แสดงในรูปที่ 4.36 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลิ้นสกัดและชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลิ้นสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป และความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์



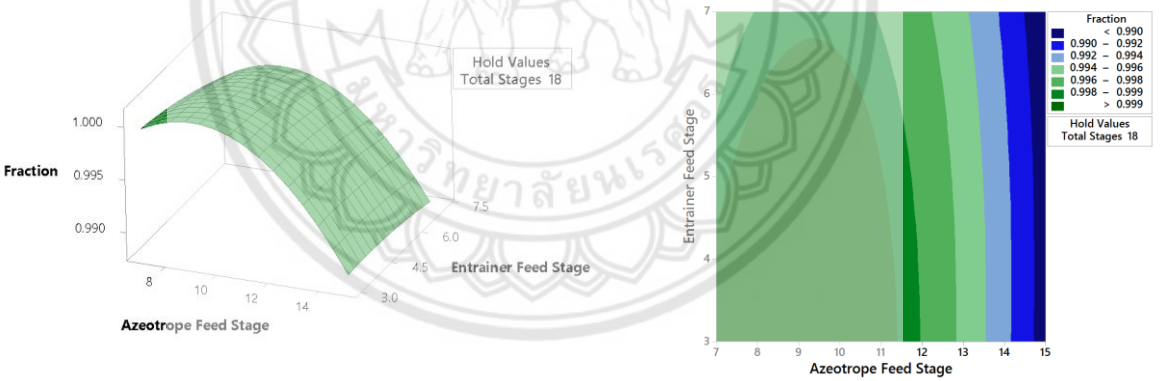
ก

ข



ค

ง



จ

ฉ

รูปที่ 4.36 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสกัด (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ ของเมทิลลัลระหว่างจำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัดและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ (ค-ง) โครงร่าง และพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างจำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัดและชั้นที่ ป้อนสารผสมอะซิโทรป (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

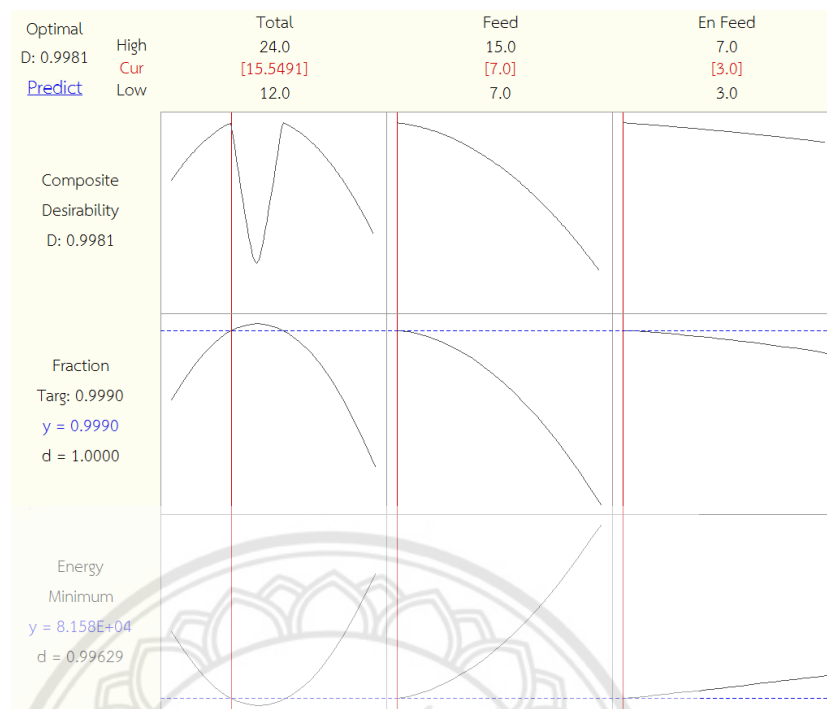
จากรูปที่ 4.36 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสกัด และชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโไตรปคือชั้นที่ 11 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลับสกัดกับชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าจำนวนชั้นหอกลับสกัดมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.36 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลับสกัด และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโไตรปที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์คือชั้นที่ 5 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลับสกัดกับชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโไตรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล จะเห็นได้ว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงจำนวนชั้นหอกลับสกัด 18-24 ชั้นเหมือนกันกับ และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโไตรปชั้นที่ 9-15 โดยเมื่อทำการป้อนสารผสมอะซิโไตรปในชั้นที่ 8 จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากในชั้นที่ 8 มีการป้อนสารผสมอะซิโไตรปใกล้เคียงกับชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์เกินไปจึงทำให้ระยะทางในการเกิดสมดุล (Equilibrium) ไม่มากพอ ส่วนถ้าป้อนสารผสมอะซิโไตรปในชั้นที่สูงขึ้นไปจากแนวโน้มของกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนอง จะต้องเพิ่มจำนวนชั้นของหอกลับสกัดขึ้นตามด้วย ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลถึงจะไม่ลดลง ดังนั้นทั้งจำนวนชั้นของหอกลับสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโไตรปมีความสัมพันธ์กันถ้าเพิ่มหรือลดหนึ่งอย่างจะได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลงเช่นกัน

จากรูปที่ 4.36 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโไตรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้จำนวนชั้นของหอกลับสกัดคงที่เท่ากับ 18 ชั้น ซึ่งชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโไตรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโไตรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ค. การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์

การหาสถานะที่เหมาะสมของการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ในส่วน of โครงสร้างหอกลับสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสถานะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.37 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างหอกลับสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ต้องใช้จำนวนชั้นของหอกลับสกัด 15.5491 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโโทรปชั้นที่ 7 และป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 3 โดยกำหนดอุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปเท่ากับ 1 และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 0.6 โดยโปรแกรมได้คำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 81,580 กิโลจูลต่อชั่วโมง มีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 0.9981 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8-1 (Zvorad, 2004) ถือว่าอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ แต่ในส่วนของโครงสร้างหอกลับสกัดต้องปัดทศนิยมขึ้นให้เป็นจำนวนเต็ม จะได้จำนวนชั้นของหอกลับสกัด 16 ชั้น เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.998 และได้พลังงาน 81,768 กิโลจูลต่อชั่วโมง ซึ่งพลังงานมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 188 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.23 ดังนั้นสามารถนำสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดนี้ไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.5.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ 2 อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป ทำการศึกษาในช่วง 0.9-1.5 และปัจจัยที่ 3 อัตราการป้อนกลับเชิงมวล ทำการศึกษาในช่วง 1.0-1.4 ในส่วนของปฏิบัติการหอกลับสกัดจะทำการวิเคราะห์ทั้งความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพลังงาน

ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

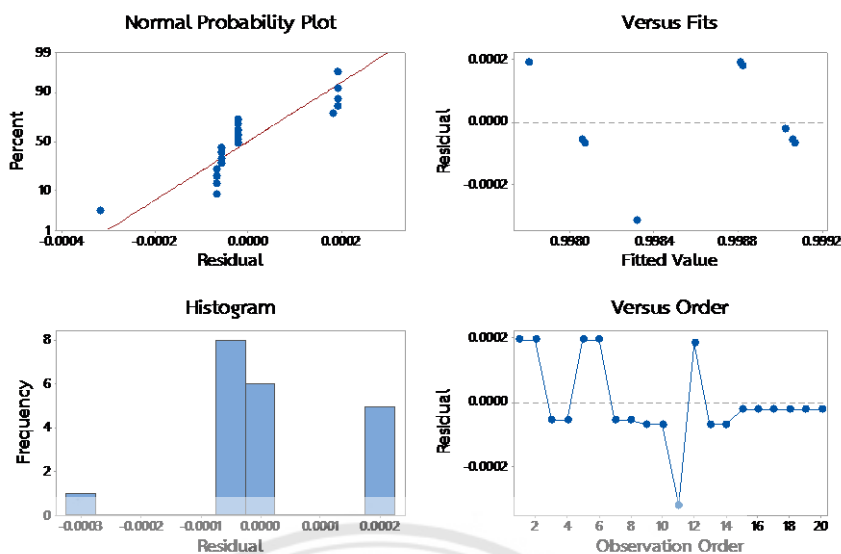
ของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลในส่วนปฏิบัติการหอกลับสกัด สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.14

$$y_2 = 0.99534 - 0.000043 x_4 + 0.00345 x_5 + 0.00432 x_6 - 0.000000 x_4^2 - 0.001263 x_5^2 - 0.002841 x_6^2 - 0.000000 x_4 x_5 + 0.000050 x_4 x_6 + 0.000000 x_5 x_6 \quad (4.14)$$

โดยที่	y_2	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_4	คือ อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)
	x_5	คือ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป
	x_6	คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.38



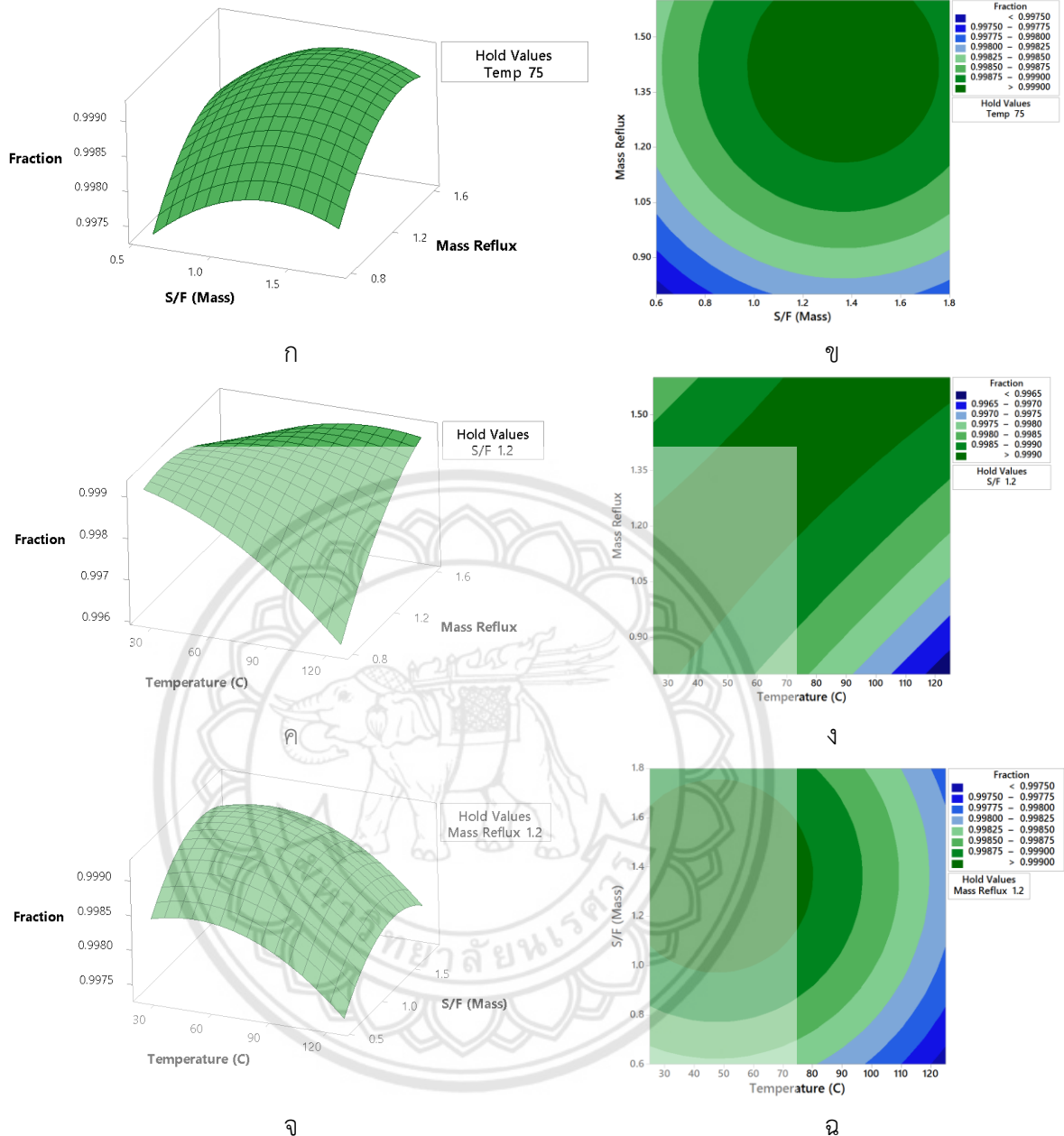
รูปที่ 4.38 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่นสกัด

จากรูปที่ 4.38 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการเรียงตัวกันเป็นจุดบนเส้น โดยมีการกระจายตัวรวมกันหนาแน่นมากที่สุดที่จุด 0 จุด -0.00015 และจุด 0.0002 การกระจายตัวทางลบมากกว่าทางบวกเล็กน้อย
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวทั้งทางบวกและทางลบเท่าๆ กัน โดยในช่วง 0.9984–0.9988 มีการกระจายตัวน้อย แต่มีการกระจายตัวทางบวกน้อยกว่าทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุด 0 และจุด 0.00005 ซึ่งใกล้กับจุด 0 มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มในในช่วง 1-14 มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน และค่าสุ่มในช่วง 15 ถึง 20 มีค่าเท่ากันตลอดซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล แสดงในรูปที่ 4.39 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปกับอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์



รูปที่ 4.39 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกั่นสกัดในส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลลัต (ก-ข) โครงร่าง และพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสาร ผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความ บริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่างอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัตระหว่างอุณหภูมิของ เอนเทรเนอร์และอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

จากรูปที่ 4.39 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.39 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปที่ 1.2 ซึ่งอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์มีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล พบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงอัตราการป้อนกลับเชิงมวล 0.75-1.25 และช่วงอุณหภูมิ 25-75 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราการป้อนกลับเชิงมวลน้อยกว่า 0.75 และมีอุณหภูมิมากกว่า 30 องศาเซลเซียส จะทำให้กลับได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง และเมื่ออุณหภูมิของเอนเทรเนอร์มากกว่า 75 องศาเซลเซียส ก็ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลงเช่นกัน เนื่องจากอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์สูงกว่าชั้นที่ทำการป้อนเอนเทรเนอร์เข้าไปจึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกัน ทำให้สารผสมกลายเป็นไอน้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นการเกิดสมดุลไอละของเหลวส่งผลให้เมทานอลกลายเป็นไอความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลจึงลดลง ดังนั้นอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์จึงไม่ควรเกิน 75 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.39 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลที่ 1.2 ซึ่งอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปกับอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ข. พลังงาน

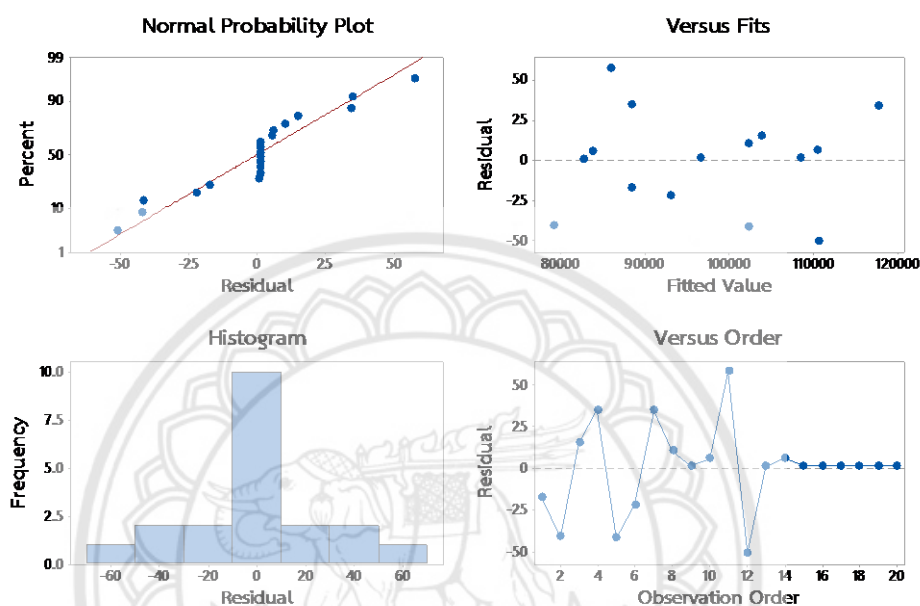
ปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดในส่วนของพลังงาน สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.15

$$y_3 = 36065 + 27.93x_4 + 24834x_5 + 34541x_6 - 0.1483x_4^2 + 4686.2x_5^2 + 297x_6^2 - 204.10x_4x_5 - 5.48x_4x_6 - 199x_5x_6 \quad (4.15)$$

โดยที่	y_3	คือ พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
	x_4	คือ อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)
	x_5	คือ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป
	x_6	คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้เตตระเอทีลีนไกลคอลเป็น เอนเทอร์เนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.40



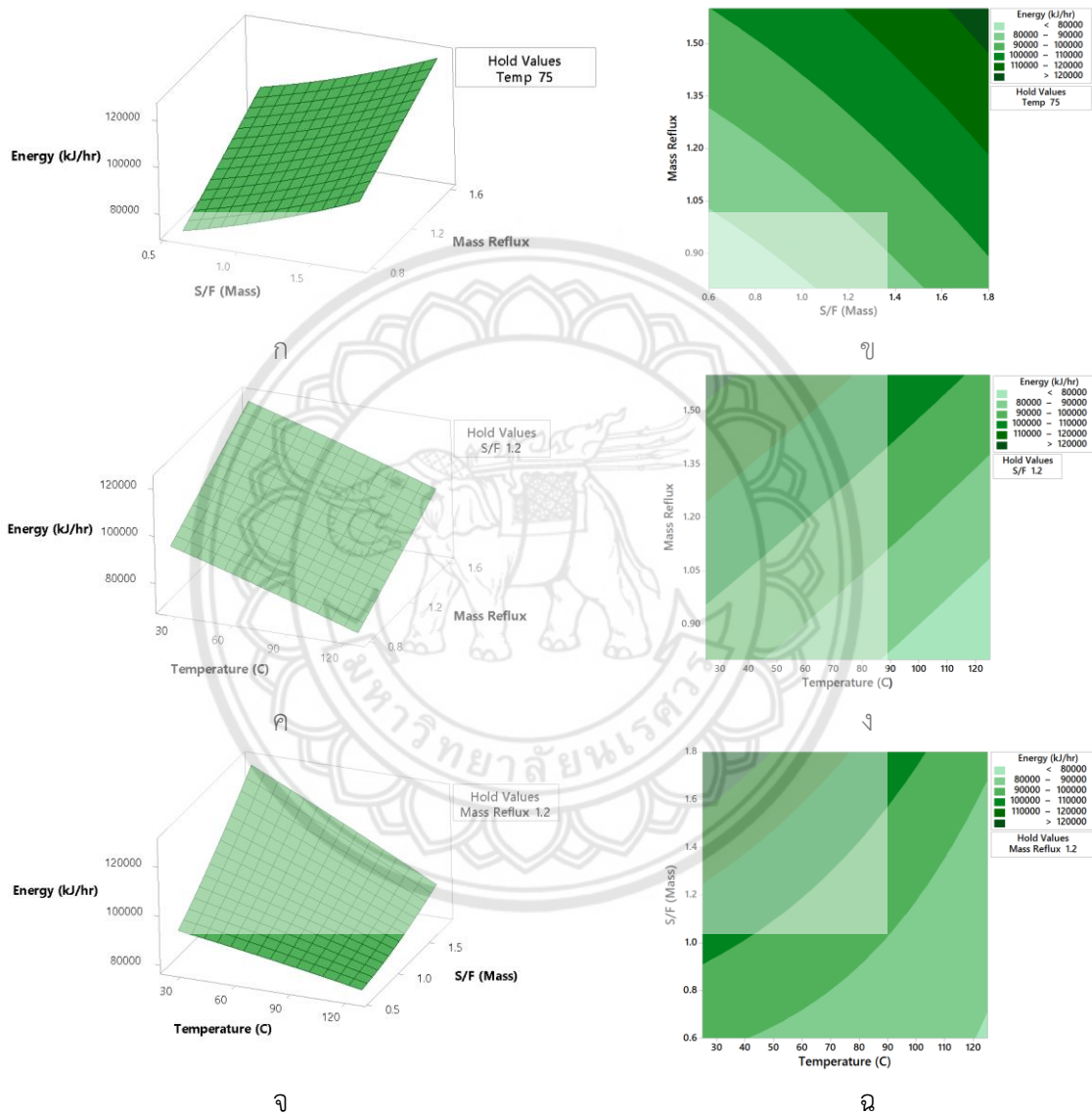
รูปที่ 4.40 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้เตตระเอทีลีนไกลคอล เป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับ

จากรูปที่ 4.40 สามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการกระจายตัวเรียงกันบนเส้น มีการกระจายตัวทั้งทางลบและทางบวกเท่าๆ กัน โดยการกระจายตัวรวมกันมากที่สุดอยู่ที่จุดศูนย์
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่าๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุมขึ้นและลงที่ไม่แน่นอนในช่วง 0 ถึง 14 และค่าสุมเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้เตตระเอทิลีน ไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้เตตระเอทิลีน ไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล แสดงใน รูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองพลังงานโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัดในส่วนของพลังงาน (ก-ข) โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

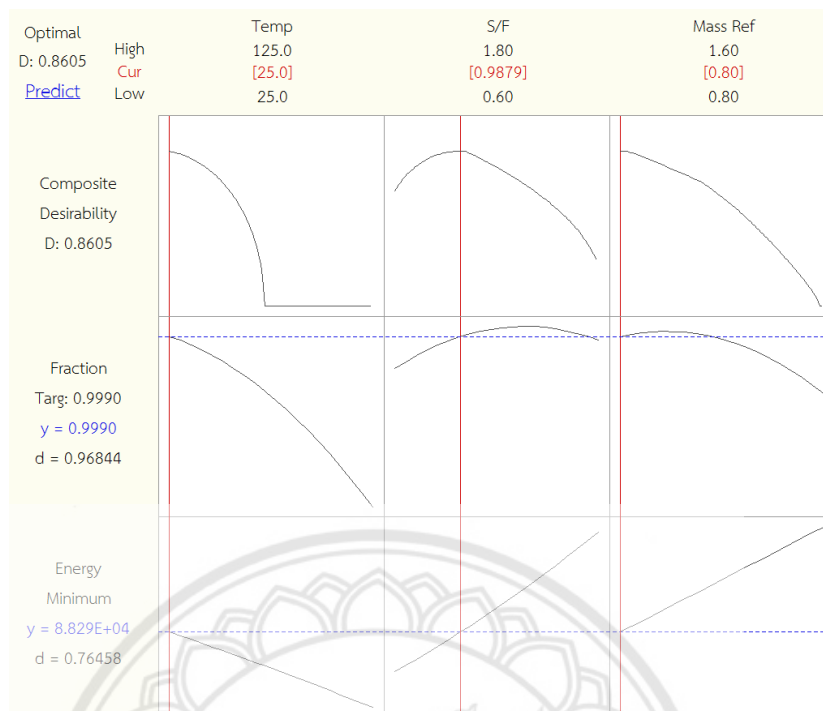
จากรูปที่ 4.41 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์คงที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.41 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปคงที่เท่ากับ 1.2 ซึ่งอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์กับอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.41 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคงที่ 1.2 ซึ่งอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์กับอัตราส่วนของเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปมีนัยสำคัญกันต่อพลังงาน พบว่าพลังงานที่ต่ำที่สุดของอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปเท่ากับ 0.6-1.6 และอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ 40-120 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปมากกว่า 1.6 และอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส จะทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้น เนื่องจากพลังงานไม่เพียงพอที่จะให้เมทิลลีสมีความบริสุทธิ์สูง

ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลีส-เมทานอลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลีส-เมทานอลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์ในส่วนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสภาวะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 กราฟสถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลับสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอล เป็นแอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.42 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปฏิบัติการหอกลับสกัดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ต้องใช้อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์เท่ากับ 0.9879 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 0.8 และใช้สถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดในรูปที่ 4.37 โปรแกรมได้คำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัตได้ 0.999 และได้พลังงาน 88290 กิโลจูลต่อชั่วโมง มีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 0.8605 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8-1 (Zvorad, 2004) ถือว่าเป็นช่วงที่สามารถยอมรับได้ เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการประมวลผลมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัต 0.999 และได้พลังงาน 88336.2 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีค่าพลังงานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 46.2 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.05 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสามารถนำสถานะที่เหมาะสมทั้งหมดไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.6 โพรไพลีนไกลคอล (Propylene Glycol)

ในการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างหอกลิ้นสกัด และปฏิบัติการหอกลิ้นสกัด

4.2.6.1 โครงสร้างหอกลิ้นสกัด

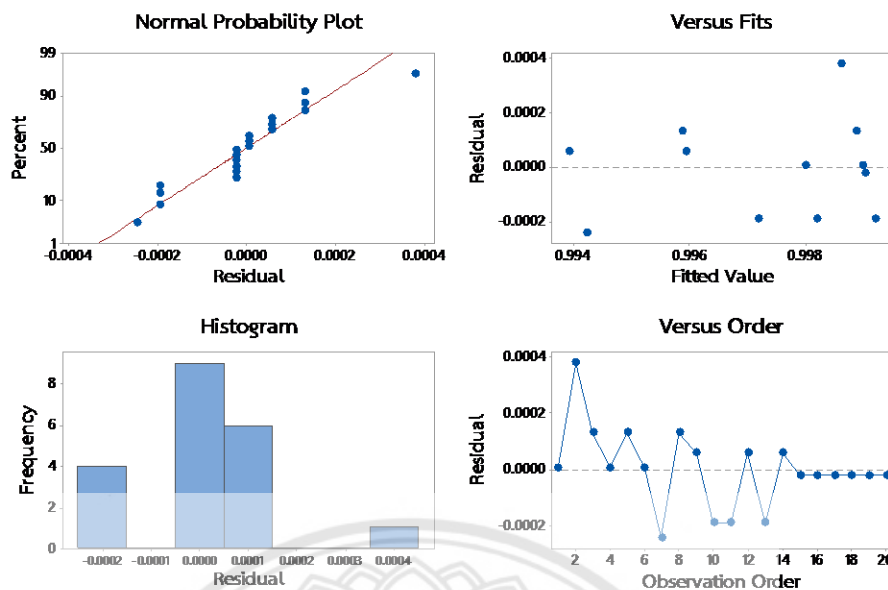
จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 จำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัด ทำการศึกษาจำนวนชั้นในช่วง 9-11 ชั้น ปัจจัยที่ 2 ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป ทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 6-8 และปัจจัยที่ 3 ชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์ ทำการศึกษาในช่วงชั้นที่ 3-5 สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.16

$$y_1 = 0.95334 + 0.007710 x_1 + 0.001528 x_2 - 0.001278 x_3 - 0.000614 x_1^2 - 0.000614 x_2^2 - 0.000489 x_3^2 + 0.000625 x_1 x_2 + 0.000375 x_1 x_3 + 0.000125 x_2 x_3 \quad (4.16)$$

โดยที่	y_1	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_1	คือ จำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัด
	x_2	คือ ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป
	x_3	คือ ชั้นที่ป้อนสารแอนเทรเนอร์

ก. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดโดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.43



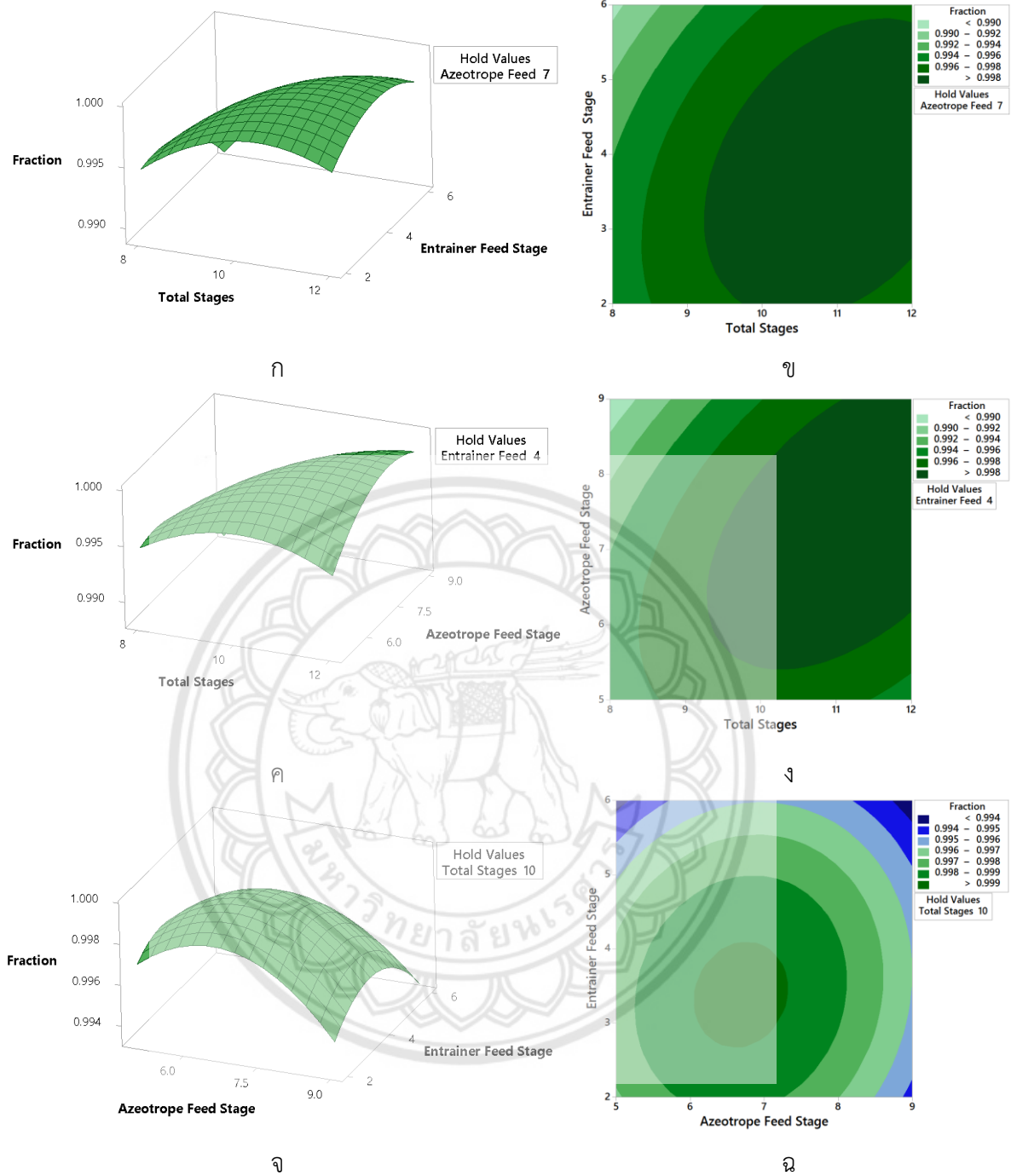
รูปที่ 4.43 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัสที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้ไพโรไลสอินไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสกัด

จากรูปที่ 4.43 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะที่จุดเรียงตัวกันบนเส้นตรงรวมตัวกันเป็นจุดๆ โดยมีการกระจายตัวรวมกันหนาแน่นที่สุดที่จุด 0
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่าๆกันทั้งทางบวกและทางลบ แต่การกระจายตัวไม่ค้ำยสม่ำเสมอ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุด 0.000 มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มในช่วง 1-14 มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน และลักษณะค่าสุ่มในช่วง 15 ถึง 20 มีค่าเท่ากันตลอดซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ข. การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ไพโรไลสอินไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัส

การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้ไพโรไลสอินไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของโครงสร้างหอกลิ้นสกัด แสดงในรูปที่ 4.44 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลิ้นสกัดและชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลิ้นสกัดและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป และความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์



รูปที่ 4.44 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้โพโรโพลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลั่นสกัด (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ ของเมทิลลัลระหว่างจำนวนชั้นของหอกลั่นสกัดและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ (ค-ง) โครงร่าง และพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างจำนวนชั้นของหอกลั่นสกัดและชั้นที่ ป้อนสารผสมอะซิโโทรป (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

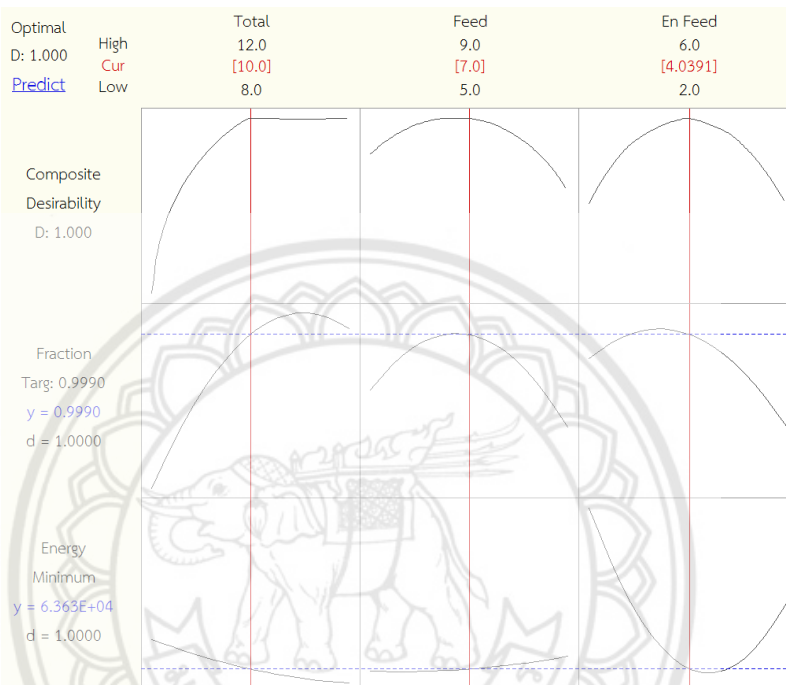
จากรูปที่ 4.44 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลิ้นสก๊อต และชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปคือชั้นที่ 7 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลิ้นสก๊อตและชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์มีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล จะเห็นได้ว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงจำนวนชั้นหอกลิ้นสก๊อต 10-12 ชั้น และชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ชั้นที่ 2-5 โดยเอนเทอร์เนอร์ (โพโรโพลีนไกลคอล) มีอุณหภูมิป้อนเข้าคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส และโพโรโพลีนไกลคอลมีจุดเดือด 187.72 องศาเซลเซียส ในหอกลิ้นสก๊อตมีอุณหภูมิตั้งแต่ 42.6407-58.2753 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อทำป้อนเอนเทอร์เนอร์เข้ามาในหอกลิ้นสก๊อต อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์จะส่งผลให้อัตราการกลายเป็นไอของสารในหอกลิ้นสก๊อตลดลงจนกลายเป็นของเหลวตกลงไปข้างล่างหอกลิ้นสก๊อต หรือเรียกพฤติกรรมนี้ว่า ของเหลวเย็นยิ่ง (Subcooled Liquid) ซึ่งพบว่าเมื่อทำการป้อนเอนเทอร์เนอร์ในชั้นที่ 6 ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลจะลดลง เนื่องจากชั้นที่ 6 มีอุณหภูมิ 45.6809 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า ภาดที่ 2-5 แต่ใกล้กับชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปเกินไปจึงไม่เหมาะสมที่จะนำเอนเทอร์เนอร์มาป้อนในชั้นนี้ ส่วนจำนวนชั้นหอกลิ้นสก๊อตที่มีจำนวนชั้นต่ำกว่า 10 ชั้นจะมีความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากชั้นของหอกลิ้นสก๊อตน้อยเกินไปอุณหภูมิของแต่ละภาดจึงใกล้เคียงกันทำให้เมทานอลบางส่วนสามารถระเหยกลายเป็นไอขึ้นไปบนยอดหอกลิ้นสก๊อตพร้อมกับเมทิลลัล เมทิลลัลจึงมีความบริสุทธิ์ลดลง

