การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแบบไหลย้อนกลับโดยความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตร้าโซนิคของน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

OPTIMIZATION OF HEAT-REFLUX AND ULTRASONIC-ASSISTED EXTRACTION OF OIL FROM SPENT COFFEE GROUND USING RESPONSE SURFACE METHADOLOGY

นางสาวสุรีรัก กาละภักดี 57365881

นายอธิโชติ อ่อนวงษ์ 57365898

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2560

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแบบไหลย้อนกลับโดยความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตร้าโซนิคของน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

ผู้ดำเนินโครงงาน นางสาวสุรีรัก กาละภักดี รหัส 57365881

นายอธิโชติ อ่อนวงษ์ รหัส 57365898

ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์อาภาภรณ์ จันทร์ปิรักษ์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2560

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

.....ที่ปรึกษาโครงการ

(อาจารย์อาภาภรณ์ จันทร์ปิรักษ์)

.....กรรมการ

(ดร.สุชาดา อยู่แก้ว)

.....กรรมการ

(ดร.วีรวรรณ วีรชัยพิเชษฐ์กุล)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแบบไหลย้อนกลับโดยความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตร้าโซนิคของน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นางสาวสุรีรัก	กาละภักดี	รหัส 57365881
	นายอธิโชติ	อ่อนวงษ์	รหัส 57365898
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์อาภาภรณ์	จันทร์ปิรักษ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2560		

.....

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ (Spent Coffee Grounds ; SCG) ด้วยตัวทำละลายร่วม (เฮกเซนกับไอโซโพรพานอล) พร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) และการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ผ่านการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Minitab R.17 ปัจจัยที่ศึกษาในโครงงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ปัจจัย ดังนี้ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (4:1 – 8:1 มิลลิลิตรต่อกรัม) อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (30 – 50 องศาเซลเซียส) เวลาที่ใช้ในการสกัด (15 – 45 นาที) และความชื้นในกากกาแฟ (ร้อยละ 2 – 30 โดยน้ำหนัก) โดยในแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ จำนวนเงื่อนไขในการทดลองเท่ากับ 27 การทดลอง ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 5.78 : 1 มิลลิลิตรต่อกรัม อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 30 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการสกัด 45 นาที และความชื้นในกากกาแฟร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าได้ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้สูงสุดร้อยละ 19.31 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำสภาวะเหล่านี้ไปทำการทดลองจึงพบว่าปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ร้อยละ 18.55 โดยน้ำหนัก คิดเป็นความคลาดเคลื่อนร้อยละ 3.96 ของค่าที่คำนวณได้ แต่สภาวะเหมาะสมนี้มีความใกล้เคียงกับบางสภาวะในการทดลอง ซึ่งได้ผลใกล้กับค่าปริมาณน้ำมันกาแฟที่คำนวณได้ จึงสามารถยืนยันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้ว่ามีความแม่นยำในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล พบว่า มีค่ากรดไขมัน 3.92 – 5.17 มิลลิกรัมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของน้ำมันกาแฟ ค่าความหนืด 51.38 – 59.92 เซนติพอยส์ และค่าความหนาแน่น 921.39 – 943.49 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งค่าเหล่านี้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ ที่นำไปผลิตไบโอดีเซล

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะ อาจารย์อาภาภรณ์ จันทร์ปิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน รวมถึงอาจารย์ ดร.วีรวรรณ วีรชัยพิเชษฐ์กุล และ ดร.สุชาดา อยู่แก้ว อาจารย์กรรมการโครงงาน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และวิธีแก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนความดูและเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงงานมาโดยตลอด และขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ดลเดช ตั้งตระการพงศ์ หัวหน้าภาควิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้ยืมใช้สถานที่ รวมถึงนางวิชญา อิ่มกระจ่าง และยางสาวนิภาวรรณ จันทะคุณ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดลองที่อาคารปฏิบัติการคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงงานใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดการดำเนินโครงงานจนสำเร็จการศึกษา

ผู้ดำเนินงาน
สุรีรัก กาละภักดี
อธิโชติ อ่อนวงษ์

พฤษภาคม 2561

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์.....ก
บทคัดย่อ.....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ช
สารบัญรูปภาพ.....ฌ

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....1
1.2 จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....3
1.3.1 สภาวะที่ใช้ในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลาย.....3
1.3.2 วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น.....3
1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....4
2.1 กาแฟ.....4
2.1.1 ประวัติกาแฟ.....4
2.1.2 สายพันธุ์กาแฟ.....5
2.2 กากกาแฟ.....6
2.3 วิธีการสกัด.....7
2.3.1 การคน.....7
2.3.2 การหมัก.....7
2.3.3 การสกัดด้วยซอห์คเลต.....7
2.3.4 การสกัดแบบไหลย้อนกลับโดยใช้ความร้อน.....7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5 การสกัดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค....8

2.3.6 การสกัดด้วยไมโครเวฟ....8

2.3.7 การสกัดโดยใช้ตัวทำละลายในสภาวะเร่ง....9

2.3.8 การสกัดแบบของไหลยิ่งยวดคาร์บอนไดออกไซด์....9

2.4 ตัวทำละลาย....9

2.4.1 เฮกเซน....9

2.4.2 ไอโซโพรพานอล....11

2.5 การออกแบบการทดลอง....12

2.5.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง....13

2.5.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง....14

2.5.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง....14

2.6 วิธีพื้นผิวตอบสนอง....15

2.6.1 การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง....17

2.6.2 การตรวจสอบข้อมูล....18

2.6.3 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ....20

2.6.4 การหาค่าผลตอบสนองที่เหมาะสม....20

2.7 โปรแกรมมสำเร็จรูปมินิแท็บ....21

2.8 ทฤษฎีที่ใช้ทดสอบ....21

2.8.1 กรดไขมันอิสระ....21

2.8.2 ความหนืด....22

2.8.3 ความหนาแน่น....22

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....22

2.9.1 งานวิจัยที่ศึกษาการสกัด....22

2.9.2 งานวิจัยที่ศึกษาวิธีการสกัดด้วยอัลตร้าโซนิค....23

2.9.3 งานวิจัยที่ศึกษาการหาจุดที่เหมาะสมของการสกัดโดยการใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง 23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 26

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง..... 26

3.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....26

3.1.2 อุปกรณ์การทดลอง.....26

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....27

3.2.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูล.....27

3.2.2 การจัดหาและเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....27

3.2.3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองในการทำพื้นที่ผิวตอบสนอง.....28

3.2.4 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายร่วม

..... 28

3.2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ..... 29

3.2.6 ขั้นตอนการวัดความหนืด.....30

3.2.7 ขั้นตอนการวัดความหนาแน่น..... 31

3.3 แผนภาพการทดลอง..... 31

3.3.1 แผนภาพการทำพื้นผิวตอบสนอง.....31

3.3.2 แผนภาพการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ..... 32

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์..... 33

4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ.....33

4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟ.....34

4.2.1 การสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟ.....35

4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

.....36

4.2.3 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล.....38

4.2.4 การสร้างพื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟ.....39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.5 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ.....48
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันจากกากกาแฟ.....48

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....50
5.1 บทสรุป.....50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....51

บรรณานุกรม.....52
ภาคผนวก.....57

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....29
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟในสภาวะที่แตกต่างกัน.....33
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....36
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันเบื้องต้น.....49

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 เมล็ดกาแฟ....4
รูปที่ 2.2 ลักษณะของเมล็ดกาแฟพันธุ์อาราบิก้าและโรบัสต้า....5
รูปที่ 2.3 กากกาแฟ....6
รูปที่ 2.4 พื้นผิวตอบสนองสามมิติ....17
รูปที่ 2.5 การออกแบบประสมกลาง....18
รูปที่ 2.6 การออบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ปัจจัย....18
รูปที่ 2.7 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด....20
รูปที่ 3.1 กระบวนการทำพื้นที่ผิวตอบสนอง....31
รูปที่ 3.2 กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ....32
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่สกัด....38
รูปที่ 4.2 กราฟโครงร่างแสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด....39
รูปที่ 4.3 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้น้ำมันกาแฟที่สกัดได้ระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด....39
รูปที่ 4.4 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด....40
รูปที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้น้ำมันกาแฟที่สกัดได้ระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด....41
รูปที่ 4.6 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและความชื้นของกากกาแฟที่ใช้ในการสกัด....42
รูปที่ 4.7 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและความชื้นของกากกาแฟที่ใช้ในการสกัด....42
รูปที่ 4.8 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัด....43
รูปที่ 4.9 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัด....44

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างความชื้นของกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด.....45
รูปที่ 4.11 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่าความชื้นของกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด.....45
รูปที่ 4.12 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างความชื้นของกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด.....46
รูปที่ 4.13 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างความชื้นของกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด.....47
รูปที่ 4.14 กราฟสภาวะที่เหมาะสมของน้ำมันกาแฟ.....48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันเครื่องดื่มกาแฟได้กลายเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันต่อมนุษย์ด้วยจำนวนประชากรประมาณ 1 ใน 4 ของโลกบริโภคเครื่องดื่มกาแฟเป็นประจำ ในปี 2560 จากข้อมูลของ The International Coffee Organization (ICO) กล่าวว่าการส่งออกและนำเข้าเมล็ดกาแฟทั่วโลกประมาณ 122 ล้านถุง ปริมาณถุงละ 60 กิโลกรัม และมากกว่า 50 ประเทศทั่วโลกส่งเมล็ดกาแฟเป็นสินค้าส่งออกหลัก (ผลผลิตรวมประมาณร้อยละ 70 ของกาแฟโลก) [1-2] นับได้ว่าเมล็ดกาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของโลก ด้วยปริมาณการบริโภคนี้ส่งผลให้เกิดของเหลือประมาณร้อยละ 65 ของน้ำหนักกาแฟสด [3] จากการผลิตเครื่องดื่มกาแฟ โดยของเหลือดังกล่าวคือ กากกาแฟ (Spent Coffee Ground; SCG) กากกาแฟแห้งมีปริมาณน้ำมันร้อยละ 15 – 28 [4-7] จะเห็นได้ว่าใกล้เคียงกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ ดังนั้นการนำน้ำมันกาแฟ (Coffee Oil) มาใช้ประโยชน์เป็นประเด็นที่น่าสนใจ

น้ำมันกาแฟมีองค์ประกอบของกรดไขมันสูง ได้แก่ กรดไลโนเลอิก (ร้อยละ 42) กรดปาล์มิติก (ร้อยละ 33) และกรดโอเลอิก (ร้อยละ 9) ของกรดไขมันทั้งหมด น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 843 กรัมต่อโมล ร้อยละความชื้นและร้อยละกรดไขมันอิสระ เป็น 0.236 และ 16.5 ตามลำดับ [8] คุณสมบัติเหล่านี้เหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งมีสารต้านอนุมูลอิสระอยู่สูง ซึ่งสารชนิดนี้ทำหน้าที่ป้องกันและยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชั่นให้กับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลได้เป็นอย่างดี [7] และข้อดีอีกประการคือลดปริมาณการใช้น้ำมันเพื่อผลิตไบโอดีเซลจากแหล่งน้ำมันเพื่อบริโภค เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันผักกาดก้านข้าว โดยน้ำมันกาแฟไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มของน้ำมันเพื่อบริโภค [9] อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของน้ำมันที่กล่าวข้างต้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกาแฟ แหล่งปลูก กระบวนการผลิตน้ำมันกาแฟ ดังนั้นการได้มาซึ่งน้ำมันกาแฟขั้นกระบวนการผลิตน้ำมันกาแฟจากกากกาแฟกลายเป็นสิ่งจำเป็น วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยที่ผ่านมากล่าวว่าวิธีการสกัด ตัวทำละลาย ความชื้น อุณหภูมิ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ ส่งผลต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด เช่น เฮกเซน ไอโซโพรพานอล เอทานอล เพนเทน อะซิโตน และเฮกเซนผสมกับไอโซโพรพานอล เป็นต้น พบว่าความสามารถในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแตกต่างกันและตัวทำละลายเฮกเซนผสมกับไอโซโพรพานอลให้ปริมาณน้ำมันได้มากที่สุด [4, 10-11] นอกจากนี้วิธีการสกัดมีทั้งวิธีของแข็ง-ของเหลว (Solid-Liquid Extraction) และวิธีของแข็ง-ของไหลวิกฤติยิ่งยวด (Solid-Supercritical Fluid Extraction) โดยมีหลากหลายเทคนิค เช่น การสกัดแบบไหลย้อนกลับ การสกัดด้วยซอห์คเลต การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะของไหลยิ่งยวด และการสกัดด้วยคลื่นอัลต

ร้าโซนิค เป็นต้น [10, 12-13] ทั้งนี้แต่ละเทคนิคจะได้ปริมาณน้ำมันและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยการสกัดแบบไหลย้อนกลับมีข้อด้อยทางด้านเวลาและปริมาณตัวทำละลายในการสกัด [14] เพื่อเอาชนะข้อด้อยดังกล่าวนี้ได้มีการนำเทคนิคการสกัดมาใช้งานร่วมกันด้วยการเพิ่มคลื่นอัลตร้าโซนิคเข้าไปช่วยให้ประสิทธิภาพการสกัดเพิ่มขึ้น โดยคลื่นอัลตร้าโซนิคจะสร้างคลื่นไปรบกวนผนังเซลล์ส่งผลให้เพิ่มการถ่ายเทมวลของน้ำมันที่ต้องการสกัดออกจากเซลล์ได้ดียิ่งขึ้น [15] จากที่กล่าวข้างต้นมีหลายปัจจัยและแต่ละปัจจัยมีหลายระดับส่งผลต่อปริมาณน้ำมัน เพื่อหาสภาวะการสกัดที่เหมาะสมต้องทำการทดลองปริมาณมากส่งผลต่อค่าใช้จ่าย ซึ่งการนำเทคนิคทางสถิติร่วมในการวิเคราะห์ข้อมูลช่วยลดจำนวนการทดลองลงได้ [16]

วิธีการทางสถิติสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลองและแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของกระบวนการที่ได้รับจากปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไป และกระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic Relationship) ซึ่งตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพิ่มหรือลดค่าแล้วมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง [16] นอกจากนี้ต้องมีการเลือกชนิดของการดำเนินการออกแบบการทดลองให้เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) จะมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design) ถ้าหากมีปัจจัยมากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป [17] และเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์รวมถึงการพัฒนาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาระดับของตัวแปรอิสระที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดนั้นค่าที่ได้จะถูกแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขและมีความสัมพันธ์ในลักษณะยากต่อการทำความเข้าใจ จึงมีการใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เข้ามาแสดงผลของสภาวะต่างๆ ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองในรูปแบบกราฟสามมิติ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันกาแฟให้ได้ปริมาณมากที่สุดจากตัวทำละลายเฮกเซนด้วยวิธีการสกัดแบบไหลย้อนกลับร่วมกับคลื่นอัลตร้าโซนิคจากสี่ปัจจัย (สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด เวลาที่ใช้ในการสกัด และความชื้นของกากกาแฟ) โดยใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนองทำนายหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันกาแฟ

1.2 จุดมุ่งหมายของการศึกษา

ก. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

ข. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลได้ของน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟ

ค. เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมใช้ในการทำนายปริมาณน้ำมันที่สกัด

ง. เพื่อศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างการสกัดแบบไหลย้อนกลับร่วมกับคลื่นอัลตร้าโซนิค

จ. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายเฮกเซนและไอโซโพรพานอล ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระ ความหนาแน่น และความหนืด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตงานวิจัยไว้ โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1.3.1 สภาวะที่ใช้ในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลาย

ก. ตัวแปรอิสระ

ก.1 สัดส่วนระหว่างกากกาแฟต่อตัวทำละลาย (4:1 – 8:1 มิลลิลิตรต่อกรัม)

ก.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (30 – 50 องศาเซลเซียส)

ก.3 เวลาที่ใช้ในการสกัด (15 – 45 นาที)

ก.4 ความชื้นในกากกาแฟ (2 – 30 ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ข. ตัวแปรตาม

ข.1 ผลได้ของน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟ

ค. ตัวแปรควบคุม

ค.1 ความดันบรรยากาศ

ค.2 ชนิดของตัวทำละลาย (เฮกเซนและไอโซโพรพานอล)

ค.3 ขนาดของกากกาแฟ

ค.4 ความถี่และกำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิคแบบอ่าง

ค.5 สายพันธุ์ของกากกาแฟ

1.3.2 วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น

วิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายเฮกเซนโดยใช้การสกัดแบบไหลย้อนกลับร่วมกับคลื่นอัลตร้าโซนิค ประกอบด้วย

ก. ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ข. ความหนาแน่น

ค. ความหนืด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ก. ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

ข. ปริมาณของน้ำมันที่สกัดมีปริมาณมากขึ้นเมื่อใช้การสกัดแบบไหลย้อนกลับร่วมกับคลื่น อัลตร้าโซนิค

ค. ทราบคุณสมบัติของน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟ ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระ ความหนาแน่น และความหนืด

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 กาแฟ [18]

คำว่า Coffee มาจากคำในภาษาอะราบิก คือ ควาฮ์วาฮ์ (Qahweh) เป็นคำที่หมายถึง ไวน์ในภาษากวี ต่อมาภายหลังพัฒนาเปลี่ยนสำเนียงเป็นคาเวย์ (Kawha) คาฟฟี่ (Kaffe) และ คอฟฟี่ (Coffee) ในที่สุด ส่วนคนไทยในสมัยก่อนเรียกว่า โกปี๊ ข้าวแฝ่ และกาแฟ ในที่สุด

รูปที่ 2.1 เมล็ดกาแฟ

ที่มา : http://www.esc.agritech.doae.go.th/ebooks/download-pdf/การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกาแฟ.pdf

2.1.1 ประวัติกาแฟ

เดิมทีกาแฟถูกค้นพบประมาณปี ค.ศ. 850 ก่อนคริสต์ศักราช โดยสันนิษฐานว่ามนุษย์สมัยโบราณอาจเรียนรู้จากการสังเกตการกินของสัตว์และทดลองกินตาม ผลกาแฟสุกนั้นมีรสหวานเป็นที่ชื่นชอบของสัตว์ต่างๆ ซึ่งต่อมามีการนำผลสุกมาทำไวน์ เมื่อลองเคี้ยวเมล็ดกาแฟจะเกิดความรู้สึกว่าสบายหายเหน็ดเหนื่อยจากอากาศร้อนหรือการเดินทางไกล นั่นเพราะกาแฟมีฤทธิ์ช่วยกระตุ้นร่างกาย ทำให้กาแฟเริ่มเป็นที่รู้จักของคนทั่วไป มีการพัฒนานำเมล็ดกาแฟมาป่นผสมไขมันสัตว์ปั้นเป็นก้อนไว้กินเป็นอาหารติดตัวในการเดินทาง ชาวพื้นเมือง บางเผ่าในแอฟริกาใช้กาแฟเซ่นไหว้พระเจ้าและผีสางที่นับถือ ในพิธีฉลองสาบานพี่น้องร่วมสายโลหิตมีการแกะเมล็ดกาแฟจากผลกาแฟสองเมล็ดแบ่งให้พี่น้องคนละหนึ่งเมล็ดเพื่อนำไปจุ่มโลหิตของตนและมอบให้พี่น้องแต่ละคนไปเคี้ยวรับประทาน นอกจากนี้กาแฟยังเป็นของขวัญที่มอบให้แก่แขกที่มาเยี่ยมเคี้ยวก่อนที่จะเลี้ยงอาหาร ต่อมากาแฟถูกนำมาใช้เป็นเครื่องดื่ม ในระยะแรกใช้เมล็ดกาแฟใส่ในน้ำต้มบนกองไฟจนน้ำกาแฟออกเป็นสีเหลือง ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันกาแฟได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ มีการตากเมล็ดกาแฟ

เพื่อให้เก็บได้นานขึ้น การคั่วบด แช่ ต้มกาแฟ โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น กระทะ ครกบด เครื่องต้มกาแฟ ฯลฯ เพื่ออำนวยความสะดวกยิ่งขึ้น

2.1.2 สายพันธุ์กาแฟ

รูปที่ 2.2 ลักษณะของเมล็ดกาแฟพันธุ์อาราบิก้าและโรบัสต้า
ที่มา : http://coffeeidiot.com/สารพันธุ์กาแฟอราบิก้าและโรบัสต้า**ในเมืองไทย**

2.1.2.1 กาแฟอาราบิก้า (Coffea Arabica L.)

เป็นสายพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุดในโลก มีปริมาณผลผลิตมากกว่าร้อยละ 80 ของผลผลิตกาแฟโลก มีโครโมโซม 2n = 44 ลักษณะทรงพุ่มขนาดเล็ก ใบเขียวเป็นมัน ดอกผสมตัวเอง ระยะออกดอก ถึงผลแก่ใช้เวลา 6 – 9 เดือน เมล็ดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ รูปทรงค่อนข้างแบนยาว เกือบเป็นวงรี สีเขียวอมเทาฟ้า ให้ผลผลิตปานกลาง ลักษณะเด่น คือ มีกลิ่นหอมและรสชาตินุ่มละมุนเป็นที่นิยมของผู้บริโภค ข้อด้อยคือ อ่อนแอต่อโรค โดยเฉพาะโรคราสนิม ไม่ทนทานต่อการแปรปรวนของสภาพแวดล้อม ทำให้การดูแลรักษาทำได้ยากกว่าพันธุ์อื่นๆ จุดเด่นของกาแฟอาราบิก้า คือ มีปริมาณคาเฟอีนน้อย ประมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนัก มีกลิ่นหอม เหมาะสำหรับนำมาทำเป็นกาแฟร้อน ทานแบบไม่ใส่นม

2.1.2.2 กาแฟโรบัสต้า (Coffea Canephora Pierre ex Froehner)

เป็นสายพันธุ์ที่ปลูกมากเป็นอันดับสองรองจากอาราบิก้ามีผลผลิตประมาณร้อยละ 20 ของผลผลิตกาแฟโลก มีโครโมโซม 2n = 22 ลักษณะทรงพุ่มใหญ่กว่ากาแฟพันธุ์อาราบิก้า มีข้อปล้องยาว กิ่งก้านสาขามาก ใบใหญ่ สีเขียวเข้มไม่เป็นมัน ดอกไม่สามารถผสมตัวเองได้ ต้องผสมข้ามต้น โดยอาศัยลม และแมลงช่วยผสมพันธุ์ ดอกกาแฟโรบัสต้าจึงมีกลิ่นที่หอมมาก ระยะเวลาตั้งแต่ดอกบานถึงผลแก่ประมาณ 9 – 11 เดือน เมล็ดเล็ก รูปทรงค่อนข้างกลมและนูน สีเขียวอมน้ำตาล ให้ผลผลิตสูง ทนทานต่อโรค และความแปรปรวนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี จุดเด่นของกาแฟโรบัสต้า คือ มีปริมาณเนื้อกาแฟมาก รสชาติเข้มข้น ส่วนข้อด้อยคือ มีกลิ่นหอมน้อยกว่า จึงเหมาะแก่การนำมาผสม

กับกาแฟอาราบิก้า หรือที่เรียกว่า การเบลนด์กาแฟ ทำกาแฟเย็น หรือกาแฟใส่นม เนื่องจากรสนมและความหวานไม่กลบรสกาแฟจนหมด นอกจากนั้นยังนิยมนำมาทำกาแฟผงหรือกาแฟสำเร็จรูปด้วย มีปริมาณคาเฟอีนประมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนัก

2.2 กากกาแฟ [19]

กากกาแฟ (Spent Coffee Grounds, SCG) คือ ส่วนที่เหลือทิ้งจากการผลิตกาแฟสำเร็จรูป ลักษณะเป็นผงเนื้อละเอียดมีความชื้นสูงเกาะกันเป็นก้อน จากความนิยมบริโภคกาแฟที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกากกาแฟที่เหลือทิ้งมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งยากต่อการจัดการอาจทำให้เกิดปัญหาเชื้อรา กลิ่นเน่าเสีย และก๊าซเรือนกระจกจากการหมักทับถม กากกาแฟเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในด้านปริมาณ มีความต่อเนื่องที่ไม่ขึ้นกับฤดูกาลต่างจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายๆ ชนิด เช่น ฟางข้าว แกนข้าวโพด แกลบ และทางใบปาล์ม เป็นต้น

(A) (B) (C)

รูปที่ 2.3 (A) กากกาแฟเหลือทิ้งจากการชงกาแฟ
(B) กากกาแฟอบแห้งก่อนสกัดน้ำมัน (C) กากกาแฟหลังสกัดน้ำมัน

ที่มา : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452316X17303393

การใช้ประโยชน์จากกากกาแฟ ในระยะเริ่มต้นกากกาแฟที่เหลือทิ้งจะถูกนำมาใช้แปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์จากสิ่งเหลือใช้ เช่น การใช้ทำวัสดุเพาะเห็ด วัสดุแทนไม้ กระเบื้องจากกากกาแฟ ใช้เป็นวัสดุหมักไข่เค็ม ใช้ดับกลิ่น ใช้ทำปุ๋ยให้กับต้นไม้ แต่ในปัจจุบันด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นประกอบกับการศึกษาวิจัยที่พบว่ากากกาแฟมีสารสำคัญอยู่หลายชนิด เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ กรดไขมัน โปรตีน คาเฟอีน สารประกอบฟีนอล และแร่ธาตุต่างๆ โดยสารเหล่านี้อาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของกาแฟ แหล่งปลูก ขั้นตอนการผลิต และวิธีการสกัด การใช้ประโยชน์จากกากกาแฟจึงเน้นไปที่การสกัดสารสำคัญไปใช้ประโยชน์ หรือการปรับสภาพเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของกากากาแฟก่อนนำไปใช้ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสิ่งเหลือใช้และลดการเกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

2.3 วิธีการสกัด

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีหนึ่งที่มีประโยชน์มากในการแยกสารและทำสารให้บริสุทธิ์ เช่น การสกัดแยกสารประกอบบางชนิดออกจากแหล่งที่เกิดในธรรมชาติ เช่น ใบไม้ ดอกไม้ การสกัดแยกสารผลิตภัณฑ์ออกจากของผสมหลังทำปฏิกิริยา หลักการของการสกัดคือ การใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมละลายสารที่ต้องการออกมาจากสารผสม [20]

เทคนิคการสกัดมีหลายวิธี ได้แก่ การคน การหมัก การสกัดด้วยซอร์คเลต การสกัดแบบไหลย้อนกลับโดยใช้ความ การสกัดด้วยอัลตร้าโซนิค การสกัดด้วยไมโครเวฟ การใช้สารละลายเป็นตัวเร่งในการสกัด การสกัดแบบของไหลวิกฤตยิ่งยวดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ โดยแต่ละวิธีมีหลักการและข้อดีข้อเสีย คือ [14]

2.3.1 การคน (Stirring Extraction) [14]

การสกัดด้วยตัวทำละลายในภาชนะปิดโดยการนำตัวอย่างมาคนอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องคนแม่เหล็กไฟฟ้า ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้เครื่องมือราคาถูก วิธีการไม่ยุ่งยาก สารไม่ถูกความร้อน แต่มีข้อเสียคือ ใช้ตัวทำละลายในการสกัด

2.3.2 การหมัก (Ferment Extraction) [14]