จากรูปที่ 4.44 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นหอกลิ้นสก๊อต และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์คือชั้นที่ 4 ซึ่งจำนวนชั้นหอกลิ้นสก๊อตและชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล จะเห็นได้ว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงจำนวนชั้นหอกลิ้นสก๊อต 10-12 ชั้นเหมือนกันกับ รูปที่ 4.44 (ก-ข) และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปชั้นที่ 6-9 โดยเมื่อทำการป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปในชั้นที่ 5 จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลง เนื่องจากในชั้นที่ 5 มีการป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปใกล้เคียงกับชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์เกินไปจึงทำให้ระยะทางในการเกิดสมดุล (Equilibrium) ไม่มากพอ ส่วนถ้าป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปในชั้นที่ 10 เป็นต้นไป ก็ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลลดลงเช่นกัน เนื่องจากภาดที่ 10 เป็นต้นไปมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 58.2753 องศาเซลเซียสขึ้นไป เมทานอลจึงสามารถระเหยกลายเป็นไอได้บางส่วนแม้จะไม่ถึงจุดเดือดของเอทานอลก็ตาม ดังนั้นในช่วงชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปชั้นที่ 6-9 จึงมีความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลสูงที่สุด

จากรูปที่ 4.44 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปและชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้จำนวนชั้นของหอกลิ้นสก๊อตคงที่เท่ากับชั้นที่ 10 ซึ่งชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโคโนโทรปกับชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ค. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้โพรไฟล์นไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้โพรไฟล์นไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ในส่วนของโครงสร้างหอกลับสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสภาวะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 กราฟสภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดโดยใช้โพรไฟล์นไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.45 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างหอกลับสกัดโดยใช้โพรไฟล์นไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ต้องใช้จำนวนชั้นของหอกลับสกัด 10 ชั้น ป้อนสารผสมอะซิโทรป ชั้นที่ 7 และป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 4.0391 โดยกำหนดคุณสมบัติของแอนเทรเนอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโทรปเท่ากับ 0.5 และอัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 0.4 โดยโปรแกรมได้คำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 63,630 กิโลจูลต่อชั่วโมง มีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 1 ถือว่าสามารถยอมรับได้ แต่ในส่วนของโครงสร้างหอกลับสกัดต้องปรับเพิ่มขึ้นให้เป็นจำนวนเต็ม จะต้องป้อนแอนเทรเนอร์ชั้นที่ 5 เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.998 และได้พลังงาน 63,710.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง ซึ่งพลังงานมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 80.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.001 ดังนั้นสามารถนำสภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดนี้ไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.2.6.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ 2 อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ปทำการศึกษาในช่วง 0.5-1.0 และปัจจัยที่ 3 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลทำการศึกษาในช่วง 0.6-1.2 ในส่วนของปฏิบัติการหอกลับสกัดจะทำการวิเคราะห์ทั้งความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลและพลังงาน

ก. ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

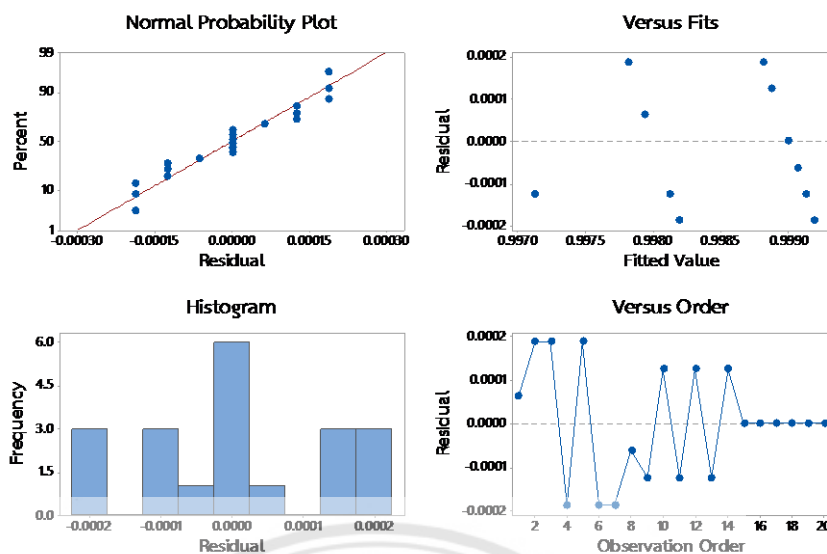
ของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลในส่วนปฏิบัติการหอกลับสกัด สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.17

$$y_2 = 0.99281 - 0.000003 x_4 + 0.00675 x_5 + 0.00646 x_6 + 0.000000 x_4^2 - 0.002000 x_5^2 - 0.002778 x_6^2 - 0.000020 x_4 x_5 + 0.000017 x_4 x_6 - 0.001667 x_5 x_6 \quad (4.17)$$

โดยที่	y_2	คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (เศษส่วนมวลของเมทิลลัล)
	x_4	คือ อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)
	x_5	คือ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป
	x_6	คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ก.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้โพรไฟล์นโกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหอกลับสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.46



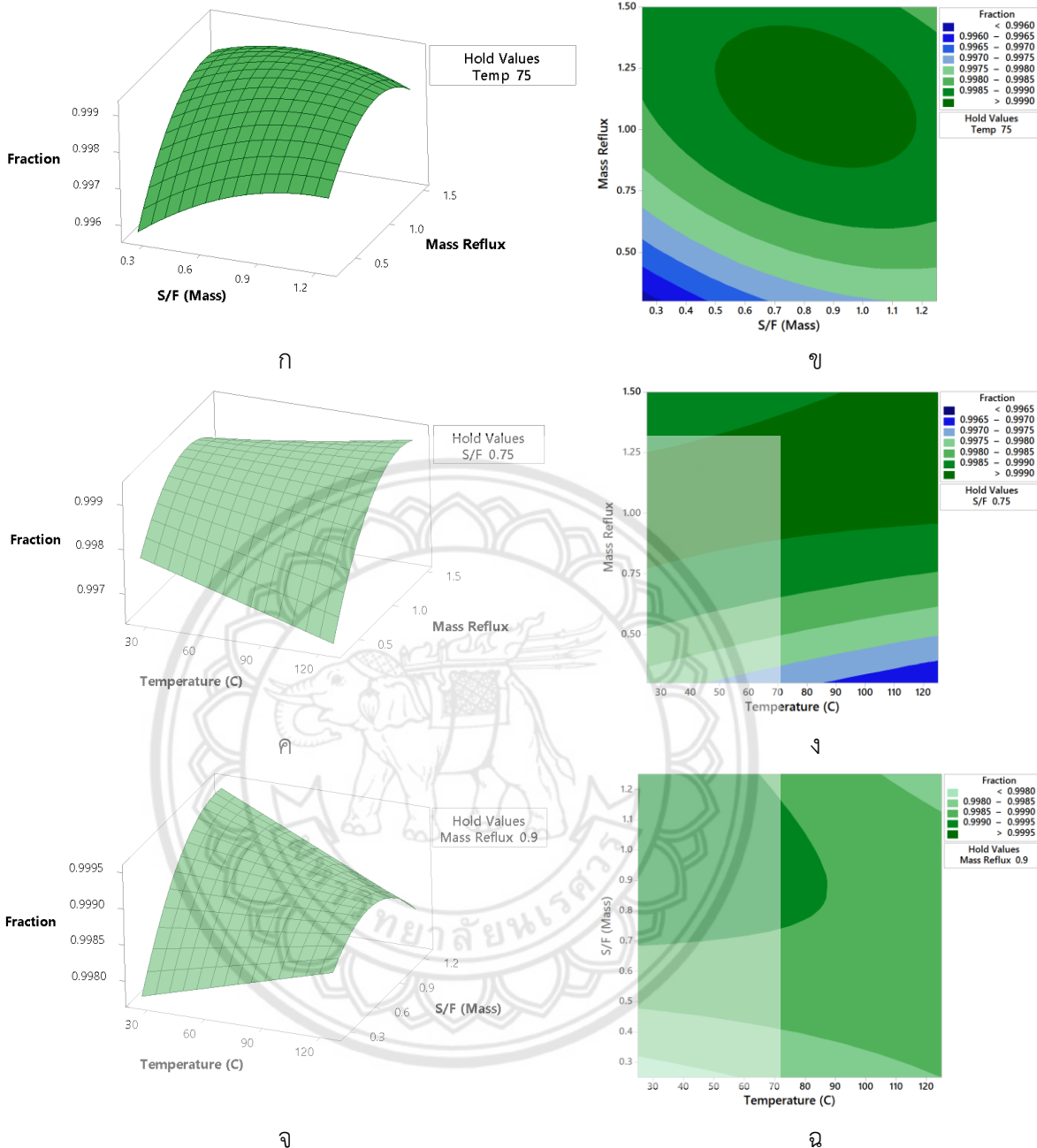
รูปที่ 4.46 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้โพรไฟล์นไกลคอลไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่นสกัด

จากรูปที่ 4.46 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะที่จุดเรียงตัวกันบนเส้น โดยมีการกระจายตัวรวมกันหนาแน่นมากที่สุดที่จุด 0
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted values) มีลักษณะการกระจายตัวทั้งทางบวกและทางลบเท่า ๆ กัน โดยในช่วง 0.9980–0.9995 มีการกระจายตัวหนาแน่นกว่าช่วงแรกๆ ถึง จุด 0.9980
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่จุดศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มในช่วง 1-14 มีค่าขึ้นลงไม่แน่นอน และค่าสุ่มในช่วง 15 ถึง 20 มีค่าเท่ากันตลอดซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center Point) ของการทดลอง

ก.2 การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้โพรไฟล์นไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดสำหรับความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

การตรวจสอบกราฟโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้โพรไฟล์นไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล แสดงในรูปที่ 4.47 โดยจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโทรัปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโทรัปกับอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์



รูปที่ 4.47 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลโดยใช้โพไพลีนไกลคอลเป็น เอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัดในส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลระหว่างอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์และอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

จากรูปที่ 4.47 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อุณหภูมิของสารเอนโทรปีคองที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.47 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนโทรปีที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปคองที่เท่ากับ 0.75 ซึ่งอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนโทรปีไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าอัตราการป้อนกลับเชิงมวลมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนอุณหภูมิของเอนโทรปีไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

จากรูปที่ 4.47 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปและอุณหภูมิของเอนโทรปีที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคองที่ 0.9 ซึ่งอัตราการป้อนกลับเชิงมวลและอุณหภูมิของเอนโทรปีไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบว่าอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรปมีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล ส่วนอุณหภูมิของเอนโทรปีไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีนัยสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ข. ผลงาน

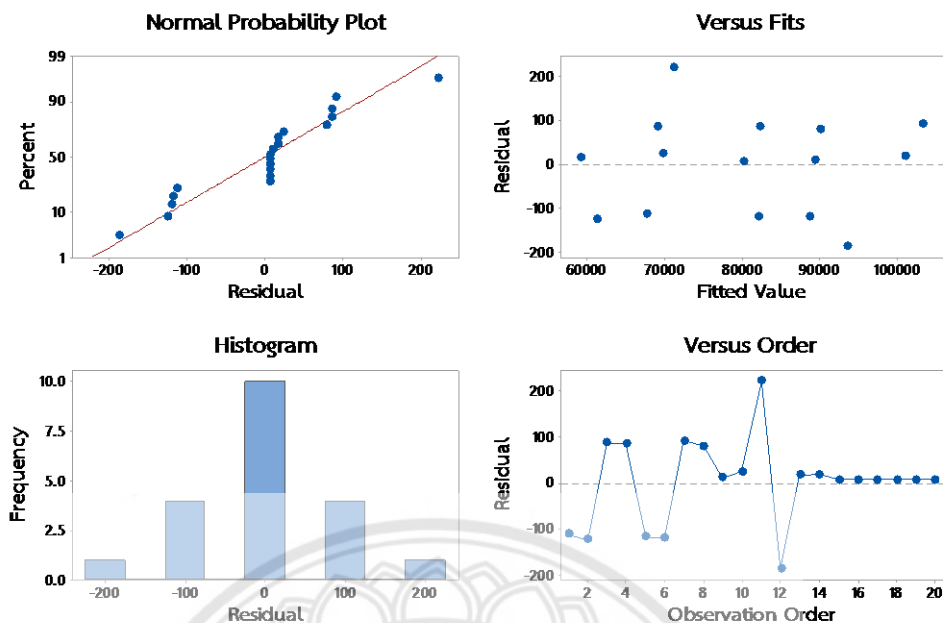
ปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในส่วนของพลังงาน สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 4.18

$$y_3 = 35587 + 34.9x_4 + 29047x_5 + 34877x_6 - 0.2245x_4^2 + 0.8752x_5^2 + 31x_6^2 - 263.20x_4x_5 - 1.16x_4x_6 - 47x_5x_6 \quad (4.19)$$

โดยที่ y_3 คือ พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
 x_4 คือ อุณหภูมิของเอนโทรปี (องศาเซลเซียส)
 x_5 คือ อัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโไตรป
 x_6 คือ อัตราการป้อนกลับเชิงมวล

ข.1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนโทรปีของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย แสดงในรูปที่ 4.48



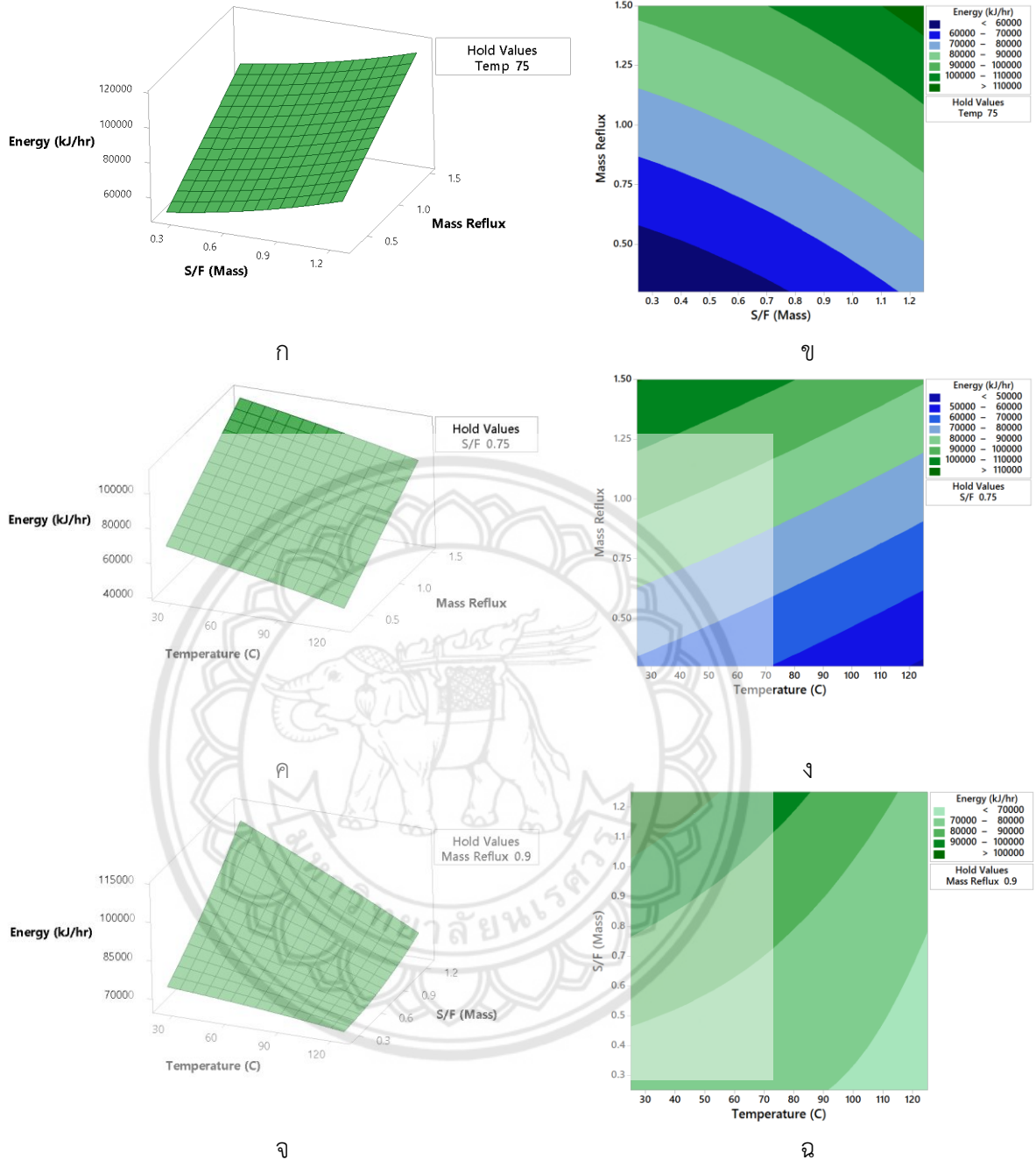
รูปที่ 4.48 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของพลังงานที่ได้จากการกลั่นสกัดโดยใช้โพรไฟลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหากลั่น

จากรูปที่ 4.48 สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะการกระจายตัวเรียงกันบนเส้น มีการกระจายตัวทั้งทางลบและทางบวกเท่า ๆ กัน โดยการกระจายตัวรวมกันมากที่สุดอยู่ที่จุดศูนย์ และมีการกระจายตัวรวมกันที่จุด -100 และ 100 หนาแน่นเท่า ๆ กัน
2. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted Values) มีลักษณะการกระจายตัวเท่า ๆ กันทั้งทางบวกและทางลบ
3. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ โดยค่าที่ศูนย์มีความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุมขึ้นและลงที่ไม่แน่นอนในช่วง 0 ถึง 14 และค่าสุมเท่าเดิมในช่วง 15 ถึง 20 ซึ่งเป็นช่วงจุดกึ่งกลาง (Center point) ของการทดลอง

ข.2 การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองโดยใช้โพรไฟลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดสำหรับพลังงาน

การตรวจสอบกราฟโครงสร้างและพื้นผิวตอบสนองสำหรับใช้โพรไฟลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ของปฏิบัติการหากลั่นสกัดในส่วนของความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล แสดงในรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองพลังงานโดยใช้ไฟฟ้โพลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลั่นสกัดในส่วนของพลังงาน (ก-ข) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรปและอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (ค-ง) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล (จ-ฉ) โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองของพลังงานระหว่างอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์และอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

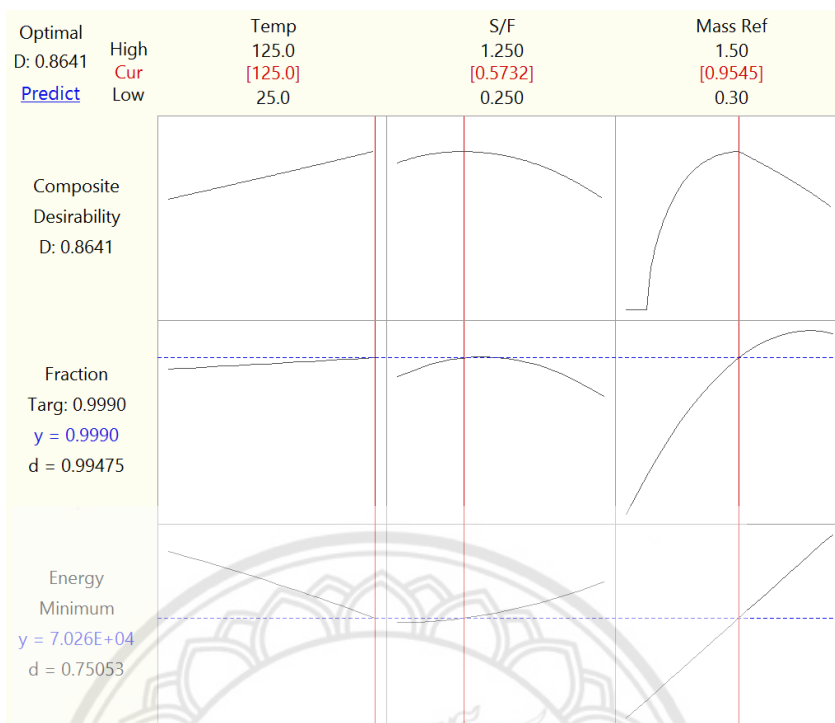
จากรูปที่ 4.49 (ก-ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโตนและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเอนโทรปีคงที่ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโตนและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.49 (ค-ง) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโตนคงที่เท่ากับ 0.75 ซึ่งอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราการป้อนกลับเชิงมวลไม่สามารถอธิบายได้มีนัยสำคัญต่อพลังงาน เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาวิเคราะห์แยก พบทั้งสองปัจจัยมีนัยสำคัญต่อพลังงาน

จากรูปที่ 4.49 (จ-ฉ) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเอนโทรปีและอัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโตนที่มีผลต่อพลังงาน โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนกลับเชิงมวลคงที่ 0.9 ซึ่งอุณหภูมิของเอนโทรปีกับอัตราส่วนของเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโตนมีนัยสำคัญกันต่อพลังงาน โดยพบว่าพลังงานที่ต่ำที่สุดของอัตราส่วนเอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโตนเท่ากับ 0.2-0.7 และอุณหภูมิของเอนโทรปี 90-120 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราส่วน เอนโทรปีต่อสารผสมอะซิโตนมากกว่า 0.7 และอุณหภูมิของเอนโทรปีต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส จะทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้น เนื่องจากพลังงานไม่เพียงพอที่จะให้ให้เมทิลลีสมีความบริสุทธิ์สูง

ค. การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดในกระบวนการกลั่นแยกสารผสมเมทิลลีส-เมทานอลโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนโทรปี

การหาสถานะที่เหมาะสมของการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลีส-เมทานอลโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนโทรปีในส่วนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดสามารถหาได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการหาสถานะที่เหมาะสมจะถูกแสดงในรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 กราฟสภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการหอกลับสกัดโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์

จากรูปที่ 4.50 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปฏิบัติการหอกลับสกัดโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ต้องใช้อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ 125 องศาเซลเซียส อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารอะซิโโทรปเท่ากับ 0.5732 อัตราการป้อนกลับเชิงมวลเท่ากับ 0.9545 และใช้สภาวะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลับสกัดในรูปที่ 4.45 โดยโปรแกรมได้คำนวณเศษส่วนมวลของเมทิลลัลได้ 0.999 และได้พลังงาน 70,260 กิโลจูลต่อชั่วโมง มีระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability) 0.8641 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8-1 (Zvorad, 2004) ถือว่าเป็นช่วงที่สามารถยอมรับได้ เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการประมวลผลมาทดสอบในโปรแกรม Aspen Plus V8.8 พบว่าได้เศษส่วนมวลของเมทิลลัล 0.999 และได้พลังงาน 70,259.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง โดยมีค่าพลังงานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการประมวลผล 0.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.0001 ซึ่งถือมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสามารถนำสภาวะที่เหมาะสมทั้งหมดไปใช้ในส่วนต่อไปได้

4.3 สภาวะที่เหมาะสมและการประเมินพลังงานรวม

ในส่วนของสภาวะที่เหมาะสมและการประเมินพลังงานรวมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ สภาวะเหมาะสม และการประเมินพลังงานรวม

4.3.1 สภาวะเหมาะสม

เมื่อทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของหอกลั่นสกัดจากขั้นตอนที่ 4.2 แล้ว หลังจากนั้นจะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของหอกู้คืนด้วยเช่นกัน โดยในแต่ละสารที่ต้องการนำมาใช้เป็นเอนเทรเนอร์ จะได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้

4.3.1.1 เอทานอลาไมน์

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์

หอ (Columns)	หอกลั่นสกัด (Extractive Distillation Columns; EDC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	12
	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	9
	ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	6
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.1429
	อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94
	หอกู้คืนเอนเทรเนอร์ (Entrainer Recovery Column; ERC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกู้คืน	7
	ชั้นที่ป้อนสารผสม	4
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.8
อัตราการกลั่นกันหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	60	
สายการไหล (Streams)	สายป้อนสารผสมอะซิโโทรป (Azeotrope Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
	เมทิลลัล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94.12
เมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	5.88	

สายการไหล (Streams)	สายป้อนสารเอนเทรเนอร์ (Entrainer Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	125
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
	เอทานอลาไมน์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	60

ตารางที่ 4.4 ผลพลังงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม

สายการไหล (Streams)	ยอดหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9825
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.999
	ก้นหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	130.434
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.003
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.088
	ยอดหอกู้คืน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	0.908
		เศษส่วนมวลของเอทานอลาไมน์	64.1212
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.954
	ก้นหอกู้คืน (Recovery Stream)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	169.128
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	164 PPM
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	940 PPM
		เศษส่วนมวลของเอทานอลาไมน์	0.999
พลังงาน ความร้อน (Heat Duty)	หอกลั่นสกัด	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-74,834.7
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	80,858.8
	หอกู้คืน	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-18,640.3
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	25,378.8
	พลังงานความร้อนรวม	หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	106,237.6
	เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน (Cooler)	อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	169.128
		อุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส)	125
		พลังงานความร้อน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-8,818.35

จากตารางที่ 4.4 พลังงานของหอกลั่นสกัดคือ 80,858.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง และพลังงานของหอกู้คืนคือ 25,378.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง ทำให้พลังงานรวมที่ต้องใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลคือ 106,237.6 กิโลจูลต่อชั่วโมง อุณหภูมิของสายการไหลที่ออกจากหอกู้คืน (เอนเทรเนอร์) คือ 169.128 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่ต้องนำกลับไปใช้ในหอกลั่นสกัดคือ 125 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ก่อนเข้าหอกลั่นสกัด

4.3.1.2 เมทิลไพรโรลิดินอน

จากการหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอล โดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์

หอ (Columns)	หอกลั่นสกัด (Extractive Distillation Columns; EDC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	28
	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	14
	ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	4
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.2687
	อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94
	หอกู้คืนเอนเทรเนอร์ (Entrainer Recovery Column; ERC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5
	ชั้นที่ป้อนสารผสม	3
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.8
อัตราการกลั่นก้นหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	30	
สายการไหล (Streams)	สายป้อนสารผสมอะซิโโทรป (Azeotrope Feed Stream)	
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	25
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
	เมทิลลัลล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94.12
	เมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	5.88
	สายป้อนสารเอนเทรเนอร์ (Entrainer Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	94
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
เมทิลไพรโรลิดินอน (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	30	

ตารางที่ 4.6 ผลพลังงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นเอนเทรเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม

สายการไหล (Streams)	ยอดหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9848
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.999
	ก้นหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	94.8969
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.006
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.161
		เศษส่วนมวลของเมทิลไพรโรลิดินอน	0.833
	ยอดหอกู้คืน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	63.9936
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.959
	ก้นหอกู้คืน (Recovery Stream)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	202.297
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	12 PPM
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	538 PPM
		เศษส่วนมวลของเมทิลไพรโรลิดินอน	0.999
พลังงาน ความร้อน (Heat Duty)	หอกลั่นสกัด	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-79,239.7
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	83,905.3
	หอกู้คืน	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-11,688.2
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	17,711.4
	พลังงานความร้อนรวม	หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	101,616.7
	เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน (Cooler)	อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	202.297
		อุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส)	94
		พลังงานความร้อน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-6,723.86

จากตารางที่ 4.6 พลังงานของหอกลั่นสกัดคือ 83,905.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง และพลังงานของหอกู้คืนคือ 17,711.4 กิโลจูลต่อชั่วโมง ทำให้พลังงานรวมที่ต้องใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลคือ 101,616.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง อุณหภูมิของสายการไหลที่ออกจากหอกู้คืน (เอนเทรเนอร์) คือ 202.297 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่ต้องนำกลับไปใช้ในหอกลั่นสกัดคือ 94 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ก่อนเข้าหอกลั่นสกัด

4.3.1.3 เอทิลีนไกลคอล

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์

หอ (Columns)	หอกลั่นสกัด (Extractive Distillation Columns; EDC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	26
	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	18
	ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	12
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.7155
	อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94
	หอกู้คืนเอนเทรเนอร์ (Entrainer Recovery Column; ERC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5
	ชั้นที่ป้อนสารผสม	3
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2
	อัตราการกลั่นกันหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	25
สายการไหล (Streams)	สายป้อนสารผสมอะซิโโทรป (Azeotrope Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
	เมทิลลัล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94.12
	เมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	5.88
	สายป้อนสารเอนเทรเนอร์ (Entrainer Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	125
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
เอทิลีนไกลคอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	25	

ตารางที่ 4.8 ผลพลังงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม

สายการไหล (Streams)	ยอดหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9822		
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.999		
	ก้นหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	93.6001		
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.007		
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.187		
			เศษส่วนมวลของเอทิลีนไกลคอล	0.806	
			ยอดหอกู้คืน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	64.0381
				เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.96
	ก้นหอกู้คืน (Recovery Stream)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	195.16	
			เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	26 PPM	
เศษส่วนมวลของเมทานอล			837 PPM		
เศษส่วนมวลของเอทิลีนไกลคอล			0.999		
พลังงาน ความร้อน (Heat Duty)	หอกลั่นสกัด	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-94,829.5		
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	97,428.5		
	หอกู้คืน	เครื่องความแน่น(กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-7,877.89		
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	14,283.5		
	พลังงานความร้อนรวม	หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	111,712		
	เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน (Cooler)	อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	195.16		
		อุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส)	125		
		พลังงานความร้อน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-5,041.68		

จากตารางที่ 4.8 พลังงานของหอกลั่นสกัดคือ 97,428.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง และพลังงานของหอกู้คืนคือ 14,283 กิโลจูลต่อชั่วโมง ทำให้พลังงานรวมที่ต้องใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลคือ 111,712 กิโลจูลต่อชั่วโมง อุณหภูมิของสายการไหลที่ออกจากหอกู้คืน (เอนเทรเนอร์) คือ 195.16 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่ต้องนำกลับไปใช้ในหอกลั่นสกัดคือ 125 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ก่อนเข้าหอกลั่นสกัด

4.3.1.4 กลีเซอรอล

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์

หอ (Columns)	หอกลั่นสกัด (Extractive Distillation Columns; EDC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	12
	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	7
	ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	5
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.9788
	อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94
	หอกู้คืนเอนเทรเนอร์ (Entrainer Recovery Column; ERC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5
	ชั้นที่ป้อนสารผสม	3
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2
อัตราการกลั่นก้นหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	50	
สายการไหล (Streams)	สายป้อนสารผสมอะซิโโทรป (Azeotrope Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
	เมทิลลัล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94.12
	เมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	5.88
	สายป้อนสารเอนเทรเนอร์ (Entrainer Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	121
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
กลีเซอรอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	50	

ตารางที่ 4.10 ผลพลังงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม

สายการไหล (Streams)	ยอดหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9955
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.999
	ก้นหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	113.472
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.005
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.103
	ยอดหอกู้คืน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	63.901
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.956
	ก้นหอกู้คืน (Recovery Stream)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	287.221
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	trace
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	<0.001
พลังงาน ความร้อน (Heat Duty)	หอกลั่นสกัด	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-69,160.3
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	73,284.9
	หอกู้คืน	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-8,212.31
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	30,507.6
	พลังงานความร้อนรวม	หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	103,792.5
	เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน (Cooler)	อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	287.221
		อุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส)	121
		พลังงานความร้อน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-22,455

จากตารางที่ 4.10 พลังงานของหอกลั่นสกัดคือ 73,284.9 กิโลจูลต่อชั่วโมง และพลังงานของหอกู้คืนคือ 30,507.6 กิโลจูลต่อชั่วโมง ทำให้พลังงานรวมที่ต้องใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลคือ 130,792.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง อุณหภูมิของสายการไหลที่ออกจากหอกู้คืน (เอนเทรเนอร์) คือ 287.221 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่ต้องนำกลับไปใช้ในหอกลั่นสกัดคือ 121 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ก่อนเข้าหอกลั่นสกัดเท่าเดิม

4.3.1.5 เติตระเอทีลีนไกลคอลล

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอลโดยใช้เติตระเอทีลีนไกลคอลลเป็นเอนเทรเนอร์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอลโดยใช้เติตระเอทีลีนไกลคอลลเป็นเอนเทรเนอร์

หอ (Columns)	หอกลั่นสกัด (Extractive Distillation Columns; EDC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	16
	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซีโอโทรป	7
	ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	3
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.8
	อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94
	หอกู้คืนเอนเทรเนอร์ (Entrainer Recovery Column; ERC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5
	ชั้นที่ป้อนสารผสม	3
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2
	อัตราการกลั่นก้นหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	98.8
	สายการไหล (Streams)	สายป้อนสารผสมอะซีโอโทรป (Azeotrope Feed Stream)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		25
ความดัน (atm)		1
อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)		
เมทิลลัลล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)		94.12
เมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)		5.88
สายป้อนสารเอนเทรเนอร์ (Entrainer Feed Stream)		
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		25
ความดัน (atm)		1
อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)		
เติตระเอทีลีนไกลคอลล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	99.3	

ตารางที่ 4.12 ผลพลังงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม

สายการไหล (Streams)	ยอดหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.996
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.999
	ก้นหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	124.327
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.002
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.055
	ยอดหอกู้คืน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	64.2588
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.883
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	329.115
	ก้นหอกู้คืน (Recovery Stream)	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	1 PPM
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	23 PPM
เศษส่วนมวลของเตตระเอทิลีนไกลคอล		1	
พลังงานความร้อน (Heat Duty)	หอกลิ้นสกัด	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-62,913.2
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	88,480.2
	หอกู้คืน	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-96,94.55
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	58,113.7
	พลังงานความร้อนรวม	หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	146,594
	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Cooler)	อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	329.115
		อุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส)	25
พลังงานความร้อน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)		-69,979.3	

จากตารางที่ 4.12 พลังงานรวมที่หอกลิ้นสกัดคือ 88,480.2 กิโลจูลต่อชั่วโมง และพลังงานของหอกู้คืนคือ 58,113.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง ทำให้พลังงานรวมที่ต้องใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลคือ 146,594 กิโลจูลต่อชั่วโมง ทั้งนี้อุณหภูมิของสายการไหลที่ออกจากหอกู้คืน (เอนเทรเนอร์) คือ 329.115 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ที่ต้องนำกลับไปใช้ในหอกลิ้นสกัดคือ 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ก่อนเข้าหอกลิ้นสกัด

4.3.1.6 โพรไฟล์ไลน์ไกลคอล

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอลโดยใช้โพรไฟล์ไลน์ไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัลล-เมทานอล โดยใช้โพรไฟล์ไลน์ไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์

หอ (Columns)	หอกลั่นสกัด (Extractive Distillation Columns; EDC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	10
	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	7
	ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	5
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.955
	อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94
	หอกู้คืนเอนเทรเนอร์ (Entrainer Recovery Column; ERC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5
	ชั้นที่ป้อนสารผสม	3
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1
	อัตราการกลั่นก้นหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	57.3
สายการไหล (Streams)	สายป้อนสารผสมอะซิโโทรป (Azeotrope Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
	เมทิลลัลล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94.12
	เมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	5.88
	สายป้อนสารเอนเทรเนอร์ (Entrainer Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	125
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
โพรไฟล์ไลน์ไกลคอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	57.294	

ตารางที่ 4.14 ผลพลังงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์ที่สภาวะที่เหมาะสม

สายการไหล (Streams)	ยอดหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9943
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.999
	ก้นหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	107.944
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.056
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.039
	ยอดหอกู้คืน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	53.0026
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.401
	ก้นหอกู้คืน (Recovery Stream)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	186.324
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	112 PPM
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	901 PPM
พลังงาน ความร้อน (Heat Duty)	หอกลิ้นสกัด	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-68,323.5
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	70,238.8
	หอกู้คืน	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-8,586.22
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	21,089.3
	พลังงานความร้อนรวม	หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	91,328.1
	เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน (Cooler)	อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	186.324
		อุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส)	125
		พลังงานความร้อน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-10,744.4

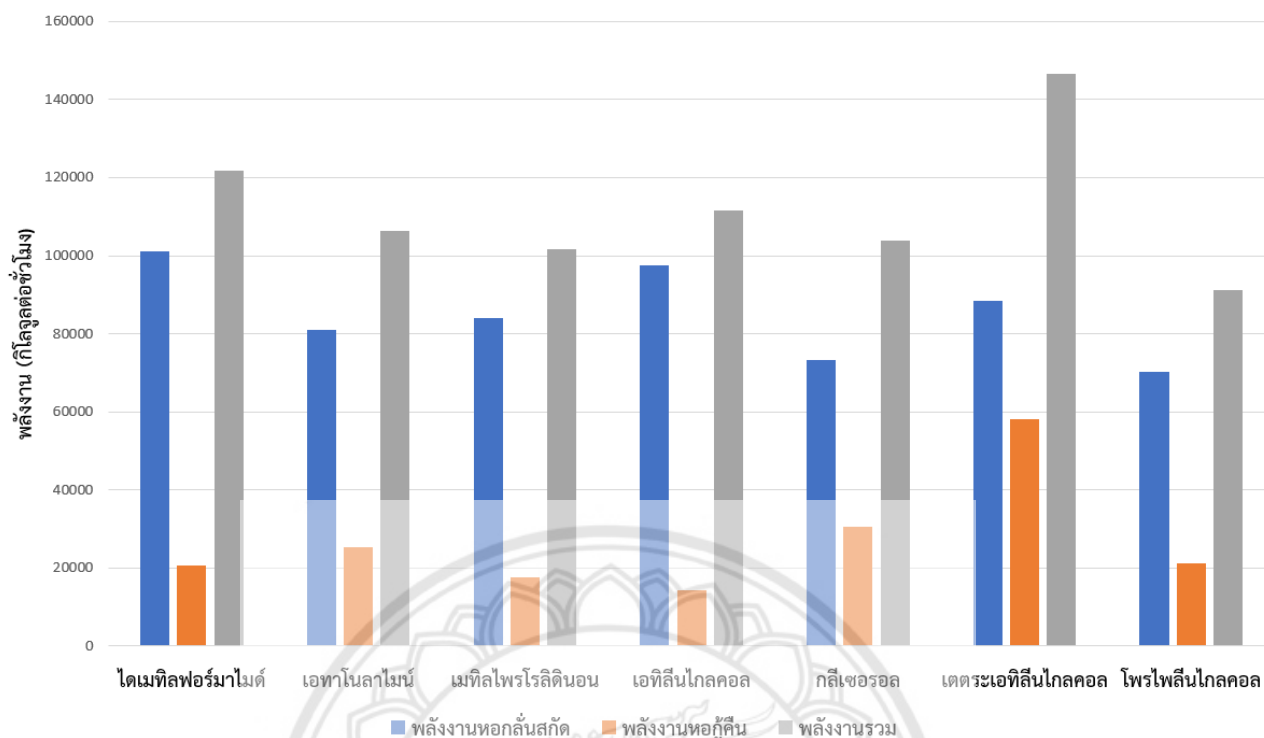
จากตารางที่ 4.14 พลังงานของหอกลิ้นสกัดคือ 70,238.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง และพลังงานของหอกู้คืนคือ 21,089.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง ทำให้พลังงานรวมที่ต้องใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลคือ 91,328.1 กิโลจูลต่อชั่วโมง อุณหภูมิของสายการไหลที่ออกจากหอกู้คืน (เอนเทรเนอร์) คือ 186.324 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิของสารเอนเทรเนอร์ที่ต้องนำกลับไปใช้ในหอกลิ้นสกัดคือ 125 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ก่อนเข้าหอกลิ้นสกัด

4.3.2 การประเมินพลังงานรวม

สภาวะที่เหมาะสมของหอกลิ้นสกัดกับหอกู้คืน และการใช้พลังงานรวมของการใช้เอนเทรเนอร์แต่ละชนิดในการกลั่นแยกเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลร้อยละ 99.9 ถูกแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 4.15 สภาวะที่เหมาะสมและการประเมินพลังงานรวมของเอนเทอร์เนอร์

	โดเมทิล ฟอร์มาไมด์	เอทาน์ ลาไมน์	เมทิลไพร โรลิตินอน	เอทิลีน ไกลคอล	กลีเซอรอล	เตตระเอทิลีน ไกลคอล	โพรโพลีน ไกลคอล
หอกลิ้นสก็ด							
จำนวนชั้นของหอกลิ้นสก็ด	18	12	28	26	12	16	10
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	12	9	14	18	7	7	7
ชั้นที่ป้อนสารเอนเทอร์เนอร์	4	6	4	12	5	3	5
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	125	94	125	121	25	125
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	0.6	0.3	0.25	0.5	0.993	0.5732
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.1	1.1429	1.269	1.7155	0.9788	0.8	0.9545
อุณหภูมียอดหอกลิ้นสก็ด (องศาเซลเซียส)	41.92	41.9825	41.9848	41.9822	41.9955	41.996	41.9943
อุณหภูมิกันหอกลิ้นสก็ด (องศาเซลเซียส)	127.33	130.434	94.8969	93.6001	113.472	124.327	107.944
เศษส่วนมวลของเมทิลล	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
พลังงานหม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	101,016	80,858.8	83,905.3	97,428.5	73,284.9	88,480.3	70,238.8
หอกู้คืน							
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	10	7	5	5	5	5	5
ชั้นที่ป้อนสารผสม	5	4	3	3	3	3	3
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.9	1.8	0.8	0.2	0.2	0.2	1
เศษส่วนมวลของเมทานอลที่ยอดหอกู้คืน	0.973	0.954	0.959	0.96	0.956	0.883	0.401
เศษส่วนมวลของเอนเทอร์เนอร์ที่กันหอกู้คืน	0.999	0.999	0.999	0.999	1	1	0.999
พลังงานหม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	20,736	25,378.8	17,711.4	14,283.5	30,507.6	58,113.7	21,089.3
ประเมินพลังงานรวม							
พลังงานหม้อต้มรวม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	121,752	106,237.6	101,616.7	111,712	103,792.5	146,594	91,328.1



รูปที่ 4.51 การใช้พลังงานในกระบวนการกลั่นสกัดของแต่ละเอเนอร์เจอร์

จากตารางที่ 4.15 เมื่อนำจำนวนชั้นของหอกลับสกัดมาวิเคราะห์ พบว่าโพรพิลีนไกลคอล ใช้จำนวนชั้นหอกลับสกัดน้อยสุด (10 ชั้น) รองลงมาเป็นกลีเซอรอล (12 ชั้น) และเอทานอลาไมน์ (12 ชั้น) เตตระเอทิลีนไกลคอล (16 ชั้น) โดเมทิลฟอร์มาไมด์ (18 ชั้น) เอทิลีนไกลคอล (28 ชั้น) และเมทิลไพรโรลิดินอน (28 ชั้น) ตามลำดับ ส่วนจำนวนชั้นของของหอกู้คืน พบว่าโพรพิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เอทานอลาไมน์ เตตระเอทิลีนไกลคอล และเมทิลไพรโรลิดินอน ใช้จำนวนชั้นของหอกู้คืน เท่ากัน (5ชั้น) เอทิลีนไกลคอล (7 ชั้น) และโดเมทิลฟอร์มาไมด์ (10 ชั้น) ตามลำดับ

เมื่อนำพลังงานในกระบวนการกลั่นสกัดจากตารางที่ 4.15 มาทำเป็นกราฟแท่ง จะได้กราฟดังรูปที่ 4.51 พบว่าการใช้เอเนอร์เจอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำในหอกลับสกัด มีโพรพิลีนไกลคอลใช้พลังงานน้อยที่สุด (70,238.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง) รองลงมาเป็นกลีเซอรอล (73,284.9 กิโลจูลต่อชั่วโมง) เอทานอลาไมน์ (80,858.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง) เมทิลไพรโรลิดินอน (83,905.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง) เตตระเอทิลีนไกลคอล (88,480.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง) เอทิลีนไกลคอล (97,428.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง) และโดเมทิลฟอร์มาไมด์ (101,016 กิโลจูลต่อชั่วโมง) ตามลำดับ ส่วนการใช้พลังงานในหอกู้คืนพบว่าเอทิลีนไกลคอลใช้พลังงานน้อยสุด (14,283.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง) รองลงมาเป็นเมทิลไพรโรลิดินอน (17,711.4 กิโลจูลต่อชั่วโมง) โดเมทิลฟอร์มาไมด์ (20,736 กิโลจูลต่อชั่วโมง) โพรพิลีนไกลคอล (21,089.3 กิโลจูลต่อชั่วโมง) เอทานอลาไมน์ (25,378.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง) กลีเซอรอล (30,507.6 กิโลจูลต่อชั่วโมง) และเตตระเอทิลีนไกลคอล (58,113.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง) ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าในหอกลับสัปดาห์ เมทิลไพรโรลิดินอน และเอทิลีนไกลคอล ใช้จำนวนหอกลับสัปดาห์มากกว่าโดเมทิลฟอร์มาไมด์แต่ใช้พลังงานน้อยกว่า ส่วนโพรไพลีนไกลคอลใช้พลังงานต่ำสุดและใช้จำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์น้อยสุด เอทานอลาไมน์กับกลีเซอรอลใช้จำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์เท่ากันแต่เอทานอลาไมน์ใช้พลังงานมากกว่า เมทิลไพรโรลิดินอนกับเอทิลีนไกลคอลมีการใช้จำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์มากที่สุดแต่เอทิลีนไกลคอลใช้พลังงานมากกว่า อย่างไรก็ตามกลับพบว่าการใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์ถึงแม้จะใช้จำนวนชั้นหอกลับสัปดาห์ที่น้อยกว่าเอทิลีนไกลคอลอยู่มาก แต่กลับพบว่ามีการใช้พลังงานในหอกลับสัปดาห์น้อยกว่าการใช้เอทิลีนไกลคอลเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ในหอกู้คืนการใช้แอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำทั้ง 6 ชนิด ใช้จำนวนชั้นหอกู้คืนน้อยกว่าโดเมทิลฟอร์มาไมด์ แต่มีเพียงเมทิลไพรโรลิดินอนกับเอทิลีนไกลคอลที่ใช้พลังงานในหอกู้คืนน้อยกว่า ส่วนการใช้แอนเทรเนอร์ชนิดอื่นใช้พลังงานในหอกู้คืนมากกว่าโดเมทิลฟอร์มาไมด์ โดยเฉพาะเตตระเอทิลีนไกลคอลใช้พลังงานในหอกู้คืนสูงที่สุด

เมื่อนำพลังงานจากหอกลับสัปดาห์และหอกู้คืนมารวมกัน พบว่าโพรไพลีนไกลคอลใช้พลังงานน้อยสุด (91,328.1 กิโลจูลต่อชั่วโมง) รองลงมาเป็น เมทิลไพรโรลิดินอน (101,616.7 กิโลจูลต่อชั่วโมง) กลีเซอรอล (103,792.5 กิโลจูลต่อชั่วโมง) เอทานอลาไมน์ (106,237.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง) เอทิลีนไกลคอล (111,712 กิโลจูลต่อชั่วโมง) โดเมทิลฟอร์มาไมด์ (121,752 กิโลจูลต่อชั่วโมง) และเตตระเอทิลีนไกลคอล (146,594 กิโลจูลต่อชั่วโมง) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโพรไพลีนไกลคอลยังคงใช้พลังงานน้อยที่สุดในขณะที่เมทิลไพรโรลิดินอนในส่วนของหอกลับสัปดาห์ใช้พลังงานมากแต่เมื่อนำเมทิลไพรโรลิดินอนมาแยกออกจากเมทานอลในหอกู้คืนกลับมีการใช้พลังงานน้อยที่สุด ส่วนของกลีเซอรอลในหอกลับสัปดาห์ใช้พลังงานน้อยแต่ในหอกู้คืนจำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูงเพื่อแยกออกจากเมทานอลเนื่องจากกลีเซอรอลมีจุดเดือดสูงกว่าเมทานอลมากส่งผลให้สารละลายในหอกู้คืนมีจุดเดือดเพิ่มมากขึ้นจึงต้องใช้พลังงานในการกลั่นมากขึ้น และเตตระเอทิลีนไกลคอลใช้พลังงานสูงที่สุดในกระบวนการกลั่นสัปดาห์ เนื่องจากต้องใช้พลังงานมากในหอกู้คืนเพื่อแยกเตตระเอทิลีนไกลคอลที่มีจุดเดือดสูงออกจากเมทานอลซึ่งมีจุดเดือดที่ต่ำกว่ากันมากส่งผลให้สารละลายในหอกู้คืนมีจุดเดือดเพิ่มมากขึ้นจึงต้องใช้พลังงานในการกลั่นมากขึ้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแอนเทรเนอร์ที่มีความเหมาะสมในการแยกเมทิลลัลออกจากเมทานอลแทนโดเมทิลฟอร์มาไมด์มีทั้งหมด 5 ชนิดดังนี้ โพรไพลีนไกลคอล เมทิลโพรไพลีนไกลคอล กลีเซอรอล เอทานอลาไมน์ และเอทิลีนไกลคอล ตามลำดับ ส่วนเตตระเอทิลีนไกลคอลไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นแอนเทรเนอร์แทนโดเมทิลฟอร์มาไมด์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลตามต้องการ (ร้อยละ 99.9) โดยใช้เอนเทรเนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำ 6 ชนิด (เอทานอล ไมด์ เมทิลไพรโรลิดินอน เอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล เตตระเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนไกลคอล) และประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัด เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ดีเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นเอนเทรเนอร์ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

5.1.1 ศึกษากระบวนการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการกลั่นสกัด

การแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลที่เป็นอะซิโทรปกันที่จุดเดือดต่ำสุดด้วยวิธีการกลั่นสกัดสามารถแยกเมทิลลัลออกมาได้ความบริสุทธิ์ตามที่ต้องการ ซึ่งการกลั่นสกัดเป็นวิธีที่เดิมตัวทำละลาย (เอนเทรเนอร์) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมดุลไอและของเหลวของสารผสมอะซิโทรปเพื่อให้กลั่นแยกได้ความบริสุทธิ์ของสารที่ต้องการได้สูงขึ้น โดยจากผลของแผนที่เส้นโค้งรีซีตวลตัวทำละลายที่เลือกมาทั้ง 6 ชนิด สามารถนำมาใช้เป็นเอนเทรเนอร์ในกระบวนการกลั่นสกัดได้ทั้งหมด

5.1.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลด้วยวิธีการกลั่นสกัด โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

ในส่วนโครงสร้างหอกกลั่นสกัด สมการทำนายความบริสุทธิ์ของเมทิลลัลสำหรับเอนเทรเนอร์ทุกชนิดมีค่า R^2 และ $R^2_{adjusted}$ เข้าใกล้ 1 ซึ่งเป็นค่าที่มีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ จำนวนชั้นของหอกกลั่นสกัด ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์ และชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรปมีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ในส่วนปฏิบัติการหอกกลั่นสกัดทั้งสมการทำนายร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล และสมการทำนายพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับเอนเทรเนอร์ทุกชนิดมีค่า R^2 และ $R^2_{adjusted}$ เข้าใกล้ 1 ทั้งหมดซึ่งถือเป็นค่าที่มีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโทรป และอัตราการป้อนกลับเชิงมวล มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัด

5.1.3 ประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลของ เอนเทอร์เนอร์ที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ

ในกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอนเทอร์เนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำทั้ง 6 ชนิด พบว่า โพรไพลีนไกลคอลใช้พลังงานในกระบวนการกลั่นสกัดน้อยที่สุด รองลงมา เป็น เมทิลไพรโรลิดินอน กลีเซอรอล เอทานอลาไมน์ เอทิลีนไกลคอล และเตตระเอทิลีนไกลคอล ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นเอนเทอร์เนอร์ พบว่ามีเพียงเตตระเอทิลีนไกลคอลที่ใช้พลังงานมากกว่าไดเมทิลฟอร์มาไมด์ เพราะเตตระเอทิลีนไกลคอลมีจุดเดือดสูงมากส่งผลให้ สารผสมในหอกลั่นมีจุดเดือดสูงขึ้น การแยกเตตระเอทิลีนไกลคอลออกจากเมทานอลในหอกลั่นจึงใช้พลังงานมากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เอนเทอร์เนอร์ที่มีความเป็นพิษต่ำที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ กลั่นสกัดเพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล คือ โพรไพลีนไกลคอล เมทิลไพรโรลิดินอน กลีเซอรอล เอทานอลาไมน์ และเอทิลีนไกลคอล

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการกลั่นสกัด เพื่อแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอลโดยใช้เอนเทอร์เนอร์ที่ต่างกัน
2. ควรศึกษาเพิ่มเกี่ยวกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์แอกติวิตีหลายวิธี
3. ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของสารที่เราต้องและพลังงานที่ต้องใช้ เช่น ความดันของหอกลั่นสกัด และอุณหภูมิของสารผสม เป็นต้น
4. ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการออกแบบการควบคุมกระบวนการ
5. ควรศึกษาเพิ่มเติมการใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง และความน่าเชื่อถือ

เอกสารอ้างอิง

- กรุงเทพเคมี, (2561). Propylene-Glycol-โพรไพลีน-ไกลคอล. สืบค้นเมื่อ 25 ตุลาคม 2561, จาก <https://krungthepchemi.com>.
- กาญจนา ชันทกะพันธ์ และ เยาวภา สุขพรมมา, (2559). การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบฟีนอลิก และ ฟลาโวนอยด์จากขิง โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง. วารสาร มฉก. วิชาการ, 20(39), 69-80.
- เคมีอุตสาหกรรม, (2561). กลีเซอริน/กลีเซอรอล. สืบค้นเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2561, จาก <https://www.siamchemi.com>.
- จรัล ทรัพย์เสรี, (2552). DOE ตอน Central Composite Design. Production, 16(145), 72-74.
- ชลธิรา บุญฟุ้ง, (2553). การศึกษาระบบดูดซับแบบสลับความดันสำหรับการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล-น้ำ โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง. ปรินญาณิพนธ์. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ณัฐชา เพ็ชรยิ้ม, (2553). การจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี: การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบกระบวนการ (Chemical Engineering Process Simulation: Using Simulation Software for Process esign). วารสารวิศวกรรม ราชมนักลธัญบุรี, 5(10), 1-4.
- บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด, (2553). Methanol (เมทิล แอลกอฮอล์ (เมทานอล)) สืบค้นเมื่อ 18 ตุลาคม 2561, จาก <https://bit.ly/2lJoUm>.
- บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด, (2553). Mono Ethanolamine (ETA-MEA) (โมนอ เอทานอลาไมน์). สืบค้นเมื่อ 23 ตุลาคม 2561, จาก <https://bit.ly/2GHEKLU>.
- บริษัท ศักย์พิรุณณ์ เคมีคอล จำกัด, (2561). Dimethylformamide (DMF). สืบค้นเมื่อ 22 ตุลาคม 2561, จาก <http://sakpiroon.com/p/28>.
- บริษัท อีดีเอส อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด, (2014). Molecular Sieve (โมเลกุลลาร์ ซีฟ). จาก <https://www.nanasupplier.com>.
- พจนารถ สุวรรณรุจิ, (2559). การย้อมผ้าใยสังเคราะห์ PLA ด้วยสีครามธรรมชาติ. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ เกียรติคุณ และนิธิยา รัตนานนท์, (2553). Glycerol / กลีเซอรอล. สืบค้นเมื่อ 25 ตุลาคม 2561, จาก <http://www.foodnetworksolution.com>.
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (2559). บทที่ 9 การวิเคราะห์การถดถอย. นครปฐม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
- เลอสรวง เมฆสุด, (2552). การกลั่น การดูดซึม และการแยกสกัด. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วงศ์ ปวารจารย์ และ อาทิวรรณ โชติพิฤกษ์, (2558). หลักเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวิศวกรรมเคมี. เลขที่ 1/129 ถนนรามอินทรา มินบุรี กรุงเทพฯ 10510. บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

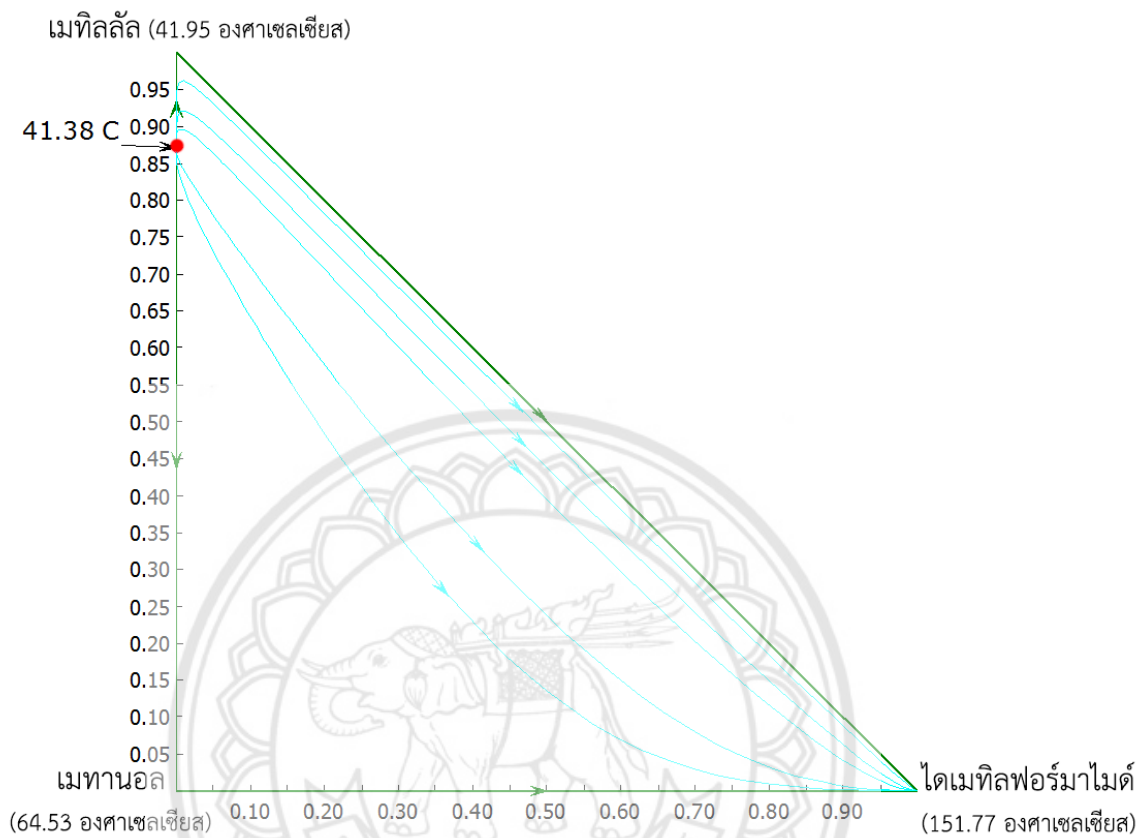
- วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, (2555). **Ethylene Glycol**. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2561, จาก http://www.summacheeva.org/index_thaitox_ethylene_glycol.htm.
- สุจิตรา ดวงศรี, (2554). **สมดุลวัฏภาคของเหลว-ของเหลวของของผสมสามองค์ประกอบสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล**. ปรียญานพนธ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์ และ เดโซ ชุนนคร, (2551). **เอทานอล:พลังงานทดแทนในวิถีพอเพียง**. ปรียญานพนธ์. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- สันติ พุ่มกระจ่าง, (2552). **การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดตั้งหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Statistical Analysis for Dual Response Surface of Hard Disk Drive Head Alignment Process)**. ปรียญานพนธ์. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สุวดี นำพาเจริญ และ ชลธิชา จำรัสพร, (2558). **การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม: การใช้ค่า Adjust R-Squared และค่า Predicted R-Squared เพื่อปรับค่าความถูกต้องของจำนวนตัวแปร**. บริษัท โซลูชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด.
- อาภาภรณ์ จันท์ปรีกษ์ พัทธราภรณ์ ดำนิล และ อมรรัตน์ หงษ์ผวย, (2561). **ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ (โรบัสต้า/อะราบิก้า) ด้วยเฮกเซน โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- EASTMAN, (2561). **N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP)**. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2561, จาก <https://bit.ly/2L5NaRx>.
- IEnergyGuru, (2015). **การกลั่น (DISTILLATION)**. สืบค้นเมื่อ 4 ตุลาคม 2561, จาก <https://ienergyguru.com>.
- Jan-Olver Weidert, Jakob Bourger & Mario Renner, (2016). **Development of an Integrated Reaction-Distillation Process for the Production of Methylal**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 575-582.
- J.D. Seader & Ernest J.Henley, (1998). **Separation Process Principles. Acid-free paper**. United States of America.
- L. Jimé'nez, O.M. Wanhshafft & V.Julka, (2001). **Analysis of Residue Curve Maps of Reactive and Extractive Distillation Units**. Computers and Chemical Engineering, 635-642.
- Safety Data Sheet, (2013). **Tetraethylene Glycol**. DOW CHEMICAL COMPANY LIMITED, United Kingdom. สืบค้นเมื่อ 23 ตุลาคม 2561, จาก <https://www.dow.com>.
- Seinosuke Satoh & Yukio Tanigawa, (2002). **PROCESS FOR PRODUCING METHYLAL**. United States Patent.

- Shirui Sun, Liping Lu, Shun an Wei & Weifeng Shen Chemstations, (2018). **Extractive Distillation: Advances in Conceptual Design**. solvent selection, and separation strategies, Chinese Journal of Chemical Engineering, 26(10), 2040-2047.
- UNION PEDIA , (2561). Dimethylformamide; DMF. สืบค้นเมื่อ 12 ตุลาคม 2561, จาก <https://th.unionpedia.org/ไดเมทิลฟอร์มามาร์ไมด์>
- Verschuere, K, (1993). **Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals**. New York, Van Nostrand Reinhold Company.
- Warisa Wisittipanich, (2015). **Computer Application for Industrial Engineering: Minitab**. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
- William L. Luyben, (1992). Editor. **Practical Distillation Control**. United States of America
- W.S. Winston Ho & Kamalesh K. Sirkar, (1992). **Membrane Handbook**. New York.
- Yichun Dong, Cheng Dai & Zhigang Lei, (2018). **Extractive Distillation of Methylal-Methanol Mixture Using Ethylene Glycol as Entrainer**. Science Direct, Fluid Phase Equilibria, 412(2018), 172-780. doi.org: 10.1016/j.fluid.2018.01.038.
- Yichun Dong, Cheng Dai & Zhigang Lei, (2018). **Extractive Distillation of Methylal-Methanol Mixture Using the Mixture of Dimethylformamide (DMF) And Ionic Liquid as Entrainers**. Fuel, 216(Fuel 87 2008), 503-512. doi.org: 10.1016/j.fuel.2017.12.043.
- Zvorad R.Lazic, (2004). **Design of Experiments in Chemical Engineering: A Practical Guide**. Optimization Unitates of America.

ภาคผนวก ก
การใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นแอนเทนเนอร์ของ Y. Dong และคณะ



ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide; DMF)



รูปที่ ก.1 แผนที่เส้นโค้งรีซีตวลสำหรับใช้ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์เป็นแอนเทรเนอร์

ตารางที่ ก.1 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัลล์-เมทานอล โดยใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นเอนเทรเนอร์ของ Y. Dong และคณะ [7]

หอ (Columns)	หอกลิ้นสกัด (Extractive Distillation Columns; EDC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัด	18
	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรอป	12
	ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	4
	อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.1
	อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	95
	หอกู้คืนเอนเทรเนอร์ (Entrainer Recovery Column; ERC)	
	ความดัน (atm)	1
	จำนวนชั้นของหอกู้คืน	10
	ชั้นที่ป้อนสารผสม	5
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.9	
อัตราการกลั่นก้นหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	100	
สายการไหล (Streams)	สายป้อนสารผสมอะซิโโทรอป (Azeotrope Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
	เมทิลลัลล์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	25
	เมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	1
	สายป้อนสารเอนเทรเนอร์ (Entrainer Feed Stream)	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25
	ความดัน (atm)	1
	อัตราการไหลขององค์ประกอบ (Component Flow Rate)	
ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	100	

ตารางที่ ก.2 ผลพลังงานรวมของกระบวนการกลั่นสกัดสำหรับการแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล โดยใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นแอนเทรเนอร์ของ Y. Dong และคณะ [7]

สายการไหล (Streams)	ยอดหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.92
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.999
	ก้นหอ กลั่นสกัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	127.33
		เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.001
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	0.047
	ยอดหอกู้คืน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	0.952
		เศษส่วนมวลของไดเมทิลฟอร์มาไมด์	63.73
	ก้นหอกู้คืน (Recovery Stream)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	0.973
		เศษส่วนมวลของเมทานอล	151.37
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	trace
เศษส่วนมวลของเมทานอล		0.001	
พลังงาน ความร้อน (Heat Duty)	หอกลั่นสกัด	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	0.999
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-74,088
	หอกู้คืน	เครื่องความแน่น (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	101,016
		หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-15,804
	พลังงานความร้อนรวม	หม้อต้ม (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	20,736
	เครื่องแลกเปลี่ยนความ ร้อน (Cooler)	อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส)	122,540
		อุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส)	151.37
		พลังงานความร้อน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	25
			พลังงานความร้อน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)

ภาคผนวก ข
ผลการจำลองกระบวนการกลั่นสกัดจากโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus V8.8



ข.1 เอทานอลาไมน์ (Ethanolamine)

ตารางที่ ข.1 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนชั้นหอกลับสกัด

ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป		6
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
จำนวนชั้นหอกลับสกัด	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
7	0.989	109,694
8	0.996	109,431
9	0.999	109,325
10	1	109,286
11	1	109,275
12	1	109,273
13	1	109,272
14	1	109,272

ตารางที่ ข.2 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		10
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป		6
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
2	0.998	111,164
3	1	109,302
4	1	109,286
5	0.999	109,315

ตารางที่ ข.3 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทโรป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		10
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		4
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทโรป		1
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทโรป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
5	0.999	109,295
6	1	109,286
7	0.999	109,292
8	0.998	109,344
9	0.993	109,578

ตารางที่ ข.4 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราป้อนกลับเชิงมวล

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		10
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทโรป		6
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทโรป		1
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.1	0.998	78,056.7
0.2	0.999	81,389.5
0.3	0.999	84,876.4
0.4	0.999	88,364.5
0.5	0.999	91,852.2
0.6	1	95,339.3
0.7	1	98,826.1
0.8	1	102,313
0.9	1	105,799
1	1	109,286

ตารางที่ ข.5 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	10	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	6	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	0.2	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.25	0.996	52,518.9
0.50	0.998	61,369.4
0.75	0.999	71,170.6
1	0.999	81,389.5
1.25	0.999	91,829.7
1.50	0.999	102,400
1.75	0.999	113,053
2	1	123,762

ตารางที่ ข.6 ผลการจำลองกระบวนการของอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	10	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	6	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	0.2	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
25	0.999	71,170.6
50	0.998	66,204.9
75	0.997	6,1224.7
100	0.992	57,674

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นเอนเทรเนอร์

	โครงสร้างหอกลั่นสกัด		ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด	
จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	12		12	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	9		9	
ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	6		6	
อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94		94	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25		125	
ความดันของเอนเทรเนอร์ (atm)	1		1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	0.5		0.6	
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.8		1.1429	
อุณหภูมิของสารผสมอะซิโโทรป (องศาเซลเซียส)	25		25	
ความดันของสารผสมอะซิโโทรป (atm)	1		1	
	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9899	126.184	41.9812	130.662
ความดัน (atm)	1	1	1	1
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-62,889.1	82,311.5	-74,828.8	80,900.8
อัตราการไหลมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)				
เมทิลลัล	93.877	0.243	93.902	0.218
เมทานอล	0.123	5.757	0.098	5.782
เอทานอลาไมน์	Trace	50	trace	60
เศษส่วนมวล (Mass Fraction)				
เมทิลลัล	0.999	0.004	0.999	0.003
เมทานอล	0.001	0.103	0.001	0.088
เอทานอลาไมน์	trace	0.893	trace	0.909

ตารางที่ ข.8 ผลการจำลองหาสถานะของหอกู้คืนสำหรับเอทานอลาไมน์

อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1								
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	7					6			
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	5	6	2	3	4	5
เศษส่วนมวลของเมทิลลิต	0.979	0.997	0.997	0.994	0.986	0.979	0.995	0.994	0.986
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	18,122	19,817	19,838	19,606	18,874	18,093	19,670	19,570	18,869
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.2								
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	7					6			
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	5	6	2	3	4	5
เศษส่วนมวลของเมทิลลิต	0.981	0.998	0.998	0.995	0.988	0.98	0.996	0.995	0.988
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	19,697	21,198	21,207	21,064	20,451	19,663	21,099	21,032	20,445
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.4								
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	7					6			
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรป	2	3	4	5	6	2	3	4	5
เศษส่วนมวลของเมทิลลิต	0.982	0.998	0.999	0.996	0.99	0.982	0.997	0.996	0.99
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	21,250	22,543	22,544	22,470	21,971	21,218	22,487	22,445	21,964
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.6								
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	7					6			
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	5	6	2	3	4	5
เศษส่วนมวลของเมทิลลิต	0.984	0.999	0.999	0.997	0.991	0.984	0.997	0.997	0.991
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	22,783	23,868	23,863	23,843	23,449	22,745	23,850	23,826	23,443
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.8								
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	7					6			
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	5	6	2	3	4	5
เศษส่วนมวลของเมทิลลิต	0.985	0.999	0.999	0.998	0.992	0.985	0.998	0.997	0.992
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	24,295	25,184	25,174	25,196	24,896	24,262	25,197	25,186	24,890

ข.2 เมทิลไพโรลิดินอน (N-methyl-2-pyrrolidinone; NMP)

ตารางที่ ข.9 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนชั้นหอกลับสกัด

ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	10	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
จำนวนชั้นหอกลับสกัด	เศษส่วนมวลของเมทิลลัลล์	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
15	0.989	95407.9
16	0.993	94815
17	0.995	94425.7
18	0.996	94176.2
19	0.997	94021.9
20	0.997	93931.7
21	0.998	93882.5
22	0.998	93857.4
23	0.998	93845.1
24	0.998	93839.3
25	0.998	93836.6

ตารางที่ ข.10 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	22	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	10	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัลล์	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
2	0.997	97372.7
3	0.998	93850.4
4	0.998	93857.4
5	0.998	93899.7
6	0.997	93952.7
7	0.997	94017.8

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		22
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรัป		10
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโทรัป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
8	0.996	94097.3
9	0.996	94194

ตารางที่ ข.11 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรัป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		22
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์		4
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโทรัป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรัป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
5	0.993	94706
6	0.995	94406
7	0.996	94196.7
8	0.997	94045.5
9	0.997	93935.1
10	0.998	93857.4
11	0.998	93810.3
12	0.998	93797.3
13	0.998	93827.3