การสกัดโดยนำตัวอย่างหมักกับตัวทำละลายในภาชนะปิด ทิ้งไว้ 3-7 วัน เขย่าหรือคนบ่อยๆ แล้วกรองเอาสารสกัดไปใช้ ถ้าต้องการให้สารประกอบที่สำคัญออกจากพืชมีปริมาณมากอาจต้องสกัดหลายครั้ง การสกัดโดยการหมักมีข้อดี คือ สารไม่ถูกความร้อน มีข้อเสีย คือ สิ้นเปลืองตัวทำละลายมากและมักไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเนื่องจากจะทำให้บูด

2.3.3 การสกัดด้วยซอห์คเลต (Soxhlet Extraction) [14]

เป็นวิธีการสกัดแบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวทำละลายซึ่งมีจุดเดือดต่ำ ใช้ความร้อนทำให้ตัวทำละลายในขวดก้นกลมระเหยขึ้นไปแล้วกลั่นตัวลงมา จนถึงจุดหนึ่งจะไหลกลับลงไปในขวดที่บรรจุ ตัวทำละลายใหม่ โดยใช้วิธีกาลักน้ำแล้วกลั่นตัวขึ้นไปใหม่จนสกัดได้หมดในที่สุด วิธีการนี้มีข้อดี ทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายน้อย แต่มีข้อเสียคือ ใช้เวลานาน ประสิทธิภาพในการสกัดน้อย สิ้นเปลืองตัวทำละลาย

2.3.4 การสกัดแบบไหลย้อนกลับโดยใช้ความร้อน (Heat Reflux Extraction, HRE) [14]

ใช้ในการสกัดสารสำคัญออกจากตัวอย่างโดยสกัดด้วยตัวทำละลาย เช่น แอลกอฮอล์ เฮกเซน หรือน้ำ เป็นต้น โดยตัวอย่างแช่ด้วยแอลกอฮอล์ เฮกเซน หรือน้ำ จะถูกต้มให้ความร้อนเพื่อทำการละลายสารสำคัญออกจากตัวอย่าง โดยที่แอลกอฮอล์หรือน้ำจะถูกต้มจนเดือดระเหยขึ้นไปด้านบน แล้วถูกควบแน่นด้วยคอนเดนเซอร์กลับลงมาทำละลายอย่างต่อเนื่อง หมุนเวียนอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนสารสกัดละลายเข้มข้น จึงนำไปเข้าเครื่องระเหยแอลกอฮอล์หรือระเหยน้ำเพื่อทำให้เข้มข้น

ต่อไป ข้อดีของวิธีการนี้ คือ มีประสิทธิภาพในการสกัดค่อนข้างดี แต่มีข้อเสียคือ ใช้เวลาในการสกัดมาก ใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก และวิธีการสกัดยุ่งยาก

2.3.5 การสกัดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค (Ultrasonic Extraction, UE) [14]

คลื่นอัลตร้าโซนิคคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูมนุษย์ จะได้ยิน มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป สาเหตุที่มีการนำคลื่นอัลตร้าโซนิคมาใช้เนื่องจากเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้เล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง จากสมบัติดังกล่าว จึงมีการนำคลื่นอัลตร้าโซนิคมาใช้ ในการสกัดสารที่สนใจออกจากตัวอย่างโดยส่วนมากจะใช้สกัดสารกึ่งระเหย (Semi-Volatile) และระเหยยาก (Non-Volatile Organic Compounds) จากตัวอย่างของแข็ง เช่น ดิน น้ำ พืชสมุนไพร ผลไม้ ดังนี้จากการ ประยุกต์ใช้อัลตร้าโซนิคในการสกัดพืชสด พบว่าเนื้อเยื่อของพืชที่ประกอบเป็นเซลล์นั้นมีส่วนผนังเซลล์อยู่ ชั้นนอกสุดซึ่งจะเป็นตัวต้านทานการสกัดได้ ซึ่งการสกัดประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการแพร่ผ่านผนังเซลล์ของตัวทำละลายและการชะสารสำคัญออกจากเซลล์เมื่อผนังเซลล์ถูกทำลาย ส่วนการสกัดพืชแห้งจะเพิ่มอีก 1 กระบวนการคือ กระบวนการดูดน้ำกลับและการพองตัว (Swell) โดยคลื่นอัลตร้าโซนิคทำให้ดัชนีบ่งชี้การพองตัวสูงขึ้นกว่าการใช้การกวนทางกลธรรมดา ดังนั้นวิธีการใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการดังกล่าวได้โดยการเกิดปรากฏการณ์เกิดโพรง เนื่องมาจากคลื่นนั้นประกอบด้วยช่วงอัดและช่วง ขยาย เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวทำละลายจะทำให้เกิดฟอง (Bubble) ของตัวทำละลายขนาดเล็กจำนวนมาก จากนั้นเมื่อฟองได้รับแรงจากคลื่นในช่วงอัดจะทำให้ฟองนั้นแตกออกและเกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็ก (Microjet) ที่มีแรงมากจนสามารถเจาะทำลายผนังเซลล์ของพืชได้ เมื่อผนังเซลล์ของพืชแตกออกจะทำให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลของสารที่ต้องการสกัดออกจากเซลล์ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้การทำให้ขนาดของตัวอย่างเล็กลงก่อนจะเพิ่มการสัมผัสกับตัวทำละลายและเกิดโพรงได้ง่ายขึ้น

2.3.6 การสกัดด้วยไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Extraction, MAE) [14]

การสกัดด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการสกัด ลดเวลาในการเตรียมตัวอย่าง และลดปริมาตรตัวทำละลายที่ใช้เมื่อเทียบกับเทคนิคการสกัดตัวอย่างแบบเดิม โดยการให้ความร้อนสำหรับการสกัดด้วยไมโครเวฟนั้นอยู่บนพื้นฐานของการสกัดโดยตรงของคลื่นไมโครเวฟต่อโมเลกุลพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟมีผลให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวและเกิดความร้อนภายในวัตถุที่สัมผัสกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเกิดจากกลไกการเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (Ionic Polarization) และการหมุนของสารประกอบมีขั้ว (Dipole Rotation) โดยการหมุนของขั้วเป็นผลให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้าของโมเลกุลทั้งในตัวทำละลายและในตัวอย่างทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีระบบการวิเคราะห์มี 2 ระบบ คือ ระบบปิด สกัดสารกึ่งระเหยให้ประสิทธิภาพการสกัด เนื่องจากอุณหภูมิตัวทำละลายที่สูงเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลของสารที่สนใจจากตัวอย่างสู่

ตัวทำละลายที่ใช้สกัดทำได้ดีขึ้น และระบบเปิด สกัดสารที่มีค่าการระเหยต่ำ เช่น ยาฆ่าแมลง PAHs ทำให้เกิดการ รีฟลักซ์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด

2.3.7 การสกัดโดยใช้ตัวทำละลายในสภาวะเร่ง (Accelerated Solvent Extraction, ASE) [14]

เป็นการสกัดแบบใช้ซอห์คเลตแต่ใช้ตัวทำละลายที่อยู่ในสภาพของไหลเหนือวิกฤต ซึ่งในสภาวะที่อุณหภูมิสูงทำให้สารที่สนใจ หรือตัวถูกละลายมีอัตราการแพร่สูงและเกิดการละลายเข้าไปสู่ตัวทำละลายได้มาก ในขณะที่สภาวะความดันสูง ช่วยรักษาสภาพของตัวทำละลายให้อยู่ต่ำกว่าจุดเดือดซึ่งจะช่วยทำให้ตัวทำละลายแทรกซึมผ่านไปในตัวอย่างได้ดี ข้อดีคือ มีประสิทธิภาพการสกัดสูง ใช้ตัวทำละลายปริมาณน้อยและใช้เวลาในการสกัดสั้น แต่มีข้อเสียคือต้องเลือกใช้ตัวทำละลายที่เฉพาะ ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง และการสกัดทำได้ยาก

2.3.8 การสกัดแบบของไหลยิ่งยวดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (Supercritical Carbon Di-oxide Extraction) [14]

การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีความดันมากกว่า 300 เท่าของชั้นบรรยากาศ และอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย หลังจากการสกัดด้วยการลดแรงดันนั้นจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนสถานะจาก Supercritical state กลายเป็นก๊าซซึ่งจะทำให้สารนั้นปราศจากการปนเปื้อนใดๆ การใช้อุณหภูมิต่ำจะทำให้สารสำคัญ (Active Ingredients) ยังคงอยู่และไม่ถูกทำลาย มีความใกล้เคียงกับสารที่มีอยู่ในธรรมชาติเพราะเหตุนี้จึงทำให้สารที่สกัดด้วยวิธีนี้ยังคงคุณสมบัติของพืชนั้นๆ ร้อยละ 100 โดยมีข้อดีคือ ปราศจากการปนเปื้อนของสารละลาย (Solvent) ที่ใช้ในการสกัดเป็นวิธีการสกัดที่ให้สารสกัดจากธรรมชาติมาก แต่ยังมีข้อเสียคือ มีต้นทุนต่อหน่วยสูง ต้องทำภายใต้สภาวะที่มีความดันสูง และมีความยุ่งยากในการสกัด จึงไม่เหมาะสำหรับใช้สกัดพืชทั่วไป

2.4 ตัวทำละลาย

2.4.1 เฮกเซน (Hexane) [21]

เฮกเซนเป็นสารที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบหรือการแยกแก๊สปิโตรเลียมเหลวถูกนำมาใช้งานสำหรับเป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การสกัดสารอินทรีย์จากสมุนไพรหรือใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเป็นตัวทำละลายสี เป็นต้น

2.4.1.1 ลักษณะเฉพาะ

ชื่อเรียกอื่น	:	Naphtha, Hydrotreated light, Dipropyl
สถานะ	:	เหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน

สูตรโมเลกุล	:	C_6H_{14}
สูตรโครงสร้างโมเลกุล	:	$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$
น้ำหนักโมเลกุล	:	86.1766 โมลต่อกรัม
จุดหลอมเหลว	:	-100 ถึง -95 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	:	69 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	:	0.660
การละลายน้ำ	:	10.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ดัชนีหักเหแสง	:	1.375
จุดวาบไฟ	:	-27 องศาเซลเซียส
สารที่เข้ากันไม่ได้	:	สารออกซิไดซ์ แมกนีเซียมเปอร์คลอเรท คลอรีน ฟลูออรีนและพลาสติก

2.4.1.2 ในการใช้ประโยชน์

เฮกเซนเป็นสารอินทรีย์ระเหยชนิดหนึ่งที่นิยมใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ การสกัดน้ำมันจากเมล็ดธัญพืชต่างๆ เช่น ถั่วเหลือง เมล็ดฝ้าย เมล็ดทานตะวันและเมล็ดข้าวโพด หรือใช้เป็นตัวทำละลายหรือสกัดสารในสมุนไพรต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมสี สีย้อม หมึกพิมพ์ กาว เป็นต้น

2.4.1.3 ข้อมูลความปลอดภัย

การทดสอบความอันตรายของสารเฮกเซนมีการทดสอบด้วยวิธีต่างๆ ทั้งการใช้แบคทีเรียและเม็ดเลือดขาวของมนุษย์ พบว่าไม่จัดเป็นสารก่อการกลายพันธุ์ ความเป็นพิษของเฮกเซนต่อระบบประสาทพบอาการที่สำคัญคือ มีอาการแขนขาอ่อนแรงและอาจเป็นอัมพาตได้ โดยพบอาการอ่อนแรงที่ขาก่อนและเกิดอาการที่แขนตามมาร่วมด้วยกับอาการปวดศีรษะ วิงเวียนศีรษะ มึนงง หายใจลำบาก มีอาการเบื่ออาหาร ฤทธิ์ของเฮกเซนที่มีต่อระบบประสาทที่เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ เซื่องซึม จะเกิดขึ้นบริเวณสมองน้อยหรือซีรีเบลล้ม (Cerebellum) เกิดการกดระบบควบคุมการหายใจ ร่วมด้วยการออกฤทธิ์กระตุ้นระบบประสาทส่วนกลางทำให้มีอาการเคลิบเคลิ้ม หากได้รับสารพิษในปริมาณมากหรือเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดการทำลายระบบประสาทส่วนกลางได้ ส่งผลทำให้เกิดความผิดปกติของการทรงตัว เดินเซ และมีอาการความจำเสื่อม

ก. เฮกเซนจัดเป็นสารมีพิษ ห้ามรับประทานหรือสูดดม และควรใช้ในสถานที่ที่มีการระบายอากาศที่ดี

ข. สารละลายเฮกเซนและไอระเหยมีความไวไฟสูง ต้องหลีกเลี่ยงความร้อนและประกายไฟขณะใช้งานเป็นอันตรายต่อผิวหนังและทางตาทำให้เกิดการอักเสบ ระคายเคือง ควรสวมหน้ากากหรือผ้าปิดจมูก สวมถุงมือ รองเท้าและสวมเสื้อผ้าให้มิดชิดขณะใช้งาน

ค เมื่อสัมผัสกับผิวหนังหรือตาให้ล้างด้วยน้ำสะอาดหากมีอาการรุนแรงให้รีบพบแพทย์ทันที

ง. การสูดดมหรืออยู่ในสถานที่ที่มีไอระเหยจะทำให้เกิดอาการวิงเวียน ร่างกายอ่อนเพลีย แขนขาชา ให้รีบออกห่างหรือนำผู้ป่วยออกจากสถานที่ดังกล่าวทันที

จ. การกลืนกินจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียนศีรษะ แขนขาชา ให้รีบปฐมพยาบาลและนำส่งแพทย์ทันที

ฉ. เมื่อใช้งานเสร็จควรปิดฝาภาชนะบรรจุให้แน่น

ช. ควรเก็บในที่มิดชิด อุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 40 องศาเซลเซียส ห่างจากแสงแดดประกายไฟและแหล่งความร้อนต่างๆ รวมถึงสารที่เข้ากันไม่ได้ในข้างต้น

2.4.2 ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) [47]

ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีราคาถูก มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคได้ (Disinfectant) และใช้เป็นตัวทำละลาย (Solvent) ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อีกด้วย

2.4.2.1 ลักษณะเฉพาะ

ชื่อเรียกอื่น	:	Isopropyl alcohol, 2-Propanol, Propan-2-ol, Rubbing alcohol, IPA, Dimethyl carbinol
สถานะ	:	ของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นแอลกอฮอล์ ติดไฟได้
สูตรโมเลกุล	:	C_3H_8O
สูตรโครงสร้างโมเลกุล	:	$CH_3CHOHCH_3$
น้ำหนักโมเลกุล	:	60.09
จุดหลอมเหลว	:	–89 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	:	82 ถึง 83 องศาเซลเซียส
ดัชนีหักเหแสง	:	1.3776
การละลายน้ำ	:	การละลายน้ำได้สมบูรณ์
จุดวาบไฟ	:	12 องศาเซลเซียส (ถ้วยปิด)
สารที่เข้ากันไม่ได้	:	ตัวออกซิไดซ์, กรด, แอซิดแอนไฮไดรด์, เฮโลเจน, อะลูมินัม.

2.4.2.2 การใช้ประโยชน์

ก. ใช้ในการผลิตเครื่องสำอางค์ น้ำหอม หมึกพิมพ์

ข. ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ใช้เป็นตัวเจือจางในไนโตรเซลลูโลส

ค. ใช้เป็นแอลกอฮอร์ฆ่าเชื้อ เคมีซักล้างและทำความสะอาด

2.4.2.3 ข้อมูลความปลอดภัย

ในโรงพยาบาล ตามบ้าน และตามโรงงานต่างๆ มักจะใช้ที่ความเข้มข้นประมาณ 70 % พิษของแอลกอฮอล์ชนิดนี้จะทำให้เกิดอาการเมาได้เหมือนพิษของเอทิลแอลกอฮอล์ สามารถกดสมองและกดการหายใจได้อย่างรุนแรง แต่มักไม่ก่อภาวะเลือดเป็นกรดอย่างรุนแรง (High Gap Metabolic Acidosis) แบบเมทิลแอลกอฮอล์

ก. ไอโซโพรพานอลเป็นอันตรายต่อร่างกาย อย่าหายใจเอาไอระเหยเข้าไป. ระวังอย่าให้เข้าตา, โดนผิวหนัง, หรือเสื้อผ้า.

ข. การใช้งานไอโซโพรพานอลควรหลีกเลี่ยงการได้รับสารเป็นเวลานานหรือซ้ำหลายครั้ง

ค. การได้รับไอโซโพรพานอลเข้าไปในปริมาณมากจะทำให้เกิดอาการเมาคล้ายคนที่ดื่มเอทิลแอลกอฮอล์ หากได้รับเข้าไปปริมาณมากๆ จะทำให้โคม่า หมดสติ ความดันโลหิตตก และหยุดหายใจได้

ง. ไอโซโพรพานอลไม่ใช่สารก่อมะเร็ง การสัมผัสทางผิวหนังบ่อยๆ นานๆ จะทำให้เกิดการระคายเคือง ผิวแตกลอก และผื่นแพ้

จ. หลีกเลี่ยงการก่อประกายไฟเนื่องจากเป็นแอลกอฮอล์ จึงสามารถติดไฟได้ดีมาก

ฉ. หากมีการสัมผัสที่ดวงตา ควรล้างตาด้วยน้ำเปล่าให้มากที่สุดก่อนส่งพบแพทย์

ช. การใช้สารเคมีต้องทำด้วยความระมัดระวัง ตรวจสอบเครื่องจักรและถังบรรจุสารเคมี เพื่อลดการสัมผัสไอโซโพรพานอลในการทำงาน

ซ. ควรเก็บรักษาไอโซโพรพานอลโดยปิดให้สนิท เก็บให้ห่างจากความร้อน ประกายไฟ และเปลวไฟ นอกจากนี้ต้องเก็บในที่แห้งและเย็น โดยใช้และเก็บภายใต้ไนโตรเจน

2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) [22]

การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาอย่างดีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสืบค้นตัวแปรในกระบวนการ (Process Variable) หรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (Product Variable) หรือองค์ประกอบของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพในการผลิต เนื่องด้วยทรัพยากรที่มีอย่างจำกัด (เวลา ต้นทุนการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลอง บุคลากร และอื่นๆ) ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าการทดลองที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้รับการวางแผนมาก่อน

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือวิธีการโดยทั่วไป

มักเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองปรับค่ากระบวนการทีละค่า (One Factor At a Time, OFAT) จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้ามากและทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมาก

2.5.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

2.5.1.1 การนิยามปัญหา (Statement of Problem)

เป็นการระบุความต้องการในการผลิตคืออะไร ซึ่งจะต้องชัดเจน เข้าใจได้ง่าย และเป็นรูปธรรม ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง อะไรที่กำลังเป็นเป็นปัญหา (What) ลักษณะของปัญหาเป็นเช่นไรขนาดไหน (How) และพบปัญหานั้นที่ไหนช่วงเวลาใด (Where)

2.5.1.2 การเลือกปัจจัยและการกำหนดระดับของปัจจัย (Choice of Factors, Levels and Ranges)

เป็นการใช้หลักการทฤษฎี และประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร ซึ่งจำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง โดยสามารถเลือกจากกรรมวิธีคัดกรองโดยเครื่องมือทางสถิติจำพวก Univariate (เช่น T-Test) หรือผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้นๆ ก็เป็นผู้ที่สามารถให้คำแนะนำที่ดีในการเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัยด้วย

2.5.1.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of The Response Variable)

การเลือกตัวแปรตอบสนองจะต้องเน้นตัวแปรที่สามารถวัดได้ ทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดและวัดด้วยกระบวนการวัดอื่นๆ (เช่น การนับ) และจะต้องเป็นตัวแปรที่สื่อถึงกระบวนการที่เราต้องการศึกษานั้นได้ดีด้วย

2.5.1.4 เลือกแบบทดลอง (Choice of Experiment Design)

เมื่อกำหนดวิธีปฏิบัติ (Treatment) และตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) แล้ว ต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลอง เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่าง วิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น

2.5.1.5 ดำเนินการทดลอง (Perform the Experiment)

ในระหว่างการทดลอง ผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง

2.5.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์ไม่ใช่แค่การรันโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ผลออกมาเท่านั้น แต่รวมถึงการตรวจสอบ ลักษณะและคุณภาพ

ของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง การพิสูจน์ทราบความถูกต้องของ Model ที่ได้ (Model Adequacy Checking) หาค่าระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย และสรุปผลโดยรวม โดยปกติ DOE จะใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นผู้วิเคราะห์ก็ต้องเข้าใจเงื่อนไข ของ ANOVA ด้วย

2.5.1.7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommend-dations)

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ ดังนั้นผู้ดำเนินการทดลองจะเป็นผู้ที่เข้าใจที่ไปที่มาของข้อมูลดี และมองออกว่าผลที่ได้เป็นเช่นนั้นเพราะอะไร การดำเนินการมีข้อบกพร่องตรงไหน มีสาระสำคัญอะไรที่ผู้อ่านรายงานควรจะได้รับรู้ เผื่ออนาคตได้ดำเนินการทดลองบ้างก็จะเอาไปเป็นบรรทัดฐานได้ ผู้บริหารหน่วยงานอาจจะสนใจข้อวิเคราะห์ ความคิดเห็น ของผู้ดำเนินการมากกว่าผลที่ปรากฏก็เป็นได้

2.5.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง

ก. วิธีปฏิบัติหรือทรีทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีดำเนินการทดลองปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ข. ปัจจัย (Factor) คือ สิ่งที่คิดว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองและนำมาพิจารณาในการทดลอง ปัจจัยอาจมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณก็ได้ กลุ่มของวิธีปฏิบัติทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (Particular Class of Related Treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระก็ได้ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น

ก.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยที่สามารถกำหนด ค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดนส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลตอบสนองที่สนใจ

ก.2 ปัจจัยที่ไม่สามารควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) คือ ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจจะเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน

2.5.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง

ก. การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้การทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลทีเกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองเรพลิเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

ข. การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้ วัตถุของการสุ่มมีดังนี้

ข.1 เพื่อขจัดคติ หรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง และเพื่อให้แน่ได้ว่าวิธีปฏิบัติต่างๆ จะไม่ได้เปรียบและเสียเปรียบกับในเรื่องเกี่ยวกับการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันว่าจะไม่มีอคติใดๆ เกิดขึ้นในการทดลอง

ข.2 การวิเคราะห์และทดสอบทางสถิติ นั้นมีข้อกำหนดว่าความคลาดเคลื่อน (Error) จะต้องเกิดขึ้นโดยสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลเป็นไปตามข้อกำหนดเหล่านี้ ทั้งนี้การสุ่มจะช่วยขจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ให้เกิดขึ้นกับหน่วยทดลองด้วยโอกาสเท่าๆ กัน

ข.3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลองบล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.6 วิธีพื้นผิวตอบสนอง

วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งจะแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น ทำให้ง่ายในการจัดการและการอธิบายผล เช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของ x_1 และ x_2 ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \tag{2.1}$$

โดยที่ ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชิงวิศวกรรมและมีผลกระทบต่อผลตอบสนอง

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

ถ้าเรากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการพื้นผิวได้ คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \tag{2.2}$$

โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปกราฟิก 3 มิติ ซึ่ง η (ค่าคาดหวังของผลตอบสนอง) จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นที่ผลตอบสนองที่เท่ากันค่าหนึ่ง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนองส่วนมากมักจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นแรก คือ ผู้ทดลองต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้นตรงกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับที่ 1 (First Order Mathematical Model) หรือสมการสหสัมพันธ์กำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \varepsilon \tag{2.3}$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้ง (Curvature) เข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ ต้องใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้นคือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับที่ 2 (Second Order Mathematical Model) หรือสมการสหสัมพันธ์กำลังสอง [23]

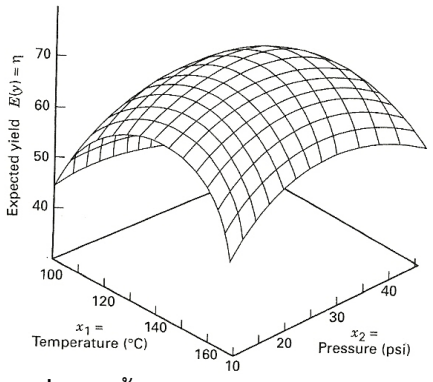
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1, j<i}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{2.4}$$

โดยที่ β_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการ และเป็นจุดตัดแกน y (Intercept) ของสมการ

β_i คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งของผลกระทบหลักปัจจัยที่ i

β_{ii} คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อันดับสองของผลกระทบหลักปัจจัยที่ i

β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ i และ j



รูปที่ 2.4 พื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ

ที่มา : https://www.intechopen.com/books/design-of-experiments applications/application-of-2k-experimental-design-and-response-surface-methodology-in-the-optimization-of-the-mo

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นที่ผิวตอบสนองส่วนมากจะใช้แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่งหรือกำลังสองในการหาผลตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่สนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวตอบสนองมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลคำตอบอยู่หลายวิธีได้แก่ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด แบบจำลองอันดับหนึ่ง แบบจำลองอันดับสอง โดยที่การออกแบบจำลองอันดับสองจะเป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองเชิงเส้นโค้งหรือควอดราติก (Quadratic Response Surface) ซึ่งมีวิธีการที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

2.6.1 การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง [17]

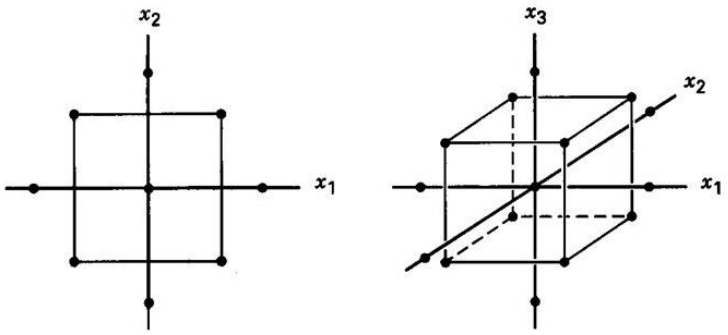
2.6.1.2 การออกแบบประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม เนื่องจากมีความยืดหยุ่น (Very Flexible) ในการใช้งาน โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 3 ส่วน ต่อไปนี้

ก. ตำแหน่งการทดลองของ 2^k Factorial (ถ้า k ในที่นี้คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย เช่น 2^2 จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง (-1, -1) (+1, -1) (+1, +1) (-1, +1)

ข. ตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาอีก 2k ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งในแนวแกนที่เรียกว่า 2k Axial หรือ Star point

ค. ตำแหน่งตรงกลางของการทดลองอีก 1 ตำแหน่ง เรียกว่า Central Point (ตำแหน่ง 0,0,0)

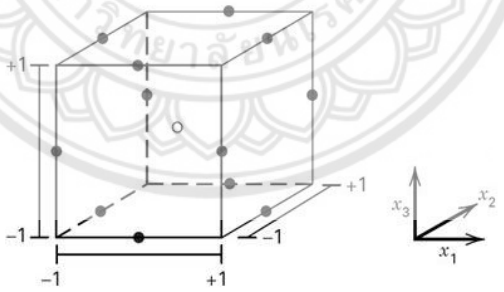


(A) (B)

รูปที่ 2.5 (A) การออกแบบประสมกลาง 2 ปัจจัย (B) การออกแบบประสมกลาง 3 ปัจจัย
ที่มา : https://www.slideshare.net/YoshikiKurata/two-level-factorial-designs-chap6

2.6.1.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken, BBD)

เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวสะท้อนการออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบนี้มีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนการประมวลผลที่ต้องการและการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วยเนื่องจากการออกแบบนี้เป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนทรงกลมรัศมี $2^{1/2}$ และไม่ได้รวมจุดใดที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่ถูกสร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ปัจจัย
ที่มา : http://slideplayer.com/slide/10989931/

2.6.2 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับ (y) และค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย ($\hat{y}$) เรียกว่าค่าความผิดพลาด (Residual, ε) ซึ่งสามารถแทนด้วย

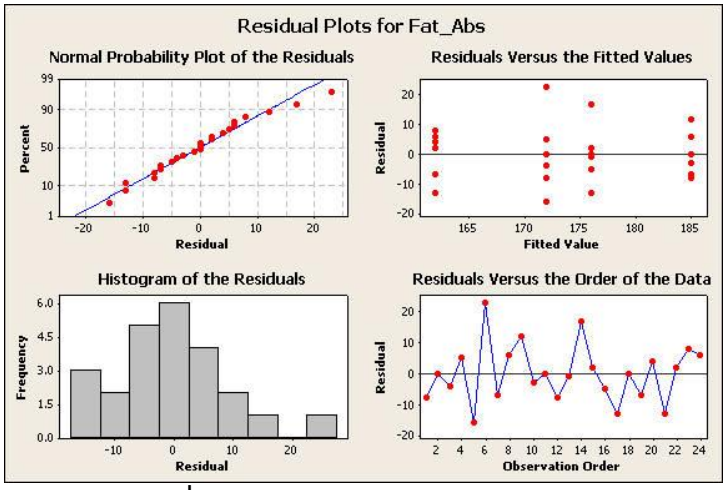
$\varepsilon = y - \hat{y}$ คุณสมบัติของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้มีความสำคัญอย่างมาก ทั้งในคุณสมบัติของความเป็นอิสระต่อกันของค่าความผิดพลาด ค่าความผิดพลาดต้องมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนที่คงที่ เป็นต้น เนื่องจากเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาตรวจสอบสมมติฐานของความเหมาะสมของสมการความสัมพันธ์ และการประมาณค่าเป็นช่วงความเชื่อมั่น ดังนั้นการวิเคราะห์และการนำเสนอค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในลักษณะของกราฟ จึงสามารถแบ่งเป็นข้อสมมติฐาน (Assumption) ได้ 4 ข้อ ดังนี้

ก. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) เป็นการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ ถ้าข้อสมมติฐานมีความถูกต้อง การนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีการกระจายตัวที่หนาแน่นบริเวณใกล้ๆ ค่าศูนย์ [23]

ข. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted values) เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนโดยพล็อตค่าระหว่างค่าความผิดพลาด (Residuals) กับค่าประมาณการทดลองที่ระดับปัจจัยใดๆ ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีการกระจายตัวแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน) ของแต่ละระดับปัจจัย และค่าเหล่านั้นควรมีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง [17]

ค. แผนภูมิฮีสโตแกรม (Histogram of The Residual) แผนภูมิแท่งที่บอกถึงความถี่ของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละอันตรภาคชั้น โดยแต่ละแท่งจะวางเรียงติดกัน แกนนอนจะกำกับด้วยค่าขอบบนและขอบล่างของชั้นนั้น ส่วนแกนตั้งเป็นค่าความถี่ในอันตรภาคชั้น ดังนั้นความสูงของแต่ละแท่งจะขึ้นอยู่กับความถี่นั่นเอง หากลักษณะของฮิสโตแกรม (Histogram) เป็นรูประฆังคว่ำ สมมาตร คือ มีการแจกแจงแบบปกติหรือใกล้เคียงกับแบบปกติมากที่สุดและการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ [24]

ง. การตรวจสอบการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals versus the order of data) เป็นการแสดงค่าความผิดพลาด (Residuals) กับลำดับที่ของการทดลอง ลักษณะของกราฟจะเป็นตัวบ่งบอกว่าข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์นั้นเป็นข้อมูลที่ได้จากการสุ่ม (Randomly data) ที่ถูกต้องหรือไม่ ซึ่งกราฟที่เป็นข้อมูลที่ได้จากการสุ่มจะไม่สามารถคาดเดาค่าในอนาคตได้ ไม่มีแนวโน้มขึ้นหรือลงอย่างเดียว [25]



รูปที่ 2.7 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด

ที่มา : http://statland.org/Software_Help/Minitab/MTB1way.htm

2.6.3 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ [17]

ก. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Analysis of Coefficients of Determination) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตาม (y) ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficients of Determination) หรือ R^2 ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก

ข. การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of Fit test, LOF) เป็นหนึ่งในค่าการคำนวณทางสถิติที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง สามารถบอกได้ว่าสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งหมดมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ เนื่องจากสมการถดถอยเชิงเส้นนี้ใช้กับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง หากตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง สมการถดถอยที่ได้ไม่เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลชุดนั้น ซึ่งถ้าค่าความเหมาะสมของสมการถดถอยมีค่า P-value มากกว่า 0.05 สามารถบอกได้ว่าสมการมีความเหมาะสม

ค. การทดสอบนับสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง (Hypothesis Testing For Regression Coefficients and Interval Estimation) นั้นเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะไปใช้ในการพยากรณ์ โดยจะทำการประมาณค่าพยากรณ์จากสมการโดยใช้ค่าประมาณแบบจุดและแบบช่วงต่อไป เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้รูปแบบทั่วไปของการทดสอบสมติฐานและการสร้างช่วงของค่าพารามิเตอร์ที่สนใจ

2.6.4 การหาค่าผลตอบสนองที่เหมาะสม

ในการออกแบบการทดลองทั้งหลายต้องมีความเกี่ยวพันธ์กับการตัดสินใจเกี่ยวกับค่าที่เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง โดยวิธีการที่จะทำให้ได้ค่า

เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของการออกแบบการทดลองโดยในการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองนั้นมีวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ 2 วิธี คือ

ก. Response Optimization เป็นวิธีที่สามารถทำการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับค่าปัจจัยที่ควบคุมได้หลายค่ารวมกัน และสามารถทำการ Optimize Plot ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถปรับการตั้งค่าของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้เพื่อที่จะสามารถทำให้พบกับวิธีการที่เราต้องการได้

ข. Overlaid Contour Plot เป็นวิธีการที่กล่าวถึงการพิจารณาผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบการทดลองนั้นมีความสัมพันธ์อย่างไรกับค่าปัจจัยที่ควบคุมได้และมีความสัมพันธ์อย่างไรกับค่าปัจจัยอื่นๆ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองโดยที่เส้นกราฟจะทำให้มองเห็นภาพโดยรวมและพื้นที่ในกราฟจะแสดงถึงผลที่เกิดจากผลตอบสนองหลายๆ ค่า

2.7 โปรแกรมสำเร็จรูปมินิแท็บ [26, 27]

โปรแกรมสำเร็จรูปมินิแท็บ (Minitab) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ประมวลผลข้อมูลทางด้านสถิติที่พัฒนาปรับปรุงคุณภาพโดยบริษัท Minitab Inc. ให้จนสามารถใช้กับระบบปฏิบัติการวินโดวส์และต่อเนื่องจนสามารถใช้ได้กับคอมพิวเตอร์หลายขนาดทั้งไมโครคอมพิวเตอร์ มินิคอมพิวเตอร์ จนถึงระดับซุปเปอร์ โดย Minitab เข้ามามีบทบาทสำหรับผู้ใช้สถิติในส่วนของการประมวลผลและการแสดงผลข้อมูลในลักษณะของตัวเลขและผลในลักษณะของกราฟ ดังนั้นโปรแกรมสำเร็จรูปนี้จึงถูกเลือกใช้ด้วยเหตุผลหลัก 3 ประการ คือ

ก. ความซับซ้อนในการประมวลผล

ข. ความเที่ยงตรงและแม่นยำในการประมวลผล

ค. ความรวดเร็วและความสามารถในการทำซ้ำ

นอกจากนี้ยังเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากความโดดเด่นในด้านการใช้งานที่ง่ายและมีการพัฒนาปรับปรุงฟังก์ชันต่างๆ ให้สอดคล้องกับความรู้และทฤษฎีใหม่ๆ รวมถึงการประยุกต์ทางด้านสถิติโดยเฉพาะในงานด้านคุณภาพอย่างต่อเนื่อง

2.8 ทฤษฎีที่ใช้ทดสอบ

2.8.1 กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid, FFA) [28]

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดจะใช้วิธีการไทเทรต (Titration) โดยนำสารตัวอย่างมาทำปฏิกิริยากับสารมีฤทธิ์ด่างที่ทราบความเข้มข้น และนำจุดสมมูลของปฏิกิริยามาคำนวณหาค่าปริมาณกรดในตัวอย่าง ดังแสดงในข้อ 3.2.5 ตามมาตรฐาน ASTM D664-04

2.8.2 ความหนืด (Viscosity) [29]

ทำการทดสอบความหนืดโดยใช้เครื่องมือวัดความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D445-03

2.8.3 ความหนาแน่น (Density) [29]

ผลที่ได้ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และไม่สูงกว่า 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ 15 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D1298-12b

2.9 งานวิจัยเกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่ศึกษาชนิดตัวทำละลายที่แตกต่างกันในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

ใน ปี ค.ศ. 2014 Mebrahtu Haile [35] ได้ศึกษาศักยภาพของการใช้กากกาแฟสำหรับการผลิตไบโอดีเซลและผลพลอยได้เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟจากนั้นดำเนินการโดยใช้เฮกเซน อีเธอร์ และส่วนผสมของไอโซโพรพานอลต่อเฮกเซน (ร้อยละ 50:50 โดยปริมาตร) และส่งผลให้ร้อยละผลได้โดยมวลของน้ำมัน คือ 15.6, 17.5 และ 21.5 ตามลำดับ และในการผลิตไบโอดีเซลนั้นกระบวนการสองขั้นตอนถูกนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลโดยการเปลี่ยนแปลงประมาณร้อยละ 82 สำหรับด้านคุณภาพของไบโอดีเซลได้รับการประเมินโดยใช้มาตรฐานอเมริกันสำหรับการทดสอบวัสดุ (ASTM D 6751) กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักพบโดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี คือ กรดไลโนเลนิก (ร้อยละ 37.6) กรดปาล์มิติ (ร้อยละ 39.8) โอเลอิก (ร้อยละ 11.7) และกรดสเตีย (ร้อยละ 8.6) นอกจากนี้กากของเสียที่เหลือจากการสกัดน้ำมันและสัดส่วนกลีเซอรีน (ปริมาณกลีเซอรีนร้อยละ 20 - 40) ถูกประมาณการสำหรับการใช้งานเชื้อเพลิงอัดเม็ด (19.3 - 21.6 เมกกะจูนต่อกิโลกรัม)

ในปี ค.ศ. 2012 Nídia S.Caetano และคณะ [4] ได้ศึกษาการเพิ่มมูลค่าให้กับกากกาแฟสำหรับผลิตไบโอดีเซล โดยในสกัดน้ำมันจะกากกาแฟนั้นได้ใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ เฮกเซน เอทานอล ไอโซโพรพานอล เฮปเทน อ๊อกเทน และตัวทำละลายผสมระหว่างเฮกเซนกับไอโซโพรพานอลที่อัตราส่วนเฮกเซนร้อยละ 50 60 70 และ 80 โดยปริมาตร ส่วนวิธีสกัดน้ำมันจากกากกาแฟนั้นใช้วิธีการสกัดแบบซอกห์เลตเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันสูงสุด ในขณะเดียวกันได้มีการหาปริมาณของตัวทำละลายเดิมที่สกัดแล้วสามารถนำกลับมาสกัดใช้ใหม่ได้ ในการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดนั้นมีหลายปัจจัย เช่น ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ ปริมาณที่สามารถนำกลับมาใช่ใหม่ได้ ราคา และพลังงานในการสกัด สรุปได้ว่า ตัวทำละลายผสมระหว่างเฮกเซนกับไอโซโพรพานอลที่อัตราส่วนเฮกเซนร้อยละ 50 โดยปริมาตร เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมมากที่สุด โดยได้น้ำมันร้อยละ 21.5 โดยน้ำหนัก

ในปี ค.ศ. 2016 Mohammad Malekzadeh และคณะ [37] ได้ศึกษาตัวทำละลายอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยเฮกเซนและเมทานอลซึ่งเป็นตัวทำละลายไม่มีขั้วและมีขั้วมาใช้สำหรับสกัดไขมันจากชีวมวลแห้งและเปียกของสาหร่ายคอลเรลลา ผลการศึกษาพบว่า ผลได้ของการสกัดน้ำมันและกรดไขมันอิสระลดลงเมื่อความชื้นของชีวมวลเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการสกัดสูงสุดได้รับจากการใช้ส่วนผสมในปริมาณของเฮกเซนและเมทานอลเท่ากัน (1:1) สำหรับทั้งชีวมวลแห้งและเปียก

2.9.2 งานวิจัยที่ศึกษาวิธีการสกัดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค

ในปี ค.ศ. 2017 Chunying Li และคณะ [30] ได้ศึกษาการสกัดสารแคมปโทเธซินและกรดบิทูลินิกจากเมล็ดพืชแคมป์โทธิกา อะคูมินาตา (Camptotheca Acuminata) โดยใช้อ่างอัลตร้าโซนิกและการสกัดแบบไหลย้อนร่วมกัน ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken โดยมีตัวแปรอิสระสามตัวแปร คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (20-40 มิลลิลิตรต่อกรัม) กำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิค (150-250 วัตต์) และเวลาในการสกัด (15-30 นาที) พบว่า สภาวะที่ได้ผลสูงสุดอยู่ที่ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 32 มิลลิลิตรต่อกรัม กำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิต 225 วัตต์ และเวลาในการสกัด 24 นาที ซึ่งทำให้ได้แคมปโทเธซิน 2.386 $\pm$ 0.112 มิลลิกรัมต่อกรัม และกรดบิทูลินิก 17.192 $\pm$ 0.808 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบการสกัดแบบอัตร้าโซนิคธรรมดากับการสกัดแบบไหลย้อน โดยทั้งสองแบบใช้เวลามากกว่า แต่กลับได้ผลผลิตน้อยกว่าร้อยละ 80 และ 60 ตามลำดับ หากเทียบกับผลผลิตจากการสกัดด้วยอัลตร้าโซนิคและแบบไหลย้อนร่วมกัน

ในปี ค.ศ. 2016 Ming-Chi Wei และคณะ [31] ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันและ α-humulene จากดอกกานพลู (Clove) โดยใช้อัลตร้าโซนิคร่วมกับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะของไหลยิ่งยวด (Supercritical Fluid) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะการยิ่งยวดทั้งที่มีและไม่มีอัลตร้าโซนิคร่วมด้วย นอกจากนี้ยังเปรียบกับการสกัดแบบไหลย้อนกลับและการกลั่นด้วยไอน้ำ พบว่าการใช้อัลตร้าโซนิคร่วมกับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะการไหลยิ่งยวดจะทำให้ได้ผลผลิตสูงสุดคือ α-humulene 2.75 $\pm$ 0.09 กรัมต่อกรัมของน้ำมัน และน้ำมันกานพลู 23.31 $\pm$ 0.77 กรัมต่อกรัมของกานพลู ซึ่งการไม่มีอัลตร้าโซนิคร่วมด้วยได้เพียง α-humulene 1.89 $\pm$ 0.07 กรัมต่อกรัมของน้ำมัน และน้ำมันกานพลู 20.97 $\pm$ 0.65 กรัมต่อกรัมของกานพลู ส่วนการสกัดอีกสองวิธีนั้นก็ได้ผลน้อยกว่าเช่นเดียวกัน

2.9.3 งานวิจัยที่ศึกษาการหาจุดที่เหมาะสมของการสกัดโดยการใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง

ในปี ค.ศ. 2013 Hugo M.A. Barbosac และคณะ [32] ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารที่อยู่ในกากกาแฟด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะของไหลวิกฤติยิ่งยวด อนุภาคของน้ำมันประกอบไปด้วย ไดเทอร์พีน คาห์วิออล คาเฟสตอล และ 16-0-เมทิลคาเฟสตอล ใน

งานวิจัยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken โดยมีตัวแปรอิสระสามตัวแปรคือ ความดัน (140 - 190 บาร์) อุณหภูมิ (40 - 70 องศาเซลเซียส) และเอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม (ร้อยละ 0 - 5 โดยน้ำหนัก) พบว่าสภาวะที่ทำให้ได้ผลสูงสุดอยู่ที่ ความดัน 190 บาร์ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และเอทานอลร้อยละ 5 ซึ่งทำให้ได้ผลร้อยละ 11.97 กรัมของน้ำมันต่อ 100 กรัมของกากกาแฟ ในส่วนของความเข้มข้นของไดเทอร์พีนที่เป็นองค์ประกอบในการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะของไหลวิกฤติยิ่งยวด สภาวะที่ดีที่สุดอยู่ที่ ความดัน 140 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเอทานอลร้อยละ 0 ทำให้ได้ 102.90 มิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำมัน อีกทั้งจากผลการสกัดสภาวะที่ใกล้เคียงกับจุดที่เหมาะสมระหว่างสภาวะ ความดัน 140 บาร์ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเอทานอลร้อยละ 0 และ ความดัน 190 บาร์ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เอทานอลร้อยละ 0 ได้ผลการยืนยันว่าแนวโน้มในการวิเคราะห์ทางสถิติและการสกัดสารด้วยของไหลวิกฤติยิ่งยวดหลายๆครั้งที่ความเข้มข้นของไดเทอร์พีนร้อยละ 212 - 410 จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการสกัดลงร้อยละ 39-79 ในการเปรียบเทียบกับเฮกเซน

ในปี ค.ศ. 2015 A. Tilahun Getachew และ B.-S. Chun [33] ได้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการต่อประสิทธิภาพของการกักเก็บสาร (Encapsulation Efficiency, EE) โดยสกัดน้ำมันจากกาแฟอาราบีก้าด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะการไหลยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสและความดัน 250 บาร์ อัตราการไหลของก๊าซ CO_2 เป็นคงที่ที่ 27 กรัมต่อนาที ในระยะเวลาการสกัดทั้ง 2 ชั่วโมง จากนั้นน้ำมันที่ได้จากการสกัดจะถูกห่อหุ้มด้วยโพลีเอธิลีนไกลคอล (PEG) โดยใช้กระบวนการ Particles from Gas-Saturated Solutions (PGSS) โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการกักเก็บสาร ได้แก่ อุณหภูมิที่ 40 - 50 องศาเซลเซียส, ความดัน (200 - 300 บาร์) และสัดส่วนพอลิเมอร์ต่อน้ำมัน (5:1 - 10:1 กรัมต่อกรัม) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD) ในการออกแบบวิธีการที่เหมาะสม สร้างแบบจำลองการคาดการณ์ประสิทธิภาพของการกักเก็บและหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโดยใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพของการกักเก็บสารมากที่สุดร้อยละ 79.78 คือ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส, ความดัน 260.14 บาร์ และสัดส่วนพอลิเมอร์ต่อน้ำมันที่ 6.57:1 กรัมต่อกรัม หลังการกักเก็บน้ำมัน 12 สัปดาห์ น้ำมันมีการสูญเสียองค์ประกอบของกรดไขมันน้อยกว่าร้อยละ 12 และรักษาสรชาติของน้ำมันได้ดีมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไมโครแคปซูลของน้ำมันกาแฟโดยใช้กระบวนการนี้ สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารได้

ในปี ค.ศ. 2015 Cai-ping Zhu และคณะ [34] ได้ศึกษาการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) จากเปลือกทับทิมด้วยอัลตร้าโซนิคและใช้น้ำเป็นตัวละลาย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD) โดยมีตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัตถุดิบ (15-25 มิลลิลิตรต่อกรัม) เวลาในการสกัด (50 - 70 นาที) อุณหภูมิในการสกัด (50 - 70 องศาเซลเซียส) และกำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิค (120 - 160 วัตต์)

เนื่องจากตัวแปร 4 ตัว จึงได้ให้เหตุในการเลือกการออกแบบการทดลองระหว่างบอกซ์-เบห์นเคนกับประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) โดยให้เหตุผลว่าบอกซ์-เบห์นเคนสามารถให้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าและจุดมุม (Corner Point) ที่หายไปนั้นสามารถช่วยให้เลี่ยงข้อมูลที่เป็นปัจจัยร่วมตรงจุดปลายทำให้สามารถป้องกันการสูญหายของข้อมูลได้ หลังจากวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้แล้วนั้นได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการอันดับที่สองขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม โดยได้ปัจจัยที่ดีที่สุด คือที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัตถุดิบ 24 มิลลิลิตรต่อกรัม เวลาในการสกัด 63 นาที อุณหภูมิในการสกัด 55 องศาเซลเซียส และกำลังของเครื่องอัลตร้าโซนิค 148 วัตต์ ภายใต้สภาวะนี้ได้พอลิแซ็กคาไรด์ร้อยละ 13.568 $\pm$ 0.133 ของเปลือกทับทิม ซึ่งใกล้เคียงที่คาดการณ์ไว้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ ร้อยละ 13.787 ของเปลือกทับทิม

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินโครงงานวิจัยนี้ เป็นโครงงานวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟในระดับปฏิบัติการ ซึ่งตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิในการสกัด เวลาในการสกัด อัตราส่วนระหว่างทำละลายต่อกากกาแฟ และความชื้นของกากกาแฟ โดยได้กำหนดวิธีการดำเนินการ ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ซึ่งมีรายละเอียดในการดำเนินการดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ก. กากกาแฟ จากร้านกาแฟบริเวณรอบมหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นกากกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้า โดยกำจัดความชื้นด้วยการอบแห้ง และเก็บในตู้ดูดความชื้น

ข. เฮกเซน ยี่ห้อ RCI Labscan

ค. ไอโซโพรพานอล ยี่ห้อ RCI Labscan

3.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

ก. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 1000 มิลลิลิตร

ข. ช้อนตักสาร (Spatula)

ค. ขวดก้นกลม (Bottom Flask)

ง. กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร

จ. กระดาษฟอยล์ (Foil)

ฉ. กระดาษกรอง (Filter Paper) ยี่ห้อ Whatman No.1 ขนาด 70 มิลลิเมตร

ช. ชุดกรองบุชเนอร์ (Buchner Funnel Filtration)

ซ. ท่อควบแน่น (Condensation)

ฌ. ตะแกรงร่อน (Sieve)

ญ. โถดูดความชื้น (Desiccator)

ฎ. เครื่องชั่งสาร (Balance)

ฏ. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

ฐ. เครื่องอัลตร้าโซนิคแบบอ่าง (Ultrasonic Bath)

ฑ. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator) รุ่น Rotavapor HeiVAP Value/G3 บริษัท Heidolph, Schwabach, Germary

ฒ. เตาอบ (Oven)

ณ. ลูกยางดูดสารเคมี (Rubber Bulb)

ด. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

ต. ขาตั้งและแคลมป์จับ (Stand & Clamp)

ถ. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

ท. เครื่องวัดความชื้น รุ่น ADAM PMB-53

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูล

ก. ศึกษาการใช้งานของเครื่องอัลตร้าโซนิคแบบอ่าง

ข. ศึกษาการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมัน เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

ค. ศึกษาข้อมูลของกากกาแฟ

ง. ศึกษาข้อมูลของตัวทำละลายเฮกเซนและไอโซโพรพานอล

จ. ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลอง

ฉ. ศึกษาการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

3.2.2 การจัดหาและเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

ก. หากากกาแฟจากร้านกาแฟสดบริเวณรอบมหาวิทยาลัยนเรศวร

ข. นำกากกาแฟที่ได้ไปอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำมาพักไว้ในโถดูดความชื้นจากนั้นนำไปร่อนคัดแยกขนาดตามที่ต้องการ และชั่งน้ำหนักของกากกาแฟ

ค. นำกากกาแฟที่ได้ไปอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำมาพักไว้ในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักของกากกาแฟอีกครั้ง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักคงที่

ง. เตรียมความชื้นของกากกาแฟโดยเริ่มจากการกำหนดร้อยละความชื้นที่ต้องการ ชั่งน้ำหนักกากกาแฟที่ต้องการเตรียมความชื้น จากนั้นคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้เตรียม ตวงน้ำตามที่คำนวณได้ พรมน้ำให้ทั่วกากกาแฟ

จ. เมื่อพรมน้ำทั่วกากกาแฟแล้ว นำกากกาแฟเก็บไว้ในกล่องที่ปิดมิดชิดเก็บไว้ในตู้เย็นเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างกากกาแฟที่เตรียมความชื้นแล้วมาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น

3.2.3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองในการทำพื้นที่ผิวตอบสนอง

ก. เลือกและกำหนดแผนการทดลองที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งกำหนดระดับปัจจัยเพื่อใช้ศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองที่ 3 ระดับ ทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Minitab R.17 ในการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis)

ข. ใช้โปรแกรม Minitab R.17 วิเคราะห์สมการถดถอย เพื่อสร้างกราฟโครงร่าง (Contour plot)

ค. ตรวจสอบโมเดล (Model) โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

ง. หาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab R.17

3.2.4 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายร่วม

ก. นำกากกาแฟที่กำจัดความชื้นแล้วผสมกับตัวทำละลายร่วม (เฮกเซนและไอโซโพรพานอล) ตามอัตราส่วนที่กำหนดลงในขวดก้นกลม และเชื่อมต่อขวดก้นกลมกับคอนเดนเซอร์เพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลายผสม

ข. นำขวดก้นกลมที่ผสมสารละลายแล้วนั้นตั้งลงบนอ่างอัลตร้าโซนิค เปิดเครื่องอัลตร้าโซนิคแบบอ่างและจับเวลา โดยตั้งอุณหภูมิน้ำของเครื่องอัลตร้าโซนิคตามที่กำหนด

ค. เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดนำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองขนาด 70 มิลลิเมตร จะได้สารละลายสีเหลืองน้ำตาลที่มีน้ำมันกาแฟผสมกับตัวทำละลายซึ่งอยู่ในขวดบุชเนอร์

ง. นำสารละลายที่ได้กลั่นด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุนด้วยการให้ให้ความร้อนประมาณ 60 องศาเซลเซียส

จ. นำน้ำมันที่ได้ใส่ขวดเก็บสารขนาด 15 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปใส่ในอ่างควบคุณหภูมิเพื่อระเหยสารละลายบางส่วนออก

ฉ. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายที่ยังคงหลงเหลืออยู่

ช. นำขวดเก็บน้ำมันใส่ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ปัจจัย				
ลำดับการทดลอง	X_1 สัดส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	X_2 อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	X_3 เวลา (นาที)	X_4 ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	4 (-1)	30 (-1)	30 (0)	16 (0)
2	8 (1)	30 (-1)	30 (0)	16 (0)
3	4 (-1)	50 (1)	30 (0)	16 (0)
4	8 (1)	50 (1)	30 (0)	16 (0)
5	6 (0)	40 (0)	15 (-1)	2 (-1)
6	6 (0)	40 (0)	45 (1)	2 (-1)
7	6 (0)	40 (0)	15 (-1)	30 (1)
8	6 (0)	40 (0)	45 (1)	30 (1)
9	6 (0)	40 (0)	30 (0)	16 (0)
10	4 (-1)	40 (0)	30 (0)	2 (-1)
11	8 (1)	40 (0)	30 (0)	2 (-1)
12	4 (-1)	40 (0)	30 (0)	30 (1)
13	8 (1)	40 (0)	30 (0)	30 (1)
14	6 (0)	30 (-1)	15 (-1)	16 (0)
15	6 (0)	50 (1)	15 (-1)	16 (0)
16	6 (0)	30 (-1)	45 (1)	16 (0)
17	6 (0)	50 (1)	45 (1)	16 (0)
18	6 (0)	40 (0)	30 (0)	16 (0)
19	4 (-1)	40 (0)	15 (-1)	16 (0)
20	8 (1)	40 (0)	15 (-1)	16 (0)
21	4 (-1)	40 (0)	45 (1)	16 (0)
22	8 (1)	40 (0)	45 (1)	16 (0)
23	6 (0)	30 (-1)	30 (0)	2 (-1)
24	6 (0)	50 (1)	30 (0)	2 (-1)
25	6 (0)	30 (-1)	30 (0)	30 (1)
26	6 (0)	50 (1)	30 (0)	30 (1)
27	6 (0)	40 (0)	30 (0)	16 (0)

3.2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ก. สารเคมี

ก.1 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol)

ก.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)

ก.3 ฟีนอฟทาลีน (Phenolphthalein)

ข. อุปกรณ์

ข.1 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลิลิตร

ข.2 บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 มิลลิตร

ข.3 ปิเปต (Pipet) ขนาด 25 มิลลิลิตร

ข.4 บิวเรต (Buret) ขนาด 100 มิลลิลิตร

ค. วิธีการทดลอง

ค.1 ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 5 กรัม ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

ค.2 เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 25 มิลลิลิตร และหยดฟีนอฟทาลีน 3 - 5 หยด เขย่าผสมในขวดรูปชมพู่

ค.3 ไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (สารละลายด่าง) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จนกระทั่งสารละลายเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูอ่อนอย่างถาวร

ง. การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระใช้สูตรจากมาตรฐาน ASTM D664

$$FFA = \frac{C_{titrant} x V_{tritrant}}{m_{sample}} x M.w._{NaOH} \qquad (3.1)$$

เมื่อ FFA คือ กรดไขมันอิสระ (มิลลิกรัมโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน)

$C_{tritrant}$ คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)

$V_{tritrant}$ คือ ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

C_{sample} คือ ปริมาณน้ำหนักของน้ำมันกาแฟที่ต้องการวิเคราะห์ (กรัม)

$M.w._{NaOH}$ คือ น้ำหนักมวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัมต่อโมล)

3.2.6 ขั้นตอนการวัดความหนืด

ทดสอบโดยเครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer รุ่น DV2T

ก. ตัวอย่างสารปริมาตร 5 มิลลิลิตร

ข. Spindle หมายเลข 18

ค. ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที

ง. อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

3.2.7 ขั้นตอนการวัดความหนาแน่น

ทดสอบความหนาแน่นจากการเติมน้ำมันลงในขวดพิคโนมิเตอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วจึงชั่งน้ำหนักที่อุณหภูมิของน้ำมัน 15 องศาเซลเซียส โดยคำนวณค่าความหนาแน่นจากสูตร

$$D = \frac{m}{V} x1000 \tag{3.2}$$

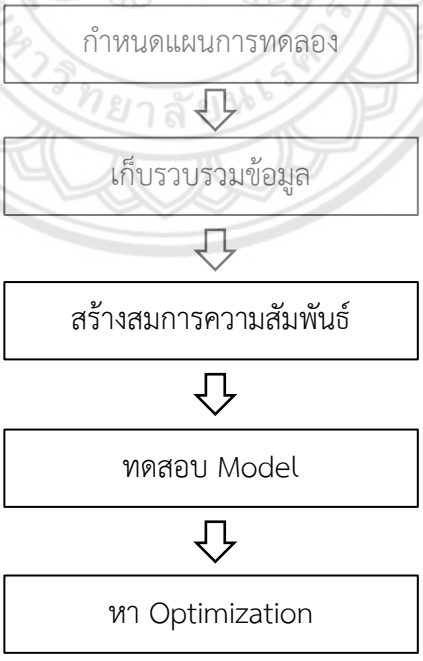
เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m คือ น้ำหนักของน้ำมันกาแฟ (กรัม)

V คือ ปริมาตรของน้ำมันกาแฟ (มิลลิลิตร)

3.3 แผนภาพการทดลอง

3.3.1 แผนภาพการทำพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 3.1 กระบวนการทำพื้นผิวตอบสนอง

3.3.2 แผนภาพการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

รูปที่ 3.2 กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้นำเสนอถึงสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ได้ร้อยละของน้ำมันจากกากกาแฟสูงสุด โดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนร่วมกับไอโซโพรพานอล การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ตอนดังนี้ ตอนที่ 1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ข้อมูลร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟ และตอนที่ 3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันจากกากกาแฟ คุณสมบัติที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระ ความหนืด และความหนาแน่น

4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนร่วมกับไอโซโพรพานอลให้อัตราส่วน 50:50 เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการสกัด โดยใช้ร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟเป็นตัวบ่งชี้ มีปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 4 ปัจจัย และในแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (4 6 และ 8 มิลลิลิตรต่อกรัม) อุณหภูมิในการสกัด (30 40 และ 50 องศาเซลเซียส) เวลาในการสกัด (15 30 และ 45 นาที) และร้อยละความชื้นของกากกาแฟที่ต้องการสกัด (2 16 และ 30 โดยน้ำหนัก)

ภายใต้การออกแบบการทดลองแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab R.17 จะถูกแสดงผลการทดลองในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟในสภาวะที่แตกต่างกัน

ปัจจัย					
ลำดับการทดลอง	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
	อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟแห้ง)
1	4 (-1)	30 (-1)	30 (0)	16 (0)	17.2841
2	8 (1)	30 (-1)	30 (0)	16 (0)	17.9513
3	4 (-1)	50 (1)	30 (0)	16 (0)	17.1695
4	8 (1)	50 (1)	30 (0)	16 (0)	18.2127

ปัจจัย					
ลำดับการทดลอง	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
	อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟแห้ง)
5	6 (0)	40 (0)	15 (-1)	2 (-1)	16.0223
6	6 (0)	40 (0)	45 (1)	2 (-1)	16.2578
7	6 (0)	40 (0)	15 (-1)	30 (1)	18.6319
8	6 (0)	40 (0)	45 (1)	30 (1)	18.7703
9	6 (0)	40 (0)	30 (0)	15 (0)	18.0025
10	4 (-1)	40 (0)	30 (0)	2 (-1)	15.4789
11	8 (1)	40 (0)	30 (0)	2 (-1)	16.7713
12	4 (-1)	40 (0)	30 (0)	30 (1)	18.5601
13	8 (1)	40 (0)	30 (0)	30 (1)	18.9961
14	6 (0)	30 (-1)	15 (-1)	15 (0)	17.4203
15	6 (0)	50 (1)	15 (-1)	15 (0)	17.8571
16	6 (0)	30 (-1)	45 (1)	15 (0)	17.8459
17	6 (0)	50 (1)	45 (1)	15 (0)	17.3697
18	6 (0)	40 (0)	30 (0)	15 (0)	17.3356
19	4 (-1)	40 (0)	15 (-1)	15 (0)	16.7719
20	8 (1)	40 (0)	15 (-1)	15 (0)	17.6356
21	4 (-1)	40 (0)	45 (1)	15 (0)	17.6964
22	8 (1)	40 (0)	45 (1)	15 (0)	18.1357
23	6 (0)	30 (-1)	30 (0)	2 (-1)	16.1860
24	6 (0)	50 (1)	30 (0)	2 (-1)	16.4984
25	6 (0)	30 (-1)	30 (0)	30 (1)	19.1508
26	6 (0)	50 (1)	30 (0)	30 (1)	18.8315
27	6 (0)	40 (0)	30 (0)	15 (0)	17.7616

จากตารางที่ 4.1 แสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟในสภาวะที่แตกต่างกัน พบว่า ร้อยละน้ำมันจากกากกาแฟอยู่ในช่วง 15.48 – 19.15 โดยน้ำหนักกากกาแฟแห้ง ซึ่งในการทดลองที่ 25 มีร้อยละของปริมาณน้ำมันกาแฟมากที่สุด เท่ากับ 19.15 ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 6

มิลลิลิตรต่อกรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความชื้นของกากกาแฟร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ขณะที่การทดลองที่ 10 มีร้อยละของปริมาณน้ำมันกาแฟน้อยที่สุด เท่ากับ 15.48 ที่อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 4 มิลลิลิตรต่อกรัม อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความชื้นของกากกาแฟร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟของโครงงานนี้มีค่ามากกว่ากว่างานวิจัยอื่นๆ ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน เช่น งานวิจัยของ Zayed Al-Hamamre และคณะ [10] ได้ร้อยละ 15.28 โดยน้ำหนัก งานวิจัยของ Krit Somnuk และคณะ [11] ได้ร้อยละ 14.7 โดยน้ำหนัก และงานวิจัยของ Nídia S.Caetano [4] ได้ร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก เป็นต้น ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของน้ำมันในกากกาแฟมีทั้งสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ดังนั้นการใช้ตัวทำละลายร่วมระหว่างเฮกเซนกับไอโซโพรพานอลที่เป็นสารไม่มีขั้วและมีขั้ว ทำให้สามารถละลายเข้ากับสารชนิดเดียวกันได้ จึงเป็นเหตุให้สกัดน้ำมันกาแฟแทรกออกมาได้มากกว่าการสกัดด้วยเฮกเซนที่ไม่สามารถละลายเข้ากันได้กับสารที่มีขั้ว [45] นอกจากนี้การใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคและการไหลย้อนกลับสามารถสกัดได้ คิดเป็นร้อยละ 81.45 เมื่อเทียบการสกัดด้วยซอห์คเลต (ร้อยละ 21.5) เห็นได้ว่าวิธีการนี้มีประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันกาแฟสูงเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการสกัดของซอห์คเลต โดยจากงานวิจัยของ Nídia S.Caetano และคณะ [4] และ Mebrahtu Haile [35] ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟเท่ากับ 21.5 และ 20.6 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยใช้เวลาสกัด 2.5 – 9.5 ชั่วโมง

4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟ

4.2.1 การสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟ

การสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟโดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟ มาเขียนให้อยู่ในรูปสมการถดถอยดังนี้

$$\begin{aligned} y = {} & 11.45 + 0.477x_1 - 0.0112x_2 + 0.1231x_3 + 0.2115x_4 \\ & - 0.0199x_1^2 + 0.000595x_2^2 - 0.000493x_3^2 - 0.000731x_4^2 \\ & + 0.0047x_1x_2 - 0.00354x_1x_3 - 0.00765x_1x_4 \\ & - 0.001522x_2x_3 - 0.001128x_3x_4 - 0.000116x_3x_4 \end{aligned} \qquad (4.1)$$

โดยที่ y คือ ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟ

x_1 คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)

x_2 คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (องศาเซลเซียส)

x_3 คือ เวลาที่ใช้ในการสกัด (นาที)

x_4 คือ ความชื้นของกากกาแฟ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบความแปรผันของแบบจำลองปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เป็นค่าที่บอกร้อยละการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถดถอย

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	Sum of square	df	Mean squares	F-Value	P-Value
เชิงเส้น					
อัตราส่วน (x_1)	1.8737	1	1.8737	38.11	0.000
อุณหภูมิ (x_2)	0.0008	1	0.0008	0.02	0.898
เวลา (x_3)	0.2513	1	0.2513	5.11	0.043
ความชื้น (x_4)	20.6089	1	20.6089	419.18	0.000
กำลังสอง					
อัตราส่วน*อัตราส่วน (x_1^2)	0.0339	1	0.0339	0.69	0.422
อุณหภูมิ*อุณหภูมิ (x_2^2)	0.0189	1	0.0189	0.38	0.547
เวลา*เวลา (x_3^2)	0.0655	1	0.0655	1.33	0.271
ความชื้น*ความชื้น (x_4^2)	0.1095	1	0.1095	2.23	0.161
ปฏิสัมพันธ์					
อัตราส่วน*อุณหภูมิ (x_1x_2)	0.0353	1	0.0353	0.72	0.413
อัตราส่วน*เวลา (x_1x_3)	0.0450	1	0.0450	0.92	0.357
อัตราส่วน*ความชื้น (x_1x_4)	0.1834	1	0.1834	3.73	0.077

Source	Sum of square	df	Mean square	F-Value	P-Value
อุณหภูมิ*เวลา (x_2x_3)	0.2084	1	0.2084	4.24	0.062
อุณหภูมิ*ความชื้น (x_2x_4)	0.0998	1	0.0998	2.03	0.180
เวลา*ความชื้น (x_3x_4)	0.0024	1	0.0024	0.05	0.830
Lack of Fit	0.3602	10	0.0360	0.32	0.913
Pure Error	0.2281	2	0.1140		
Total SS	24.1403	26			
R^2	0.9756				
Adjust R^2	0.9470				

จากตารางที่ 4.2 สามารถวิเคราะห์ได้ 3 ประการ ดังนี้

ก. ในการพิจารณาความน่าจะเป็นทางสถิติหรือเรียกว่าค่าของ P-value แสดงระดับนัยสำคัญในแต่ละปัจจัย ซึ่งจะกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ที่ร้อยละ 95 หากค่า P-value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญ 0.05 จะยอมรับว่าตัวแปรในแบบจำลองที่ได้นำมาวิเคราะห์นั้นได้มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟ ซึ่งปัจจัยที่มีนัยสำคัญได้แก่ อัตราส่วนของตัวทำละลายกับกากกาแฟ เวลา และความชื้น

ข. การประเมินค่าความเหมาะสมของสมการจะวัดจากค่า P-value ของ Lack of Fit Test เพื่อให้ทราบว่าสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสี่ปัจจัยมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยจะต้องมีค่ามากกว่า 0.05 สมการถึงจะบอกได้มีความเหมาะสมและค่าที่ได้นั้นเท่ากับ 0.91 เป็นค่าที่มากกว่า 0.05 จึงทำให้สมการนี้มีความเหมาะสม

ค. การประเมินความใกล้เคียงระหว่างผลจากการทดลองกับสมการทำนายความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น สามารถประเมินจากค่า Coefficient of Determination (R^2) หรือที่เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยหากค่าที่ได้จากทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันจะมีค่าเข้าใกล้ 1 แต่ในบางกรณีค่า R^2 เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มตัวแปรไม่ได้เป็นผลมาจากข้อมูลที่นำมาสร้างสมการจริงๆ ซึ่งจะมีค่า Adjusted Coefficient of Determination ($R^2_{adjusted}$) เป็นตัวแสดงถึงค่าความถูกต้องของค่า R^2 นี้โดยจากผลการวิเคราะห์ R^2 และ $R^2_{adjusted}$ จะมีค่าเท่ากับ 0.97 และ 0.95 ตามลำดับ ถือว่าค่าที่ได้นี้ค่อนข้างสูงทำให้สมการทำนายมีความน่าเชื่อถือ

4.2.3 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล

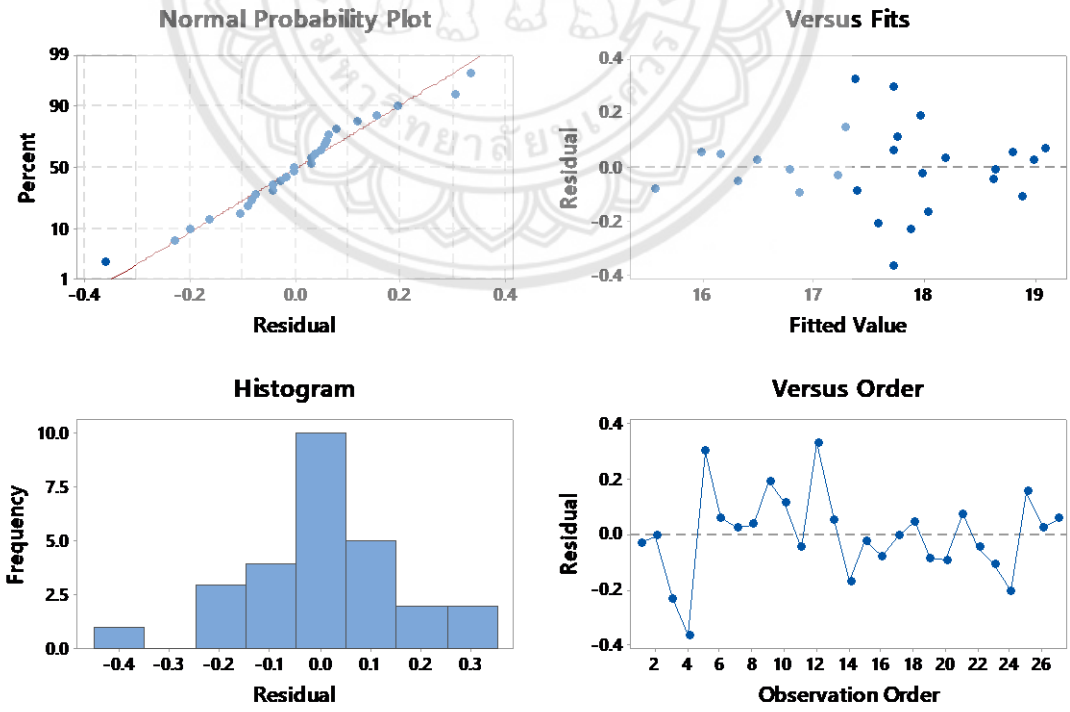
เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด โดยความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองที่ได้รับกับค่าประมาณที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการถดถอย ซึ่งจากทฤษฎีที่กล่าวไปในบทก่อนหน้านี้ โดยจะถูกแสดงในรูปที่ 4.1 และสามารถวิเคราะห์ออกมาได้ 4 ประการ ดังนี้

ก. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot of The Residual) มีลักษณะที่จุดเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงและการกระจายตัวรวมกันที่บริเวณใกล้เคียงกับศูนย์

ข. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Residual Versus The Fitted values) มีลักษณะการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบและจุดต่างๆ มีลักษณะแนวโน้มเรียงกันเป็นเส้นตรง

ค. แผนภูมิฮีสโตแกรม (Histogram of The Residual) มีลักษณะเป็นรูปโค้งระฆังคว่ำอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ค่าศูนย์มีค่าความถี่สูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลที่ดี

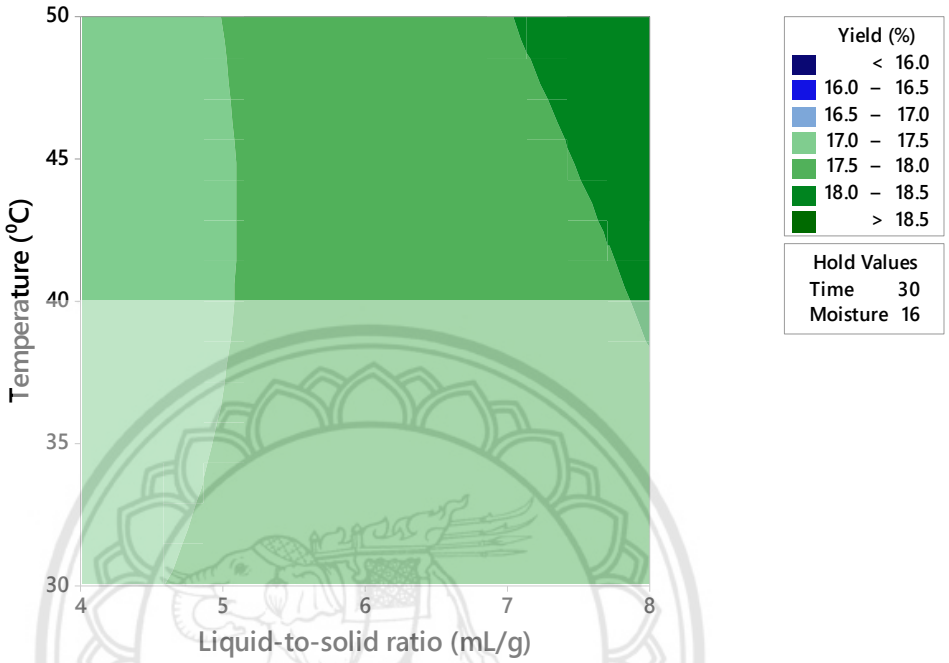
ง. การตรวจสอบการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Residuals Versus The Order of Data) มีลักษณะค่าสุ่มขึ้นหรือลงที่ไม่แน่นอน ไม่สามารถที่จะคาดเดาได้



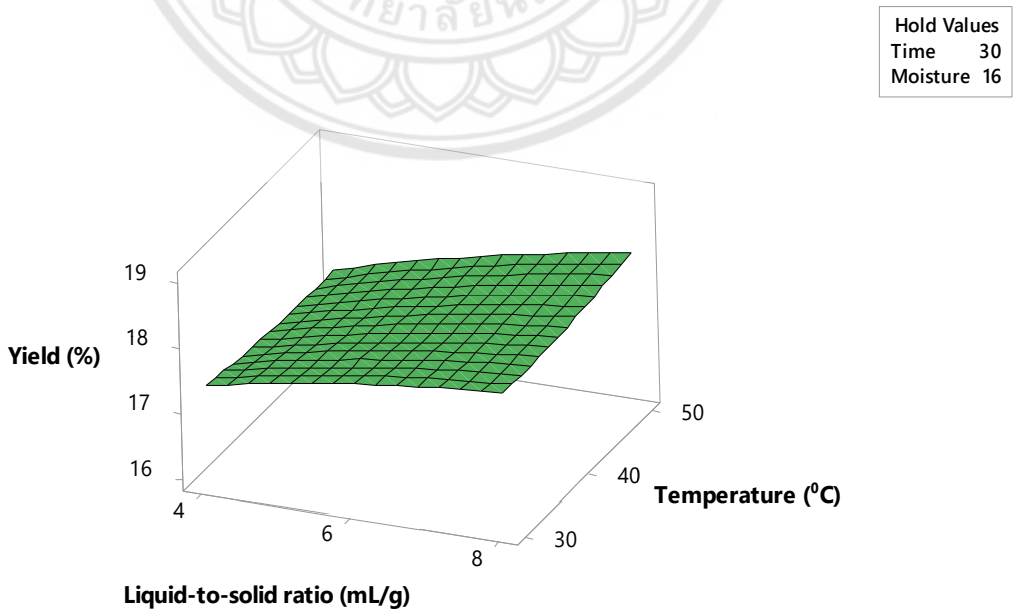
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่สกัด

4.2.4 การสร้างพื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันกาแฟที่ได้จากการสกัด สามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวผลตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟและกราฟโครงร่างได้ดังรูปที่ 4.2 – 4.13

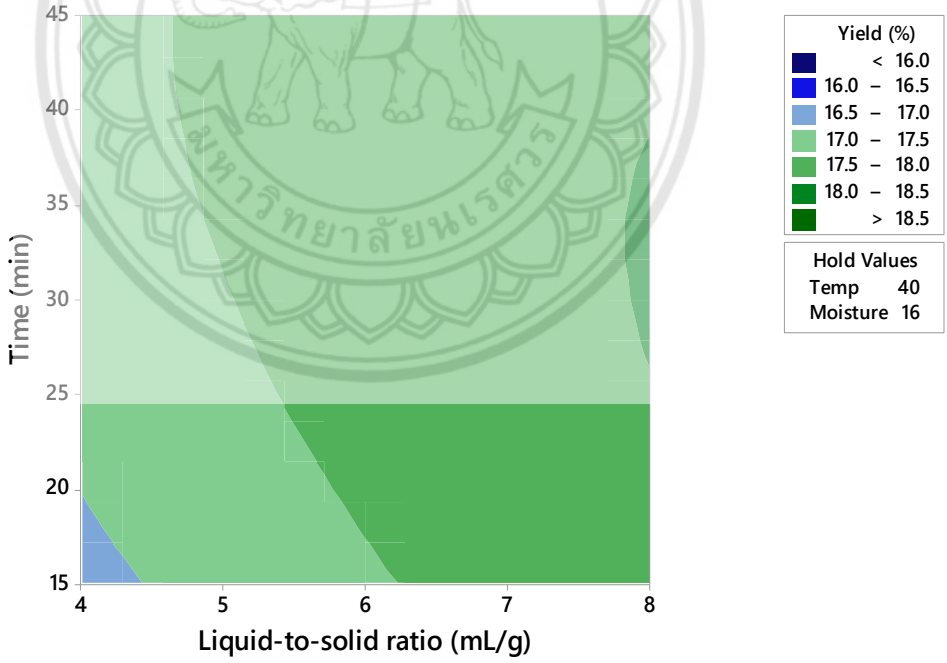


รูปที่ 4.2 กราฟโครงร่างแสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด

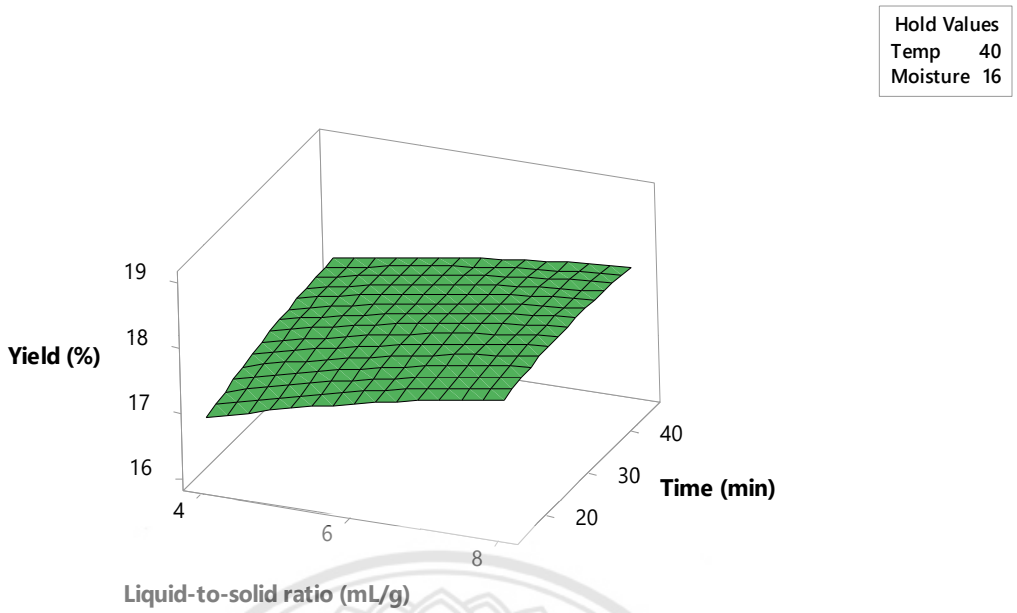


รูปที่ 4.3 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้น้ำมันกาแฟที่สกัดได้ระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงอิทธิพลร่วมของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ เมื่อปัจจัยอื่นคงที่ พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่ได้สกัดได้สูงสุด เมื่ออัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟใกล้เคียงที่ 8 มิลลิลิตรต่อกรัม และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดประมาณ 40 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นการเพิ่มทั้งอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและอุณหภูมิส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นปริมาณตัวทำละลายทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลของสาร (Mass Transfer) และเร่งการแพร่กระจายของสาร (Diffusion) อย่างไรก็ตามปริมาณตัวทำละลายที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงขับ (Driving Force) ของสาร [41, 44] สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิการสกัดส่งผลต่อคุณสมบัติการละลายของสารที่ต้องการสกัดและตัวทำละลาย เนื่องจากความหนืดของตัวทำละลายทั้งสองลดลงและเพิ่มคุณสมบัติในการถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Property) ของสารที่ต้องการสกัด ช่วยให้ตัวทำละลายซึมผ่านเข้าสู่สารที่ต้องการสกัดได้ดี ขณะเดียวกันสารที่ต้องการสกัดละลายเข้ากับตัวทำละลายได้ดีเช่นกัน [44, 46]