ตารางที่ ข.12 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราป้อนกลับเชิงมวล

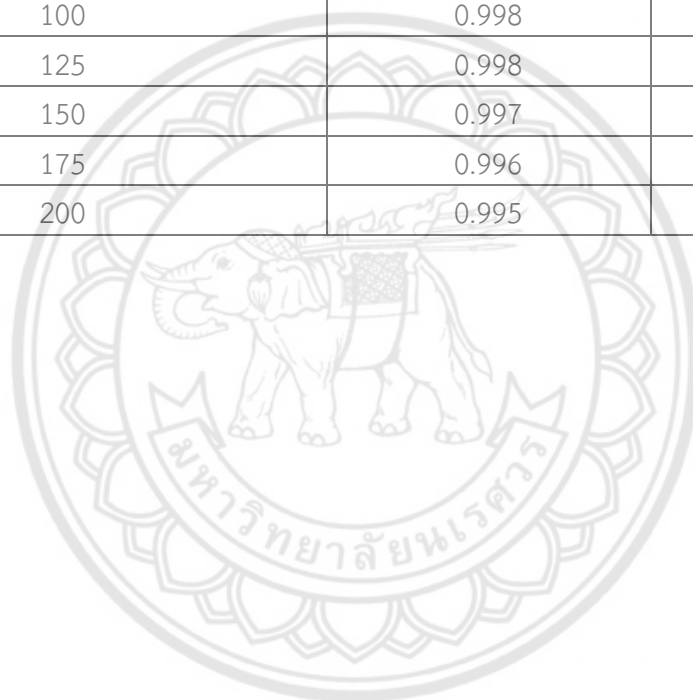
จำนวนชั้นหอกลับสกัด		22
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป		10
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป		1
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.2	0.985	67473.4
0.4	0.99	73967.5
0.6	0.994	80476
0.8	0.996	87100
1	0.998	93857.4
1.2	0.999	100704
1.4	0.999	107600
1.6	0.999	114523
1.8	0.999	121462
2	1	128411

ตารางที่ ข.13 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		22
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป		10
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1.4
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.25	0.998	91349.7
0.5	0.999	96031.4
0.75	0.999	101530
1	0.999	107600
1.25	0.999	114101
1.5	0.999	120939
1.75	0.999	128047

ตารางที่ ข.14 ผลการจำลองกระบวนการของอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	22	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	10	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1.4	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	0.75	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
25	0.999	101530
50	0.999	98422.2
75	0.999	95156.7
100	0.998	91735.2
125	0.998	88168.8
150	0.997	84478.8
175	0.996	80696.7
200	0.995	7686.3



ตารางที่ ข.15 ผลการทดลองโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์

	โครงสร้างหอกลั่นสกัด		ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด	
จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	28		28	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	14		14	
ชั้นที่ป้อนสารแอนเทรเนอร์	4		4	
อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94		94	
อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25		94.132	
ความดันของแอนเทรเนอร์ (atm)	1		1	
อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	0.5		0.3	
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.2		1.269	
อุณหภูมิของสารผสมอะซิโโทรป (องศาเซลเซียส)	25		25	
ความดันของสารผสมอะซิโโทรป (atm)	1		1	
	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9696	106.992	41.982	94.9533
ความดัน (atm)	1	1	1	1
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-76767.2	88946.7	-79236.3	83898.7
อัตราการไหลมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)				
เมทิลลัล	93.935	0.185	93.899	0.221
เมทานอล	0.065	5.815	0.101	5.779
เมทิลไพรโรลิดินอน	trace	50	trace	30
เศษส่วนมวล (Mass Fraction)				
เมทิลลัล	0.999	0.003	0.999	0.006
เมทานอล	696 PPM	0.104	0.001	0.161
เมทิลไพรโรลิดินอน	7 PPB	0.893	4 PPB	0.833

ตารางที่ ข.16 ผลการจำลองหาสภาวะของหอกู้คืนสำหรับเมทิลไพรโรลิดีนอน

อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.992	0.998	0.994	0.991	0.993	0.983
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	12599.7	13638.1	12916.9	12443.1	12705.3	11421.6
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.4					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.993	0.999	0.997	0.992	0.995	0.984
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	14116.1	15043.4	14684.4	13943.4	14425	12844.5
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.6					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.994	0.999	0.998	0.993	0.996	0.984
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	15584.2	16372.3	16159	15402.1	159077	14247.7
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.8					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.995	0.999	0.998	0.994	0.997	0.985
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	17019.8	17683.5	17543.3	16833.5	17309.3	15638.8
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.995	1	0.999	0.995	0.997	0.986
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	18427.1	18987.3	18889.9	18239.3	18674.1	17018
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.2					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.996	1	0.999	0.995	0.998	0.986
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	1914.5	20287.4	20217.7	19627.4	20018.9	18388.6

ข.3 เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol)

ตารางที่ ข.17 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนชั้นหอกลับสกัด

ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป		11
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		2
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
จำนวนชั้นหอกลับสกัด	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
15	0.989	138810
16	0.992	137847
17	0.995	137224
18	0.996	136815
19	0.997	136545
20	0.998	136370
21	0.998	136258
22	0.998	136191
23	0.999	136151
24	0.999	136129
25	0.999	136117
26	0.999	136110
27	0.999	136107

ตารางที่ ข.18 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	23	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	11	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	2	
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
2	0.998	140662.9
3	0.999	136166.6
4	0.999	136151.3
5	0.999	136144
6	0.999	136135.7
7	0.999	136126.7
8	0.999	136116.7
9	0.999	136106
10	0.999	136094.4

ตารางที่ ข.19 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	23	
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	10	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	2	
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
11	0.999	136094.4
12	0.999	136062.1
13	0.999	136053.8
14	0.999	136071.5
15	0.999	136120.7
16	0.998	136216.0
17	0.998	136399.2

ตารางที่ ข.20 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราป้อนกลับเชิงมวล

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		23
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		10
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป		12
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป		1
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.2	0.978	76379.3
0.4	0.982	82922.9
0.6	0.987	89334.9
0.8	0.991	95710.7
1	0.994	102174.9
1.2	0.996	108779.0
1.4	0.997	115503.1
1.6	0.998	122309.8
1.8	0.999	129169.2
2	0.999	136062.1
2.22	0.999	142976.7
2.4	0.999	149905.7
2.6	0.999	156844.5

ตารางที่ ข.21 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		23
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		10
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป		12
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		2
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.25	0.999	113562.7
0.5	0.999	120091.6
0.75	0.999	127687.8
1	0.999	136062.1
1.25	0.999	145025.4
1.5	0.999	154443.1

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	23	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	10	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	12	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	2	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1.75	0.999	164216.0
2	0.999	174268.9

ตารางที่ ข.22 ผลการจำลองกระบวนการของอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	23	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	10	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	12	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	2	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	0.25	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
25	0.999	113562.7
50	0.999	112098.6
75	0.999	110580.9
100	0.999	109002.4
125	0.999	107356.8
150	0.999	105638.9
175	0.999	103844.7
200	0.997	80798.4

ตารางที่ ข.23 ผลการทดลองโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์

	โครงสร้างหอกลั่นสกัด		ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด	
จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	26		26	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	18		18	
ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	12		12	
อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94		94	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	175		125	
ความดันของเอนเทรเนอร์ (atm)	1		1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	0.25		0.25	
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	2		1.7155	
อุณหภูมิของสารผสมอะซิโโทรป (องศาเซลเซียส)	25		25	
ความดันของสารผสมอะซิโโทรป (atm)	1		1	
	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9669	93.668	41.9817	93.6671
ความดัน (atm)	1	1	1	1
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-104665	103745	-94826.6	97434.5
อัตราการไหลมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)				
เมทิลลัล	93.942	0.178	93.9	0.22
เมทานอล	0.058	5.822	0.1	5.78
เอทิลีนไกลคอล	trace	25	trace	25
เศษส่วนมวล (Mass Fraction)				
เมทิลลัล	0.999	0.006	0.999	0.007
เมทานอล	613 PPM	1.88	0.001	0.186
เอทิลีนไกลคอล	trace	0.806	trace	0.806

ตารางที่ ข.24 ผลการจำลองหาสถานะของหอกู้คืนสำหรับเอทิลีนไกลคอล

อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2					
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.996	0.999	0.995	0.995	0.995	0.988
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	13913.2	14250.7	13824.6	13751.5	13798.4	12930
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.4					
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.997	0.999	0.997	0.996	0.997	0.988
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	15322.1	15575.3	15400.9	15216.5	15318.8	14376.3
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.6					
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสมเอซีโอโทรป	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.997	1	0.998	0.996	0.997	0.989
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	16703.5	16878.5	16804.4	16608.5	16734.2	15801.2
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.8					
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.997	1	0.999	0.997	0.998	0.989
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	18065.2	18176.8	18153.9	17982.7	18098.8	17215.3
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1					
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.998	1	0.999	0.997	0.998	0.99
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	19413.3	19473	19479.8	19342.9	19441.1	18618.9
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.2					
จำนวนชั้นของหอกลับคืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.998	1	0.999	0.997	0.998	0.99
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	20751.3	20768.1	20793.9	20693.8	20771.5	20014.9

ข.4 กลีเซอรอล (Glycerol)

ตารางที่ ข.25 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนชั้นหอกลิ้นสกัต

ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
จำนวนชั้นหอกลิ้นสกัต	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
8	0.989	101,384
9	0.996	101,190
10	0.999	101,108
11	0.999	101,077
12	1	101,068
13	1	101,065
14	1	101,064
15	1	101,064
16	1	101,064

ตารางที่ ข.26 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

จำนวนชั้นหอกลิ้นสกัต	11	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
2	1	101,677
3	1	101,068
4	0.999	101,077
5	0.999	101,096
6	0.998	101,131

ตารางที่ ข.27 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		11
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์		4
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
5	0.999	101,103
6	0.999	101,081
7	0.999	101,077
8	0.999	101,085
9	0.998	101,137
10	0.991	101,333

ตารางที่ ข.28 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราป้อนกลับเชิงมวล

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		11
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป		7
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.2	0.999	73148.5
0.4	0.999	80144.8
0.6	0.999	87125.5
0.8	0.999	94102
1.0	0.999	101077
1.2	0.999	108053

ตารางที่ ข.29 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	11	
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	0.2	
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.25	0.992	50,697
0.50	0.996	56,873
0.75	0.998	64,507.7
1	0.999	73,148.5
1.25	0.999	82,611.6
1.50	0.999	92,791.4
1.75	0.999	103,616
2	0.999	115,029

ตารางที่ ข.30 ผลการจำลองกระบวนการของอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	11	
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	0.2	
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
25	0.999	73,148.5
50	0.998	67,737.1
75	0.996	62,153.9
100	0.993	57,319.7
125	0.992	54,130.3
150	0.991	51,125.7
175	0.989	48,266.6
200	0.987	45,303.7

ตารางที่ ข.31 ผลการทดลองโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเอนเทรเนอร์

	โครงสร้างหอกลั่นสกัด		ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด	
จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	12		12	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	7		7	
ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	5		5	
อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94		94	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25		120.9596	
ความดันของเอนเทรเนอร์ (atm)	1		1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1		0.5	
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2		0.9788	
อุณหภูมิของสารผสมอะซิโโทรป (องศาเซลเซียส)	25		25	
ความดันของสารผสมอะซิโโทรป (atm)	1		1	
	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.9981	137.768	41.9951	113.507
ความดัน (atm)	1	1	1	1
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-41947.5	72095.3	-69158.8	72242.3
อัตราการไหลมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)				
เมทิลลัล	93.853	0.267	93.862	0.258
เมทานอล	0.147	5.733	0.138	5.742
กลีเซอรอล	trace	100	trace	50
เศษส่วนมวล (Mass Fraction)				
เมทิลลัล	0.998	0.003	0.999	0.005
เมทานอล	0.002	0.054	0.001	0.103
กลีเซอรอล	trace	0.943	trace	0.893

ตารางที่ ข.32 ผลการจำลองหาสถานะของหอกู้คืนสำหรับกลีเซอรอล

อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.1					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	1	1	0.998	0.999	0.998	0.997
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	29827.9	29831.8	29106.9	29760.4	29078.8	28230.8
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	1	1	0.999	0.999	0.999	0.997
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	30510.8	30492.7	30148.2	30472.9	30104.9	29011.4
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.3					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโอรอป	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	1	1	0.999	0.999	0.999	0.997
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	31190.9	31147.9	31001.2	31182.7	30961	29486.9
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.4					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	1	1	0.999	1	0.999	0.997
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	31867.6	31804.1	31786.6	31890	31748	30559.3
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.5					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	1	1	0.999	1	0.999	0.997
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	32541.8	32461.4	32536.1	32595.8	32502.5	31327.9
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.6					
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	1	1	0.999	1	0.999	0.997
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	33213.9	33119.8	33266.1	33299.8	33239.8	32093.1

ข.5 เตตระเอทีสินไกลคอลล

ตารางที่ ข.33 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนชั้นหอกลับน้สกัถ

ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซีโทรป		7
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซีโทรป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
จำนวนชั้นหอกลับน้สกัถ	เศษส่วนมวลของเมทิลลัถ	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
8	0.972	99,650.5
9	0.983	98,043.6
10	0.989	97,014.2
11	0.994	96,405.7
12	0.996	96,055.5
13	0.997	95,859.3
14	0.998	95,755.7
15	0.998	95,706
16	0.998	95,684.4
17	0.999	95,675.6
18	0.999	95,672.2
19	0.999	95,670.9
20	0.999	95,670.4
21	0.999	95,670.2
22	0.999	95,670.1
23	0.999	95,670.1

ตารางที่ ข.34 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	20	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1	
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป	1	
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
2	0.999	97537.6
3	0.999	95611.1
4	0.999	95670.4
5	0.998	95763.1
6	0.997	95907.5

ตารางที่ ข.35 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	20	
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	4	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1	
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป	1	
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
5	0.996	96066.3
6	0.998	95814.9
7	0.999	95670.4
8	0.999	95585.3
9	0.999	95534.9
10	1	95505.1
11	1	95488.2
12	1	95479.6
13	1	95477.3
14	1	95482.5
15	1	95510.8

ตารางที่ ข.36 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราป้อนกลับเชิงมวล

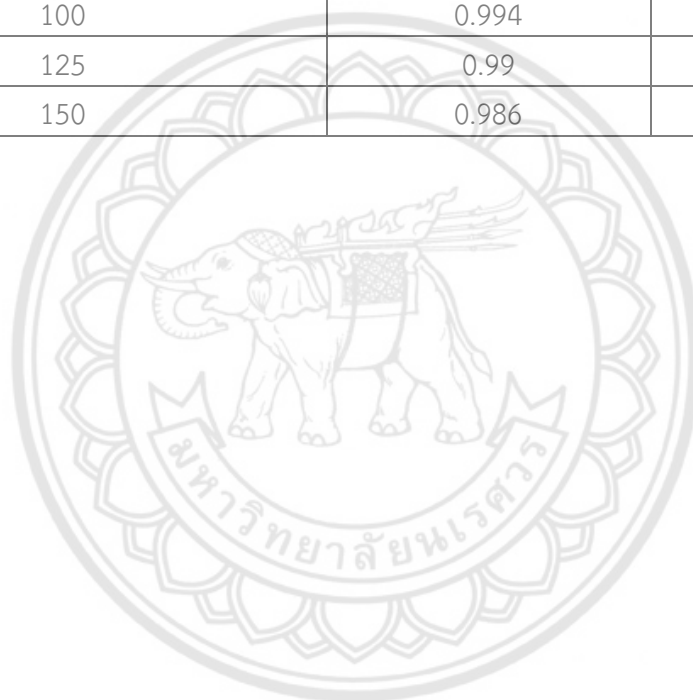
จำนวนชั้นหอกันสกัด		20
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป		9
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป		1
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.2	0.994	68081.1
0.4	0.997	74816.6
0.6	0.999	81673.2
0.8	0.999	88591.4
1	0.999	95534.9
1.2	1	102490
1.4	1	109450

ตารางที่ ข.37 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป

จำนวนชั้นหอกันสกัด		20
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป		9
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		0.6
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.25	0.995	63863.5
0.50	0.997	68784.2
0.75	0.998	74830.3
1	0.999	81673.2
1.25	0.999	89162
1.50	0.999	97209
1.75	0.999	105756
2	1	114760

ตารางที่ ข.38 ผลการจำลองกระบวนการของอุณหภูมิของเอนเทรเนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	20	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	9	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	0.6	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
25	0.999	81673.2
50	0.998	76856.4
75	0.997	71939.5
100	0.994	66998.3
125	0.99	62027.6
150	0.986	56895.8



ตารางที่ ข.39 ผลการทดลองโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์

	โครงสร้างหอกลั่นสกัด		ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด	
จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	16		16	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	7		7	
ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	3		3	
อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94		94	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25		25	
ความดันของเอนเทรเนอร์ (atm)	1		1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	1		0.9879	
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.6		0.8	
อุณหภูมิของสารผสมอะซิโโทรป (องศาเซลเซียส)	25		25	
ความดันของสารผสมอะซิโโทรป (atm)	1		1	
	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	42.0162	124.587	41.9959	124.228
ความดัน (atm)	1	1	1	1
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-55993.5	81768	-62913.1	88336.2
อัตราการไหลมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)				
เมทิลลัล	93.802	0.318	93.859	0.261
เมทานอล	0.198	5.682	0.141	5.739
เตตระเอทิลีนไกลคอล	trace	100	Trace	98.79
เศษส่วนมวล (Mass Fraction)				
เมทิลลัล	0.998	0.003	0.999	0.002
เมทานอล	0.002	0.054	0.001	0.055
เตตระเอทิลีนไกลคอล	trace	0.943	trace	0.943

ตารางที่ ข.40 ผลการจำลองหาสถานะของหอกู้คืนสำหรับเตตระเอทิลีนไกลคอล

อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.1					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลิล	1	1	0.999	1	0.999	0.998
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	55836.7	55791.7	54380.4	55674.8	54291.7	52210.1
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลิล	1	1	0.999	1	0.999	0.998
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	56532.4	56104.1	55790.5	56399.2	55661.3	53015.4
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.3					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโพรป	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลิล	1	1	1	1	0.999	0.998
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	57222.7	56691.4	56768.4	57122.4	56654.9	53819
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.4					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลิล	1	1	1	1	1	0.998
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	57910.5	57325	57605	57841.1	57504.1	54617.8
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.5					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลิล	1	1	1	1	1	0.998
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	58593.7	57962.3	58402.9	58558.1	58295.5	55419.4
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.6					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลิล	1	1	1	1	1	0.998
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	59273.4	58603.4	59175.6	59273	59069.5	56212.4

ข.6 โพรไพลีนไกลคอล (Propylene Glycol)

ตารางที่ ข.41 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนชั้นหอกลับสกัด

ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป	1	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
จำนวนชั้นหอกลับสกัด	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
8	0.998	102443
9	0.999	102317
10	1	102283
11	1	102273
12	1	102271
13	1	102270
14	1	102270

ตารางที่ ข.42 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	9	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตร์ป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโตร์ป	1	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
2	0.999	104142
3	1	102300
4	0.999	102317
5	0.999	102373
6	0.997	102480

ตารางที่ ข.43 ผลการจำลองกระบวนการของชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		9
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์		4
อัตราป้อนกลับเชิงมวล		1
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
5	0.999	102353
6	0.999	102319
7	0.999	102317
8	0.999	102344

ตารางที่ ข.44 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราป้อนกลับเชิงมวล

จำนวนชั้นหอกลับสกัด		9
ชั้นที่ป้อนเอนเทรเนอร์		4
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป		7
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป		1
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)		25
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.2	0.998	74453
0.4	0.999	81413.5
0.6	0.999	88378
0.8	0.999	95346.1
1.0	0.999	102317
1.2	0.999	109289
1.4	0.999	116262
1.6	0.999	123236
1.8	0.999	130211
2	0.999	137187

ตารางที่ ข.45 ผลการจำลองกระบวนการของอัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทโรป

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	9	
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทโรป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	0.4	
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	25	
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทโรป	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
0.25	0.995	57138
0.50	0.997	63738.4
0.75	0.998	72050.9
1	0.999	81413.5
1.25	0.999	91444
1.50	0.999	101904
1.75	0.999	112644
2	0.999	123568

ตารางที่ ข.46 ผลการจำลองกระบวนการของอุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์

จำนวนชั้นหอกลับสกัด	9	
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	4	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทโรป	7	
อัตราป้อนกลับเชิงมวล	0.4	
อัตราส่วนเอนเทอร์เนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทโรป	1	
อุณหภูมิของเอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
25	0.999	81413.5
50	0.998	75429.5
75	0.997	69079.8
100	0.994	62398.7
125	0.992	56361.1
150	0.985	52953.3
175	0.963	47126.4

ตารางที่ ข.47 ผลการทดลองโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นเอนเทรเนอร์

	โครงสร้างหอกลั่นสกัด		ปฏิบัติการหอกลั่นสกัด	
จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด	10		10	
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซีโอโทรม	7		7	
ชั้นที่ป้อนสารเอนเทรเนอร์	5		5	
อัตราการกลั่นยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	94		94	
อุณหภูมิของเอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	25		125	
ความดันของเอนเทรเนอร์ (atm)	1		1	
อัตราส่วนเอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซีโอโทรม	0.5		0.5732	
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.4		0.9545	
อุณหภูมิของสารผสมอะซีโอโทรม (องศาเซลเซียส)	25		25	
ความดันของสารผสมอะซีโอโทรม (atm)	1		1	
	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)	ยอดหอ (Distillate)	ก้นหอ (Bottom)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	42.0206	103.287	41.9901	108.243
ความดัน (atm)	1	1	1	1
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	-49007.9	63710.5	-68287.8	70259.3
อัตราการไหลมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)				
เมทิลลัล	93.789	3.648	93.876	3.561
เมทานอล	0.211	2.352	0.124	2.439
โพรไพลีนไกลคอล	trace	50	trace	57.32
เศษส่วนมวล (Mass Fraction)				
เมทิลลัล	0.998	0.065	0.999	0.056
เมทานอล	0.002	0.042	0.001	0.039
โพรไพลีนไกลคอล	3 PPB	0.893	trace	0.905

ตารางที่ ข.48 ผลการจำลองหาสถานะของหอกู้คืนสำหรับโพรไฟล์นไกลคอล

อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.2					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.993	0.996	0.99	0.991	0.99	0.991
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	16390.8	17087.3	15914.3	16086.6	15852	16087
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.4					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.994	0.998	0.993	0.992	0.993	0.986
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	17450.2	18305.1	17436.9	17127.2	17310.4	15947.1
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.6					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโพรป	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.994	0.999	0.995	0.993	0.994	0.986
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	18478	19287.1	18679.2	18148.1	18520.5	16954.9
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	0.8					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.995	0.999	0.996	0.993	0.995	0.987
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	19491.8	20198	19773	19150.9	19605.3	17952.7
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.996	0.999	0.997	0.994	0.996	0.987
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	20473.6	21080.4	20785.3	20137.8	20620.5	18940.5
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	1.2					
จำนวนชั้นของหอกู้คืน	5			4		3
ชั้นที่ป้อนสารผสม	2	3	4	2	3	2
เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	0.996	0.999	0.997	0.994	0.996	0.987
พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	21442.9	21948.7	21749	21111.3	21593.1	19921.6

ตารางที่ ข.49 อุณหภูมิของชั้นแต่ละชั้นก่อนป้อนเอนเทรเนอร์ในหอกลั่นสกัด

Tray	เอทานอล ลาไมน์ (Mass Reflux =1.1429) (องศาเซลเซียส)	เมทิลไพรโร ลิตินอน (Mass Reflux =1.2687) (องศาเซลเซียส)	เอทิลีน ไกลคอล (Mass Reflux =1.7155) (องศาเซลเซียส)	กลีเซอรอล (Mass Reflux =0.9788) (องศาเซลเซียส)	เตตระเอทิลีน ไกลคอล (Mass Reflux =0.8) (องศาเซลเซียส)	โพรไพลีน ไกลคอล (Mass Reflux =0.9545) (องศาเซลเซียส)
1 (Top)	42.1349	42.0195	41.9666	42.2214	42.2844	42.6407
2	42.3117	42.0872	41.9851	42.4811	42.6053	43.3153
3	42.465	42.1605	42.0076	42.8042	42.8862	43.9718
4	42.598	42.2399	42.0349	43.2071	43.1309	44.5958
5	42.7129	42.3262	42.0683	43.7086	43.3426	45.1704
6	42.8121	42.4199	42.1091	44.3277	43.5246	45.6809
7	42.8976	42.5217	42.1588	45.0773	43.68	46.1179
8	43.1588	42.6325	42.2197	47.0665	43.7722	49.056
9	43.7	42.7529	42.2942	50.6177	43.9629	53.5764
10	44.829	42.8839	42.3856	55.3598	44.358	58.2753
11	47.1359	43.0262	42.4979	59.5419	45.1744	
12	51.2616	43.1806	42.636	62.1415	46.8252	
13		43.3479	42.8061		49.8715	
14		43.5284	43.0158		54.286	
15		43.5373	43.2744		58.6397	
16		43.5555	43.5925		61.6116	
17		43.593	43.9821			
18		43.6698	44.4545			
19		43.8278	45.6344			
20		44.1531	47.9432			
21		44.8228	51.811			
22		46.1843	56.4767			
23		48.7837	60.2253			
24		52.881	62.443			
25		57.4128	63.5661			
26		60.8042	64.0999			
27		62.7433				
28		63.7171				

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Minitab 18.1



ค.1 เอทานอลาไมน์ (Ethanolamine)

ค.1.1 โครงสร้างหอกลิ้นสีกัด

ตารางที่ ค.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสีกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
จำนวนชั้นของหอกลิ้นสีกัด (x_1)	8	9	10	11	12
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซีโอโทรป (x_2)	5	6	7	8	9
ชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์ (x_3)	2	3	4	5	6

ตารางที่ ค.2 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัลและพลังงาน) โดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสีกัด

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	x_1 จำนวนชั้น หอกลิ้นสีกัด	x_2 ชั้นป้อน สารผสมอะซีโอโทรป	x_3 ชั้นป้อน แอนเทรเนอร์	y_1 เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	y พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	9 (-1)	6 (-1)	3 (-1)	0.998	82,351
2	11 (1)	6 (-1)	3 (-1)	1.00	82,268
3	9 (-1)	8 (1)	3 (-1)	0.989	82,870
4	11 (1)	8 (1)	3 (-1)	0.999	82,294
5	9 (-1)	6 (-1)	5 (1)	0.996	82,481
6	11 (1)	6 (-1)	5 (1)	0.999	82,307
7	9 (-1)	8 (1)	5 (1)	0.989	82,880
8	11 (1)	8 (1)	5 (1)	0.999	82,315
9	8 (-2)	7 (0)	4 (0)	0.988	82,887
10	12 (2)	7 (0)	4 (0)	1.00	82,242
11	10 (0)	5 (-2)	4 (0)	0.999	82,316
12	10 (0)	9 (2)	4 (0)	0.989	82,838
13	10 (0)	7 (0)	2 (-2)	0.998	83,635
14	10 (0)	7 (0)	6 (2)	0.996	82,469
15	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	82,320
16	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	82,320

ปัจจัย					
ลำดับ	x_1	x_2	x_3	y_1	y
การทดลอง	จำนวนชั้น หอกลับสกัด	ชั้นป้อน สารผสมอะซิโโทรป	ชั้นป้อน เอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
17	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	82,320
18	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	82,320
19	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	82,320
20	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	82,320

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของโครงสร้างหอกลับสกัดโดยเอทานอลาไมน์เป็นเอนเทอร์เนอร์

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000332	0.000037	418.45	0.000
Linear	3	0.000239	0.000080	903.42	0.000
x_1	1	0.000150	0.000150	1,703.94	0.000
x_2	1	0.000086	0.000086	971.55	0.000
x_3	1	0.000003	0.000003	34.77	0.000
Square	3	0.000064	0.000021	240.75	0.000
x_1^2	1	0.000039	0.000039	438.01	0.000
x_2^2	1	0.000039	0.000039	438.01	0.000
x_3^2	1	0.000006	0.000006	67.17	0.000
2-Way Interaction	3	0.000029	0.000010	111.18	0.000
$x_1 * x_2$	1	0.000028	0.000028	319.35	0.000
$x_1 * x_3$	1	0.000000	0.000000	1.42	0.261
$x_2 * x_3$	1	0.000001	0.000001	12.77	0.005
Error	10	0.000001	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000001	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000333			
$R^2 = 99.74\%$		Adjust $R^2 = 99.50\%$		Pred $R^2 = 97.84\%$	

ค.1.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

ค.1.2.1 ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ตารางที่ ค.4 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (x_4)	25	50	75	100	125
อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป (x_5)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล (x_6)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2

ตารางที่ ค.5 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัลและพลังงาน) โดยใช้เอทานอลาไมน์เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	x_4 อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	x_5 อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	x_6 อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	y_2 เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	y_3 พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	50 (-1)	0.8 (-1)	0.6 (-1)	0.999	81,847
2	100 (1)	0.8 (-1)	0.6 (-1)	0.998	70,406
3	50 (-1)	1.2 (1)	0.6 (-1)	0.999	95,724
4	100 (1)	1.2 (1)	0.6 (-1)	0.998	78,537
5	50 (-1)	0.8 (-1)	1.0 (1)	0.999	95,791
6	100 (1)	0.8 (-1)	1.0 (1)	0.999	84,338
7	50 (-1)	1.2 (1)	1.0 (1)	1.000	109,669
8	100 (1)	1.2 (1)	1.0 (1)	0.999	92,484
9	25 (-2)	1.0 (0)	0.8 (0)	0.999	102,315
10	125 (2)	1.0 (0)	0.8 (0)	0.998	73,647
11	75 (0)	0.6 (-2)	0.8 (0)	0.999	78,003
12	75 (0)	1.4 (2)	0.8 (0)	0.999	100,036
13	75 (0)	1.0 (0)	0.4 (-2)	0.998	74,756
14	75 (0)	1.0 (0)	1.2 (2)	1.000	102,656
15	75 (0)	1.0 (0)	0.8 (0)	0.999	88,717

ปัจจัย					
ลำดับ การ ทดลอง	x_4	x_5	x_6	y_2	y_3
	อุณหภูมิของ เอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วน เอนเทอร์เนอร์ต่อสาร ผสมอะซิโโททรอป	อัตราการ ป้อนกลับ เชิงมวล	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
16	75 (0)	1.0 (0)	0.8 (0)	0.999	88,717
17	75 (0)	1.0 (0)	0.8 (0)	0.999	88,717
18	75 (0)	1.0 (0)	0.8 (0)	0.999	88,717
19	75 (0)	1.0 (0)	0.8 (0)	0.999	88,717
20	75 (0)	1.0 (0)	0.8 (0)	0.999	88,717

ตารางที่ ค.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดโดยเอาทอโนลาโมนเป็น
เอนเทอร์เนอร์สำหรับเศษส่วนมวลของเมทิลลัล

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000005	0.000001	19.51	0.000
Linear	3	0.000005	0.000002	50.00	0.000
x_4	1	0.000002	0.000002	50.00	0.000
x_5	1	0.000000	0.000000	2.00	0.188
x_6	1	0.000003	0.000003	98.00	0.000
Square	3	0.000000	0.000000	4.53	0.030
x_4^2	1	0.000000	0.000000	12.57	0.005
x_5^2	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
x_6^2	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
2-Way Interaction	3	0.000000	0.000000	4.00	0.041
$x_4 * x_5$	1	0.000000	0.000000	4.00	0.073
$x_4 * x_6$	1	0.000000	0.000000	4.00	0.073
$x_5 * x_6$	1	0.000000	0.000000	4.00	0.073
Error	10	0.000000	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000000	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000006			
$R^2 = 94.61\%$		Adjust $R^2 = 89.76\%$		Pred $R^2 = 58.01\%$	

ค.1.2.2 พลังงาน

ตารางที่ ค.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติหอกลับสกัดโดยใช้เอทานอลาไมน์
เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับพลังงาน

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	2,101,597,674	233,510,853	3,640,083.38	0.000
Linear	3	2,083,924,311	694,641,437	10,828,416.42	0.000
x_4	1	82,0842,555	820,842,555	12,795,702.26	0.000
x_5	1	485,087,410	485,087,410	7,561,783.96	0.000
x_6	1	777,994,346	77,799,4346	12,127,763.04	0.000
Square	3	1,209,273	403,091	13,341.22	0.000
x_4^2	1	855,838	855,838	13,341.22	0.000
x_5^2	1	141,913	141,913	2,212.21	0.000
x_6^2	1	275	275	4.29	0.065
2-Way Interaction	3	16,464,089	5,488,030	85,550.14	0.000
$x_4 * x_5$	1	16,464,043	16,464,043	256,649.70	0.000
$x_4 * x_6$	1	14	14	0.22	0.650
$x_5 * x_6$	1	32	32	0.50	0.496
Error	10	641	64		
Lack-of-Fit	5	641	128	*	*
Pure Error	5	0	0		
Total	19	2101598315			
$R^2 = 100\%$		Adjust $R^2 = 100\%$		Pred $R^2 = 100\%$	

ค.2 เมทิลไพโรลิดินอน (N-methyl-2-pyrrolidinone; NMP)

ค.2.1 โครงสร้างหกเหลี่ยม

ตารางที่ ค.8 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้เมทิลไพโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์
สำหรับโครงสร้างหกเหลี่ยม

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
จำนวนชั้นของหกเหลี่ยม (x_1)	16	19	22	25	28
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโตน (x_2)	6	8	10	12	14
ชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์ (x_3)	3	4	5	6	7

ตารางที่ ค.9 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัส
และพลังงาน) โดยใช้เมทิลไพโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหกเหลี่ยม

ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย				
	x_1 จำนวนชั้น ของหอก หกเหลี่ยม	x_2 ชั้นที่ป้อน สารผสมอะซิโตน	x_3 ชั้นที่ป้อน แอนเทรเนอร์	y_1 เศษส่วนมวล ของเมทิลลัส	y พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	19 (-1)	8 (-1)	4 (-1)	0.997	89,341
2	25 (1)	8 (-1)	4 (-1)	0.997	89,310
3	19 (-1)	12 (1)	4 (-1)	0.997	89,346
4	25 (1)	12 (1)	4 (-1)	0.999	89,018
5	19 (-1)	8 (-1)	6 (1)	0.996	89,452
6	25 (1)	8 (-1)	6 (1)	0.996	89,421
7	19 (-1)	12 (1)	6 (1)	0.997	89,402
8	25 (1)	12 (1)	6 (1)	0.999	89,059
9	16 (-2)	10 (0)	5 (0)	0.994	89,811
10	28 (2)	10 (0)	5 (0)	0.998	89,153
11	22 (0)	6 (-2)	5 (0)	0.995	89,737
12	22 (0)	14 (2)	5 (0)	0.998	89,117
13	22 (0)	10 (0)	3 (-2)	0.998	89,122
14	22 (0)	10 (0)	7 (2)	0.998	89,246
15	22 (0)	10 (0)	5 (0)	0.998	89,166

ปัจจัย					
ลำดับ การ ทดลอง	x_1	x_2	x_3	y_1	y
	จำนวนชั้น ของหอ กลั่นสกัด	ชั้นที่ป้อน สารผสมอะซิโโทรป	ชั้นที่ป้อน เอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
16	22 (0)	10 (0)	5 (0)	0.998	89,166
17	22 (0)	10 (0)	5 (0)	0.998	89,166
18	22 (0)	10 (0)	5 (0)	0.998	89,166
19	22 (0)	10 (0)	5 (0)	0.998	89,166
20	22 (0)	10 (0)	5 (0)	0.998	89,166