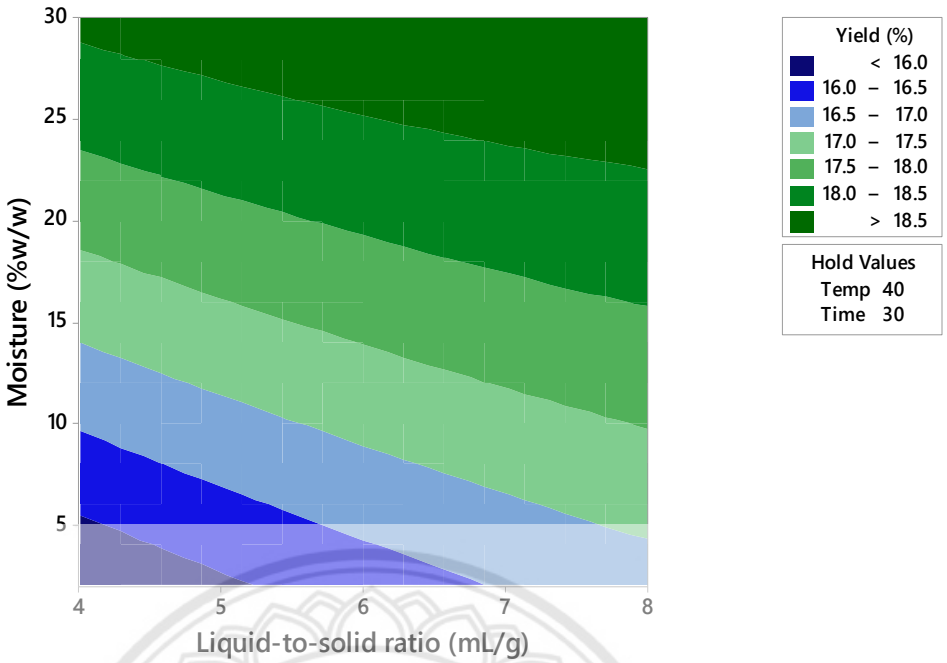


รูปที่ 4.4 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด

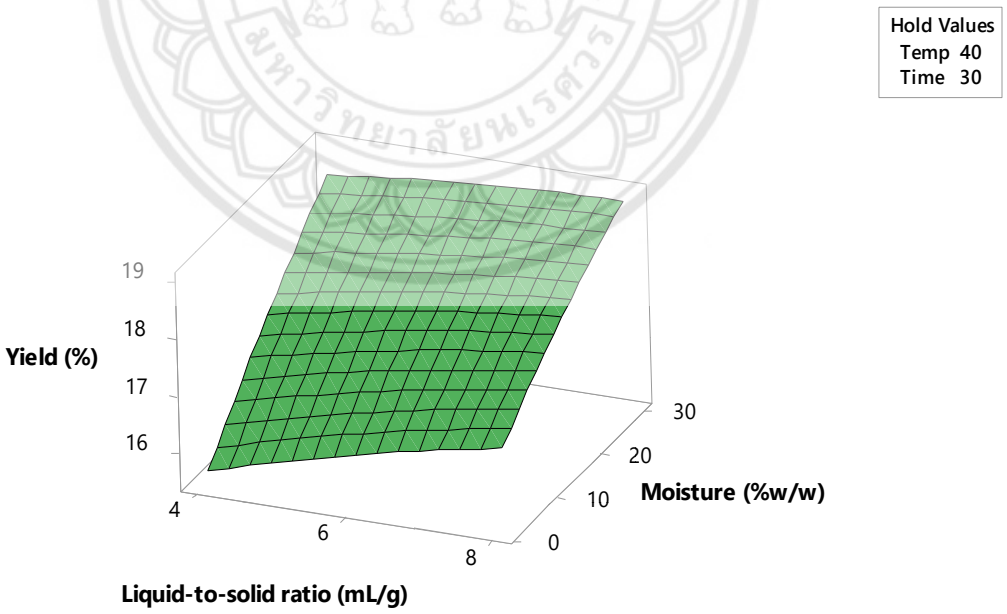


รูปที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้น้ำมันกาแฟที่สกัดได้ระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟที่ 8 มิลลิลิตรต่อกรัม และเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณ 30 นาที นอกจากนั้นการเพิ่มทั้งอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาจะส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่างตัวทำละลายกับกากกาแฟได้นานและปริมาณตัวทำละลายละลายสารมากขึ้น และประเด็นที่น่าสนใจอีกประการคือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวของทำละลายต่อกากกาแฟถึงช่วงหนึ่งร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟเริ่มคงที่ ส่งผลเนื่องจากพลังงานจากคลื่นอัลตร้าโซนิคถูกดูดซับหรือกระจัดกระจายไปในตัวทำละลายที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานของคลื่นอัลตร้าโซนิคลดลงและพลังงานในการสกัดจึงลดลงตามไปด้วย [41]

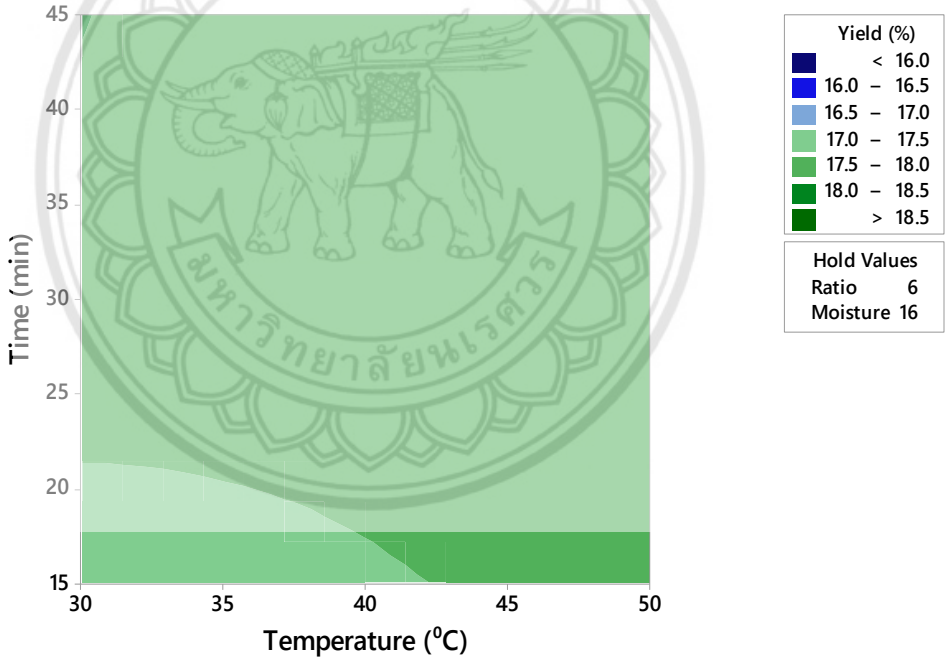


รูปที่ 4.6 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและความชื้นของกากกาแฟที่ใช้ในการสกัด

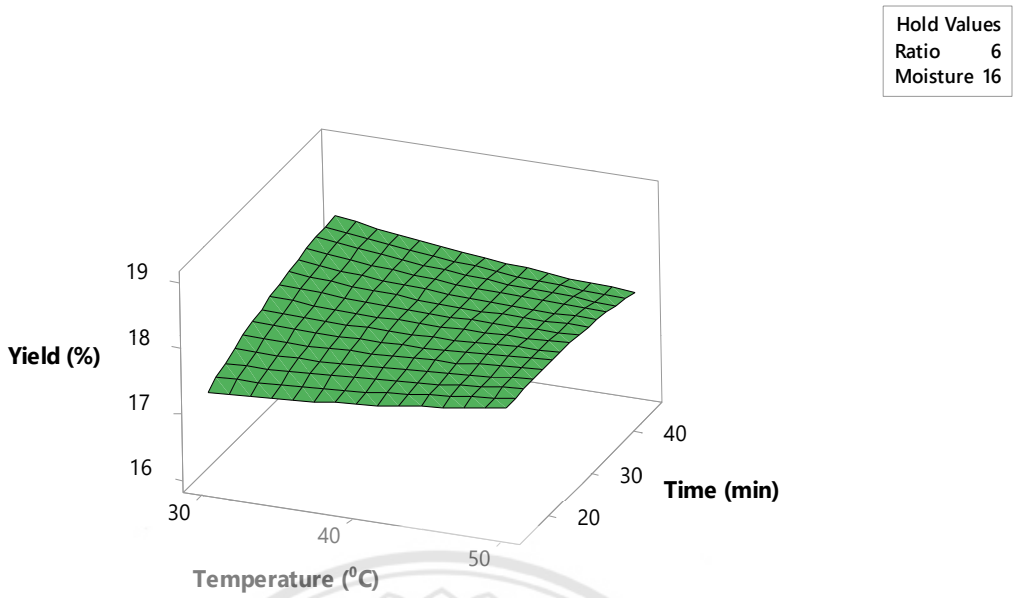


รูปที่ 4.7 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและความชื้นของกากกาแฟที่ใช้ในการสกัด

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและความชื้นของกากกาแฟที่ใช้ในการสกัด พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟที่ 8 มิลลิลิตรต่อกรัม และความชื้นของกากกาแฟที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณร้อยละ 30 ของน้ำหนักกากกาแฟ นอกจากนั้นการเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟเป็นการเพิ่มปริมาณสารเข้าไปสัมผัสกับกากกาแฟมากขึ้นส่งผลให้น้ำมันกาแฟออกมามากขึ้นด้วยเช่นกัน และความชื้นหรือน้ำในกากกาแฟนั้นเป็นสารที่มีขั้วเช่นเดียวกันกับไอโซโพรพานอลที่เป็นตัวทำละลายร่วมทำให้สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ จึงลดการขัดขวางการสกัดที่เกิดจากความชื้น [37, 45] และด้วยเหตุนี้อาจส่งผลต่อการซึมผ่านของตัวทำละลาย โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นในกากกาแฟเป็นทางผ่านที่ทำให้ตัวทำละลายร่วมนี้เข้าไปในกากกาแฟได้มากขึ้น

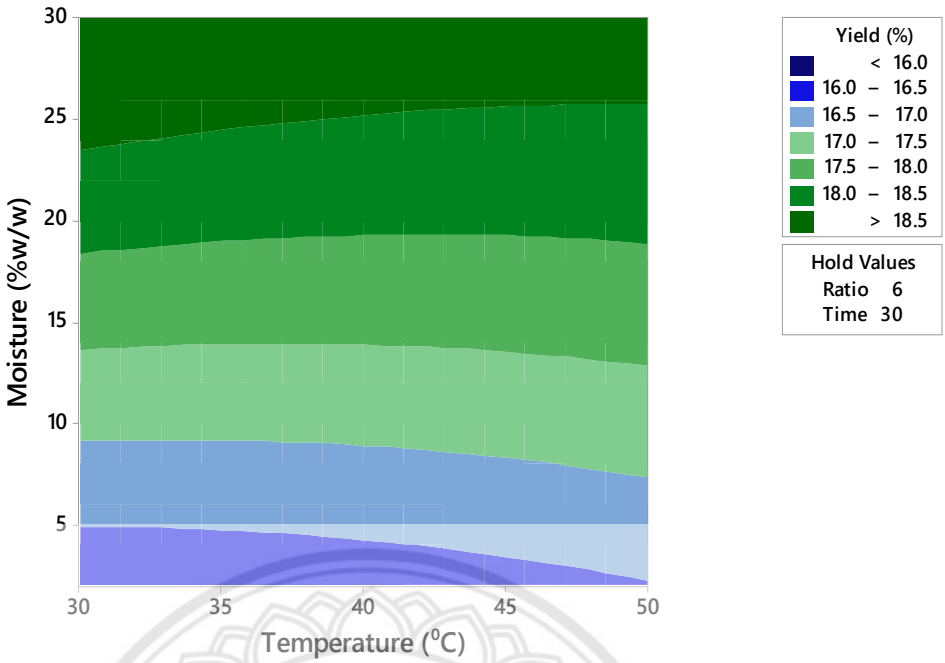


รูปที่ 4.8 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัด

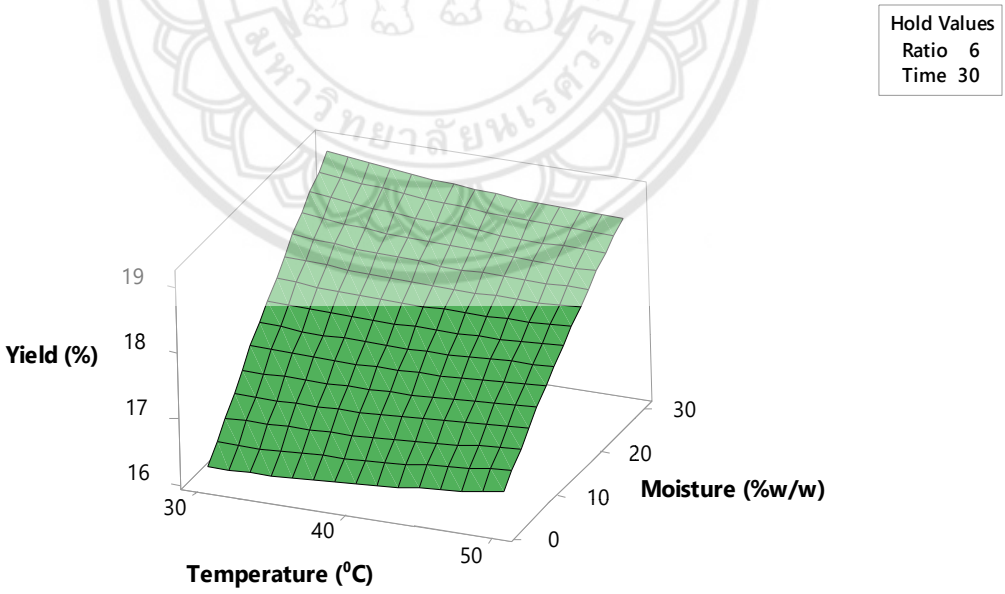


รูปที่ 4.9 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัด

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัด พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณ 30 องศาเซลเซียส และเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณ 45 นาที อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาส่งผลให้ได้น้ำมันกาแฟเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลกับการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) จากคลื่นอัลตราโซนิคโดยทำให้เกิดโพรงอากาศได้ง่ายขึ้น โดยเป็นการเพิ่มฟองอากาศขนาดเล็กไปทำลายผนังเซลล์ของตัวอย่าง และเพิ่มการถ่ายโอนมวลของตัวทำละลายและสารสกัดทำให้ได้น้ำมันกาแฟเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ตัวทำละลายกลายเป็นไอไปอยู่ฟองอากาศที่เกิดจากคลื่นอัลตร้าโซนิค ซึ่งไอของตัวทำละลายนี้จะลดผลกระทบจากระเบิดของฟองอากาศทำให้ประสิทธิภาพของคลื่นอัลตร้าโซนิตลดลง [43] และเมื่อถึงช่วงหนึ่งความร้อนที่ถูกสะสมจากอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้น้ำมันกาแฟมีความเสถียรลดลงและสลายตัวไป [42] เป็นผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟมีค่าลดลง

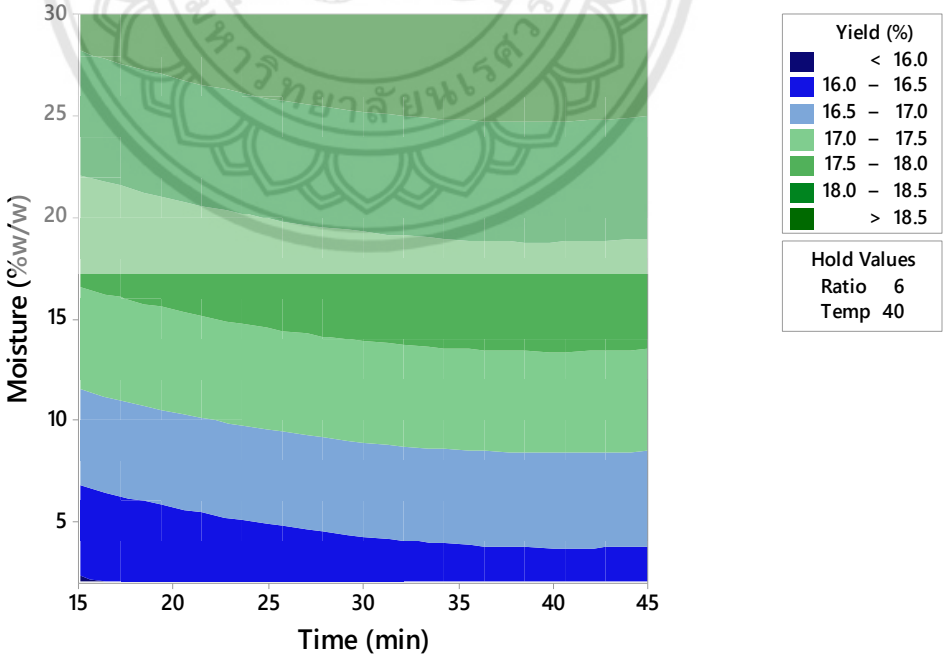


รูปที่ 4.10 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างความชื้นของกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด

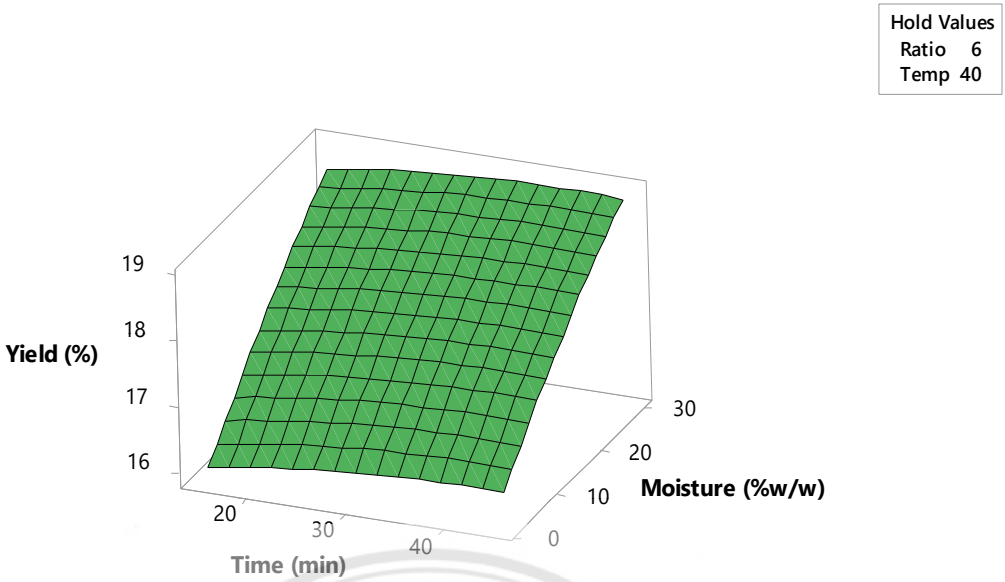


รูปที่ 4.11 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่าความชื้นของกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมอุณหภูมิและความชื้นของกากกาแฟที่ใช้ในการสกัดใช้ในการสกัด พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นของกากกาแฟที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณร้อยละ 30 ของน้ำหนักกากกาแฟ อีกทั้งในช่วงเริ่มต้นของการสกัดเมื่อเพิ่มความชื้นและอุณหภูมิในการสกัดได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้นไปทำลายผนังเซลล์ตัวอย่างส่งผลให้ง่ายต่อการสกัดทำให้ได้น้ำมันกาแฟเพิ่มขึ้น [36] ช่วงการสกัดหลังเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟเนื่องจากการกลายเป็นไอเข้าไปในฟองอากาศที่เกิดจากคลื่นอัตร้าโซนิคซึ่งส่วนนี้ลดประสิทธิภาพการทำลายผนังเซลล์ของการแตกตัวจากฟองอากาศ [43] และส่งผลให้ตัวทำละลายที่กลายเป็นไอ ซึ่งมีอัตราการกลับคืนสู่ของเหลวได้ต่ำ [35] จึงส่งผลต่อปริมาณการสกัดน้ำมันกาแฟ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลเพียงแค่เล็กน้อยเท่านั้นอาจกล่าวได้ว่าไม่มีนัยสำคัญ สำหรับความชื้นหรือน้ำในกากกาแฟสามารถละลายเข้ากันกับไอโซโพรพานอลที่เป็นสารมีขั้วเหมือนกันได้ จึงละลายเข้าด้วยกันได้ [45] และอาจส่งผลให้ตัวทำละลายเข้าไปในกากกาแฟได้มากขึ้น ผ่านทางความชื้นที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 กราฟโครงร่างร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างความชื้นของกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด

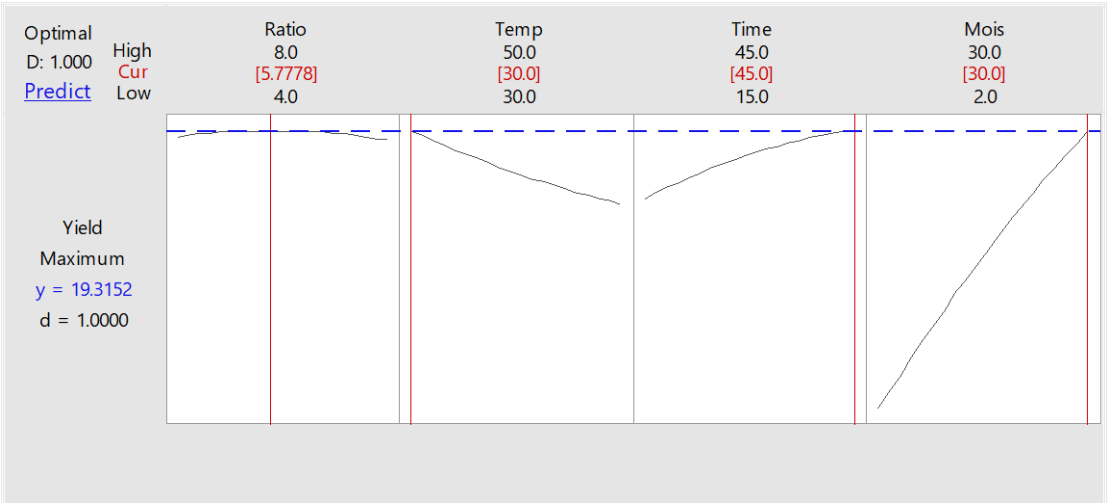


รูปที่ 4.13 พื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟระหว่างความชื้นของกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัด

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่อพิจารณาเวลาและความชื้นของกากกาแฟที่ใช้ในการสกัดใช้ในการสกัด พบว่า เวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณ 45 นาทีและความชื้นของกากกาแฟที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำมันกาแฟสูงสุดคือบริเวณร้อยละ 30 ของน้ำหนักกากกาแฟ เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างตัวทำละลายกากกาแฟนานขึ้นและความชื้นในกากกาแฟที่สามารถละลายเข้ากันกับไอโซโพรพานอลในตัวทำละลายร่วม [37] ทั้งนี้เมื่อทำการสกัดจนถึงช่วงระยะเวลาหนึ่งจะเข้าสู่ค่าคงที่เนื่องจากความอิ่มตัวของการสกัด ขณะที่ความชื้นที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลต่อการซึมผ่านของตัวทำละลายเข้าไปในกากกาแฟ ด้วยเหตุผลการละลายเข้ากันได้ของความชื้นกับตัวทำละลาย

4.2.5 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟสามารถได้จากฟังก์ชัน Response optimizer ในโปรแกรม Minitab R.17 ซึ่งจะถูกแสดงให้ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟสภาวะที่เหมาะสมของน้ำมันกาแฟ

จากรูปที่ 4.14 พบว่า สภาวะที่เหมาะที่สุดในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้ตัวละลายร่วมระหว่างเฮกเซนและไอโซโพรพานอลในอัตราส่วน 50:50 คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 5.78 มิลลิลิตรต่อกรัม อุณหภูมิในการสกัด 30 องศาเซลเซียส เวลาในการสกัด 45 นาที และความชื้นของกากกาแฟร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก โดยโปรแกรมได้คำนวณออกมาได้ปริมาณน้ำมันกาแฟร้อยละ 19.31 $\pm$ 0.73 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำสภาวะที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมนี้มาทดสอบได้ปริมาณน้ำมันร้อยละ 18.55 โดยน้ำหนัก ซึ่งคาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมไปร้อยละ 3.96 ของค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม ทั้งนี้สภาวะที่เหมาะสมนี้มีสภาวะคล้ายกันกับลำดับการทดลองที่ 25 ในตารางที่ 4.1 ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าสมการความสัมพันธ์ของ 4 ปัจจัยและตัวแปรตอบสนอง และสภาวะที่เหมาะสมนี้มีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองร่วมกับการออกแบบการทดลองการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการทำนายหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดได้

4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันจากกากกาแฟ

การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันจากกากกาแฟ เป็นการวิเคราะห์น้ำมันเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบว่าน้ำมันที่สกัดได้นั้นสามารถนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลได้หรือไม่ โดยแสดงผลในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันเบื้องต้น

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่าที่ได้จากการทดลอง	ค่าอ้างอิง
กรดไขมัน	มิลลิกรัมของ NaOH ต่อกรัมของน้ำมันกาแฟ	3.920 – 5.173	3.9 - 5.6 [40]
ความหนืด	เซนติพอยส์	51.38 – 59.92	50.99 [10]
ความหนาแน่น	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	921.39 – 943.49	927 [40]

จากตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้โดยใช้ตัวทำละลายร่วมระหว่างเฮกเซนและไอโซโพรพานอลในอัตราส่วน 50:50 พบว่า ค่ากรดไขมัน ค่าความหนืด และค่าความหนาแน่นแตกต่างกันไม่มากนัก และมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ได้มีการทดลองสกัดน้ำมันจากกากกาแฟก่อนหน้านี้ของ Zayed Al-Hamamre และคณะ [10] และ Nídia S.Ca-etano และคณะ [40] สำหรับการนำไปผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถทำได้โดยผ่านการเตรียมน้ำมันก่อนด้วยกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชั่นเพื่อลดความเป็นกรด ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ จะได้รับการเติมแต่งจากสารเติมแต่งหลังจากที่ผลิตเป็นไบโอดีเซลแล้วเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานของน้ำมันเชื้อเพลิง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการสกัดแบบไหลย้อนกลับโดยความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตร้าโซนิคของน้ำมันจากกากกาแฟ โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมจากปัจจัยต่างๆ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง และศึกษาผลของการใช้ตัวทำละลายร่วมระหว่างเฮกเซนและไอโซโพรพานอล ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยเป็นประเด็นต่างๆ ได้ดังนี้

ก. การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองบ็อก-เบห์นเคน ปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการสกัด และความชื้นของกากกาแฟ มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟอย่างเกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน

ข. สมการทำนายร้อยละผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจคือ 0.97 และความน่าเชื่อถือของค่าสัมประสิทธิ์มีค่า 0.95 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น่าเชื่อถือ และร้อยละน้ำมันจากกากกาแฟได้มากที่สุดคือ ร้อยละ 19.31 โดยน้ำหนักกากกาแฟ เมื่ออัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 5.78 มิลลิลิตรต่อกรัม อุณหภูมิในการรสกัด 30 องศาเซลเซียส เวลาในการสกัด 45 นาที และความชื้นของกากกาแฟร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ค. จากการนั้นนำสภาวะที่ได้จากสมการทำนายมาทำการทดลองสกัดเพื่อตรวจสอบคาดเคลื่อนนั้น พบว่า ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟเท่ากับ 18.55 โดยน้ำหนัก ซึ่งคาดเคลื่อนไปร้อยละ 3.96 เมื่อเทียบค่าที่คำนวณได้จากสมทำนาย เห็นได้ว่าร้อยละผลได้น้ำมันกาแฟจากสมการทำนายและการทดลองที่สภาวะเดียวกันไม่แตกต่างกัน

ง. ผลกระทบของตัวทำละลายร่วมระหว่างเฮกเซนและไอโซโพรพานอลส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันมากกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ด้วยคุณสมบัติความเป็นขั้วของตัวทำละลายทั้งสองที่ไม่มีขั้วและมีขั้ว ทำให้สามารถไปสกัดสารในกากกาแฟออกมาได้มากขึ้นเนื่องจากสารเป้าหมายภายในกากกาแฟมีสารที่ไม่มีขั้วและมีขั้ว ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มการละลายของสารเป้าหมาย นอกจากนั้นไอโซโพรพานอลยังเข้ามามีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาเรื่องความชื้นในกากกาแฟ โดยความชื้นหรือน้ำในกากกาแฟซึ่งเป็นสารมีขั้วจะละลายเข้ากับไอโซโพรพานอล

จ. การใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคร่วมกับการสกัดแบบไหลย้อนกลับด้วยความร้อนทำให้สามารถสกัดที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาในการสกัดน้อยลง ซึ่งส่งผลดีเนื่องจากลดพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิ

และนอกจากนี้คลื่นอัลตร้าโซนิคได้เข้ามามีส่วนช่วยในการสกัดทำให้สามารถสกัดน้ำมันจากกากกาแฟได้มากขึ้น

ฉ. การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟ พบว่า ค่ากรดไขมัน 3.92 – 5.17 มิลลิกรัมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของน้ำมันกาแฟ ค่าความหนืด 51.38 – 59.92 เซนติพอยส์ และค่าความหนาแน่น 921.39 – 943.49 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าการทดสอบใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆที่สกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

ช. น้ำมันกากกาแฟสามารถนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลได้โดยการเตรียมน้ำมันด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชั่นเพื่อลดค่าความเป็นกรดก่อน ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ จะได้รับการเติมแต่งจากสารเติมแต่งหลังจากที่ผลิตเป็นไบโอดีเซลกาแฟเพื่อปรับให้เป็นไปตามมาตรฐานการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ก. ควรประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการสกัดแบบไหลย้อนกลับโดยความร้อนร่วมกับคลื่นอัลตร้าโซนิค

ข. ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของคุณสมบัติกายภาพของกากกาแฟ กากกาแฟซึ่งปราศจากน้ำมัน และน้ำมันที่ได้จากการสกัด (นอกเหนือจากรดไขมันอิสระ ความหนืด และความหนาแน่น)

ค. ควรศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระโดยการใช้เครื่อง Gas Chromatography

บรรณานุกรม

[1] มานพ หาญเทวี. (2548). **เทคโนโลยีการผลิตกาแฟอาราบิก้า**. ศูนย์วิจัยเกษตรหลวงเชียงใหม่ สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร.

[2] International Coffee Organization (ICO). (2016). **Record Exports for Coffee Year 2016/17. London**. UK. สืบค้นเมื่อ 1 ธันวาคม 2560, จาก https://icocoffeeorg.tumblr.com/post/167228397100/record-exports-for-coff-ee year-201617

[3] Obruca S, Petrik S, Benesova P, Svoboda Z, Eremka L, Marova I. (2014). **Utilization of oil extracted from spent coffee grounds for sustainable production of polyhydro-xyalkanoates**. Appl Microbiol Biotechnol. 98(13), 5883–5890.

[4] Caetano NS, Silva VFM, Mata TM. (2012). **Valorization of coffee grounds for biodiesel production**. Chem Eng Trans. 26, 267–272.

[5] Kondamudi N,Mohapatra SK,MisraM. (2008). **Spent coffee grounds as a versatile source of green energy**. J Agric Food Chem 56(24), 11757–11760.

[6] Kwon EE, Yi H, Jeon YJ. (2013). **Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds**. Bioresour Technol. 136(1), 475–480.

[7] Derek R. Vardon, et al. (2013). **Complete Utilization of Spent Coffee Grounds To Produce Biodiesel, Bio-Oil, and Biochar**. ACS Sustainable Chemistry& Engineering. 1(10), 1286-1294.

[8] Chokchai M, Ruamporn N, Jatuporn K, Kulchanart P. (2017). **Statistical Optimization for Esterification of Waste Coffee Grounds Oil using Response Surface Methodology.** Energy Procedia. 138, 235-240.

[9] E. Pichai, S. Krit. (2015). **Optimization of solid to liquid ratio and time for oil extraction process from spent coffee grounds using response surface methodology**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 10(16), 7049-7052.

[10] Al-Hamamre Z, Foerster S, Hartmann F, Kroger M, Kaltschmitt M. (2012). **Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing**. Fuel. 96, 70–76.

[11] S. Krit, E. Pichai, P. Gumpon. (2017). **Optimization of coffee oil extraction from spent coffee grounds using four solvents and prototype-scale extraction using circulation process**. Agriculture and Natural. Resources. 51, 181-189.

[12] Ricardo M. Couto, Joao Fernandes, M.D.R. Gomes da Silva, Pedro C Simoes. (2009). **Supercritical fluid extraction of lipids from spent coffee grounds**. J. of Supercritical Fluids. 51(2), 159–166.

[13] Rocha, M.V.P., de Matos, L.J.B.L., Lima, L.P.D., Figueiredo, P.M.D.S., Lucena, I.L., Fernan-des, F.A.N., Gonçalves, L.R.B. (2014). **Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds**. Bioresour Technol. 167, 343-348.

[14] แดนชัย เครื่องเงิน และ นลิสา ทองอรุณ. (2557). **วิธีการที่เหมาะสมในการสกัดกรดโอลีนโนลิกและกรดยูโซลิกในพืช**. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.). 1(2), 1-11

[15] Ma, Y.Q., Ye, X.Q., Fang, Z.X., Chen, J.C., Xu, G.H., Liu, D.H. (2008). **Phenolic compounds and antioxidant activity of extracts from ultrasonic treatment of Satsuma mandarin (Citrus unshiu Marc.) peels**. J. Agric. Food Chem. 56(14), 5682–5690.

[16] ดร.จรัล ทรัพย์เสรี. (2009). **DOE ตอน Central Composite Design**. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม 2560, จาก www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/FQ145_p72-74.pdf

[17] รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ รศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). **การทดลองแบบ Box-Benhken**. กรุงเทพฯ:ท้อป, 464 หน้า

[18] นางอมรทิพย์ ภิรมย์บูรณ์ และคณะ. (2557). **การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกาแฟ**. กรมส่งเสริมการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

[19] Pushpa S. Murthy, M. Madhava Naidu. (2012). **Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. Resources**. Conservation and Recycling. 66, 45– 58

[20] **การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction)**, สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2560, จาก http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/chapter 8. pdf

[21] รศ. ดร. ศุภศร วนิชเวชารุ่งเรือง และคณะ. (2558). **การสกัดด้วยตัวทำละลาย**. 2302275 (Org Chem Lab I). สืบค้นเมื่อ 2 ธันวาคม 2560, จาก http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/2302275.htm

[22] มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. **การทบทวนความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง**. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2560, จาก https://cdn.fbsbx.com/v/t59.270821/114038581020582851-4845777_1970829117n.pdf

[23] ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2557). **การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเชิงวิศวกรรมด้วยวิธีพื้นที่ตอบสนองประยุกต์**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, หน้า 8-9

[24] มารุต มูเก็ม. **ฮิสโตแกรม**. สืบค้นเมื่อ 23 ธันวาคม 2560, จาก http://www.mim.psu.ac.th/index.php/2-uncategorised/93-histogram

[25] ฉลอง สีแก้วสิ่ว. **บทที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน**. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม 2560, จาก https://sites.google.com/site/mystatistics01/chapter5/2-way-anova

[26] สุรีย์ เข็มทอง. **โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ**. สืบค้นเมื่อ 8 ธันวาคม 2560, จาก http://slidegur.com/doc/1525893/%E0%B9%82%

[27] กัณฐ์มณี ศรีเที่ยง. **การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ**. สืบค้นเมื่อ 8 ธันวาคม 2560, จาก https://sites.google.com/site/kanmanee1992/3-porkaerm-minitab

[28] มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. **การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ**. สืบค้นเมื่อ 9 ธันวาคม 2560, จาก http://digi.library.tu.ac.th/thesis/en/0232/14APPENDIX_A.pdf

[29] ศูนย์บริการวิชาการที่ 3 (จังหวัดมหาสารคาม). **เทคนิคการผลิตไบโอดีเซลให้ได้คุณภาพ**. สืบค้นเมื่อ 10 ธันวาคม 2560, จาก http://www2.dede.go.th/bett/Activities/KM/BioDiesel%20Manual.pdf

[30] Chunying Li et al. (2017). **Ultrasonic Assisted-Reflux Synergistic Extraction of Camptothecin and Betulinic Acid from Camptotheca acuminata Decne**. Fruits. Molecules. 22(7), 1076

[31] Ming-Chi Wei, Jianbo Xiao, Yu-Chiao Yang. (2016). **Extraction of a-humulene-enriched oil from clove using ultrasound-assisted supercritical carbon dioxide extraction and studies of its fictitious solubility**. Food Chemistry. 210, 172–181.

[32] Hugo M.A. Barbosa, et al. (2014). **Optimization of the supercritical fluid coextraction of oil and diterpenes from spent coffee grounds using experimental design and response surface methodology**. The Journal of Supercritical Fluids. 85, 165-172.

[33] Adane Tilahun Getachew , Byung-Soo Chun. (2016). **Optimization of coffee oil flavor encapsulation using response surface methodology**. LWT - Food Science and Technology. 70, 126-134.

[34] Cai-ping Zhu et al. (2015). **Response surface optimization of ultrasound-assisted polysaccharides extraction from pomegranate peel**. Food Chemistry. 177, 139–146

[35] Mabrahtu Haile. (2014). **Integrated volarization of spent coffee grounds to biofuels**. Biofuel Research Journal. 1(2), 65-69

[36] Mohammad Rostami et al. (2014). **Optimizing the extraction process of sesame seed's oil using responsesurface method on the industrial scale**. Industrial Crops and Products. 58, 160-165.

[37] Mohammad Malekzadeh et al. (2016). **Experimental study and thermodynamic modeling for determining the effect of non-polar solvent (hexane) / polar-solvent (methanol) ratio and moisture content on the lipid extraction efficiency from Chlorella**. Bioresource Technology. 201, 304-311.

[38] Jamil, F; Al-Muhtaseb, AH; Al-Haj, L; Al-Hinai, MA; Hellier, P; Rashid, U. (2016). **Optimization of oil extraction from waste "date pits" for biodiesel production**. Energy Conversion and Management. 117, 264-272.

[39] เจริญพร ถาวรประเสริฐ และคณะ. (2558). **การศึกษากระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายและระยะเวลาสกัด**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 16. 390-392

[40] Nı´dia S. Caetano et al. (2014). **Spent coffee grounds for biodiesel production and other applications**. Clean Techn Environ Policy. 16(7), 1423-1430.

[41] Y. Li et al. (2017). **Recovery and purification of cholesterol from cholesterol-b-cyclodextrin inclusion complex using ultrasound-assisted extraction**. Ultrasonics Sonochemistry. 34, 281-288

[42] I. Efthymiopoulos et al. (2018). **Influence of solvent selection and extraction temperature on yield and composition of lipids extracted from spent coffee grounds**. Industrial Crops & Products. 119, 49-56

[43] M. Abdullah, A. Bulent Koc. (2013). **Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication**. Renewable Energy. 50, 965-970

[44] Z. Lou et al. (2010). **Improved extraction of oil from chickpea under ultrasound in a dynamic system**. Journal of Food Engineering. 98, 13-18

[45] ณัฐินี โมพันธุ์ และคณะ. **กระบวนการเกิดสารละลาย.** สืบค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม 2561, จาก http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/liquid_solution/solution_dissolution.htm

[46] S. Hemwimol et al. (2006). **Ultrasound-assisted extraction of anthraquinones from roots of Morinda citrifolia**. Ultrasonics Sonochemistry. 13, 543-548

[47] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2004). **เอกสารข้อมูลความปลอดภัย**. สืบค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม 2561, จาก http://www.chemtrack.org/MSDSSG/Trf/msdst/msdst67-63-0.html

ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ปัจจัย				ความชื้นจริง (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)	เนื้อกากกาแฟแห้ง (กรัม)	ขวด+น้ำมัน (กรัม)	ขวดเปล่า (กรัม)	น้ำมัน (กรัม)	น้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)						
6	30	30	2	1.81	19.638	34.889	31.7494	3.1396	15.9874
4	40	30	2	1.81	19.638	34.6293	31.7110	2.9183	14.8605
6	40	15	2	1.81	19.638	34.6377	31.5029	3.1348	15.9629
6	40	45	2	1.81	19.638	34.9270	31.8190	3.1080	15.8265
8	40	30	2	1.81	19.638	35.0251	31.7412	3.2839	16.7222
6	50	30	2	1.81	19.638	35.1789	31.9513	3.2276	16.4355
4	30	30	15	16.23	16.754	34.5312	31.8061	2.7251	16.2654
6	30	15	15	16.23	16.754	34.6437	31.7251	2.9186	17.4203
6	30	45	15	15.47	16.906	34.749	31.7333	3.0157	17.8380
8	30	30	15	16.23	16.754	34.7093	31.7541	2.9552	17.6388
4	40	15	15	16.23	16.754	34.5943	31.8261	2.7682	16.5226
4	40	45	15	15.47	16.906	34.8295	31.8367	2.9928	17.7026
6	40	30	15	16.23	16.754	34.5145	31.6101	2.9044	17.3356
6	40	30	15	-	-	-	-	-	-

ปัจจัย				ความชื้นจริง (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)	เนื้อกากกาแฟแห้ง (กรัม)	ขวด+น้ำมัน (กรัม)	ขวดเปล่า (กรัม)	น้ำมัน (กรัม)	น้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)						
6	40	30	15	-	-	-	-	-	-
8	40	15	15	16.23	16.754	34.5902	31.7234	2.8668	17.1111
8	40	45	15	15.47	16.906	34.747	31.6674	3.0796	18.2160
4	50	30	15	15.47	16.906	32.6727	29.7608	2.9119	17.2241
6	50	15	15	15.47	16.906	32.6748	29.6623	3.0125	17.8191
6	50	45	15	15.47	16.906	32.5553	29.6324	2.9229	17.2891
8	50	30	15	15.47	16.906	32.5908	29.5234	3.0674	18.1439
6	30	30	30	30.27	13.946	32.213	29.5021	2.7109	19.4385
4	40	30	30	30.27	13.946	32.4213	29.7706	2.6507	19.0069
6	40	15	30	30.27	13.946	32.5032	29.8486	2.6546	19.0348
6	40	45	30	30.27	13.946	32.3839	29.7704	2.6135	18.7401
8	40	30	30	30.27	13.946	32.2595	29.505	2.7545	19.7512
6	50	30	30	30.27	13.946	32.5401	29.887	2.6531	19.0241
5.7778	30	45	30	29.76	14.048	34.0566	31.4492	2.6074	18.5606

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ปัจจัย				ความชื้นจริง (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)	เนื้อกากกาแฟแห้ง (กรัม)	ขวด+น้ำมัน (กรัม)	ขวดเปล่า (กรัม)	น้ำมัน (กรัม)	น้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)						
6	30	30	2	1.81	19.638	32.8708	29.5225	3.3483	17.0501
4	40	30	2	1.81	19.638	32.9351	29.6358	3.2993	16.8006
6	40	15	2	1.81	19.638	33.2095	29.8277	3.3818	17.2207
6	40	45	2	1.81	19.638	32.7839	29.4049	3.3790	17.2064
8	40	30	2	1.81	19.638	33.0278	29.6517	3.3761	17.1917
6	50	30	2	1.81	19.638	33.0407	29.6360	3.4047	17.3373
4	30	30	15	15.36	16.928	34.5856	31.6520	2.9336	17.3299
6	30	15	15	15.36	16.928	34.7185	31.7213	2.9972	17.7056
6	30	45	15	15.36	16.928	32.5017	29.4794	3.0223	17.8539
8	30	30	15	15.36	16.928	32.4843	29.4455	3.0388	17.9513
4	40	15	15	16.07	16.786	32.5784	29.7212	2.8572	17.0213
4	40	45	15	15.36	16.928	32.8125	29.8179	2.9946	17.6902
6	40	30	15	-	-	-	-	-	-
6	40	30	15	16.07	16.786	32.7326	29.7107	3.0219	18.0025

ปัจจัย				ความชื้นจริง (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)	เนื้อกากกาแฟแห้ง (กรัม)	ขวด+น้ำมัน (กรัม)	ขวดเปล่า (กรัม)	น้ำมัน (กรัม)	น้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)						
6	40	30	15	-	-	-	-	-	-
8	40	15	15	16.07	16.786	32.6461	29.5461	3.1000	18.4678
8	40	45	15	15.36	16.928	34.9014	31.8450	3.0564	18.0553
4	50	30	15	15.36	16.928	32.3413	29.4441	2.8972	17.1148
6	50	15	15	15.56	16.888	32.7272	29.7051	3.0221	17.8950
6	50	45	15	15.56	16.888	32.6857	29.7387	2.9470	17.4503
8	50	30	15	15.56	16.888	32.6943	29.6069	3.0874	18.2816
6	30	30	30	30.40	13.920	34.4805	31.8769	2.6036	18.7040
4	40	30	30	30.40	13.920	34.0410	31.5037	2.5373	18.2277
6	40	15	30	30.40	13.920	32.2145	29.5983	2.6162	18.7945
6	40	45	30	30.40	13.920	34.5016	31.9100	2.5916	18.6178
8	40	30	30	30.40	13.920	31.9319	29.2822	2.6497	19.0352
6	50	30	30	30.40	13.920	32.1815	29.5654	2.6161	18.7938
5.7778	30	45	30	29.76	14.048	32.1105	29.5058	2.6047	18.5414

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ปัจจัย				ความชื้นจริง (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)	เนื้อกากกาแฟแห้ง (กรัม)	ขวด+น้ำมัน (กรัม)	ขวดเปล่า (กรัม)	น้ำมัน (กรัม)	น้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)						
6	30	30	2	1.81	19.638	33.0343	29.8167	3.2176	16.3846
4	40	30	2	1.81	19.638	32.7707	29.6095	3.1612	16.0974
6	40	15	2	1.81	19.638	32.756	29.5979	3.1581	16.0816
6	40	45	2	1.81	19.638	32.7562	29.4788	3.2774	16.6891
8	40	30	2	1.81	19.638	35.1791	31.8759	3.3032	16.8205
6	50	30	2	1.81	19.638	32.5335	29.2812	3.2523	16.5613
4	30	30	15	15.90	16.820	32.6099	29.7104	2.8995	17.2384
6	30	15	15	-	-	-	-	-	-
6	30	45	15	-	-	-	-	-	-
8	30	30	15	-	-	-	-	-	-
4	40	15	15	-	-	-	-	-	-
4	40	45	15	-	-	-	-	-	-
6	40	30	15	-	-	-	-	-	-
6	40	30	15	-	-	-	-	-	-

ปัจจัย				ความชื้นจริง (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)	เนื้อกากกาแฟแห้ง (กรัม)	ขวด+น้ำมัน (กรัม)	ขวดเปล่า (กรัม)	น้ำมัน (กรัม)	น้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความชื้น (ร้อยละของน้ำหนักกากกาแฟ)						
6	40	30	15	15.90	16.820	34.4912	31.5037	2.9875	17.7616
8	40	15	15	15.90	16.820	32.4101	29.4438	2.9663	17.6356
8	40	45	15	-	-	-	-	-	-
4	50	30	15	-	-	-	-	-	-
6	50	15	15	-	-	-	-	-	-
6	50	45	15	-	-	-	-	-	-
8	50	30	15	-	-	-	-	-	-
6	30	30	30	31.73	13.654	32.3343	29.7387	2.5956	19.0098
4	40	30	30	31.73	13.654	34.4443	31.9101	2.5342	18.5601
6	40	15	30	31.73	13.654	34.1979	31.6539	2.5440	18.6319
6	40	45	30	31.73	13.654	34.3592	31.7922	2.5670	18.8004
8	40	30	30	31.73	13.654	32.2941	29.7057	2.5884	18.9571
6	50	30	30	31.73	13.654	32.1149	29.5648	2.5501	18.6766
5.7778	30	45	30	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ก.4 ผลการวัดปริมาณกรดไขมันอิสระ

ครั้งที่	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักกากกาแฟ)	น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M)	ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)	กรดไขมันอิสระ (กรัมโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน)
1	2	5	0.1	6.2	4.960
	16			5.5	4.400
	30			4.6	3.680
2	2	5	0.1	7	5.600
	16			5.5	4.400
	30			-	-
3	2	5	0.1	6.2	4.960
	16			5.8	4.640
	30			5.2	4.160

*น้ำหนักมวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 39.997 กรัมต่อโมล

ตารางที่ ก.5 ผลการวัดความหนาแน่น

ครั้งที่	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักกากกาแฟ)	ปริมาตรกาแฟ (มิลลิลิตร)	น้ำหนัก (กรัม)		
			ขวดเปล่า	ขวด+น้ำมัน	น้ำมัน
1	2	10	17.3086	26.4268	9.1182
	16		17.0655	26.3732	9.3077
	30		16.9443	26.4079	9.4636
2	2	10	16.9443	26.2979	9.3536
	16		17.3086	26.4665	9.1579
	30		-	-	-
3	2	10	17.0655	26.3751	9.3096
	16		-	-	-
	30		16.9443	26.3505	9.4062

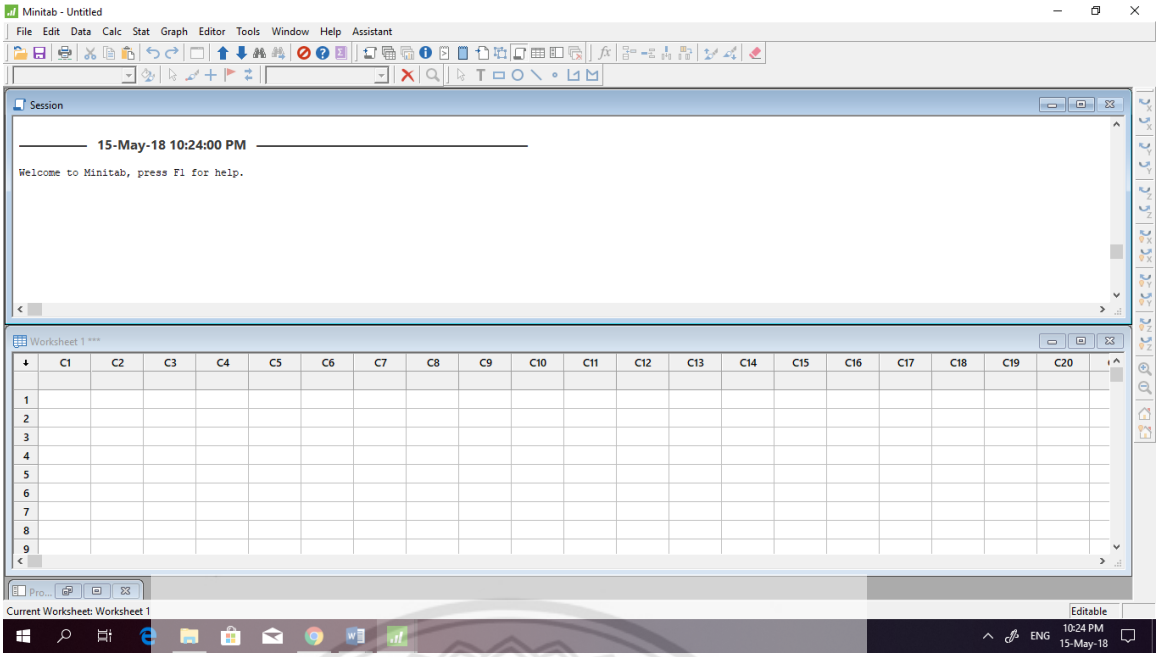
ตารางที่ ก.6 ผลการวัดความหนืด

ครั้งที่	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักกากกาแฟ)	ความเร็วรอบ (RPM)	%Toque	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด (cP)
1	2	60	99.1	40.4	49.55
	16	58	99.5	40.9	51.47
	30	52	99.5	40.3	57.4
2	2	57	99.4	39.7	52.32
	16	59	99.4	40.5	50.54
	30	-	-	-	-
3	2	57	99.3	40.6	52.26
	16	52	98.8	40.3	57
	30	48	99.9	40.6	62.44

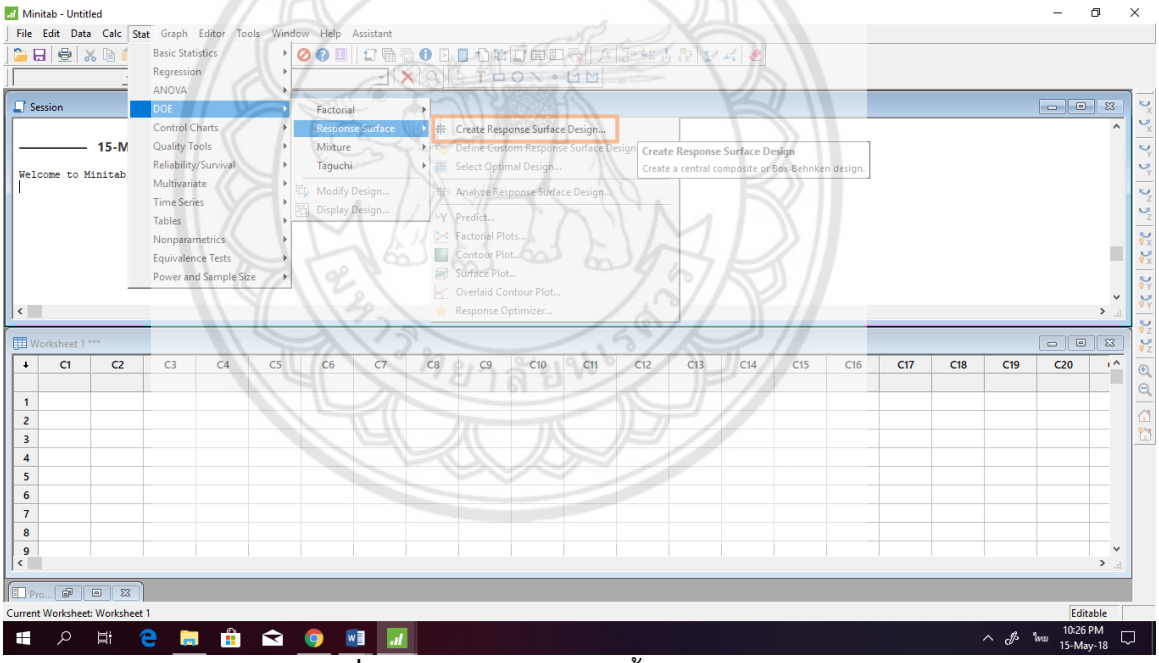
*ตัวอย่างมีปริมาตร 5 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ข