ตารางที่ ค.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของโครงสร้างหอกลั่นสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอล
เป็นเอนเทอร์เนอร์

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000029	0.000003	24.64	0.000
Linear	3	0.000018	0.000006	46.15	0.000
x_1	1	0.000009	0.000009	68.28	0.000
x_2	1	0.000009	0.000009	68.28	0.000
x_3	1	0.000000	0.000000	1.90	0.199
Square	3	0.000008	0.000003	21.45	0.000
x_1^2	1	0.000006	0.000006	45.54	0.000
x_2^2	1	0.000003	0.000003	25.22	0.001
x_3^2	1	0.000000	0.000000	0.02	0.878
2-Way Interaction	3	0.000003	0.000001	6.32	0.011
$x_1 * x_2$	1	0.000002	0.000002	15.17	0.003
$x_1 * x_3$	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
$x_2 * x_3$	1	0.000001	0.000001	3.79	0.080
Error	10	0.000001	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000001	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000031			
R ² = 95.69%		Adjust R ² = 91.80%		Pred R ² = 63.92%	

ค.2.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

ค.2.2.1 ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ตารางที่ ค.11 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (x_4)	25	50	75	100	125
อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป (x_5)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล (x_6)	0.8	1.2	1.6	2	2.4

ตารางที่ ค.12 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัลและพลังงาน) โดยใช้เมทิลไพรโรลิดินอนเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับ

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	x_4 อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	x_5 อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	x_6 อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	y_2 เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	y_3 พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	50 (-1)	0.6 (-1)	1.2 (-1)	0.999	88,582
2	100 (1)	0.6 (-1)	1.2 (-1)	0.999	83,253
3	50 (-1)	1.2 (1)	1.2 (-1)	0.999	100,711
4	100 (1)	1.2 (1)	1.2 (-1)	0.998	90,208
5	50 (-1)	0.6 (-1)	2 (1)	1.000	116,348
6	100 (1)	0.6 (-1)	2 (1)	1.000	110,922
7	50 (-1)	1.2 (1)	2 (1)	1.000	128,468
8	100 (1)	1.2 (1)	2 (1)	1.000	117,618
9	25 (-2)	0.9 (0)	1.6 (0)	1.000	111,910
10	125 (2)	0.9 (0)	1.6 (0)	0.999	95,697
11	75 (0)	0.3 (-2)	1.6 (0)	1.000	96,392
12	75 (0)	1.5 (2)	1.6 (0)	1.000	114,876
13	75 (0)	0.9 (0)	0.8 (-2)	0.994	77,216
14	75 (0)	0.9 (0)	2.4 (2)	1.000	132,026
15	75 (0)	0.9 (0)	1.6 (0)	1.000	104,194

ปัจจัย					
ลำดับ การ ทดลอง	x_4	x_5	x_6	y_2	y_3
	อุณหภูมิของ เอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วน เอนเทอร์เนอร์ต่อสาร ผสมอะซิโโทโรป	อัตราการ ป้อนกลับ เชิงมวล	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
16	75 (0)	0.9 (0)	1.6 (0)	1.000	104,194
17	75 (0)	0.9 (0)	1.6 (0)	1.000	104,194
18	75 (0)	0.9 (0)	1.6 (0)	1.000	104,194
19	75 (0)	0.9 (0)	1.6 (0)	1.000	104,194
20	75 (0)	0.9 (0)	1.6 (0)	1.000	104,194

ตารางที่ ค.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกั่นสกัดโดยเมทิลไพรโรลิดีนอนเป็น
เอนเทอร์เนอร์สำหรับเศษส่วนมวลของเมทิลลัล

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000033	0.000004	10.29	0.001
Linear	3	0.000019	0.000006	17.37	0.000
x_4	1	0.000001	0.000001	1.57	0.239
x_5	1	0.000000	0.000000	0.17	0.685
x_6	1	0.000018	0.000018	50.38	0.000
Square	3	0.000014	0.000005	13.16	0.001
x_4^2	1	0.000000	0.000000	0.73	0.853
x_5^2	1	0.000000	0.000000	0.04	0.853
x_6^2	1	0.000013	0.000013	37.09	0.000
2-Way Interaction	3	0.000000	0.000000	0.35	0.791
$x_4 * x_5$	1	0.000000	0.000000	0.35	0.568
$x_4 * x_6$	1	0.000000	0.000000	0.35	0.568
$x_5 * x_6$	1	0.000000	0.000000	0.35	0.568
Error	10	0.000004	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000004	0.000001	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000037			
R ² = 90.26%		Adjust R ² = 81.49%		Pred R ² = 19.16%	

ค.2.2.2 พลังงาน

ตารางที่ ค.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติหอกลับสกัดโดยใช้เมทิลไพรโรลิดีนอน เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับพลังงาน

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	3,659,910,095	406,656,677	29,241.92	0.000
Linear	3	3,641,731,393	1,213,910,464	87,290.03	0.000
x_4	1	260,302,729	260,302,729	18,717.88	0.000
x_5	1	350,326,089	350,326,089	2,191.29	0.000
x_6	1	303,110,2575	3,031,102,575	217,960.93	0.000
Square	3	4,105,007	1,368,336	98.39	0.000
x_4^2	1	262,380	262,380	18.87	0.001
x_5^2	1	3,176,809	3,176,809	228.44	0.000
x_6^2	1	263,040	263,040	18.91	0.001
2-Way Interaction	3	14,073,695	4,691,232	337.34	0.000
$x_4 * x_5$	1	14,040,230	14,040,230	1,009.61	0.000
$x_4 * x_6$	1	24,553	24,553	1.77	0.213
$x_5 * x_6$	1	8,911	8,911	0.64	0.442
Error	10	139,066	13,907		
Lack-of-Fit	5	139,066	27,813	*	*
Pure Error	5	0	0		
Total	19	3,660,049,161			
$R^2 = 100\%$		Adjust $R^2 = 99.99\%$		Pred $R^2 = 99.97\%$	

ค.3 เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol)

ค.3.1 โครงสร้างหอกลับสกัด

ตารางที่ ค.15 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับสกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด (x_1)	18	20	22	24	26
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซีโโทรป (x_2)	10	12	14	16	18
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ (x_3)	4	6	8	10	12

ตารางที่ ค.16 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัลและพลังงาน) โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับสกัด

ปัจจัย					
ลำดับ	x_1	x_2	x_3	y_1	y
การทดลอง	จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซีโโทรป	ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	20(-1)	12(-1)	6(-1)	0.998	104,058
2	24 (1)	12(-1)	6(-1)	0.999	103,888
3	20(-1)	12(-1)	10 (1)	0.998	103,980
4	24 (1)	12(-1)	10 (1)	0.999	103,833
5	20(-1)	16 (1)	6(-1)	0.994	104,930
6	24 (1)	16 (1)	6(-1)	0.999	103,853
7	20(-1)	16 (1)	10 (1)	0.994	104,840
8	24 (1)	16 (1)	10 (1)	0.999	103,813
9	18 (-2)	14 (0)	8 (0)	0.994	105,024
10	26 (2)	14 (0)	8 (0)	0.999	103,784
11	22 (0)	14 (0)	4 (-2)	0.998	103,960
12	22 (0)	14 (0)	12 (2)	0.999	103,854
13	22 (0)	10 (-2)	8 (0)	0.998	103,977
14	22 (0)	18 (2)	8 (0)	0.995	104,802
15	22 (0)	14 (0)	8 (0)	0.999	103,913
16	22 (0)	14 (0)	8 (0)	0.999	103,913

ปัจจัย					
ลำดับ	x_1	x_2	x_3	y_1	y
การทดลอง	จำนวนชั้นของ หอกลิ้นสก็ด	ชั้นที่ป้อน สารผสมอะซีโโทโรป	ชั้นที่ป้อน เอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
17	22 (0)	14 (0)	8 (0)	0.999	103,913
18	22 (0)	14 (0)	8 (0)	0.999	103,913
19	22 (0)	14 (0)	8 (0)	0.999	103,913
20	22 (0)	14 (0)	8 (0)	0.999	103,913

ตารางที่ ค.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดโดยเอทีลินไกลคอลล
เป็นเอนเทอร์เนอร์

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000068	0.000008	91.98	0.000
Linear	3	0.000043	0.000014	174.17	0.000
x_1	1	0.000030	0.000030	369.72	0.000
x_2	1	0.000012	0.000012	149.72	0.000
x_3	1	0.000000	0.000000	3.06	0.111
Square	3	0.000017	0.000006	69.19	0.000
x_1^2	1	0.000000	0.000000	124.44	0.000
x_2^2	1	0.000010	0.000010	124.44	0.000
x_3^2	1	0.000000	0.000000	5.71	0.038
2-Way Interaction	3	0.000008	0.000003	32.59	0.000
$x_1 * x_2$	1	0.000008	0.000008	97.78	0.000
$x_1 * x_3$	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
$x_2 * x_3$	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Error	10	0.000001	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000001	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000069			
$R^2 = 98.81\%$		Adjust $R^2 = 97.73\%$		Pred $R^2 = 90.04\%$	

ค.3.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

ค.3.2.1 ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ตารางที่ ค.18 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (x_4)	25	50	75	100	125
อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป (x_5)	0.25	0.5	0.75	1	1.25
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล (x_6)	1.7	1.8	1.9	2	2.1

ตารางที่ ค.19 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัลและพลังงาน) โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	x_4 อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	x_5 อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	x_6 อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	y_2 เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	y_3 พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	50	0.50	1.8	0.999	110,164
2	100	0.50	1.8	0.999	104,008
3	50	0.50	2	0.999	117,069
4	100	0.50	2	0.999	110,889
5	50	1.00	1.8	0.999	123,282
6	100	1.00	1.8	0.998	111,115
7	50	1.00	2	0.999	130,138
8	100	1.00	2	0.999	117,865
9	25	0.75	1.9	0.999	124,140
10	125	0.75	1.9	0.998	105,679
11	75	0.75	1.7	0.998	108,410
12	75	0.75	2.1	0.999	122,123
13	75	0.25	1.9	0.999	107,017
14	75	1.25	1.9	0.998	126,753
15	75	0.75	1.9	0.999	115,239

ปัจจัย					
ลำดับ การ ทดลอง	x_4	x_5	x_6	y_2	y_3
	อุณหภูมิของ เอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วน เอนเทอร์เนอร์ต่อสาร ผสมอะซิโโทรป	อัตราการ ป้อนกลับ เชิงมวล	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
16	75	0.75	1.9	0.999	115,239
17	75	0.75	1.9	0.999	115,239
18	75	0.75	1.9	0.999	115,239
19	75	0.75	1.9	0.999	115,239
20	75	0.75	1.9	0.999	115,239

ตารางที่ ค.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดโดยเอทิลีนไกลคอล
เป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับเศษส่วนมวลของเมทิลลัล

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000004	0.000000	128.16	0.000
Linear	3	0.000004	0.000001	351.90	0.000
x_4	1	0.000001	0.000001	257.86	0.000
x_5	1	0.000002	0.000002	482.86	0.000
x_6	1	0.000001	0.000001	315.00	0.000
Square	3	0.000000	0.000000	5.90	0.014
x_4^2	1	0.000000	0.000000	10.10	0.010
x_5^2	1	0.000000	0.000000	4.49	0.060
x_6^2	1	0.000000	0.000000	10.10	0.010
2-Way Interaction	3	0.000000	0.000000	26.67	0.000
$x_4 * x_5$	1	0.000000	0.000000	51.43	0.000
$x_4 * x_6$	1	0.000000	0.000000	5.71	0.038
$x_5 * x_6$	1	0.000000	0.000000	22.86	0.001
Error	10	0.000000	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000000	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000004			
$R^2 = 99.14\%$		Adjust $R^2 = 98.37\%$		Pred $R^2 = 93.52\%$	

ค.3.2.2 พลังงาน

ตารางที่ ค.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติหอกลับสกัดโดยใช้เอทิลีนไกลคอล เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับพลังงาน

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	948,117,562	105,346,396	24,861.93	0.000
Linear	3	924,712,348	308,237,449	72,744.57	0.000
x_4	1	339,472,661	339,472,661	80,116.14	0.000
x_5	1	397,423,293	397,423,293	93,792.59	0.000
x_6	1	187,816,394	187,816,394	44,325.00	0.000
Square	3	5082,338	1,694,113	399.81	0.000
x_4^2	1	174,754	174,754	41.24	0.000
x_5^2	1	4,236,092	4,236,092	999.73	0.000
x_6^2	1	910	910	0.21	0.653
2-Way Interaction	3	18,322,876	6,107,625	1,441.41	0.000
$x_4 * x_5$	1	18,316,752	18,316,752	4,322.79	0.000
$x_4 * x_6$	1	2,118	2,118	0.50	0.496
$x_5 * x_6$	1	4,006	4,006	0.95	0.354
Error	10	42,373	4,237		
Lack-of-Fit	5	42,373	4,237		
Pure Error	5	42,373	8,475	*	*
Total	19	0	0		
$R^2 = 100\%$		Adjust $R^2 = 99.99\%$		Pred $R^2 = 99.96\%$	

ค.4 ก्लीเซอรอล (Glycerol)

ค.4.1 โครงสร้างหอกลิ้นสกัต

ตารางที่ ค.22 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์
สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสกัต

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
จำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัต (x_1)	9	10	11	12	13
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโทรป (x_2)	6	7	8	9	10
ชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์ (x_3)	2	3	4	5	6

ตารางที่ ค.23 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลิลล์
และพลังงาน) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสกัต

ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย				
	x_1 จำนวนชั้นของ หอกลิ้นสกัต	x_2 ชั้นที่ป้อน สารผสมอะซิโทรป	x_3 ชั้นที่ป้อน แอนเทรเนอร์	y_1 เศษส่วนมวล ของเมทิลลิลล์	y พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	10(-1)	7(-1)	3(-1)	0.997	72,068
2	12 (1)	7(-1)	3(-1)	1.000	72,124
3	10 (-1)	9 (1)	3(-1)	0.982	71,567
4	12 (1)	9 (1)	3(-1)	0.998	72,092
5	10(-1)	7(-1)	5 (1)	0.995	72,009
6	12 (1)	7(-1)	5 (1)	0.998	72,095
7	10(-1)	9 (1)	5 (1)	0.981	71,548
8	12 (1)	9 (1)	5 (1)	0.997	72,069
9	9 (-2)	8 (0)	4 (0)	0.981	71,548
10	13 (2)	8 (0)	4 (0)	1.000	72,124
11	11 (0)	6 (-2)	4 (0)	0.998	72,095
12	11 (0)	10 (2)	4 (0)	0.982	71,567
13	11 (0)	8 (0)	2 (-2)	0.999	73,707
14	11 (0)	8 (0)	6 (2)	0.995	72,009
15	11 (0)	8 (0)	4 (0)	0.997	72,069
16	11 (0)	8 (0)	4 (0)	0.997	72,069

ปัจจัย					
ลำดับ	x_1	x_2	x_3	y_1	y
การทดลอง	จำนวนชั้นของ หอกลิ้นสีกัด	ชั้นที่ป้อน สารผสมอะซิโโททรอป	ชั้นที่ป้อน เอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัต	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
17	11 (0)	8 (0)	4 (0)	0.997	72,069
18	11 (0)	8 (0)	4 (0)	0.997	72,069
19	11 (0)	8 (0)	4 (0)	0.997	72,069
20	11 (0)	8 (0)	4 (0)	0.997	72,069

ตารางที่ ค.24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของโครงสร้างหอกลิ้นสีกัดโดยกลีเซอรอลเป็นเอนเทอร์เนอร์

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000843	0.000094	2,945.32	0.000
Linear	3	0.000629	0.000210	6,592.14	0.000
x_1	1	0.000361	0.000361	11,345.71	0.000
x_2	1	0.000256	0.000256	8,045.71	0.000
x_3	1	0.000012	0.000012	385.00	0.000
Square	3	0.000129	0.000043	1,353.33	0.000
x_1^2	1	0.000067	0.000067	2,115.92	0.000
x_2^2	1	0.000078	0.000078	2,451.53	0.000
x_3^2	1	0.000000	0.000000	0.10	0.756
2-Way Interaction	3	0.000085	0.000028	890.48	0.000
$x_1 * x_2$	1	0.000085	0.000085	2,655.71	0.000
$x_1 * x_3$	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
$x_2 * x_3$	1	0.000001	0.000001	15.71	0.003
Error	10	0.000000	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000000	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000844			
$R^2 = 99.96\%$		$Adjust R^2 = 99.93\%$		$Pred R^2 = 99.69\%$	

ค.4.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

ค.4.2.1 ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัต

ตารางที่ ค.25 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับการใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (x_4)	25	50	75	100	125
อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป (x_5)	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล (x_6)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5

ตารางที่ ค.26 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัตและพลังงาน) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	x_4 อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	x_5 อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	x_6 อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	y_2 เศษส่วนมวลของเมทิลลัต	y_3 พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	50(-1)	0.8(-1)	0.6(-1)	0.999	74,783
2	100 (1)	0.8(-1)	0.6(-1)	0.998	65,812
3	50(-1)	1.4 (1)	0.6(-1)	0.999	94,015
4	100 (1)	1.4 (1)	0.6(-1)	0.998	78,289
5	50(-1)	0.8(-1)	1.2 (1)	0.999	95,713
6	100 (1)	0.8(-1)	1.2 (1)	0.999	86,733
7	50(-1)	1.4 (1)	1.2 (1)	1.000	114,937
8	100 (1)	1.4 (1)	1.2 (1)	1.000	99,224
9	25 (-2)	1.1	0.9 (0)	1.000	100,230
10	125 (2)	1.1 (1)	0.9 (0)	0.999	75,492
11	75 (0)	0.5 (-2)	0.9 (0)	0.999	74,799
12	75 (0)	1.7 (2)	0.9 (0)	1.000	106,220
13	75 (0)	1.1 (0)	0.3 (-2)	0.997	67,248
14	75 (0)	1.1 (0)	1.5 (2)	1.000	109,145
15	75 (0)	1.1 (0)	0.9 (0)	0.999	88,226

ปัจจัย					
ลำดับ การ ทดลอง	x_4	x_5	x_6	y_2	y_3
	อุณหภูมิของ เอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วน เอนเทอร์เนอร์ต่อสาร ผสมอะซิโโทรป	อัตราการ ป้อนกลับ เชิงมวล	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
16	75 (0)	1.1 (0)	0.9 (0)	0.999	88,226
17	75 (0)	1.1 (0)	0.9 (0)	0.999	88,226
18	75 (0)	1.1 (0)	0.9 (0)	0.999	88,226
19	75 (0)	1.1 (0)	0.9 (0)	0.999	88,226
20	75 (0)	1.1 (0)	0.9 (0)	0.999	88,226

ตารางที่ ค.27 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดโดยกลีเซอรอลเป็นเอนเทอร์เนอร์
สำหรับเศษส่วนมวลของเมทิลลัล

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000011	0.000001	37.13	0.000
Linear	3	0.000008	0.000003	86.43	0.000
x_4	1	0.000001	0.000001	31.43	0.000
x_5	1	0.000001	0.000001	31.43	0.000
x_6	1	0.000006	0.000006	196.43	0.000
Square	3	0.000001	0.000000	14.48	0.001
x_4^2	1	0.000000	0.000000	10.20	0.010
x_5^2	1	0.000000	0.000000	10.20	0.010
x_6^2	1	0.000000	0.000000	14.69	0.003
2-Way Interaction	3	0.000001	0.000000	10.48	0.002
$x_4 * x_5$	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
$x_4 * x_6$	1	0.000001	0.000001	15.71	0.003
$x_5 * x_6$	1	0.0000001	0.000001	15.71	0.003
Error	10	0.000000	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000000	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000011			
$R^2 = 97.09\%$		Adjust $R^2 = 94.48\%$		Pred $R^2 = 75.95\%$	

ค.4.2.2 พลังงาน

ตารางที่ ค.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดโดยใช้กลีเซอรอล
เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับพลังงาน

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	3,393,256,623	377,028,514	166,927.67	0.000
Linear	3	3,360,908,101	1,120,302,700	496,008.97	0.000
x_4	1	610,900,429	610,900,429	270,473.41	0.000
x_5	1	99,6437,609	99,6437,609	441,168.26	0.000
x_6	1	1,753,570,063	1,753,570,063	776,385.24	0.000
Square	3	961,2467	3,204,156	1,418.63	0.000
x_4^2	1	213,651	213,651	94.59	0.000
x_5^2	1	8,168,719	8,168,719	3,616.66	0.000
x_6^2	1	1,725	1,725	0.76	0.403
2-Way Interaction	3	22,736,055	7,578,685	3,355.43	0.000
$x_4 * x_5$	1	22,736,047	22,736,047	10,066.28	0.000
$x_4 * x_6$	1	2	2	0.00	0.975
$x_5 * x_6$	1	5	5	0.00	0.963
Error	10	22,586	2,259		
Lack-of-Fit	5	22,586	4,517	*	*
Pure Error	5	0	0		
Total	19	3,393,279,210			
$R^2 = 100\%$		Adjust $R^2 = 100\%$		Pred $R^2 = 99.99\%$	

ค.4 เตตระเอทิลีนไกลคอล (Tetraethylene Glycol)

ค.4.1 โครงสร้างหอกลิ้นสกัด

ตารางที่ ค.29 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลิ้นสกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
จำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัด (x_1)	12	15	18	21	24
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป (x_2)	7	9	11	13	15
ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์ (x_3)	3	4	5	6	7

ตารางที่ ค.30 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัลและพลังงาน) โดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับโครงหอกลิ้นสกัด

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	x_1 จำนวนชั้นของหอกลิ้นสกัด	x_2 ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	x_3 ชั้นที่ป้อนเอนเทอร์เนอร์	y_1 เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	y พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	15 (-1)	9 (-1)	4 (-1)	0.998	81,813
2	21 (1)	9 (-1)	4 (-1)	0.999	81,672
3	15 (-1)	13 (1)	4 (-1)	0.982	83,700
4	21 (1)	13 (1)	4 (-1)	1.000	81,569
5	15 (-1)	9 (-1)	6 (1)	0.996	81,972
86	21 (1)	9 (-1)	6 (1)	0.998	81,803
7	15 (-1)	13 (1)	6 (1)	0.981	83,726
8	21 (1)	13 (1)	6 (1)	0.999	81,605
9	12 (-2)	11 (0)	5 (0)	0.969	85,250
10	24 (2)	11 (0)	5 (0)	0.999	81,621
11	18 (0)	7 (-2)	5 (0)	0.996	81,954
12	18 (0)	15 (2)	5 (0)	0.991	82,641
13	18 (0)	11 (0)	3 (-2)	0.999	81,617
14	18 (0)	11 (0)	7 (2)	0.998	81,777
15	18 (0)	11 (0)	5 (0)	0.999	81,673
16	18 (0)	11 (0)	5 (0)	0.999	81,673

ปัจจัย					
ลำดับ	x_1	x_2	x_3	y_1	y
การทดลอง	จำนวนชั้นของ หอกลิ้นสก็ด	ชั้นที่ป้อน สารผสมอะซิโโทรป	ชั้นที่ป้อน เอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัส	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
17	18 (0)	11 (0)	5 (0)	0.999	81,673
18	18 (0)	11 (0)	5 (0)	0.999	81,673
19	18 (0)	11 (0)	5 (0)	0.999	81,673
20	18 (0)	11 (0)	5 (0)	0.999	81,673

ตารางที่ ค.31 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของโครงสร้างหอกลิ้นสก็ดโดยใช้

เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นเอนเทอร์เนอร์

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.001220	0.000136	26.35	0.000
Linear	3	0.000711	0.000237	46.07	0.000
x_1	1	0.000613	0.000613	119.12	0.000
x_2	1	0.000095	0.000095	18.49	0.002
x_3	1	0.000003	0.000003	0.60	0.458
Square	3	0.000372	0.000124	24.14	0.000
x_1^2	1	0.000347	0.000347	67.51	0.000
x_2^2	1	0.000045	0.000045	8.79	0.014
x_3^2	1	0.000000	0.000000	0.04	0.845
2-Way Interaction	3	0.000136	0.000045	8.84	0.004
$x_1 * x_2$	1	0.000136	0.000136	26.47	0.000
$x_1 * x_3$	1	0.000000	0.000000	0.02	0.879
$x_2 * x_3$	1	0.000000	0.000000	0.02	0.879
Error	10	0.000051	0.000005		
Lack-of-Fit	5	0.000051	0.000010	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.001271			
$R^2 = 95.95\%$		$\text{Adjust } R^2 = 92.31\%$		$\text{Pred } R^2 = 66.10\%$	

ค.4.2 ปฏิบัติการหอกลับสัปดาห์

ค.4.2.1 ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัส

ตารางที่ ค.32 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับการใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสัปดาห์

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (x_4)	25	50	75	100	125
อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซีโอโทรป (x_5)	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล (x_6)	0.8	1	1.2	1.4	1.6

ตารางที่ ค.33 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัสและพลังงาน) โดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสัปดาห์

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	x_4 อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	x_5 อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซีโอโทรป	x_6 อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	y_2 เศษส่วนมวลของเมทิลลัส	y_3 พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	50 (-1)	0.9 (-1)	1 (-1)	0.999	88,420
2	100 (1)	0.9 (-1)	1 (-1)	0.998	79,222
3	50 (-1)	1.5 (1)	1 (-1)	0.999	103,859
4	100 (1)	1.5 (1)	1 (-1)	0.998	88,582
5	50 (-1)	0.9 (-1)	1.4 (1)	0.999	102,316
6	100 (1)	0.9 (-1)	1.4 (1)	0.999	93,052
7	50 (-1)	1.5 (1)	1.4 (1)	0.999	117,751
8	100 (1)	1.5 (1)	1.4 (1)	0.999	102,320
9	25 (-2)	1.2 (0)	1.2 (0)	0.999	108,524
10	125 (2)	1.2 (0)	1.2 (0)	0.998	83,947
11	75 (0)	0.6 (-2)	1.2 (0)	0.998	86,027
12	75 (0)	1.8 (2)	1.2 (0)	0.999	110,560
13	75 (0)	1.2 (0)	0.8 (-2)	0.998	82,809
14	75 (0)	1.2 (0)	1.6 (2)	0.999	110,498
15	75 (0)	1.2 (0)	1.2 (0)	0.999	96,604

ปัจจัย					
ลำดับ การ ทดลอง	x_4	x_5	x_6	y_2	y_3
	อุณหภูมิของเอน เทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วน เอนเทอร์เนอร์ต่อสาร ผสมอะซิโโทโรป	อัตราการ ป้อนกลับ เชิงมวล	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
16	75 (0)	1.2 (0)	1.2 (0)	0.999	96,604
17	75 (0)	1.2 (0)	1.2 (0)	0.999	96,604
18	75 (0)	1.2 (0)	1.2 (0)	0.999	96,604
19	75 (0)	1.2 (0)	1.2 (0)	0.999	96,604
20	75 (0)	1.2 (0)	1.2 (0)	0.999	96,604

ตารางที่ ค.34 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกลิ้นสก็ดโดยเตตระเอทิลีนไกลคอล
เป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับเศษส่วนมวลของเมทิลลัล

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000003	0.000000	11.98	0.000
Linear	3	0.000002	0.000001	23.57	0.000
x_4	1	0.000001	0.000001	31.43	0.000
x_5	1	0.000000	0.000000	7.86	0.019
x_6	1	0.000001	0.000001	31.43	0.000
Square	3	0.000001	0.000000	7.14	0.008
x_4^2	1	0.000000	0.000000	10.20	0.010
x_5^2	1	0.000000	0.000000	10.20	0.010
x_6^2	1	0.000000	0.000000	10.20	0.010
2-Way Interaction	3	0.000001	0.000000	5.24	0.020
$x_4 * x_5$	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
$x_4 * x_6$	1	0.000001	0.000001	15.71	0.003
$x_5 * x_6$	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Error	10	0.000000	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000000	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000004			
R ² = 91.52%		Adjust R ² = 83.88%		Pred R ² = 29.77%	

ค.4.2.2 พลังงาน

ตารางที่ ค.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกดโดยใช้เตตระเอทิลีนไกลคอล เป็นแอนเทอร์เนอร์สำหรับพลังงาน

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	2,002,016,328	222,446,259	171,294.95	0.000
Linear	3	1,977,850,031	659,283,344	507,681.74	0.000
x_4	1	604,246,455	604,246,455	465,300.54	0.000
x_5	1	607,234,325	607,234,325	467,601.35	0.000
x_6	1	766,369,251	766,369,251	590,143.34	0.000
Square	3	5,413,903	1,804,634	1,389.6	0.000
x_4^2	1	216,134	216,134	166.43	0.000
x_5^2	1	4,472,430	4,472,430	3,444.00	0.000
x_6^2	1	3,544	3,544	2.73	0.130
2-Way Interaction	3	18,752,394	6,250,798	4,813.43	0.000
$x_4 * x_5$	1	18,745,258	18,745,258	14,434.80	0.000
$x_4 * x_6$	1	6,001	6,001	4.62	0.057
$x_5 * x_6$	1	1,135	1,135	0.87	0.372
Error	10	12,986	1,299		
Lack-of-Fit	5	12,986	2,597	*	*
Pure Error	5	0	0		
Total	19	2,002,029,314			
$R^2 = 100\%$		Adjust $R^2 = 100\%$		Pred $R^2 = 99.99\%$	

ค.5 โพรไพลีนไกลคอล (Propylene Glycol)

ค.5.1 โครงสร้างหอกลับสกัด

ตารางที่ ค.36 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองโดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงสร้างหอกลับสกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
จำนวนชั้นของหอกลับสกัด (x_1)	8	9	10	11	12
ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป (x_2)	5	6	7	8	9
ชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์ (x_3)	2	3	4	5	6

ตารางที่ ค.37 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัลและพลังงาน) โดยใช้โพรไพลีนไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับโครงหอกลับสกัด

ปัจจัย					
ลำดับ	x_1	x_2	x_3	y_1	y
การทดลอง	จำนวนชั้นของหอกลับสกัด	ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป	ชั้นที่ป้อนแอนเทรเนอร์	เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	9 (-1)	6 (-1)	3 (-1)	0.998	63,692
2	11 (1)	6 (-1)	3 (-1)	0.999	63,662
3	9 (-1)	8 (1)	3 (-1)	0.996	63,837
4	11 (1)	8 (1)	3 (-1)	0.999	63,644
5	9 (-1)	6 (-1)	5 (1)	0.996	63,782
6	11 (1)	6 (-1)	5 (1)	0.998	63,722
7	9 (-1)	8 (1)	5 (1)	0.994	63,926
8	11 (1)	8 (1)	5 (1)	0.999	63,668
9	8 (-2)	7 (0)	4 (0)	0.994	63,932
10	12 (2)	7 (0)	4 (0)	0.999	63,641
11	10 (0)	5 (-2)	4 (0)	0.997	63,727
12	10 (0)	9 (2)	4 (0)	0.996	63,813
13	10 (0)	7 (0)	2 (-2)	0.998	65,152
14	10 (0)	7 (0)	6 (2)	0.996	63,779
15	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	63,670
16	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	63,670

ปัจจัย					
ลำดับ	x_1	x_2	x_3	y_1	y
การทดลอง	จำนวนชั้นของ หอกลับสัปดาห์	ชั้นที่ป้อน สารผสมอะซิโโททรอป	ชั้นที่ป้อน เอนเทอร์เนอร์	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัส	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
17	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	63,670
18	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	63,670
19	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	63,670
20	10 (0)	7 (0)	4 (0)	0.999	63,670

ตารางที่ ค.38 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของโครงสร้างหอกลับสัปดาห์โดยใช้โพรไพลีนไกลคอล
เป็นเอนเทอร์เนอร์

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000056	0.0000006	163.94	0.000
Linear	3	0.000034	0.000011	299.35	0.000
x_1	1	0.000028	0.000028	724.03	0.000
x_2	1	0.000002	0.000002	41.04	0.000
x_3	1	0.000005	0.000005	132.99	0.000
Square	3	0.000018	0.000006	154.17	0.000
x_1^2	1	0.000009	0.000009	248.70	0.000
x_2^2	1	0.000009	0.000009	248.70	0.000
x_3^2	1	0.000006	0.000006	157.70	0.000
2-Way Interaction	3	0.000004	0.000001	38.31	0.000
$x_1 * x_2$	1	0.000003	0.000003	82.09	0.000
$x_1 * x_3$	1	0.000001	0.000001	29.55	0.000
$x_2 * x_3$	1	0.000000	0.000000	3.28	0.100
Error	10	0.000000	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000000	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000057			
$R^2 = 99.33\%$		$\text{Adjust } R^2 = 98.72\%$		$\text{Pred } R^2 = 94.74\%$	

ค.5.2 ปฏิบัติการหอกลับสกัด

ค.5.2.1 ความบริสุทธิ์ของเมทิลลัล

ตารางที่ ค.39 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองสำหรับการใช้โพรไฟล์นไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ปัจจัย	ระดับ				
	$-\infty$	-1	0	1	$+\infty$
อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (x_4)	25	50	75	100	125
อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป (x_5)	0.25	0.5	0.75	1	1.25
อัตราการป้อนกลับเชิงมวล (x_6)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5

ตารางที่ ค.40 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (เศษส่วนมวลของเมทิลลัลและพลังงาน) โดยใช้โพรไฟล์นไกลคอลเป็นแอนเทรเนอร์สำหรับปฏิบัติการหอกลับสกัด

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				
	x_4 อุณหภูมิของแอนเทรเนอร์ (องศาเซลเซียส)	x_5 อัตราส่วนแอนเทรเนอร์ต่อสารผสมอะซิโโทรป	x_6 อัตราการป้อนกลับเชิงมวล	y_2 เศษส่วนมวลของเมทิลลัล	y_3 พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
1	50 (-1)	0.5 (-1)	0.6 (-1)	0.998	67,677
2	100 (1)	0.5 (-1)	0.6 (-1)	0.998	61,110
3	50 (-1)	1 (1)	0.6 (-1)	0.999	82,369
4	100 (1)	1 (1)	0.6 (-1)	0.998	69,233
5	50 (-1)	0.5 (-1)	1.2 (1)	0.999	88,582
6	100 (1)	0.5 (-1)	1.2 (1)	0.999	81,991
7	50 (-1)	1 (1)	1.2 (1)	0.999	103,270
8	100 (1)	1 (1)	1.2 (1)	0.999	90,088
9	25 (-2)	0.75 (0)	0.9 (0)	0.999	89,458
10	125 (2)	0.75 (0)	0.9 (0)	0.999	69,747
11	75 (0)	0.25 (-2)	0.9 (0)	0.998	71,360
12	75 (0)	1.25 (2)	0.9 (0)	0.999	93,344
13	75 (0)	0.75 (0)	0.3 (-2)	0.997	59,289
14	75 (0)	0.75 (0)	1.5 (2)	0.999	101,061
15	75 (0)	0.75 (0)	0.9 (0)	0.999	80,153

ปัจจัย					
ลำดับ การ ทดลอง	x_4	x_5	x_6	y_2	y_3
	อุณหภูมิของ เอนเทอร์เนอร์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วน เอนเทอร์เนอร์ต่อสาร ผสมอะซิโโทโรป	อัตราการ ป้อนกลับ เชิงมวล	เศษส่วนมวล ของเมทิลลัล	พลังงาน (กิโลจูลต่อชั่วโมง)
16	75 (0)	0.75 (0)	0.9 (0)	0.999	80,153
17	75 (0)	0.75 (0)	0.9 (0)	0.999	80,153
18	75 (0)	0.75 (0)	0.9 (0)	0.999	80,153
19	75 (0)	0.75 (0)	0.9 (0)	0.999	80,153
20	75 (0)	0.75 (0)	0.9 (0)	0.999	80,153