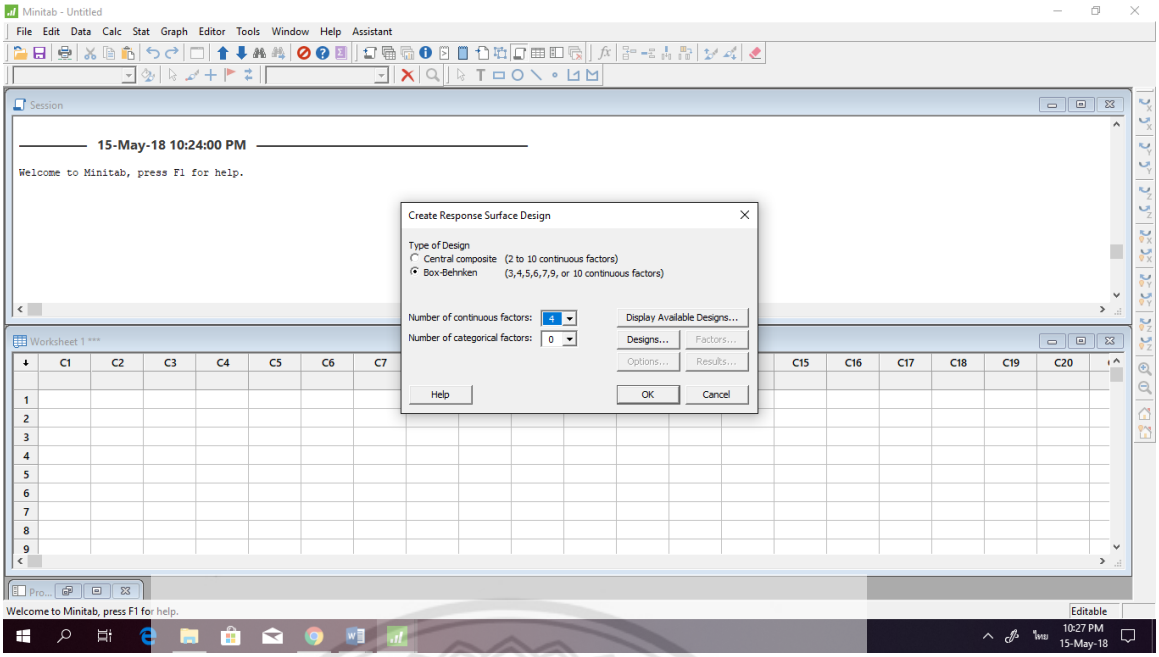
การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ



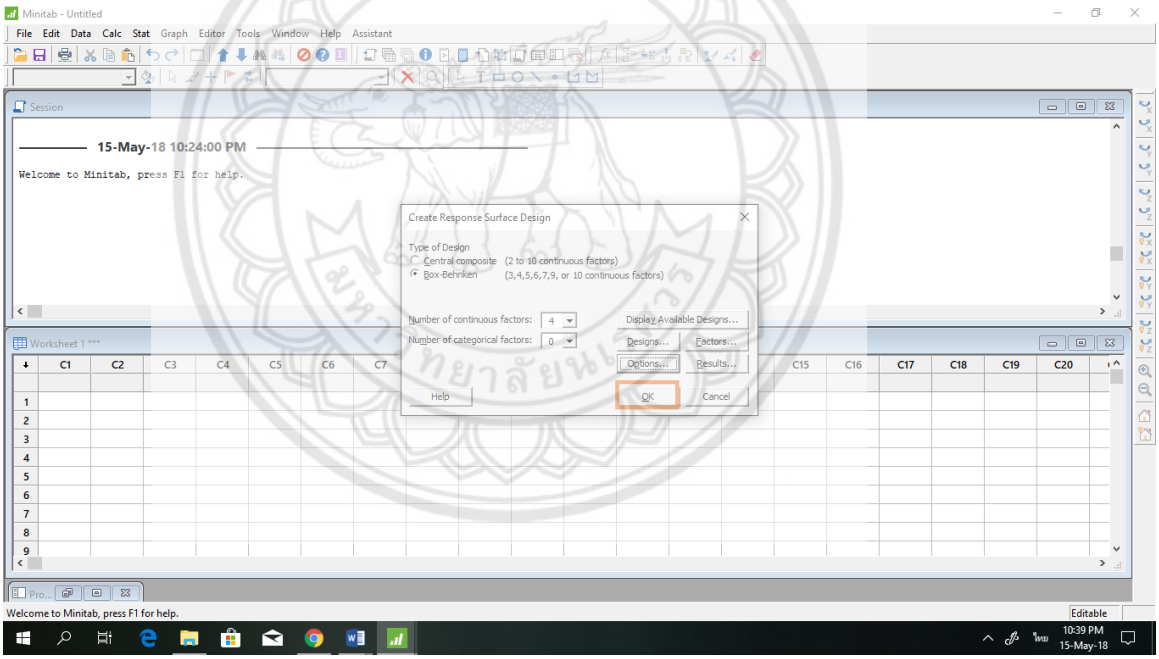
รูปที่ ข.1 หน้าแรกของโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ Minitab R.17



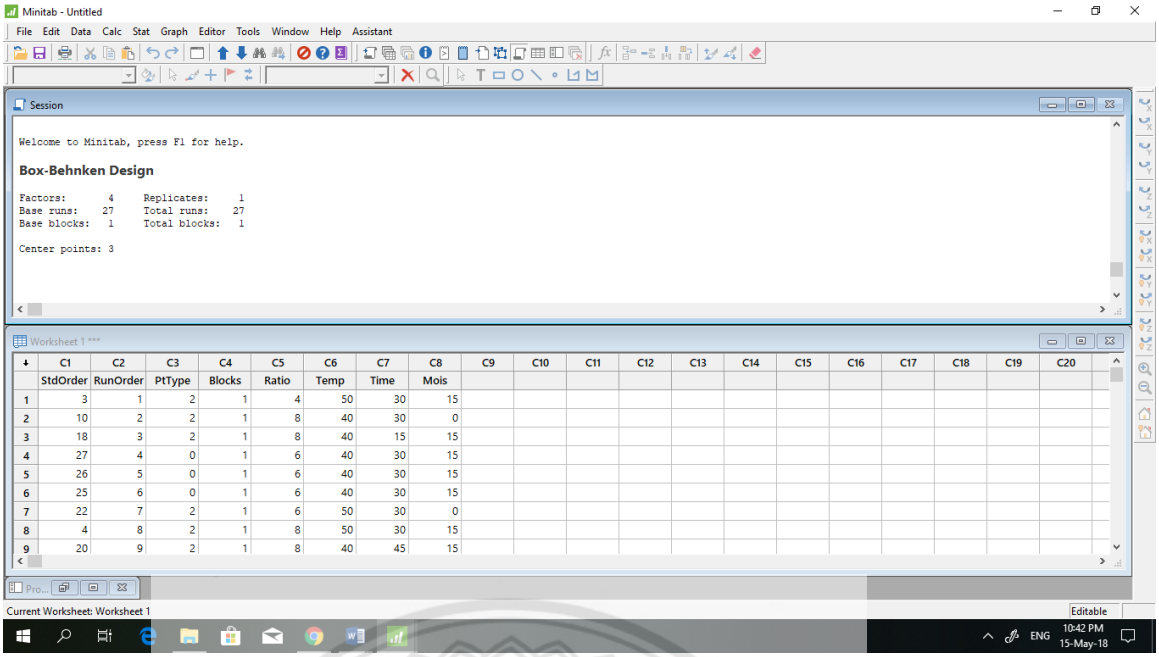
รูปที่ ข.2 การเข้าสู่การสร้างพื้นผิวตอบสนอง



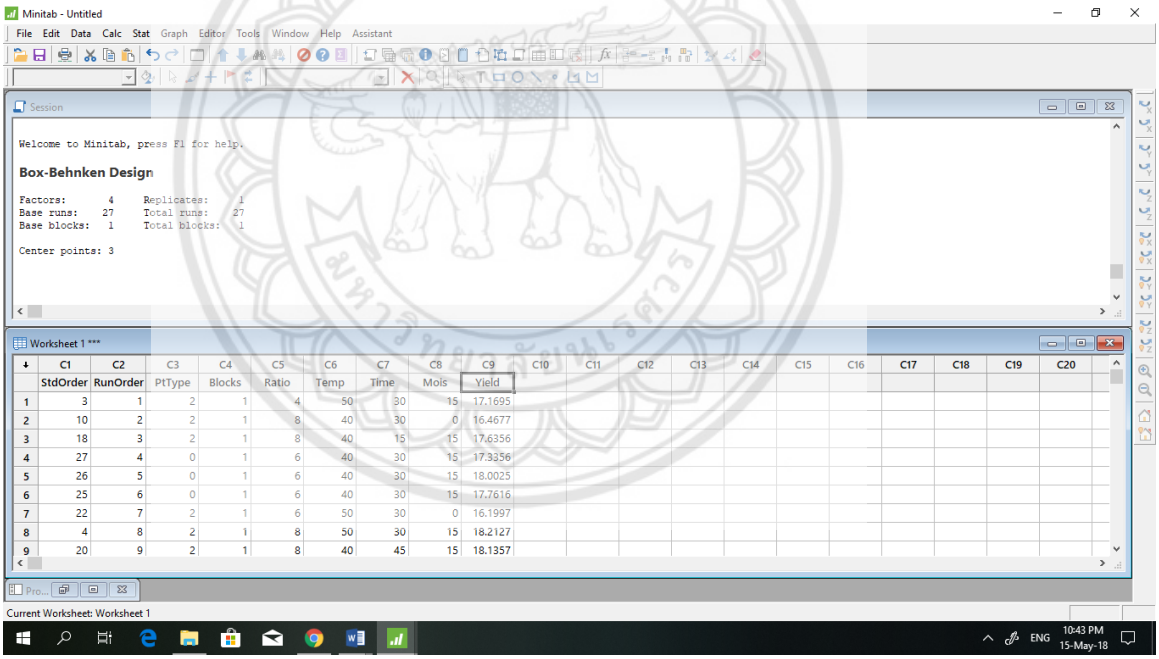
รูปที่ ข.3 การกำหนดจำนวนปัจจัย



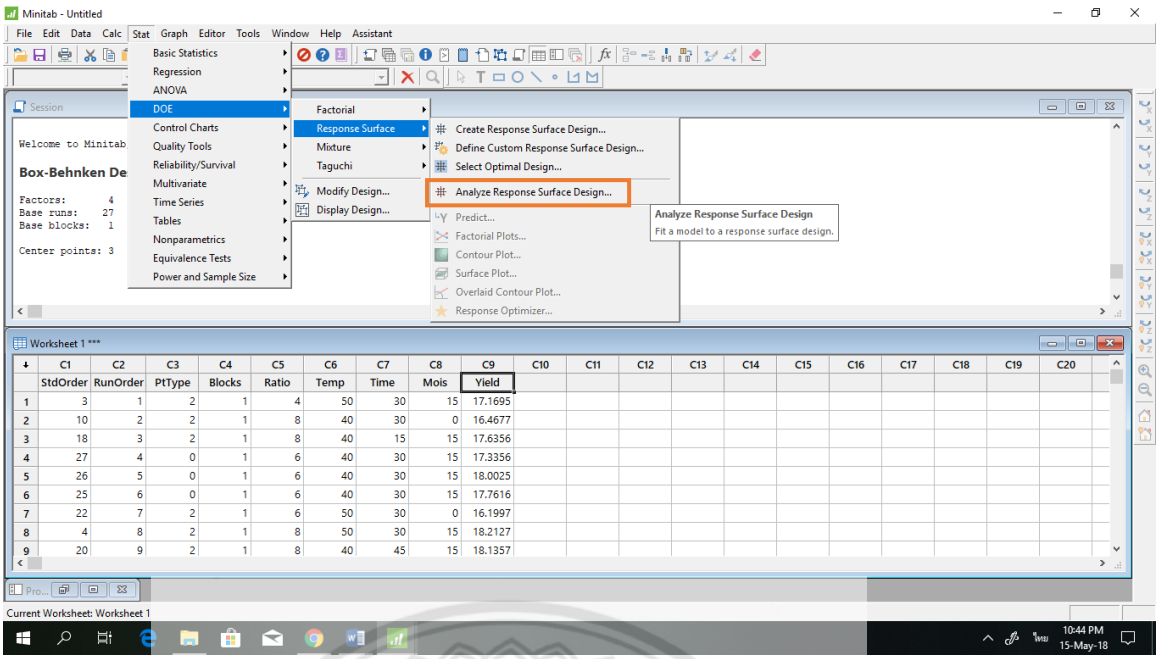
รูปที่ ข.4 กด OK เพื่อดำเนินการสร้างสภาวะการทดลอง



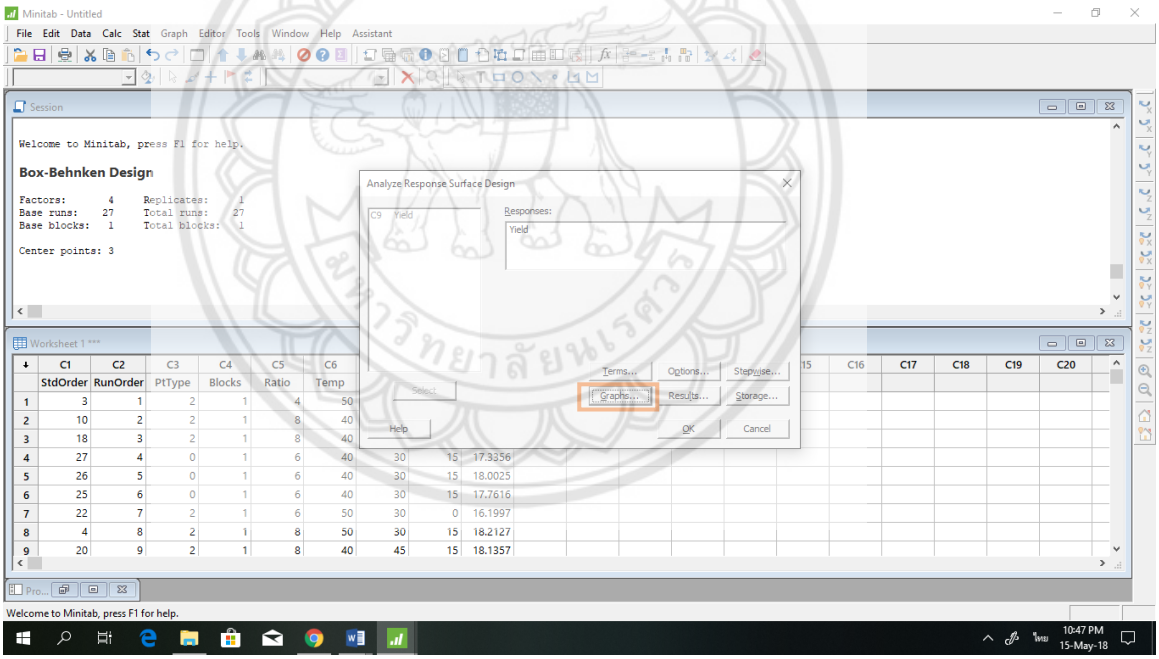
รูปที่ ข.5 โปรแกรมแสดงสภาวะการทดลอง



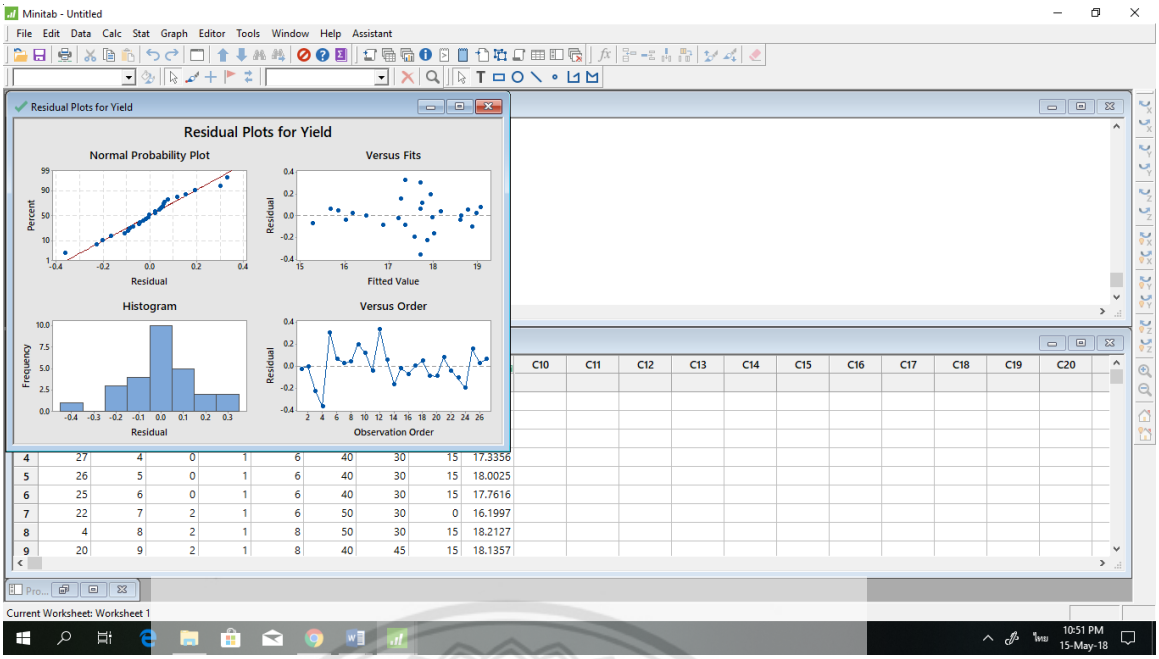
รูปที่ ข.6 ป้อนผลที่ได้จากการทดลองให้ตรงตามสภาวะที่ทำการทดลอง



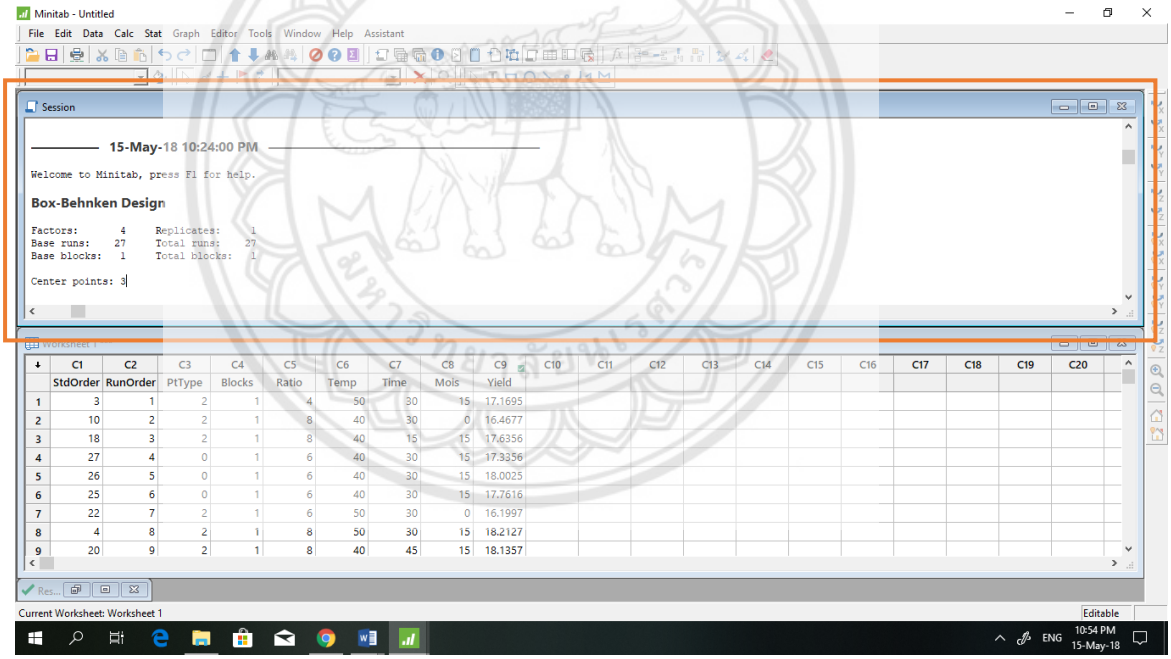
รูปที่ ข.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง



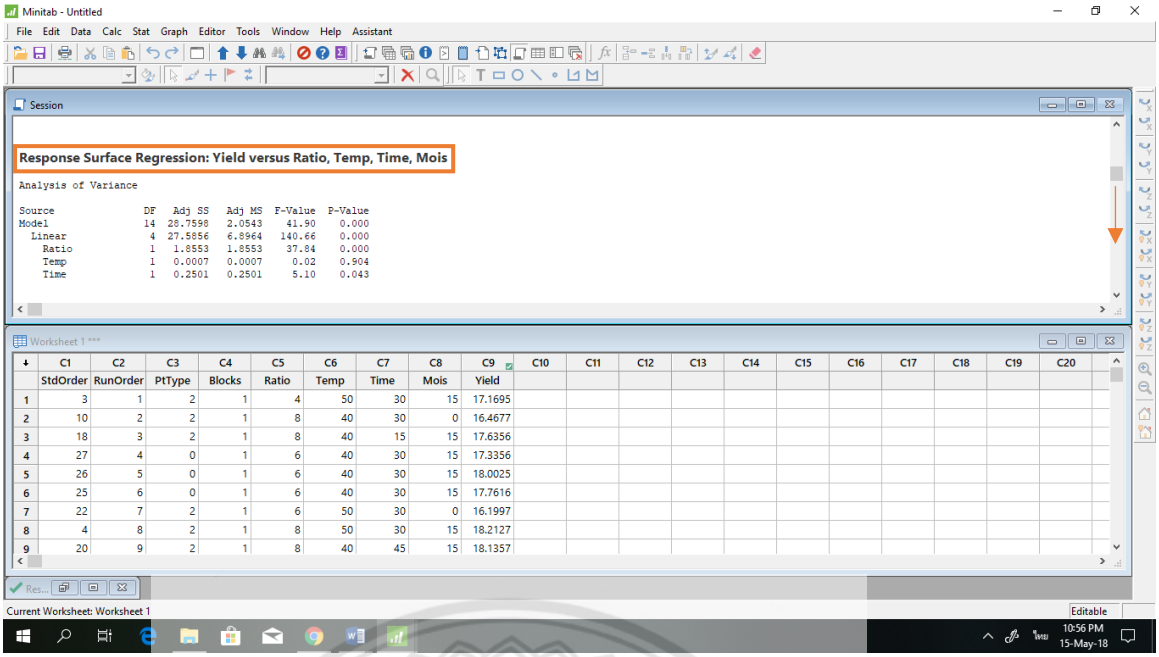
รูปที่ ข.8 เลือกรูปแบบกราฟที่ต้องการให้แสดงผล



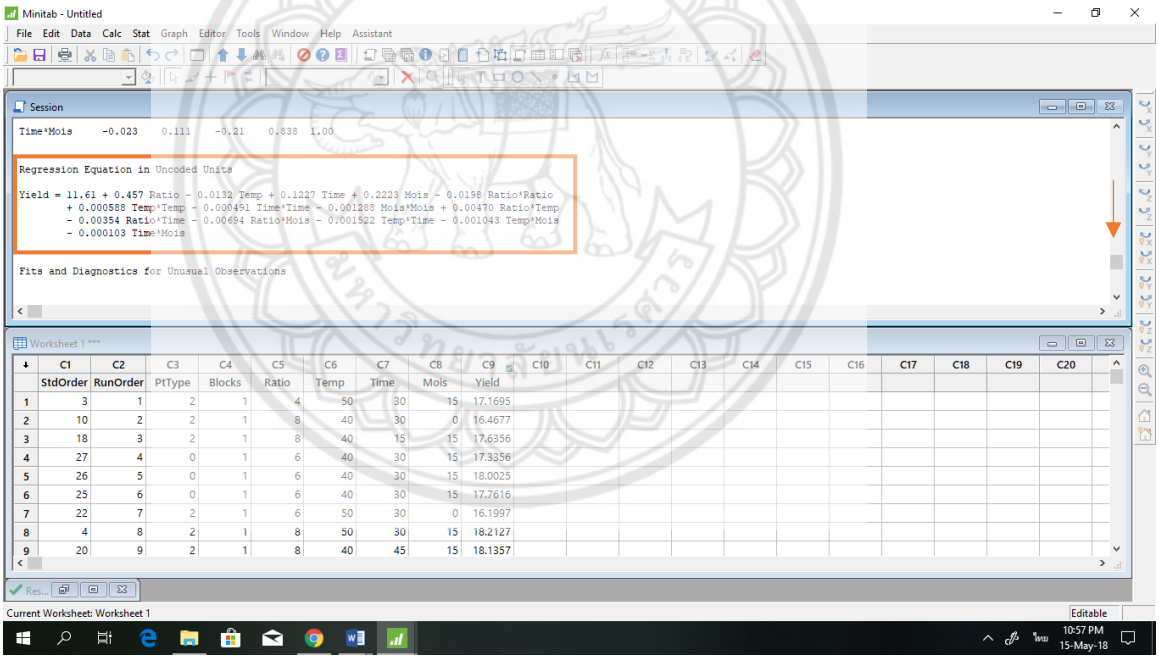
รูปที่ ข.9 โปรแกรมแสดงกราฟ Residual plots



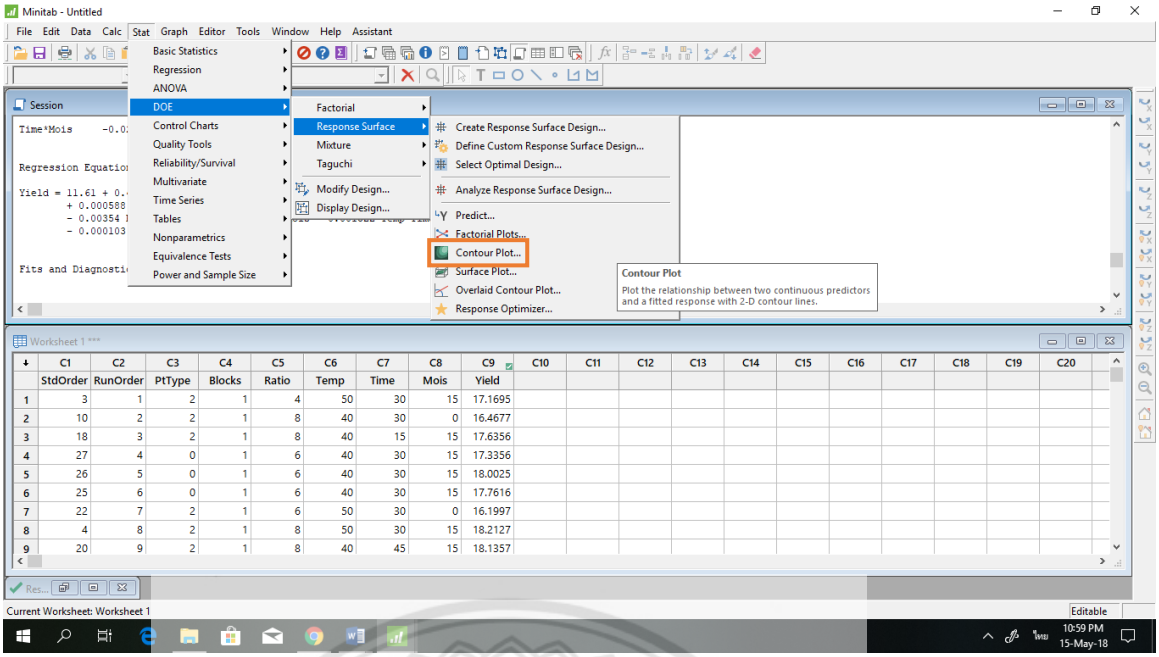
รูปที่ ข.10 หน้าต่างแสดงผล



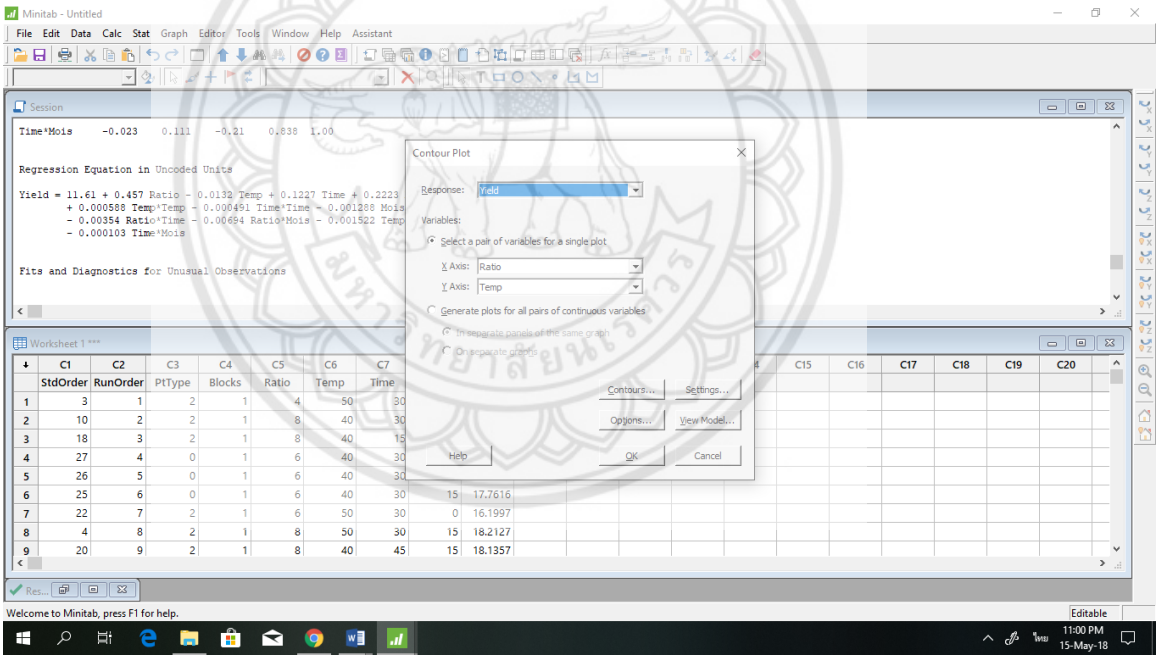
รูปที่ ข.11 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน



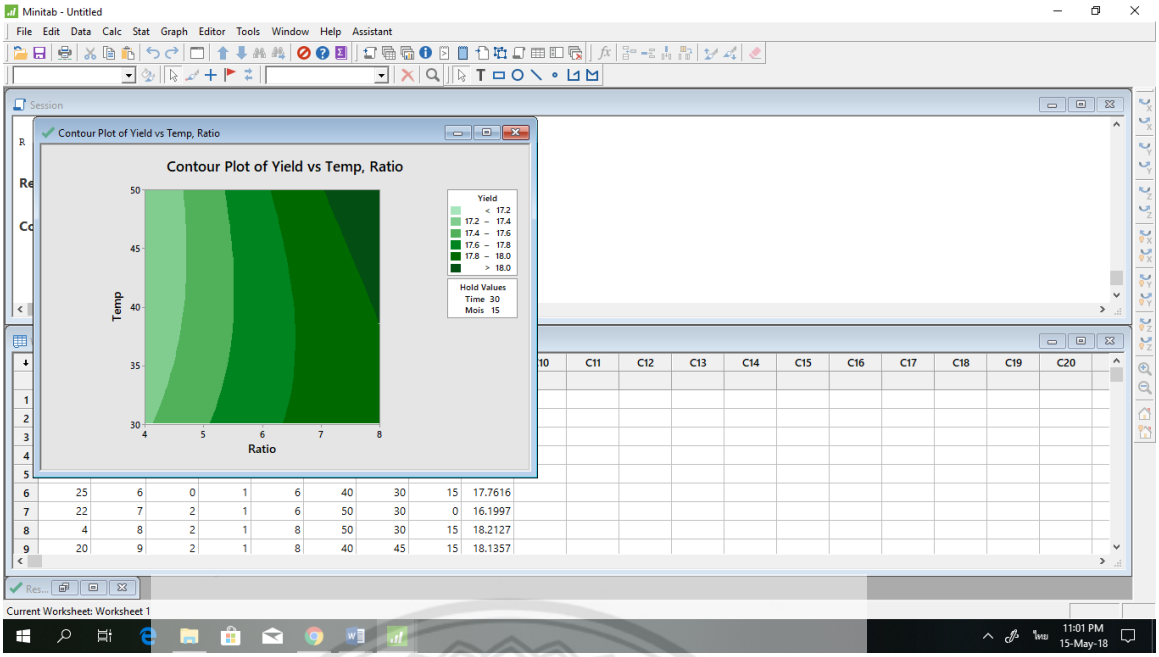
รูปที่ ข.12 แสดงสมการถดถอย



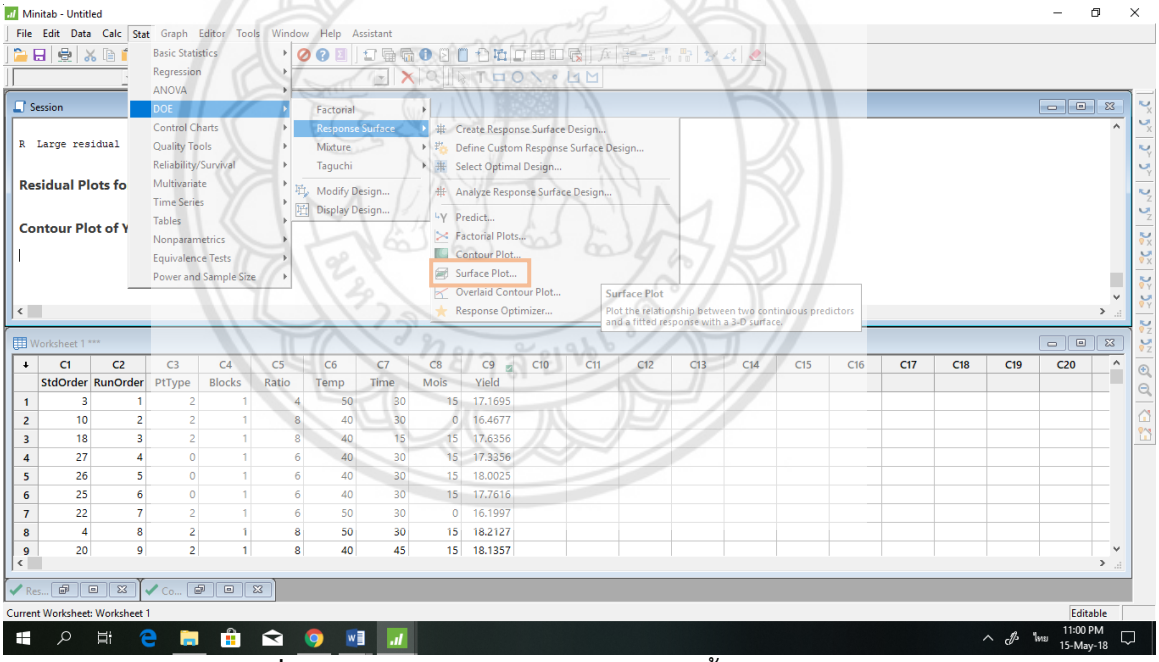
รูปที่ ข.13 เลือกฟังก์ชันในการแสดงกราฟโครงร่าง



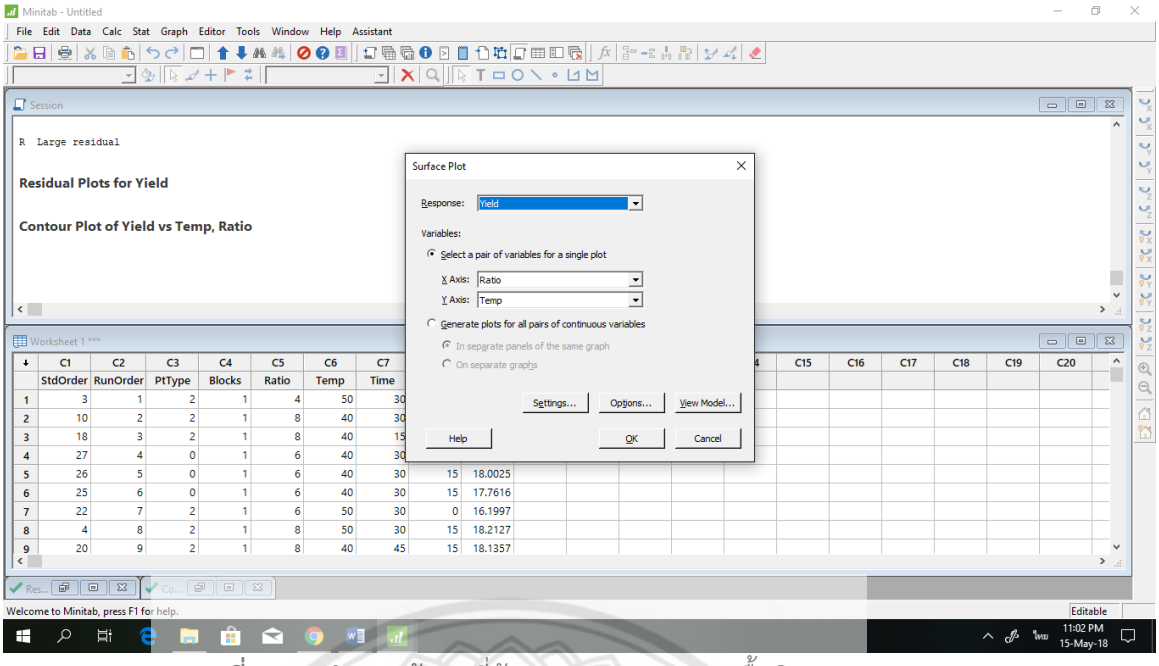
รูปที่ ข.14 กำหนดข้อมูลที่ต้องการแสดงผลกราฟโครงร่าง



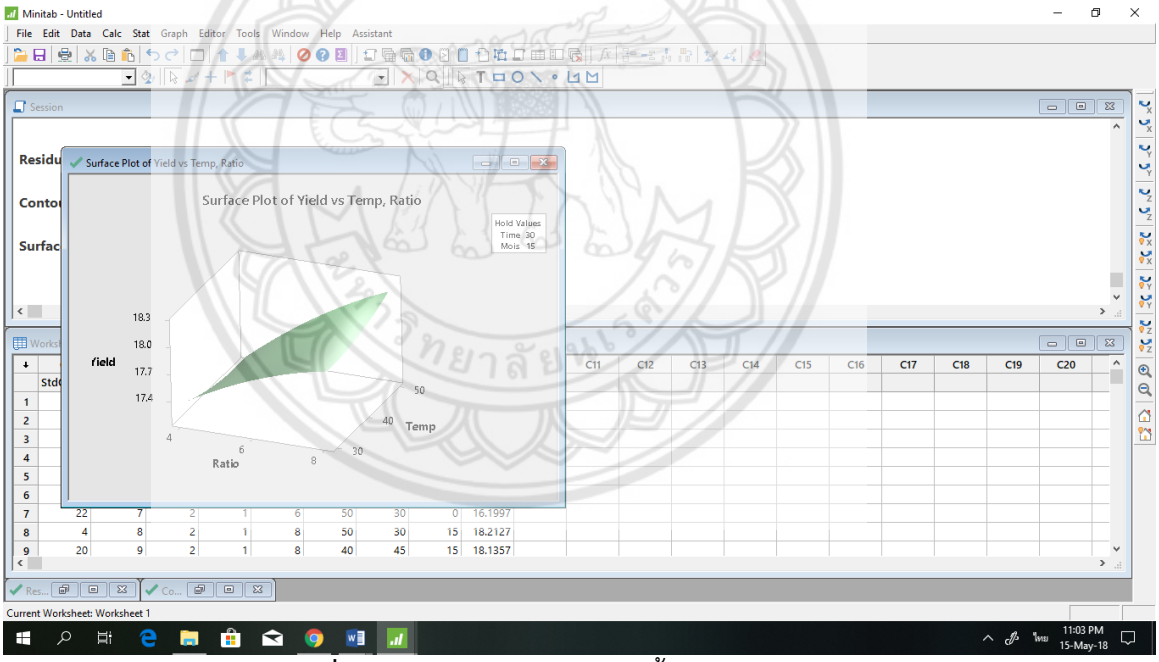
รูปที่ ข.15 โปรแกรมแสดงกราฟโครงร่าง



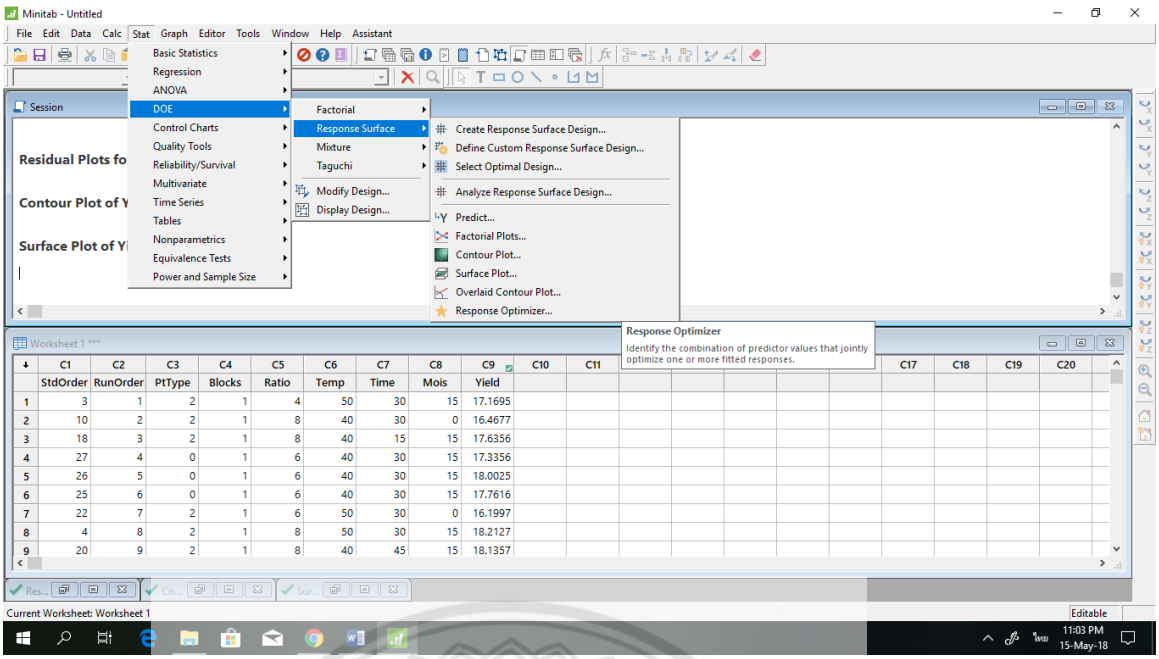
รูปที่ ข.16 เลือกฟังก์ชันในการแสดงกราฟพื้นผิวตอบสนอง



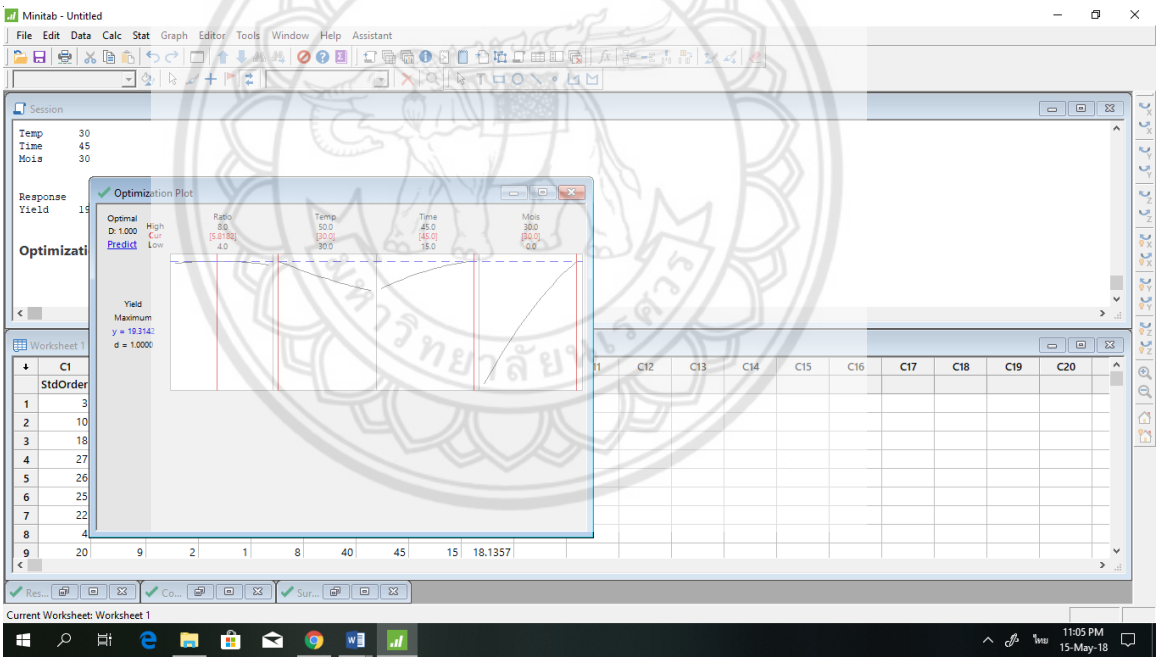
รูปที่ ข.17 กำหนดข้อมูลที่ต้องการแสดงผลกราฟพื้นผิวตอบสนอง



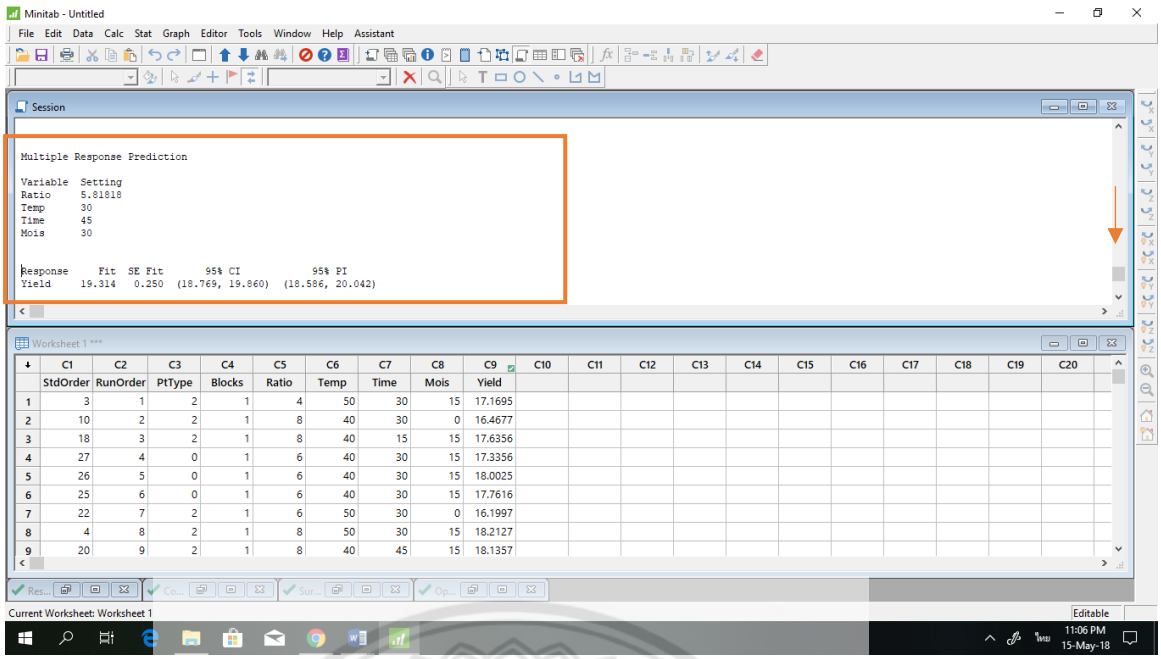
รูปที่ ข.18 โปรแกรมแสดงกราฟพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ ข.19 เลือกฟังก์ชันในการหาสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ ข.20 โปรแกรมแสดงสภาวะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์



รูปที่ ข.21 หน้าแสดงผลการหาสภาวะที่เหมาะสม

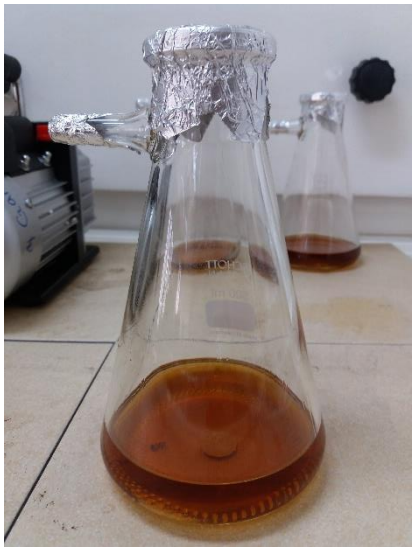
ภาคผนวก ค
รูปการทดลอง

รูปที่ ค.1 อบกากกาแฟเพื่อไล่ความชื้น

รูปที่ ค.2 ชุดทดลองในการสกัด

รูปที่ ค.3 กากกาแฟกับของเหลวผสมหลังการสกัด

รูปที่ ค.4 ชุดการกรองน้ำมันที่จากการสกัด



รูปที่ ค.5 ของเหลวผสมหลังจากการกรอง

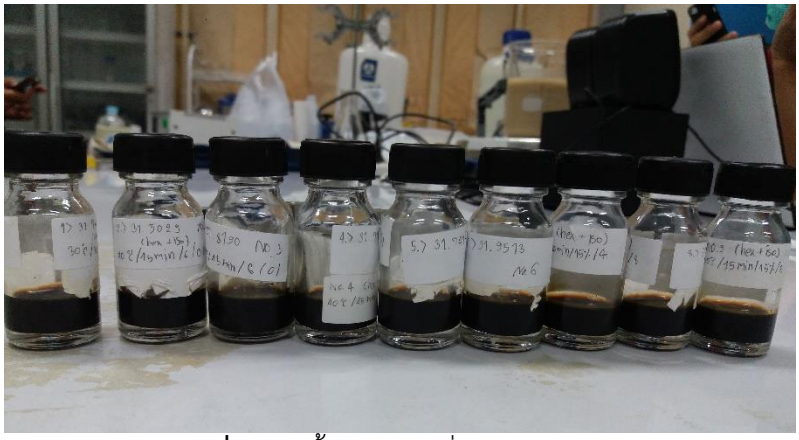
รูปที่ ค.6 เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน

รูปที่ ค.7 ดำเนินการกลั่นแยกตัวทำละลาย

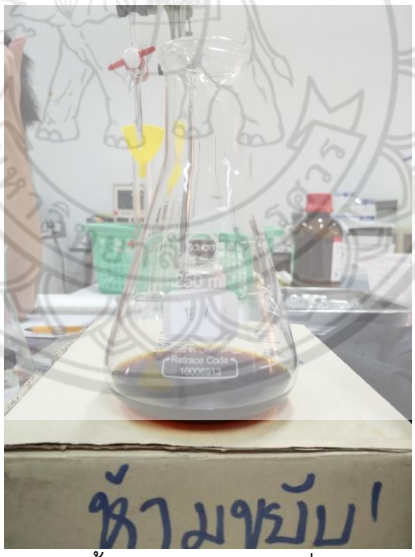
รูปที่ ค.8 เก็บของเหลวผสมลงในขวดขนาดเล็ก

รูปที่ ค.9 อุปกรณ์ระเหยตัวทำละลายออกจากน้ำมันในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

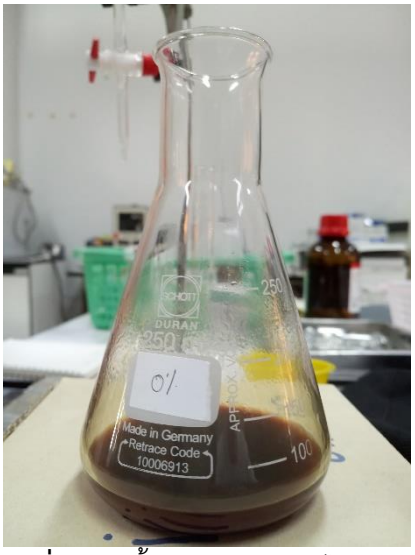
รูปที่ ค.10 อบน้ำมันเพื่อกำจัดตัวทำละลายให้หมด



รูปที่ ค.11 น้ำมันกาแฟที่ได้หลังการสกัด



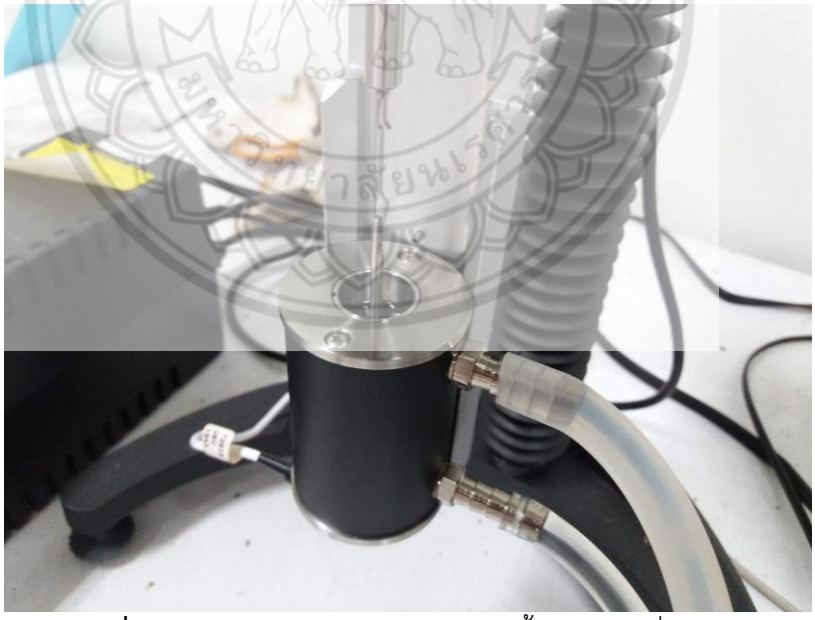
รูปที่ ค.11 เตรียมน้ำมันก่อนไทเทรตเพื่อหากรดไขมันอิสระ



รูปที่ ค.12 น้ำมันระหว่างการไทเทรต

รูปที่ ค.12 การหาค่าความหนาแน่นของน้ำมันโดยใช้พิโดโนมิเตอร์

รูปที่ ค.13 เครื่องวัดความหนืด



รูปที่ ค.14 ดำเนินการวัดความหนืดของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้