ตารางที่ ค.41 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกลิ้นสกัดโดยโพรไพลีนไกลคอล
เป็นเอนเทอร์เนอร์สำหรับเศษส่วนมวลของเมทิลลัล

Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	0.000006	0.000001	20.93	0.000
Linear	3	0.000004	0.000001	39.33	0.000
x_4	1	0.000000	0.000000	2.00	0.188
x_5	1	0.000001	0.000001	18.00	0.002
x_6	1	0.000003	0.000003	98.00	0.000
Square	3	0.000002	0.000001	19.47	0.000
x_4^2	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
x_5^2	1	0.000000	0.000000	12.57	0.005
x_6^2	1	0.000002	0.000002	50.29	0.000
2-Way Interaction	3	0.000000	0.000000	4.00	0.041
$x_4 * x_5$	1	0.000000	0.000000	4.00	0.073
$x_4 * x_6$	1	0.000000	0.000000	4.00	0.073
$x_5 * x_6$	1	0.000000	0.000000	4.00	0.073
Error	10	0.000000	0.000000		
Lack-of-Fit	5	0.000000	0.000000	*	*
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000006			
$R^2 = 94.96\%$		Adjust $R^2 = 90.42\%$		Pred $R^2 = 60.72\%$	

ค.5.2.2 พลังงาน

ตารางที่ ค.42 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิบัติการหอกลับสกัดโดยใช้โพรไพลีนไกลคอล เป็นแอนเทรเนอร์สำหรับพลังงาน

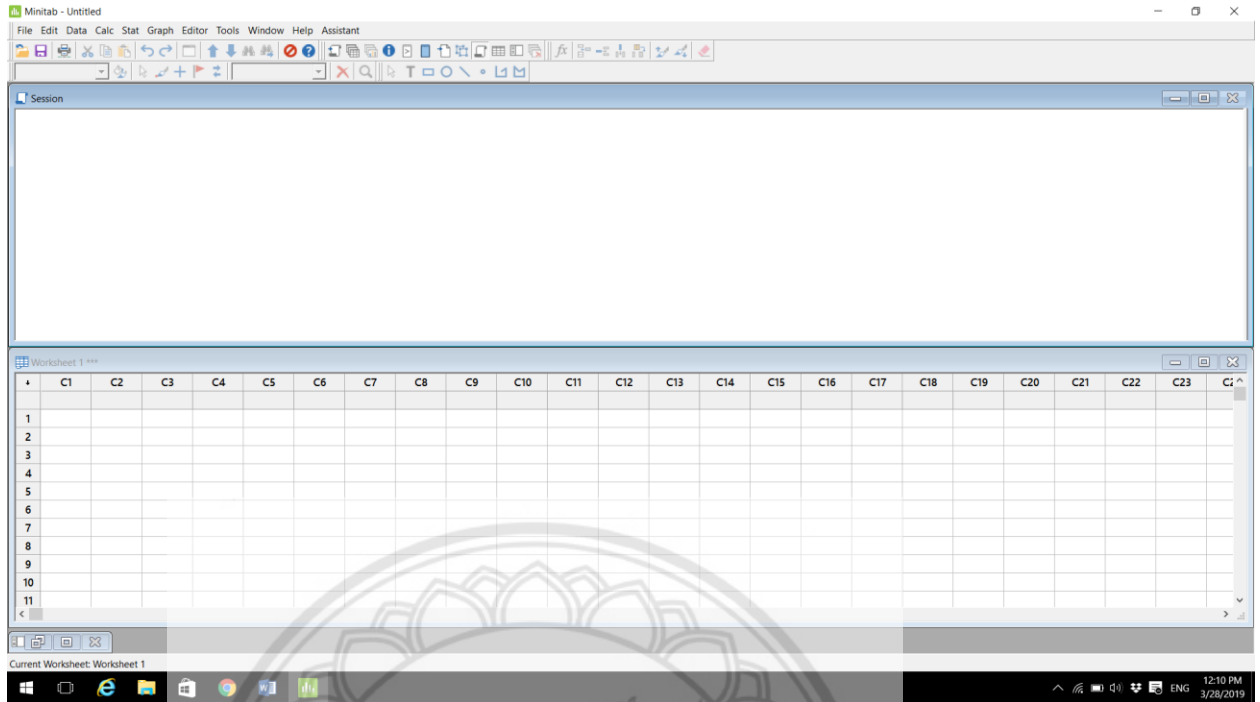
Source	DF	Sum Square	Mean Square	F-Value	P-Value
Model	9	2,666,386,549	296,265,172	17,343.58	0.000
Linear	3	2,635,336,248	878,445,416	51,424.83	0.000
x_4	1	389,05,6886	38,905,6886	22,775.67	0.000
x_5	1	501,427,415	501,427,415	29,353.92	0.000
x_6	1	1,744,851,947	1,744,851,947	102,144.89	0.000
Square	3	9,401,061	3,133,687	183.45	0.000
x_4^2	1	495,115	495,115	28.98	0.000
x_5^2	1	7,523,563	7,523,563	440.43	0.000
x_6^2	1	193	193	0.01	0.917
2-Way Interaction	3	21,649,240	7,216,413	422.45	0.000
$x_4 * x_5$	1	21,648,529	2,1648,529	1,267.32	0.000
$x_4 * x_6$	1	611	611	0.04	0.854
$x_5 * x_6$	1	100	100	0.01	0.940
Error	10	170,821	17,082		
Lack-of-Fit	5	17,0821	34,164	*	*
Pure Error	5	0	0		
Total	19	2,666,557,370			
$R^2 = 99.99\%$		Adjust $R^2 = 99.99\%$		Pred $R^2 = 99.95\%$	



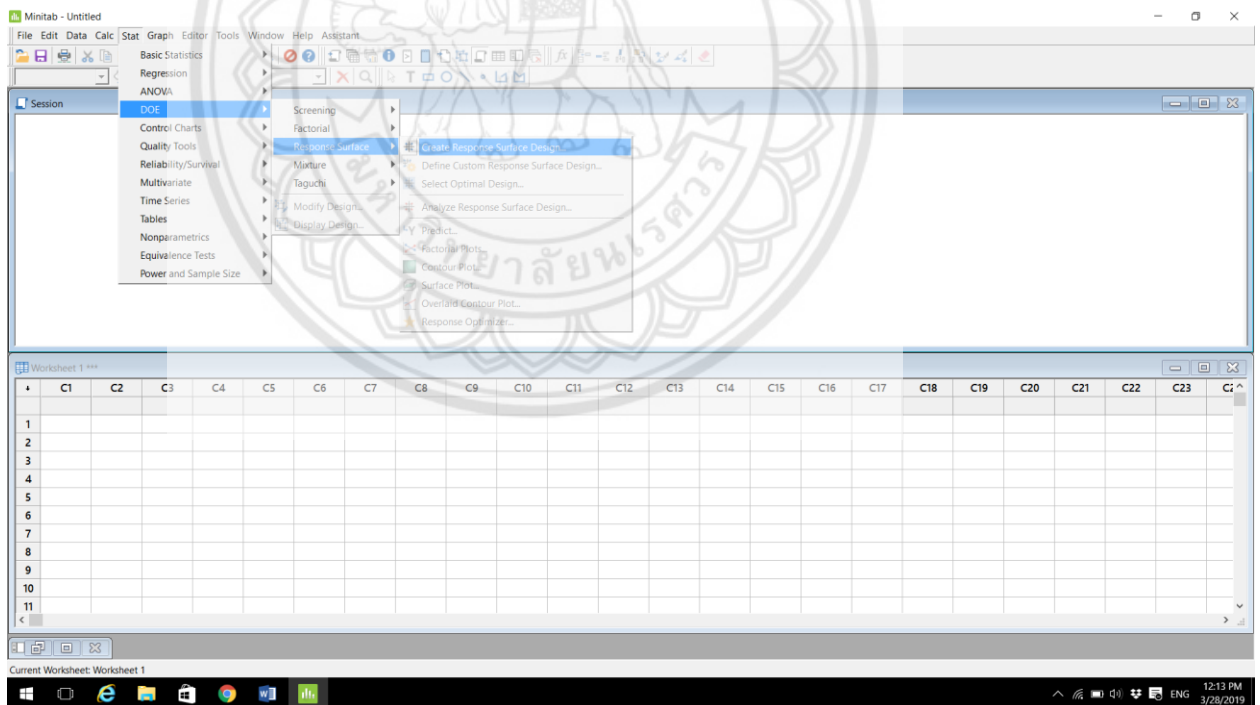
ภาคผนวก ง

การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ

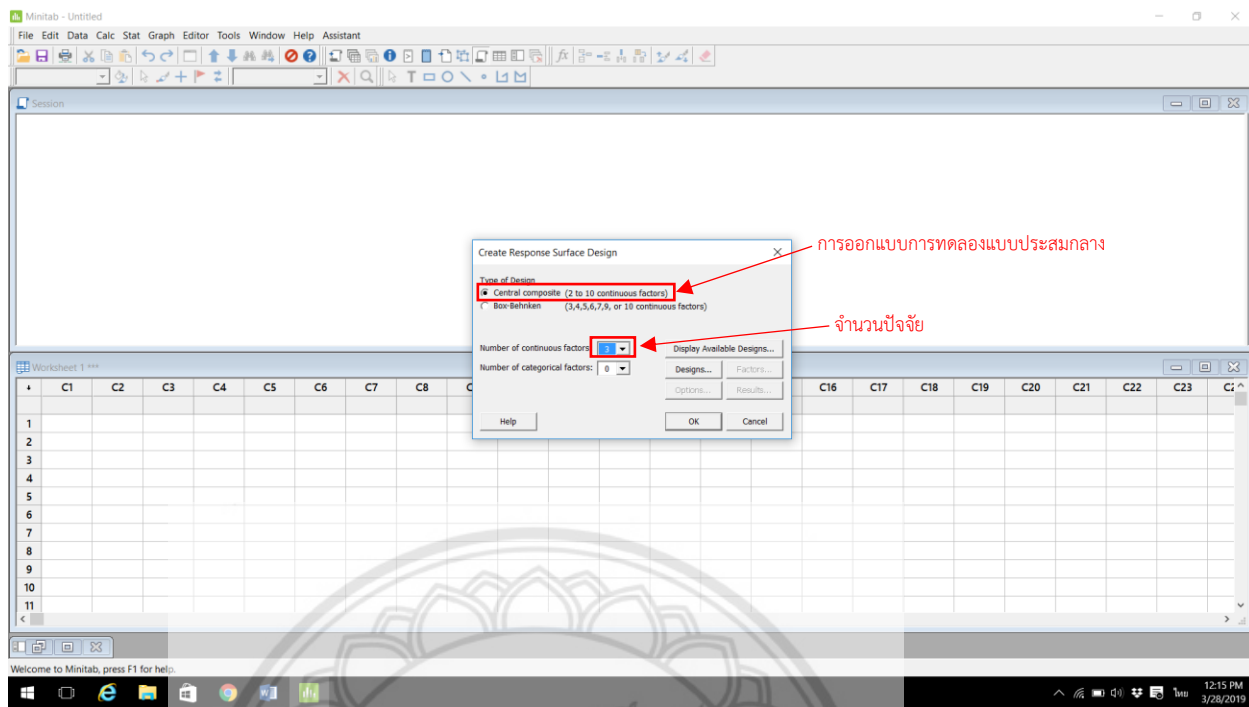
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์



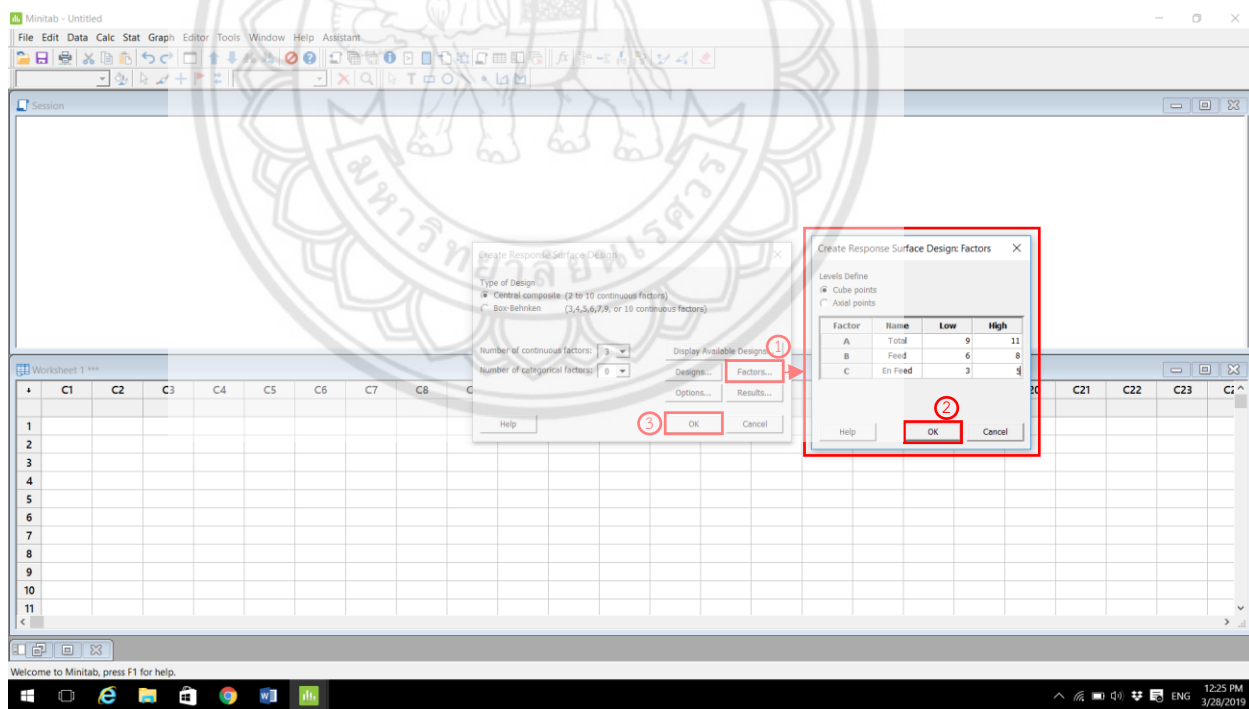
รูปที่ ง.1 หน้าแรกของโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ Minitab 18.1



รูปที่ ง.2 การเข้าสู่การสร้างพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ ง.3 การกำหนดจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษาโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง



รูปที่ ง.4 การกำหนดระดับของแต่ละปัจจัย

Minitab - Untitled

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 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23
	StdOrder	RunOrder	PTType	Blocks	Total	Feed	En Feed																
1	1	1	1	1	9	6	3																
2	2	2	1	1	11	6	3																
3	3	3	1	1	9	8	3																
4	4	4	1	1	11	8	3																
5	5	5	1	1	9	6	5																
6	6	6	1	1	11	6	5																
7	7	7	1	1	9	8	5																
8	8	8	1	1	11	8	5																
9	9	9	-1	1	8	7	4																
10	10	10	-1	1	12	7	4																
11	11	11	-1	1	10	5	4																

Current Worksheet: Worksheet 2

4:10 PM
3/28/2019

รูปที่ ง.5 โปรแกรมแสดงสภาวะในการทดลอง

Minitab - Untitled

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

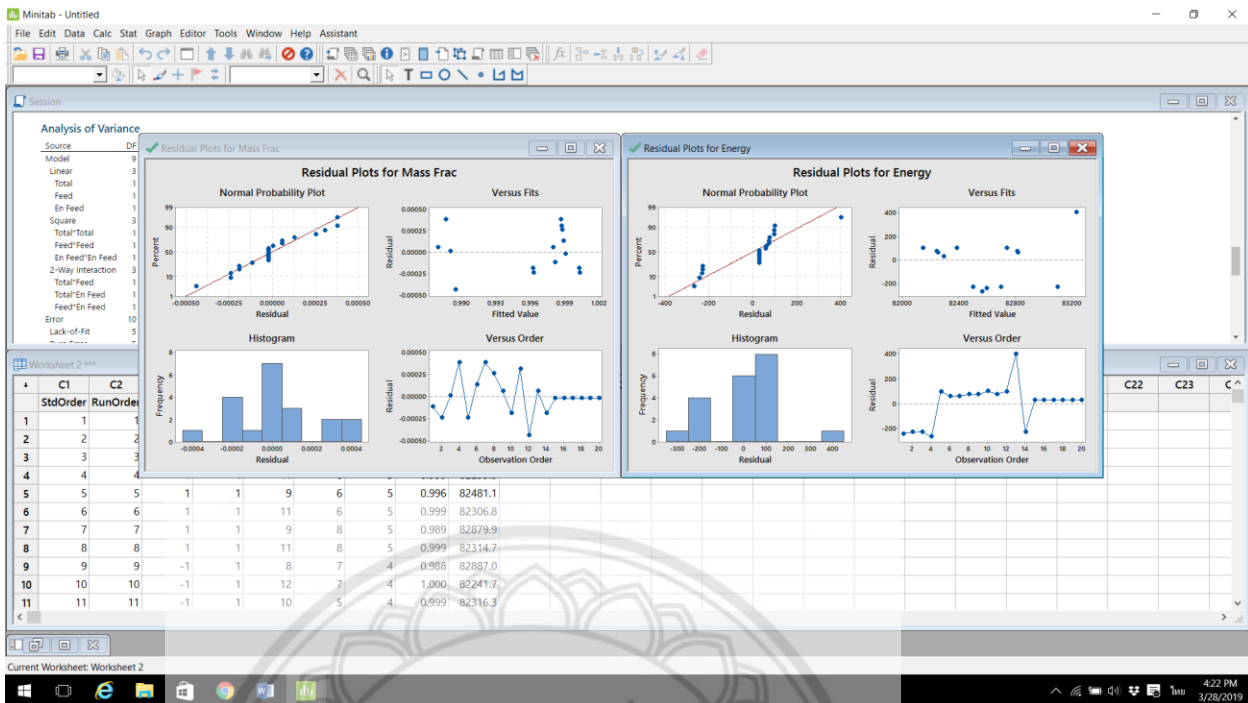
Worksheet 2 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23
	StdOrder	RunOrder	PTType	Blocks	Total	Feed	En Feed	Mass Frac	Energy														
1	1	1	1	1	9	6	3	0.998	82350.9														
2	2	2	1	1	11	6	3	1.000	82267.7														
3	3	3	1	1	9	8	3	0.989	82869.5														
4	4	4	1	1	11	8	3	0.999	82293.9														
5	5	5	1	1	9	6	5	0.996	82481.1														
6	6	6	1	1	11	6	5	0.999	82306.8														
7	7	7	1	1	9	8	5	0.989	82873.9														
8	8	8	1	1	11	8	5	0.999	82314.7														
9	9	9	-1	1	8	7	4	0.980	82887.0														
10	10	10	-1	1	12	7	4	1.000	82241.7														
11	11	11	-1	1	10	5	4	0.999	82316.3														
12	12	12	-1	1	10	9	4	0.989	82837.5														
13	13	13	-1	1	10	7	2	0.998	83635.0														
14	14	14	-1	1	10	7	6	0.996	82469.1														
15	15	15	0	1	10	7	4	0.999	82319.9														
16	16	16	0	1	10	7	4	0.999	82319.9														
17	17	17	0	1	10	7	4	0.999	82319.9														
18	18	18	0	1	10	7	4	0.999	82319.9														
19	19	19	0	1	10	7	4	0.999	82319.9														
20	20	20	0	1	10	7	4	0.999	82319.9														

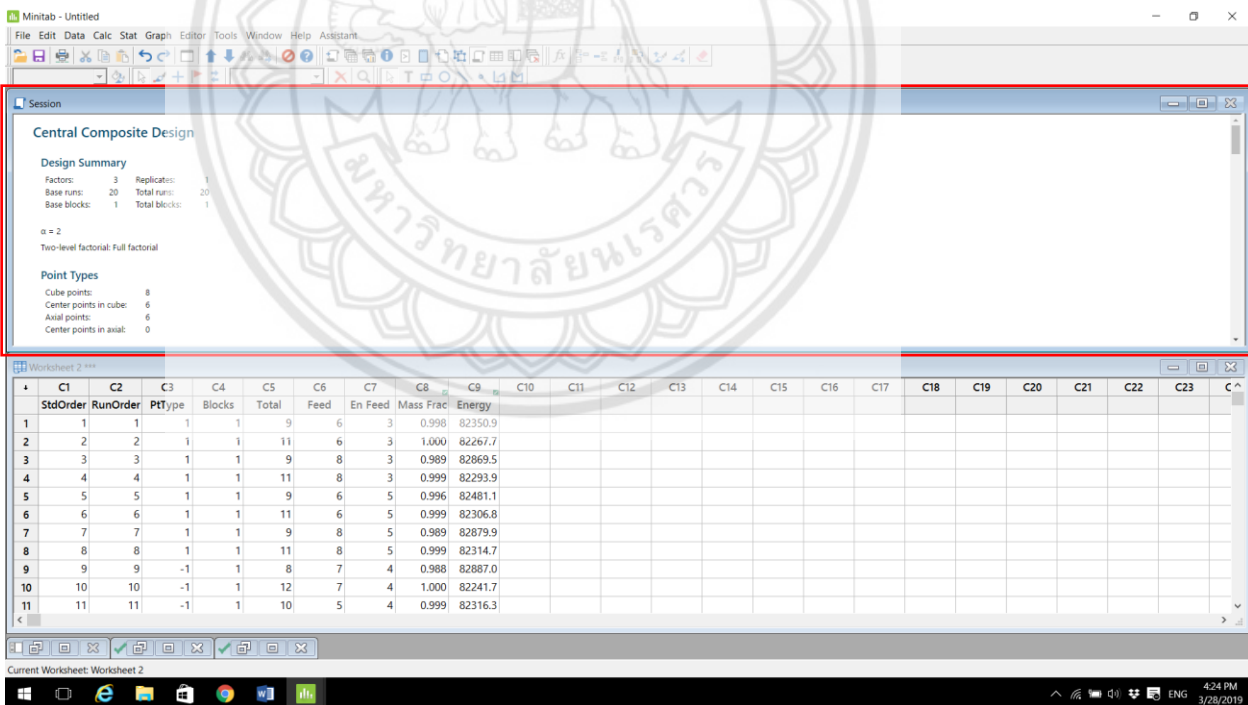
Current Worksheet: Worksheet 2

4:12 PM
3/28/2019

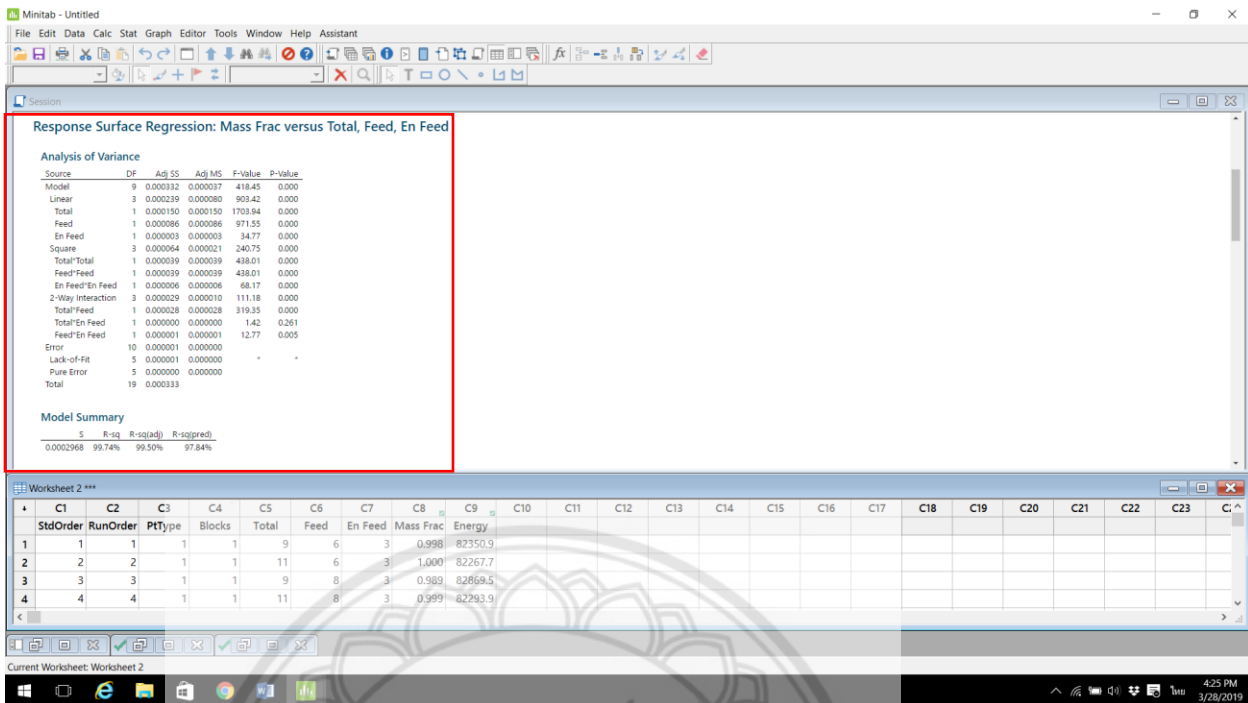
รูปที่ ง.6 ผลการทดลองที่ได้จากสภาวะในการทดลอง



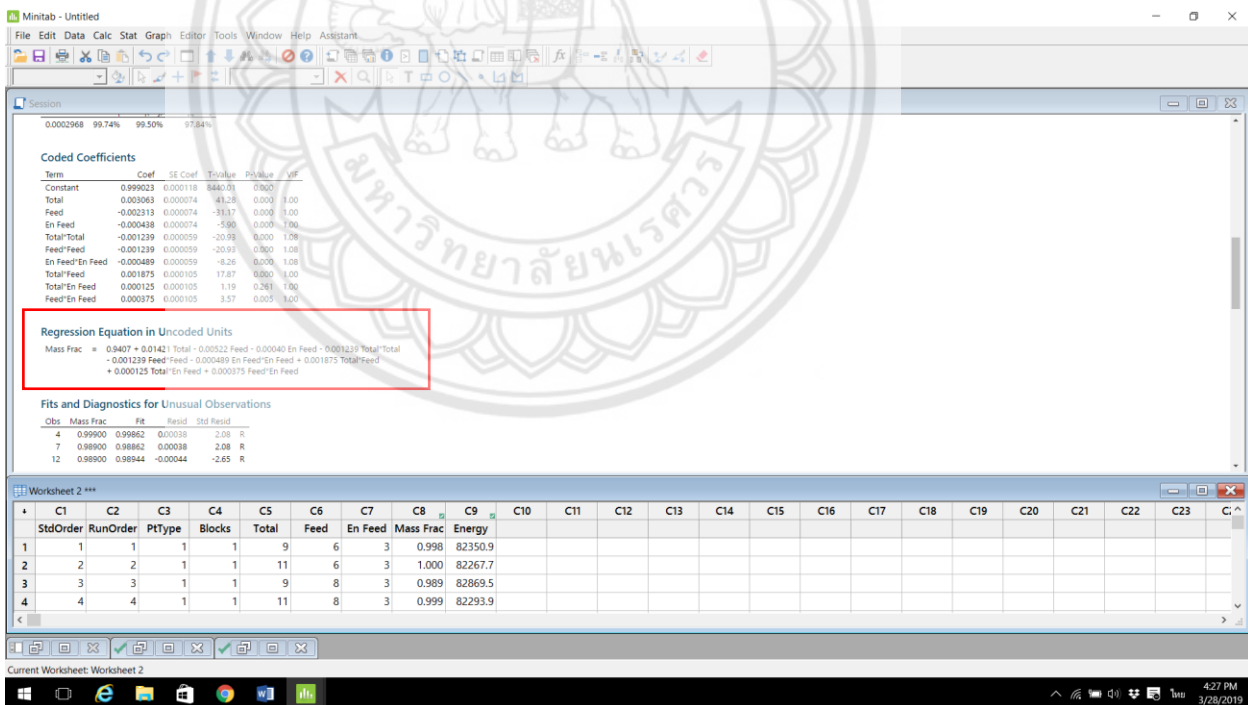
รูปที่ ๙.๙ โปรแกรมแสดงกราฟ Residual Plots



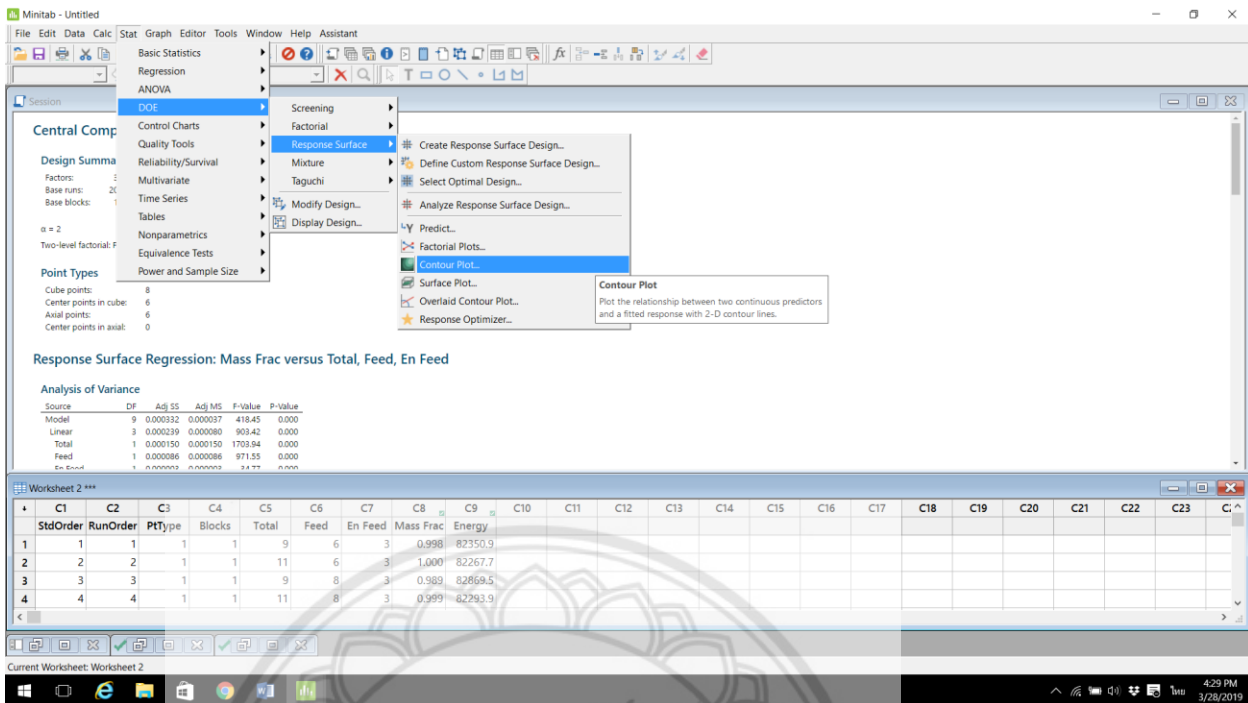
รูปที่ ๙.๑๐ หน้าต่างแสดงผล



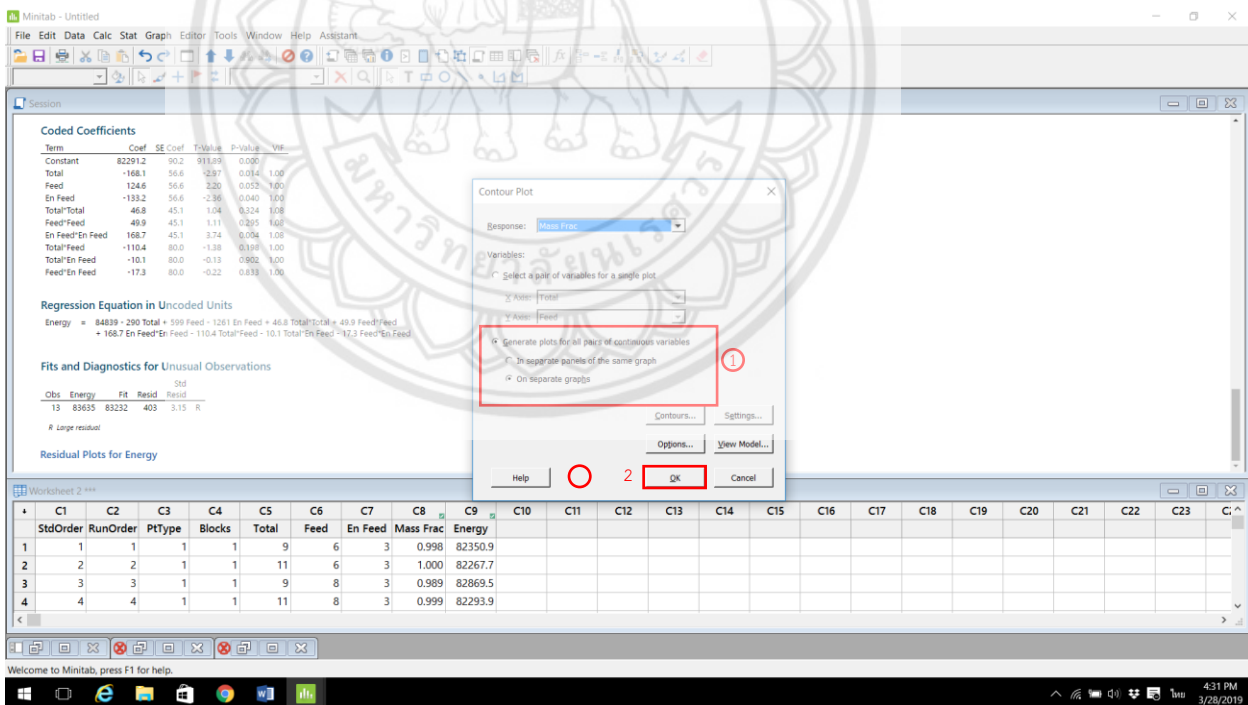
รูปที่ ง.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน



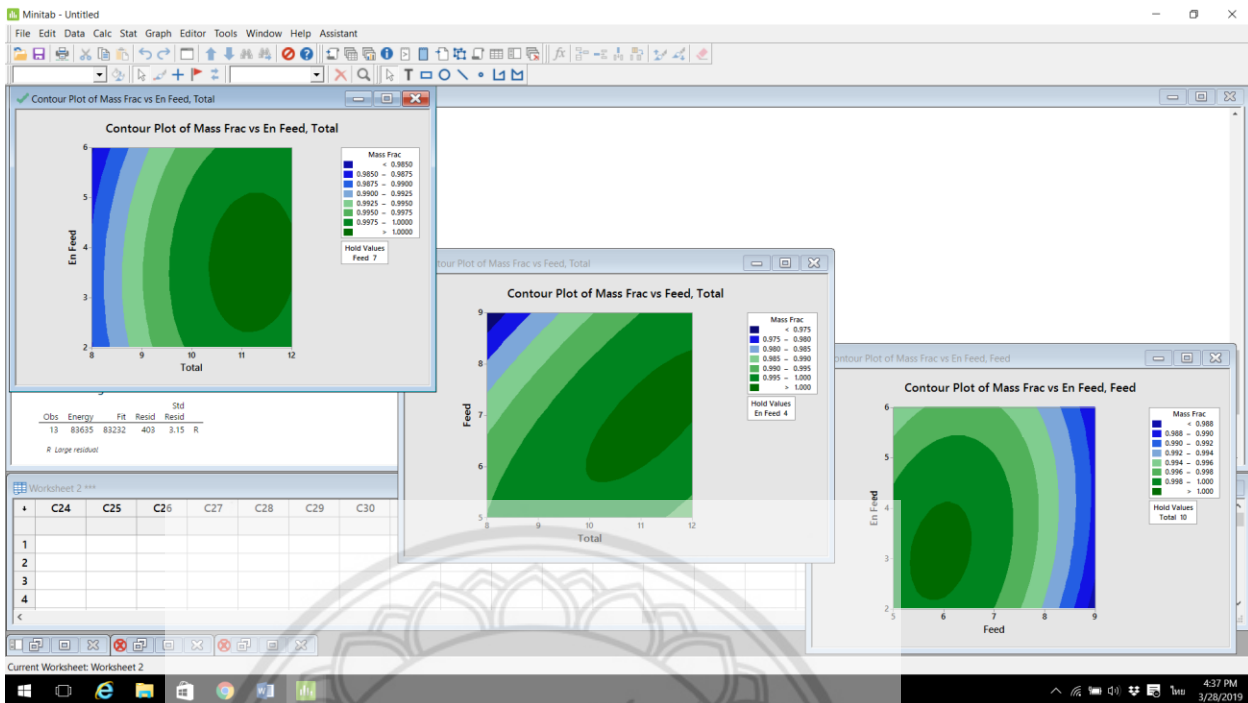
รูปที่ ง.12 สมการถดถอย



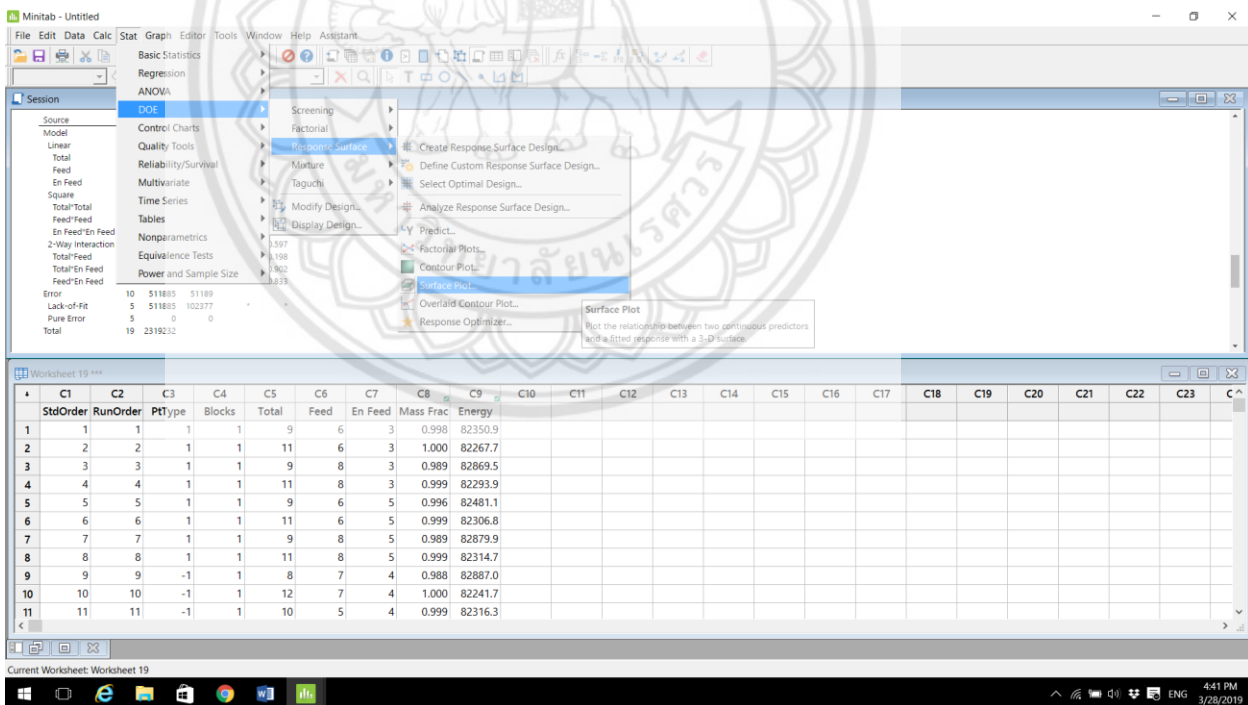
รูปที่ ง.13 ฟังก์ชันในการแสดงกราฟโครงร่าง



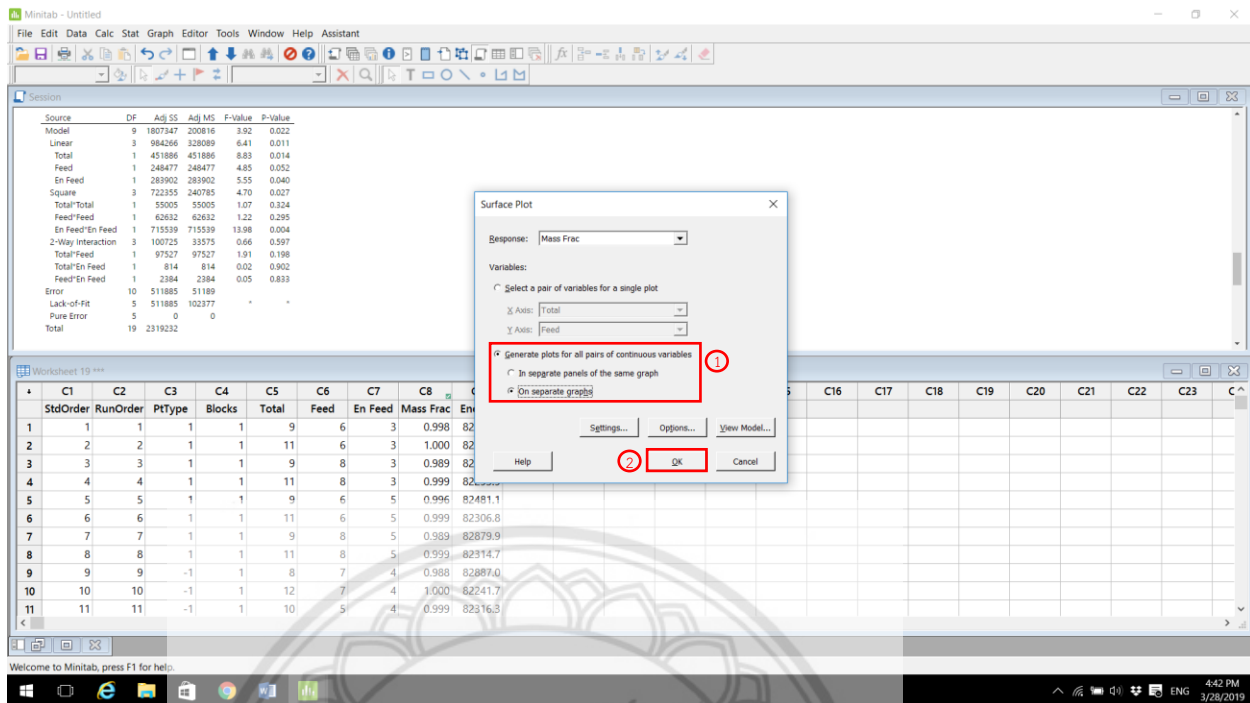
รูปที่ ง.14 กำหนดข้อมูลที่ต้องการแสดงผลกราฟโครงร่าง



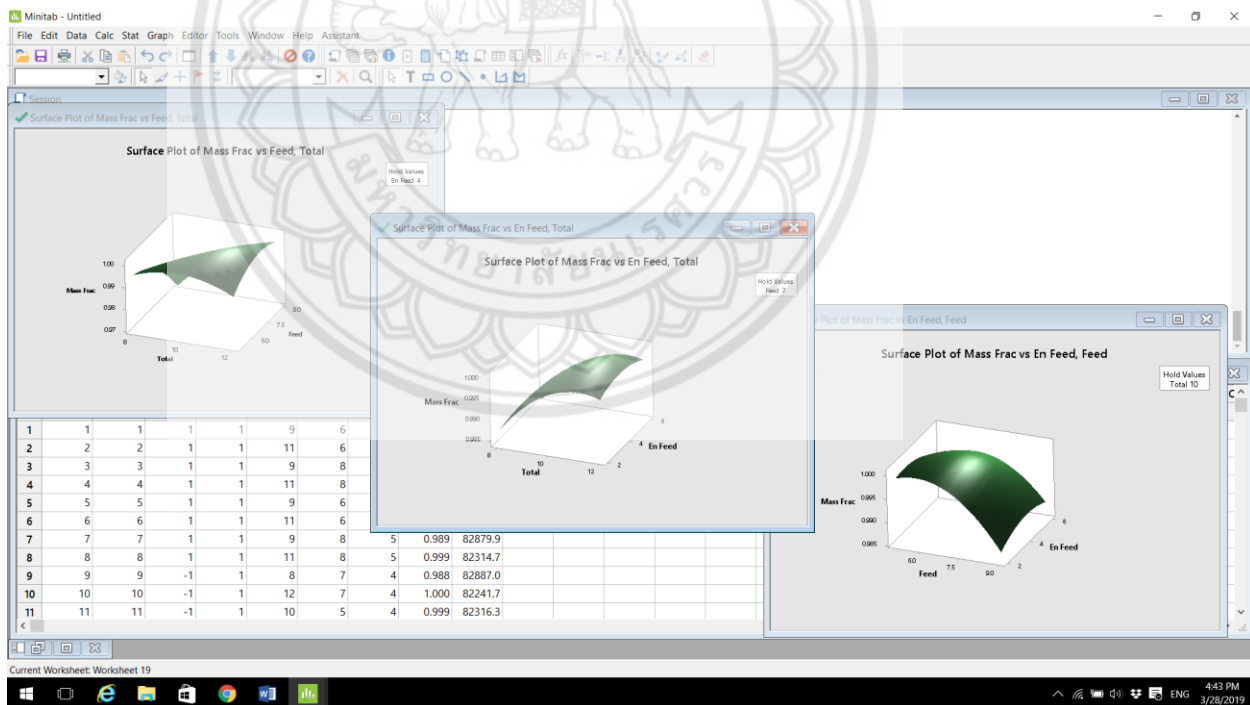
รูปที่ ง.15 โปรแกรมแสดงกราฟโครงร่าง



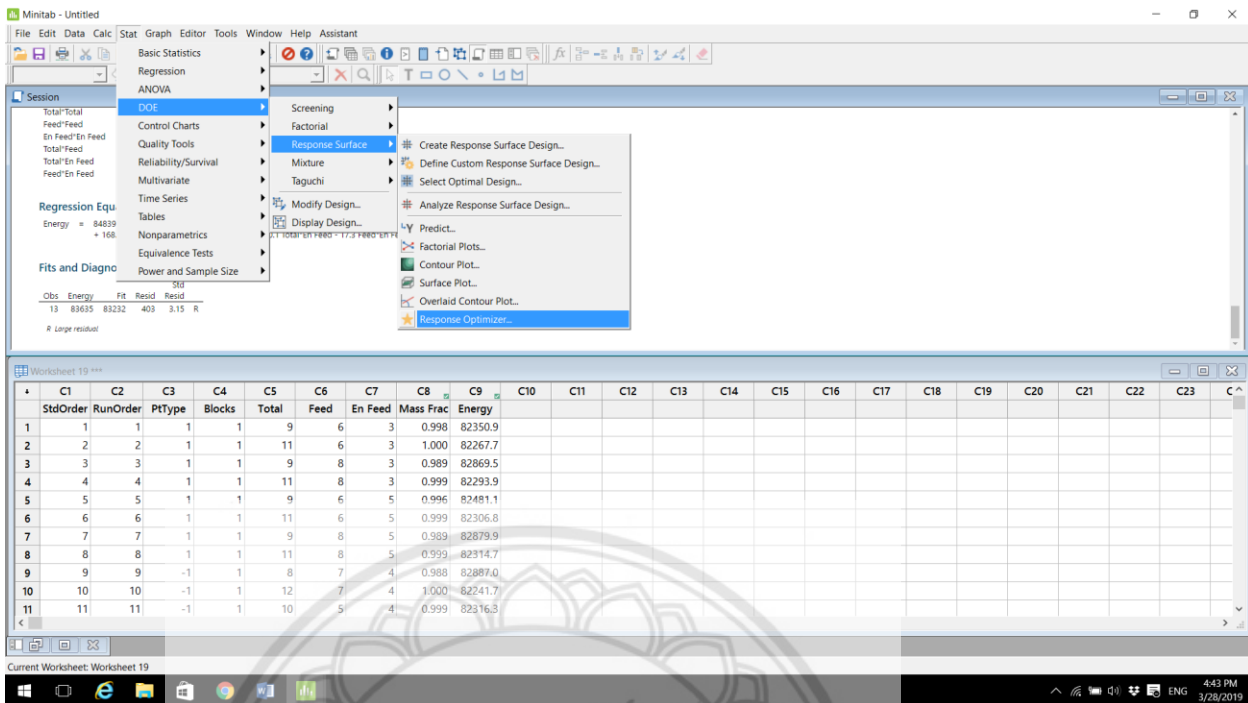
รูปที่ ง.16 เลือกฟังก์ชันในการแสดงกราฟพื้นผิวตอบสนอง



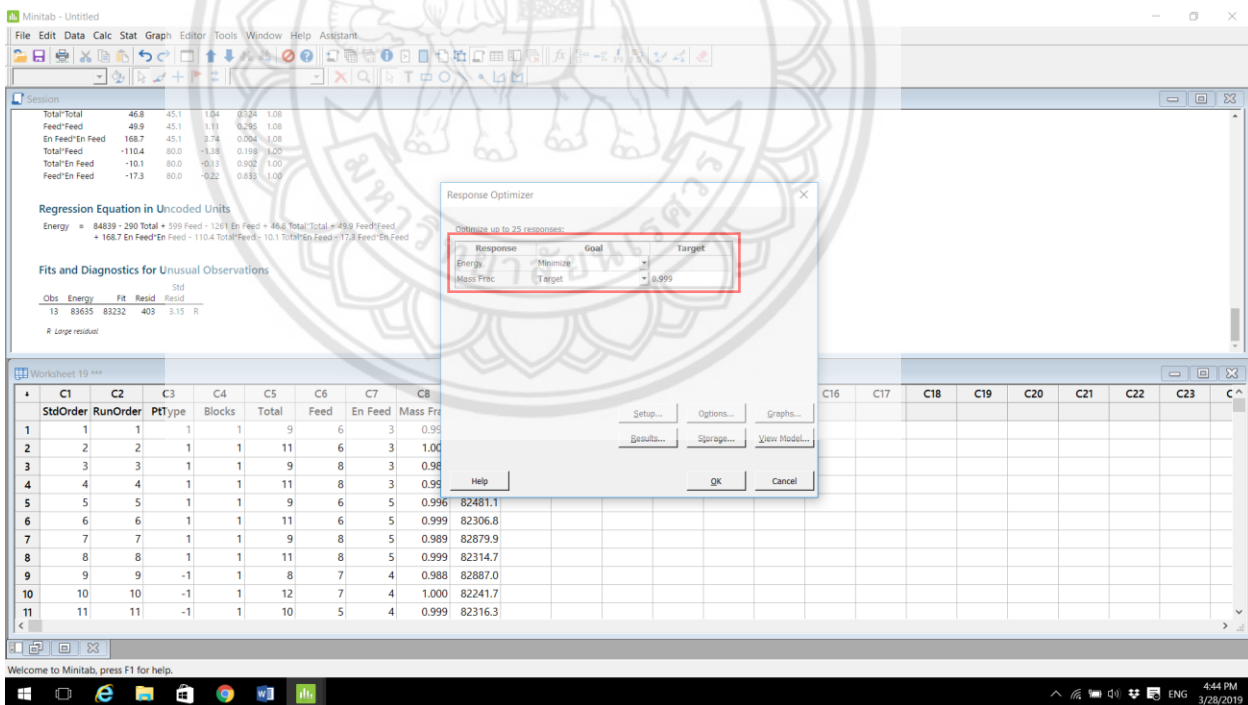
รูปที่ ง.17 กำหนดข้อมูลที่ต้องการแสดงผลกราฟพื้นผิวตอบสนอง



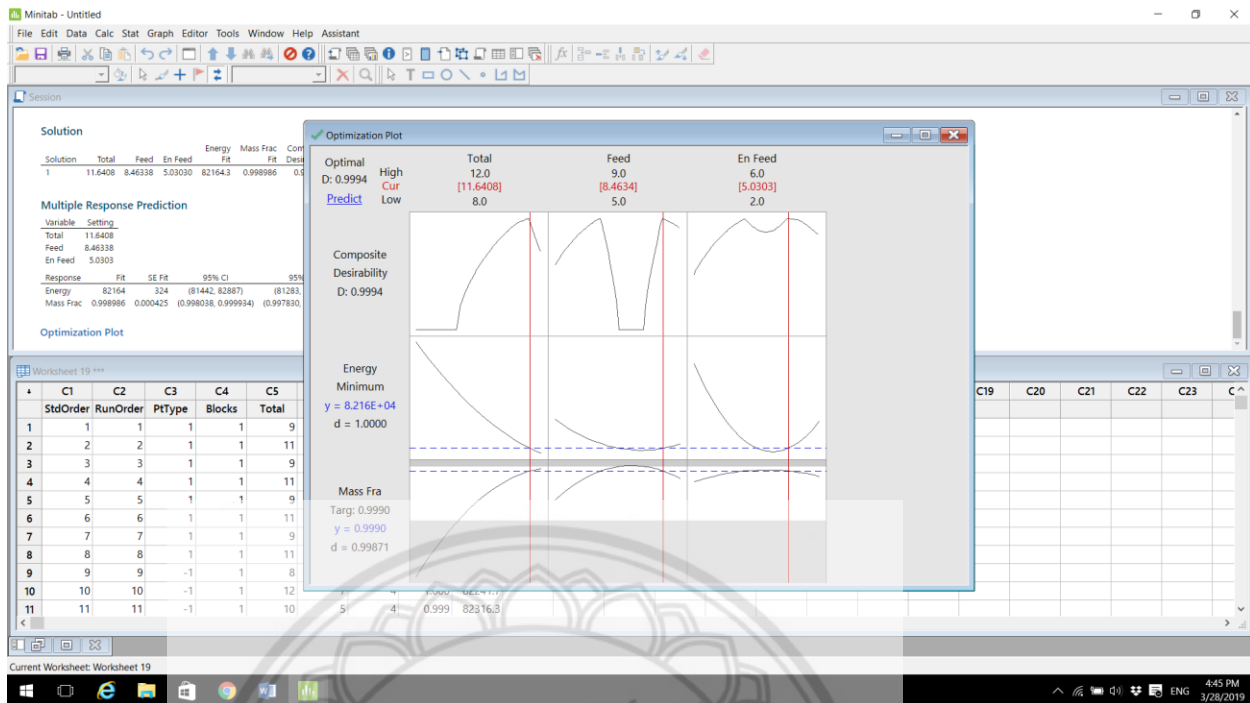
รูปที่ ง.18 โปรแกรมแสดงกราฟพื้นผิวตอบสนอง



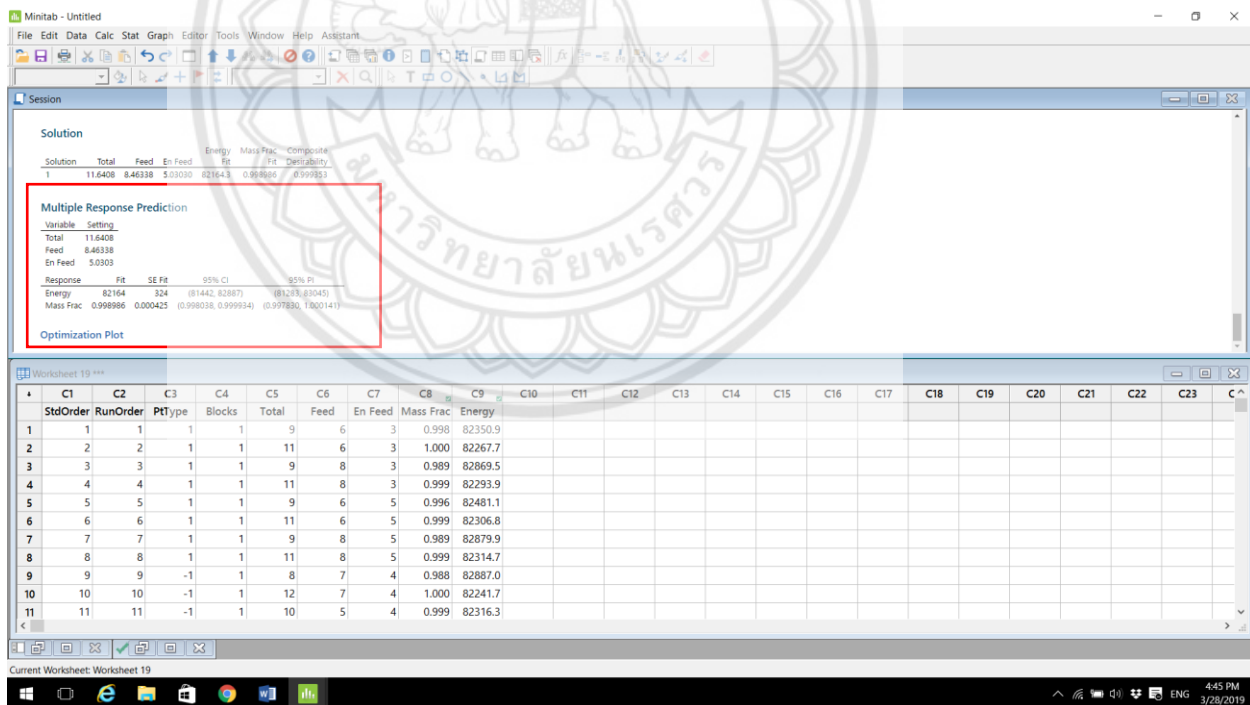
รูปที่ ง.19 เลือกฟังก์ชันในการหาสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ ง.20 กำหนดผลที่ต้องการในการหาสภาวะที่เหมาะสม

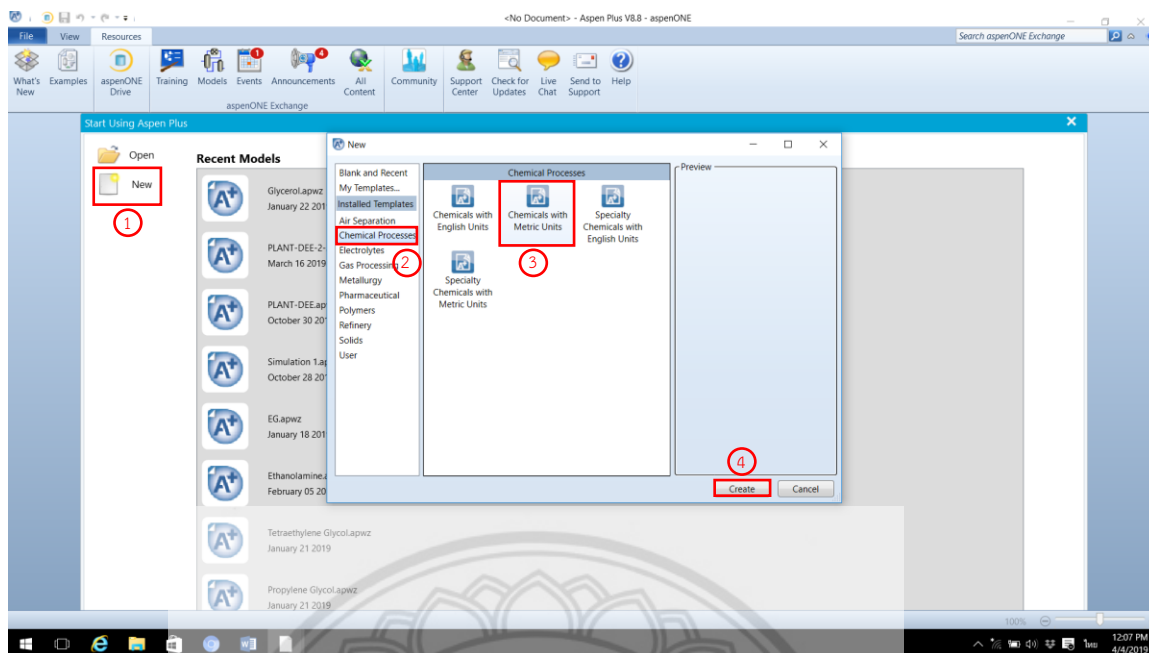


รูปที่ ง.21 โปรแกรมแสดงสถานะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์

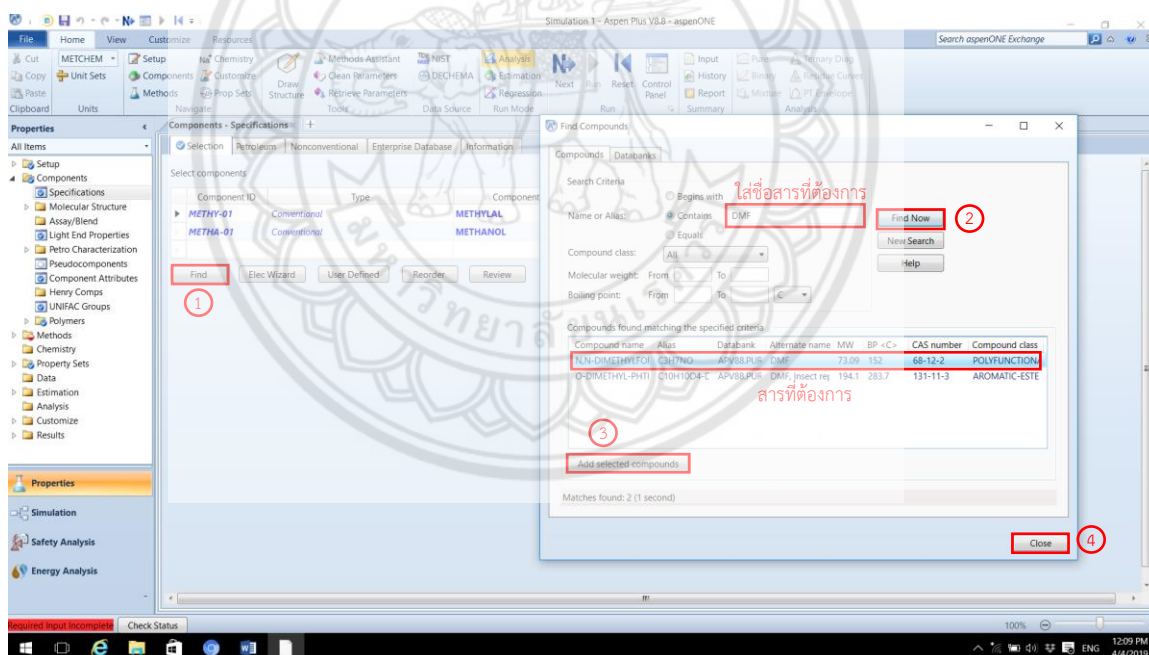


รูปที่ ง.22 หน้าต่างแสดงผลการหาสถานะที่เหมาะสม

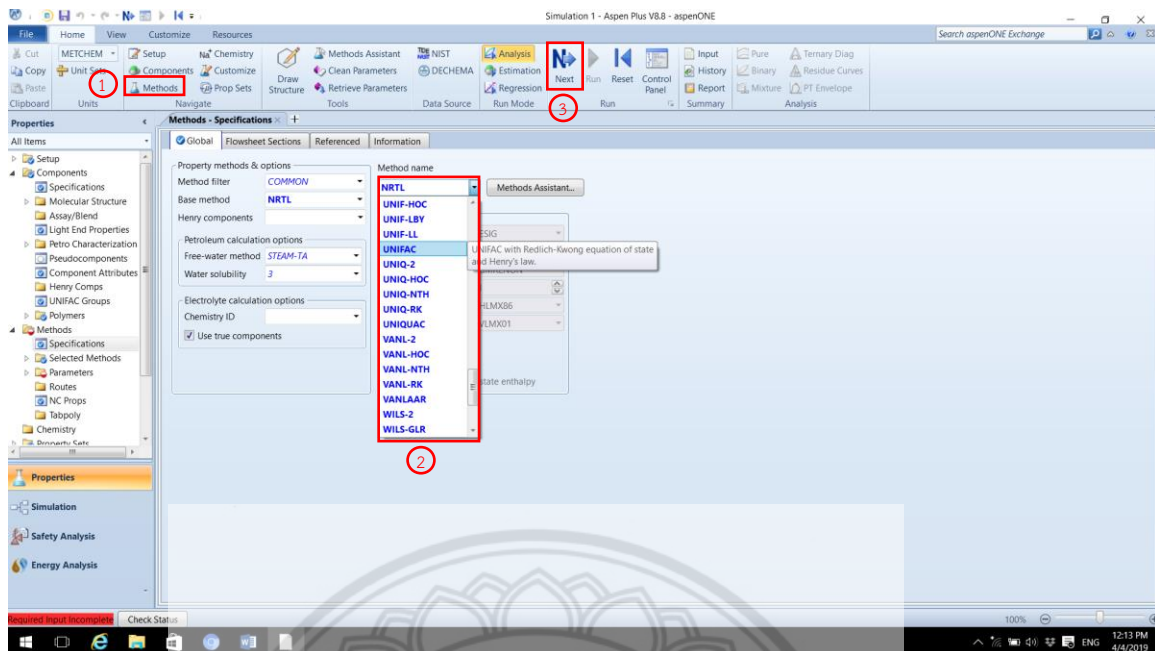




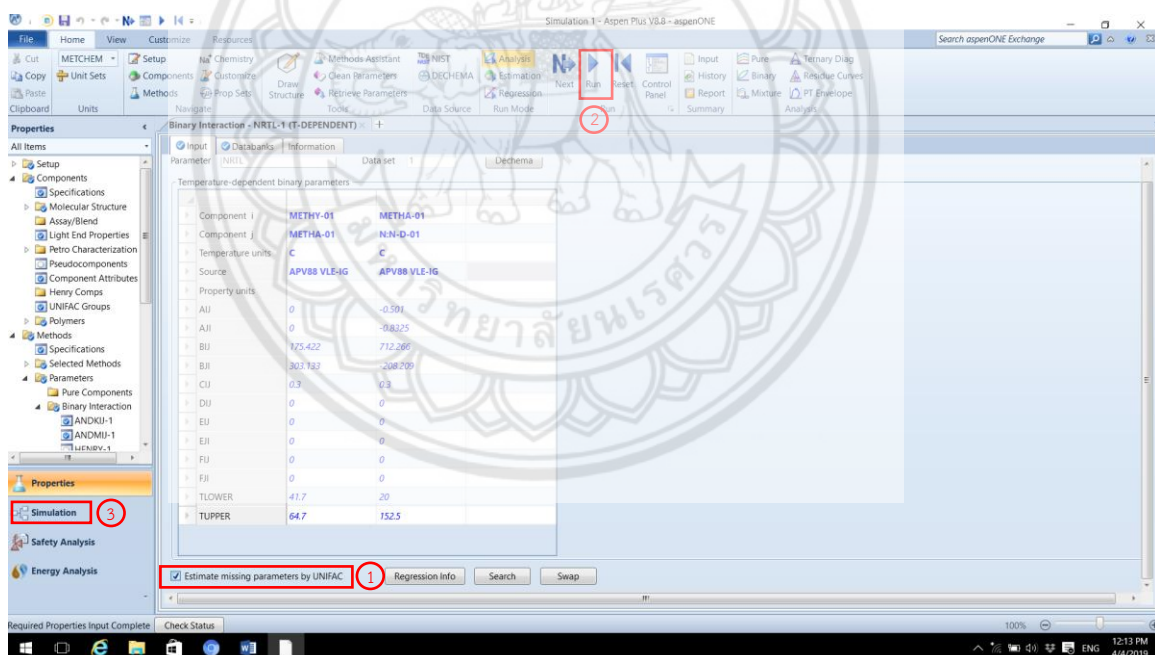
รูปที่ จ.1 โปรแกรมจำลองกระบวนการ Aspen Plus V8.8



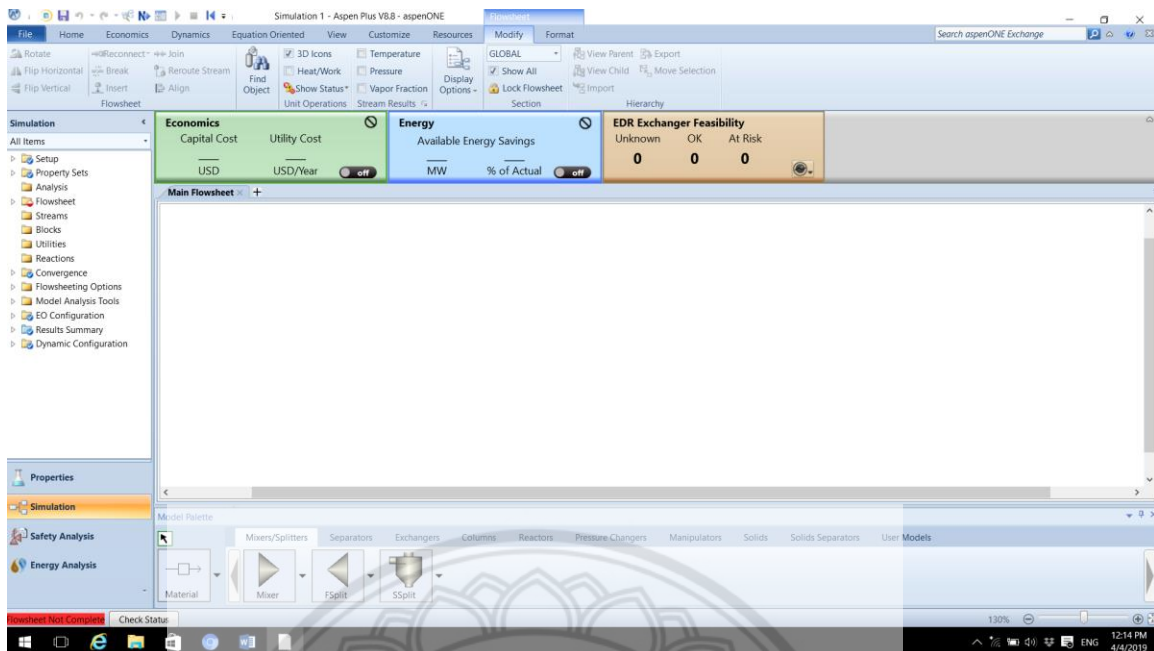
รูปที่ จ.2 ใส่ข้อมูลที่ผสมอะซิโตนและเอเทนอร์ที่ต้องการ



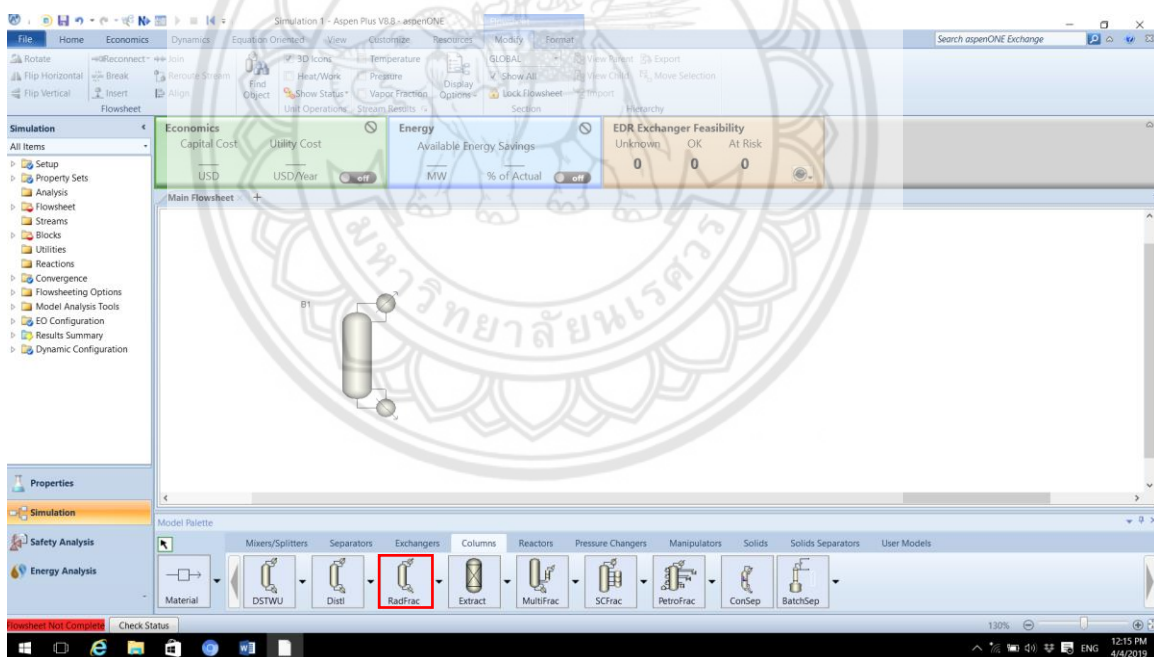
รูปที่ จ.3 เลือกวิธีในการคำนวณ (UNIFAC)



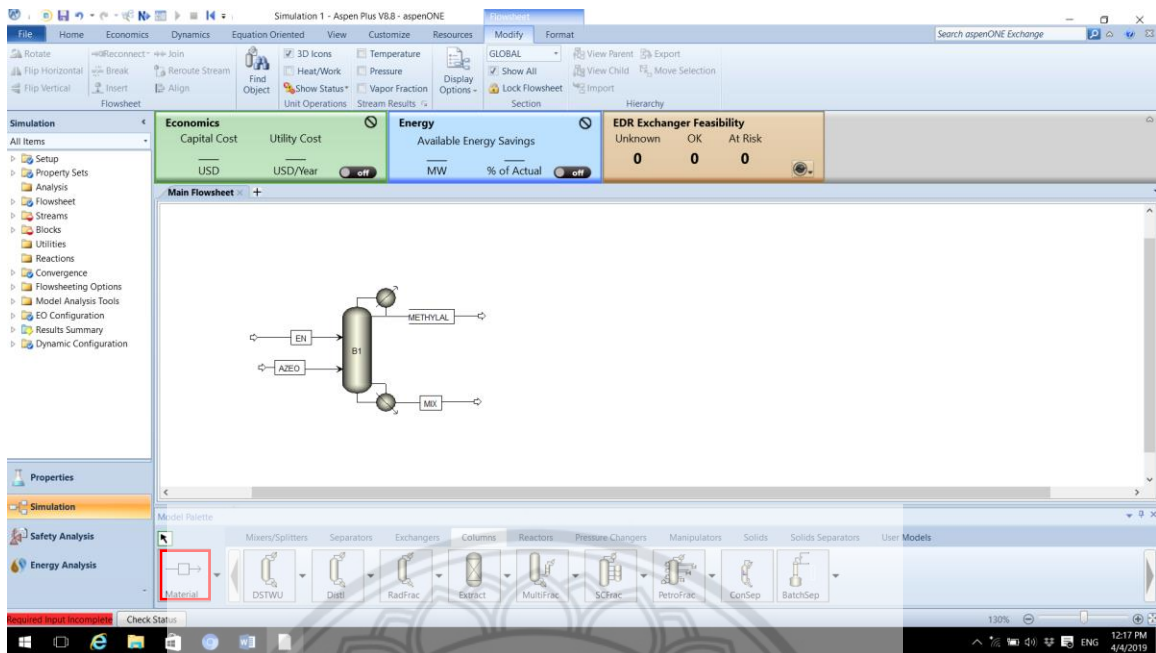
รูปที่ จ.4 ตรวจสอบความสัมพันธ์ของสารผสมอะซิโตนและเอทานอล



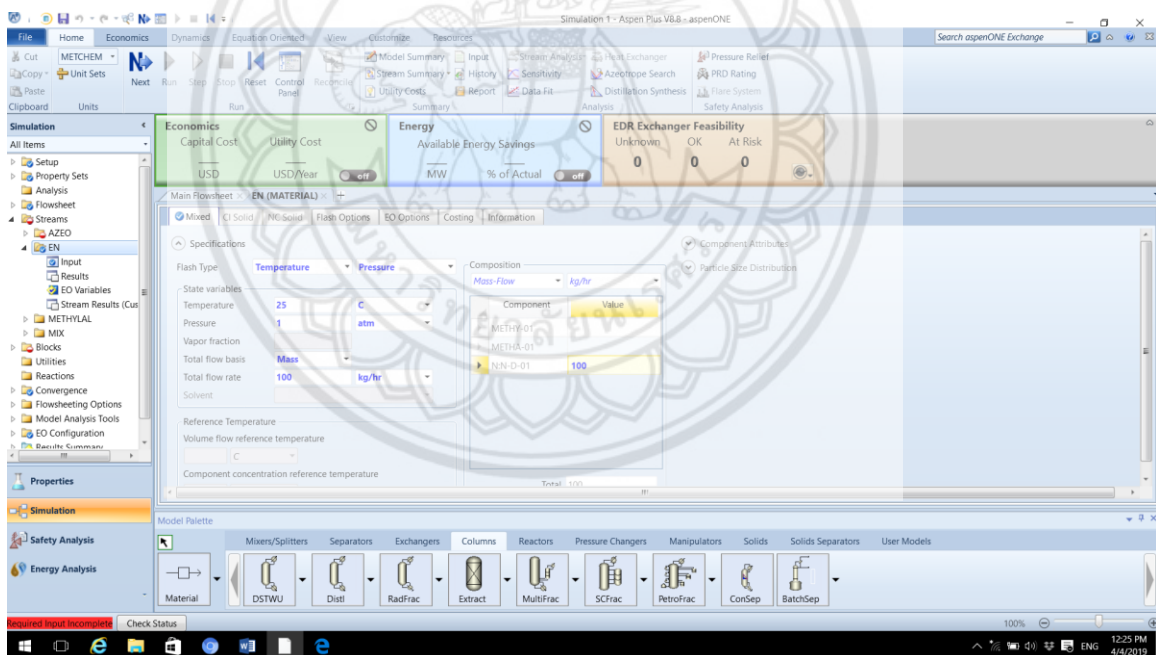
รูปที่ จ.5 หน้าจำลองกระบวนการ (Simulation)



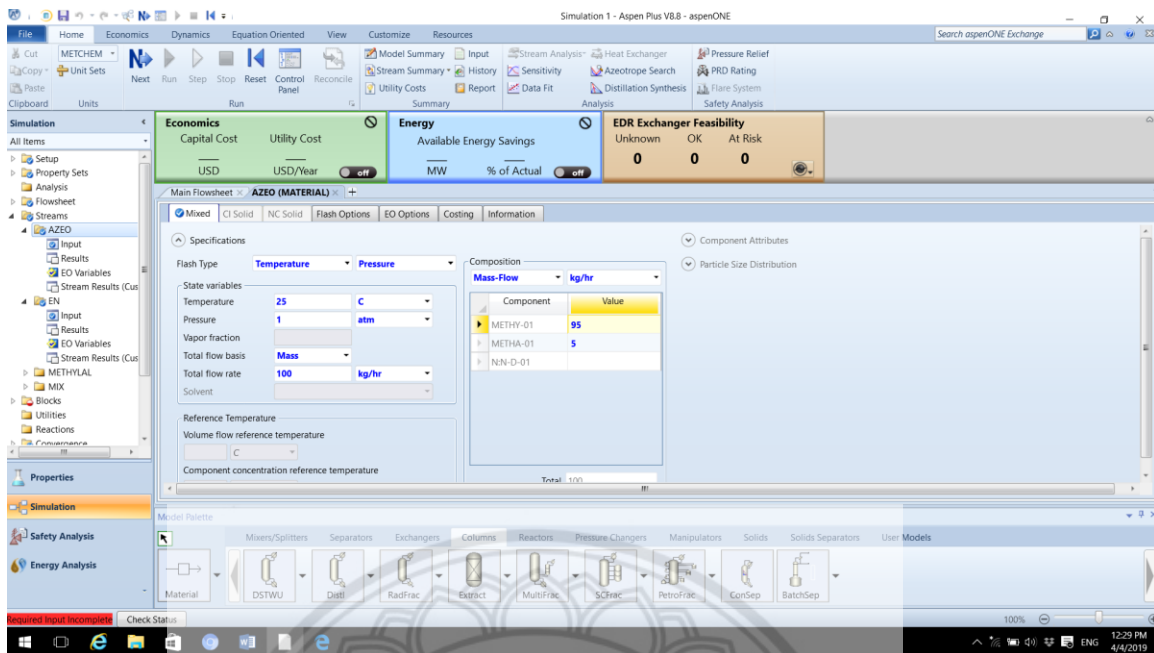
รูปที่ จ.6 หอกลับที่ใช้ในการจำลองกระบวนการกลั่นสกัด (Extractive Distillation)



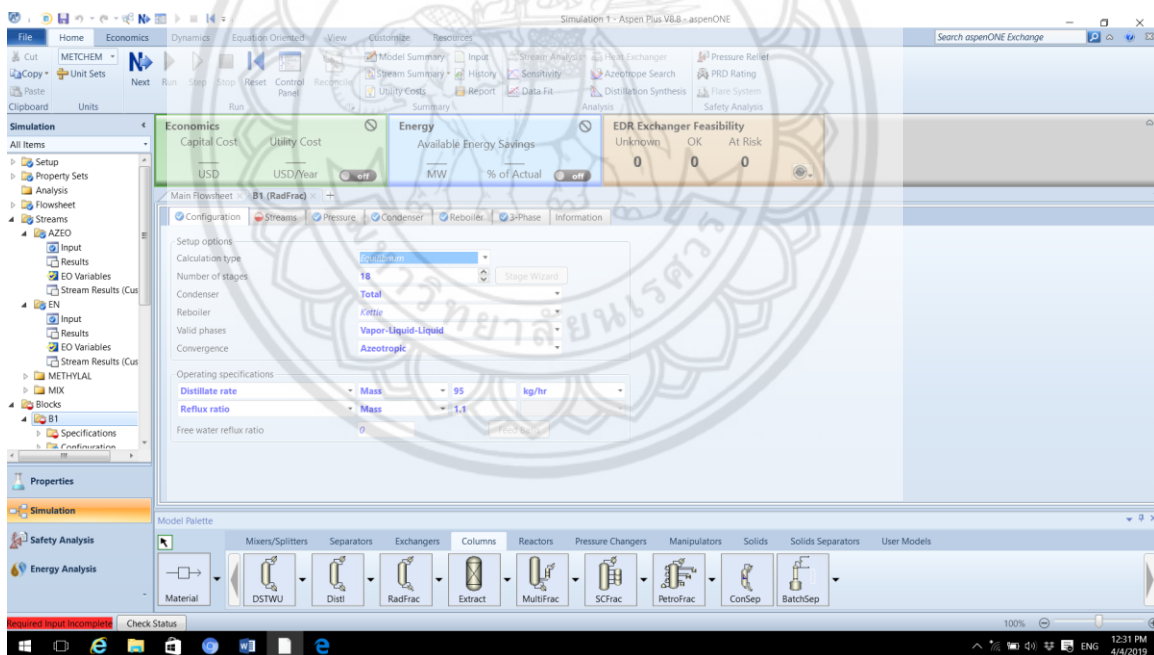
รูปที่ จ.7 ใส่สายเข้าและสายออกสำหรับหอกลั่นสกัด



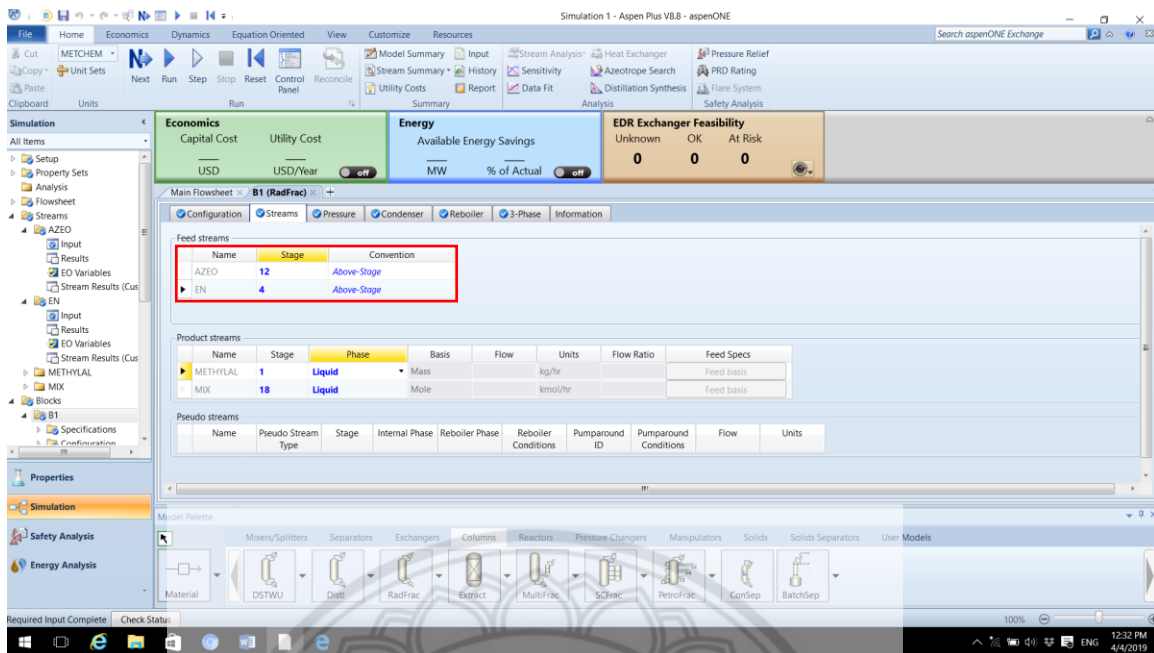
รูปที่ จ.8 ใส่ข้อมูลสำหรับแอนเทนเนอร์



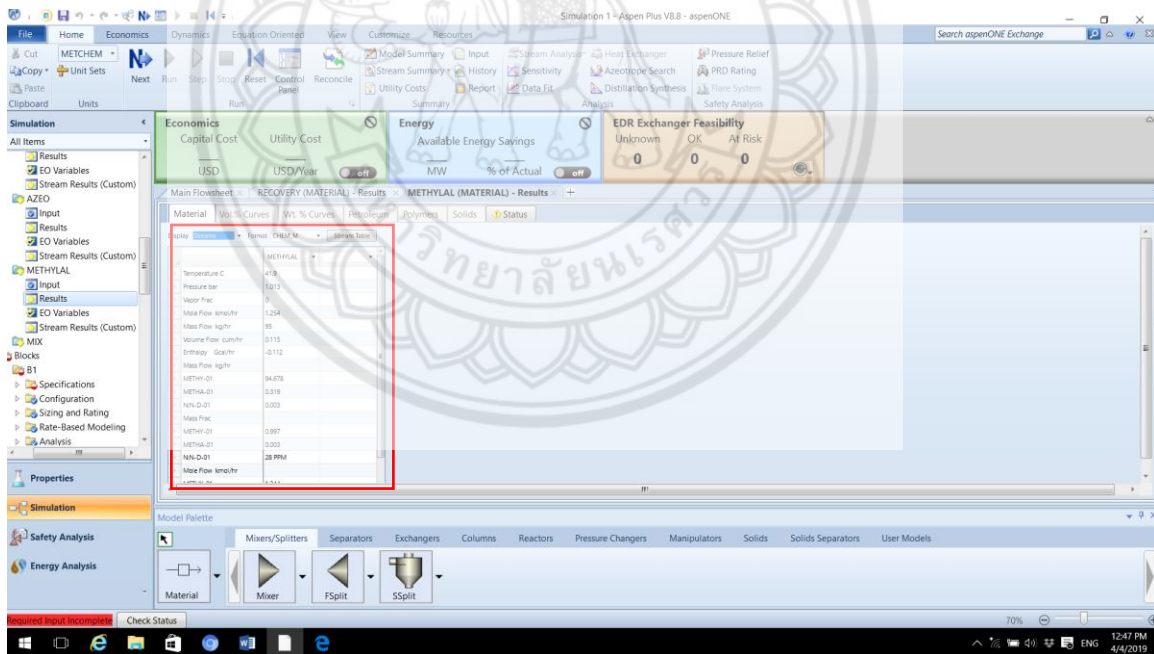
รูปที่ จ.9 ใส่ข้อมูลสำหรับสารผสมอะซิโพรป



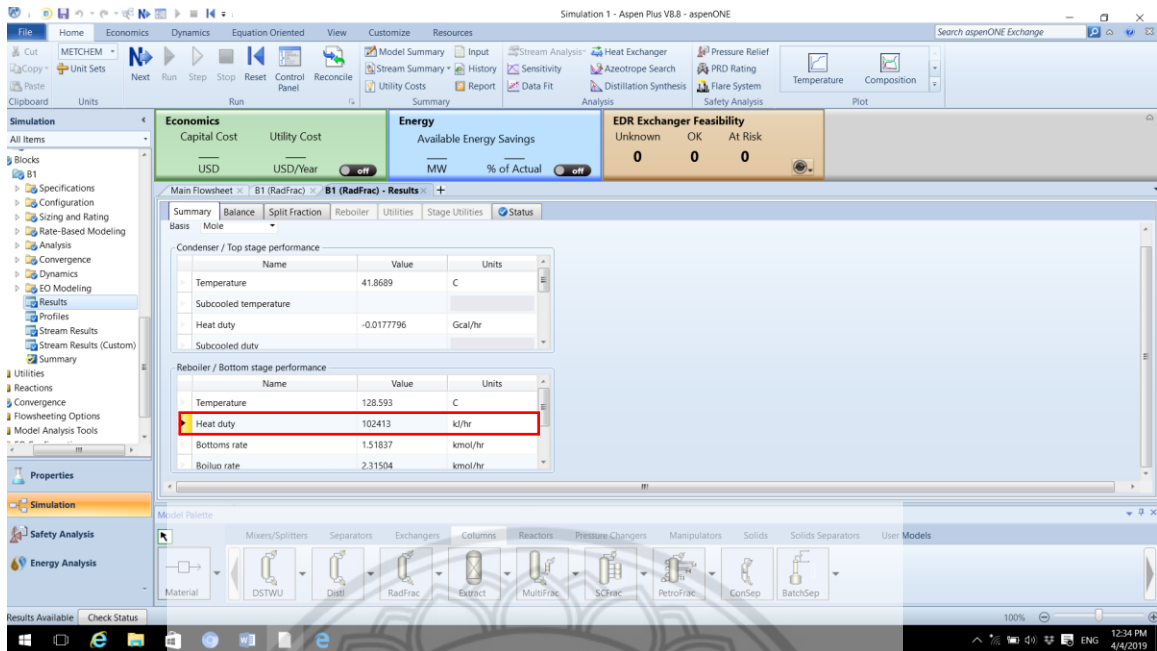
รูปที่ จ.10 ใส่ข้อมูลสำหรับหอกลั่นสกัด



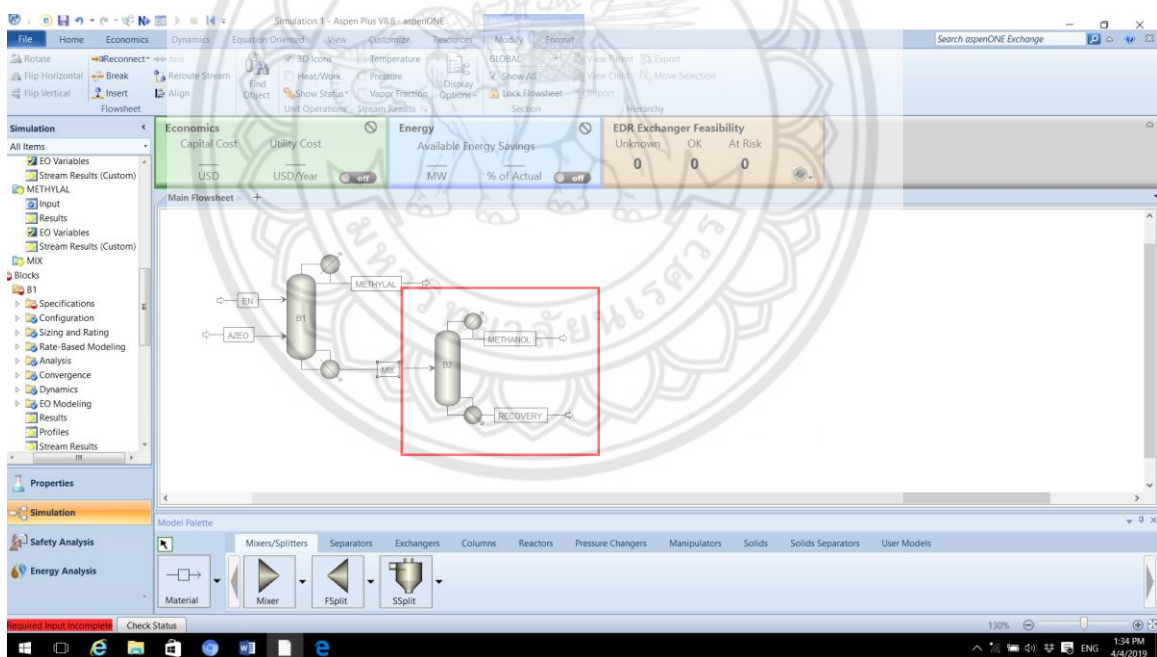
รูปที่ จ.11 ใส่ข้อมูลชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรปและเออนเทรเนอร์สำหรับหอกลั่นสกัด



รูปที่ จ.12 ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการสำหรับหอกลั่นสกัด (ยอดหอ)



รูปที่ จ.13 พลังงานที่ใช้สำหรับการกลั่นสกัด



รูปที่ จ.14 หอกลั่นสำหรับนำเอเทนเนอร์กลับมาใช้ใหม่ (Recovery Column)

Simulation 1 - Aspen Plus V8.8 - aspenONE

Economics
Capital Cost USD
Utility Cost USD/Year
Available Energy Savings MW
% of Actual

Energy
Economic Summary
Economic Summary
Utility Costs
Summary

EDR Exchanger Feasibility
Unknown OK At Risk
0 0 0

Main Flowsheet: B2 (RadFrac)

Configuration | Streams | Pressure | Condenser | Reboiler | 3-Phase | Information

Setup options
Calculation type: Equilibrium
Number of stages: 10
Condenser: Total
Reboiler: Kettle
Valid phases: Vapor-Liquid
Convergence: Standard

Operating specifications
Bottoms rate: Mole 100 kmol/hr
Reflux ratio: Mass 1.9
Free water reflux ratio: 0

Model Palette: Mixers/Splitters, Separators, Exchangers, Columns, Reactors, Pressure Changers, Manipulators, Solids, Solids Separators, User Models

รูปที่ จ.15 ใส่ข้อมูลสำหรับหอกู้คืน

Simulation 1 - Aspen Plus V8.8 - aspenONE

Economics
Capital Cost USD
Utility Cost USD/Year
Available Energy Savings MW
% of Actual

Energy
Economic Summary
Economic Summary
Utility Costs
Summary

EDR Exchanger Feasibility
Unknown OK At Risk
0 0 0

Main Flowsheet: B2 (RadFrac)

Configuration | Streams | Pressure | Condenser | Reboiler | 3-Phase | Information

Feed streams

Name	Stage	Condition
MIX	5	Above-Stage

Product streams

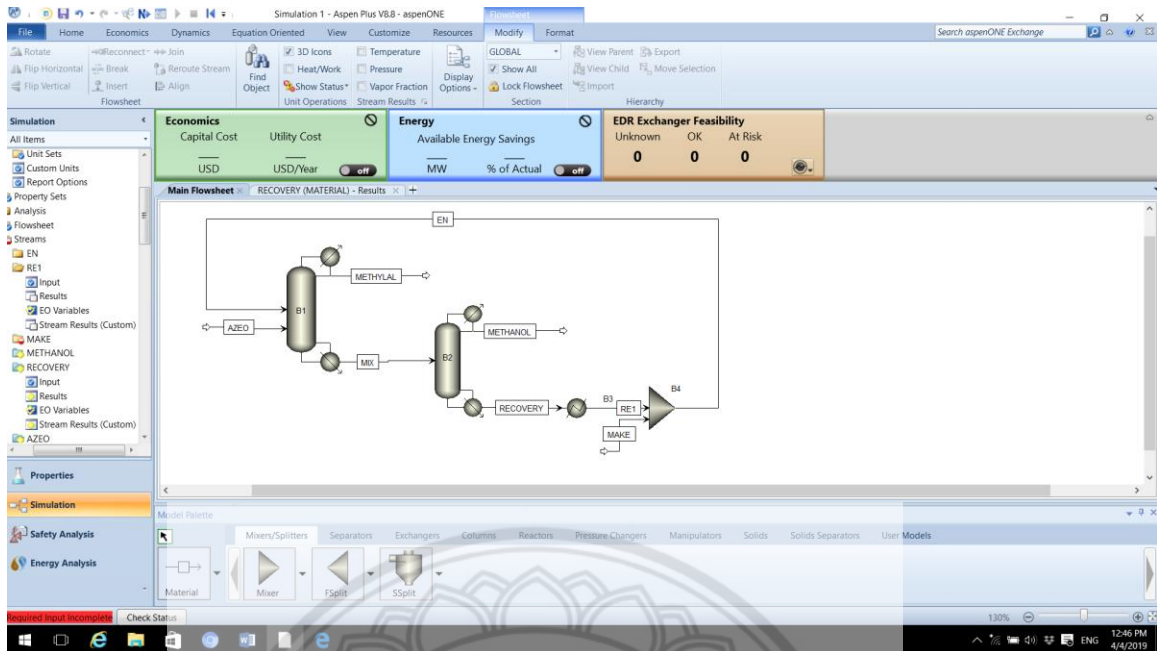
Name	Stage	Phase	Basis	Flow	Units	Flow Ratio	Feed Specs
METHANOL	1	Liquid	Mole		kmol/hr		Feed basis
RECOVERY	10	Liquid	Mole		kmol/hr		Feed basis

Pseudo streams

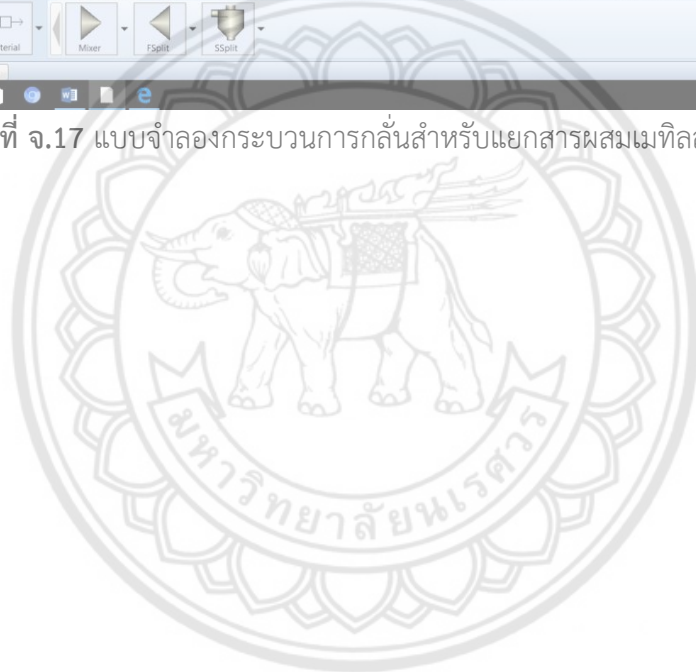
Name	Pseudo Stream Type	Stage	Internal Phase	Reboiler Phase	Reboiler Conditions	Pumparound ID	Pumparound Conditions	Flow	Units
------	--------------------	-------	----------------	----------------	---------------------	---------------	-----------------------	------	-------

Model Palette: Mixers/Splitters, Separators, Exchangers, Columns, Reactors, Pressure Changers, Manipulators, Solids, Solids Separators, User Models

รูปที่ จ.16 ใส่ข้อมูลขั้นที่ป้อนสารผสมสำหรับหอกู้คืน



รูปที่ จ.17 แบบจำลองกระบวนการกลั่นสำหรับแยกสารผสมเมทิลลัล-เมทานอล



ภาคผนวก ฉ
ข้อมูลเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองกระบวนการกลั่นสกัด
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus V8.



Name	Ethernet
Description	Realtek PCIe GBE Family Controller
Physical address (MAC)	54:bf:64:4c:a4:b5
Status	Not operational
Maximum transmission unit	1500
IPv4 address	169.254.110.154/16
IPv6 address	fe80::b8d4:e001:9e23:6e9a%15/64
DNS servers	161.200.91.5, 161.200.192.4, 161.200.80.1, 8.8.4.4
DNS connection suffix	eng.chula.ac.th
Connectivity (IPv4/IPv6)	Disconnected

Name	Local Area Connection* 12
Description	Microsoft Wi-Fi Direct Virtual Adapter #3
Physical address (MAC)	da:9c:67:57:d9:75
Status	Not operational
Maximum transmission unit	1500
IPv4 address	169.254.82.81/16
IPv6 address	fe80::c0d0:ae3f:ee0d:5251%9/64
DNS servers	fec0:0:0:ffff::1%1, fec0:0:0:ffff::2%1, fec0:0:0:ffff::3%1
Connectivity (IPv4/IPv6)	Disconnected

Name	Local Area Connection* 13
Description	Microsoft Wi-Fi Direct Virtual Adapter #4
Physical address (MAC)	ea:9c:67:57:d9:75
Status	Not operational
Maximum transmission unit	1500
IPv4 address	169.254.110.236/16
IPv6 address	fe80::184f:7aeb:60b5:6eec%7/64
DNS servers	fec0:0:0:ffff::1%1, fec0:0:0:ffff::2%1, fec0:0:0:ffff::3%1
Connectivity (IPv4/IPv6)	Disconnected


Name	Wi-Fi
Description	Qualcomm QCA61x4A 802.11ac Wireless Adapter
Physical address (MAC)	d8:9c:67:57:d9:75
Status	Operational
Maximum transmission unit	1500
Link speed (Receive/Transmit)	866/866 (Mbps)
DHCP enabled	Yes
DHCP servers	1.1.1.1
DHCP lease obtained	Wednesday, April 10, 2019 15:18:29
DHCP lease expires	Wednesday, April 10, 2019 15:33:29
IPv4 address	10.201.0.193/21
IPv6 address	fe80::788a:e136:2826:194c%19/64
Default gateway	10.201.7.254
DNS servers	161.200.91.5, 161.200.192.4, 161.200.91.1, 161.200.80.1, 8.8.4.4
DNS domain name	chula.ac.th
DNS connection suffix	chula.ac.th
Network name	eduroam
Network category	Public
Connectivity (IPv4/IPv6)	Connected to Internet / Connected to unknown network

Name	Bluetooth Network Connection
Description	Bluetooth Device (Personal Area Network)
Physical address (MAC)	d8:9c:67:57:d9:76
Status	Not operational
Maximum transmission unit	1500
IPv4 address	169.254.122.132/16
IPv6 address	fe80::34d4:abf6:b342:7a84%21/64
DNS servers	fec0:0:0:ffff::1%1, fec0:0:0:ffff::2%1, fec0:0:0:ffff::3%1
Connectivity (IPv4/IPv6)	Disconnected

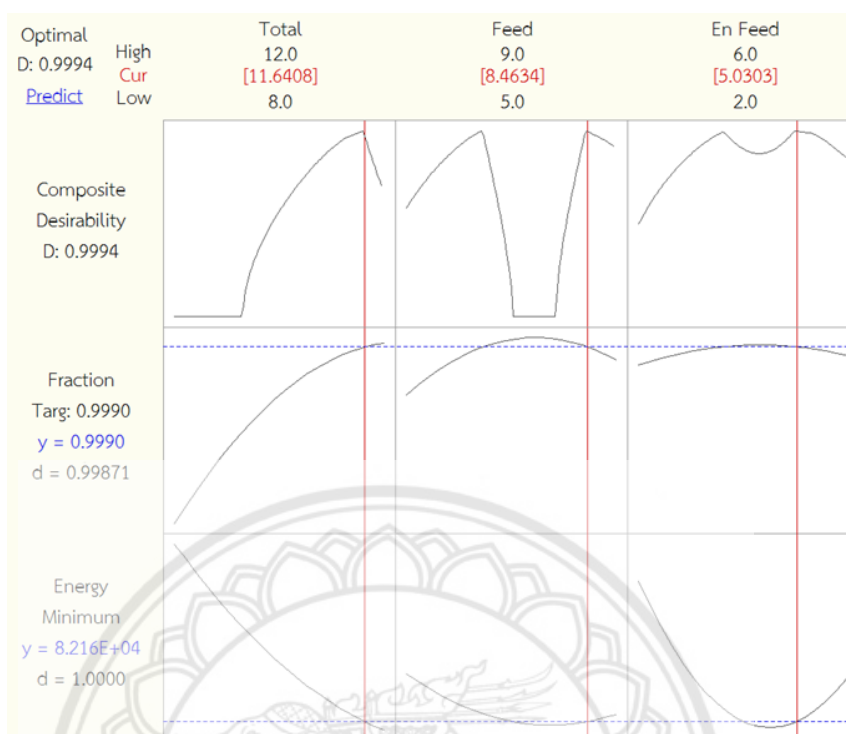
Name	Local Area Connection* 1
Description	Microsoft Wi-Fi Direct Virtual Adapter
Physical address (MAC)	da:9c:67:57:e3:ef
Status	Not Present
Maximum transmission unit	0
Connectivity (IPv4/IPv6)	Disconnected

Name	Local Area Connection* 2
Description	Microsoft Wi-Fi Direct Virtual Adapter #2
Physical address (MAC)	ea:9c:67:57:e3:ef
Status	Not Present
Maximum transmission unit	0
Connectivity (IPv4/IPv6)	Disconnected





ภาคผนวก ข
การอ่านกราฟสถานะที่เหมาะสมของหอกันสกดสำหรับฟังก์ชัน
Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab



รูปที่ ข.1 กราฟสถานะที่เหมาะสมของโครงสร้างหอกลั่นสกัดโดยใช้เอทานอลาไมนเป็นเอนเทรนเนอร์

จากรูปที่ ข.1 ในรูปมีกราฟย่อยเล็ก ๆ อยู่ 9 กราฟ โดยแกน X คือปัจจัยที่เราต้องการหาสถานะที่เหมาะสม ประกอบด้วย จำนวนชั้นของหอกลั่นสกัด (Total state) ชั้นที่ป้อนสารผสมอะซิโโทรป (Azeotrope feed state) และ ชั้นที่ป้อนเอนเทรนเนอร์ (Entrainer feed state) ตามลำดับ แกน Y คือระดับความน่าเชื่อถือ (Composite Desirability :D) เศษส่วนมวลของเมทิลลัล (Fraction) และ พลังงาน (Energy) ตามลำดับ ในแต่ละกราฟจะมีเส้นสีแดงที่ตัดผ่านเส้นกราฟตามแนวแกน Y ซึ่งแสดงจุดค่าความน่าเชื่อถือสูงสุดที่ตรงกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้คือค่าของเศษส่วนมวลของเมทิลลัลเท่ากับ 0.999 และจะใช้พลังงานที่น้อยที่สุดที่ โดยจะมีเส้นสีฟ้าตัดผ่านแต่ละปัจจัยที่แสดงในแกน X เป็นค่าที่แสดงผลเป็นสถานะที่เหมาะสม