

(1)



การสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยวิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว

Extraction of Oil from Spent Coffee Grounds with  
Solid-Liquid Extraction

พิชัย เอียวเล็ก

Pichai Eawlex

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(2)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยวิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว  
ผู้เขียน นายพิชัย เอี่ยวเล็ก  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.กฤษ สมนึก)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พกมาศ เจริญพัฒนานนท์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรีระ ประเสริฐสรพ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกุร)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร)

.....กรรมการ  
(ดร.กฤษ สมนึก)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....  
(ดร.กฤษ สมนึก)  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....  
(นายพิชัย เอี่ยวนเล็ก)  
นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

(นายพิชัย เอี่ยวนเล็ก)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยวิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว
ผู้เขียน	นายพิชัย เอี่ยวนเล็ก
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2558

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาสภาพรวมที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยเหลว ด้วยวิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว โดยศึกษาตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร คือ อัตราส่วนระหว่างกาแฟและน้ำมันกาแฟเพื่อหาปริมาณผลได้ (yield) ถูกศึกษาด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) โดยสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ได้จาก RSM ถูกพิสูจน์ด้วยการทดลองจริงที่เงื่อนไขที่เหมาะสม ผลจากการทดลองพบว่า สามารถสกัดน้ำมันจากกาแฟได้ปริมาณผลได้สูงสุดจากการทดลอง เท่ากับ 14.68 wt.% (ด้วย hexane) 13.13 wt.% (ด้วย anhydrous ethanol) 11.80 wt.% (ด้วย hydrous ethanol) และ 7.52 wt.% (ด้วย methanol) เครื่องสกัดตันแบบถูกทดลองด้วยวิธีแบบหมุนวน ซึ่งสามารถสกัดน้ำมันได้ประมาณ 11.83 wt.% ด้วยเงื่อนไขที่ให้ผลได้สูงสุดจากระดับห้องปฏิบัติการที่ตัวทำละลายแยกชนิดอ่อนนุ่มนวล 22.5 g.g<sup>-1</sup> เวลา 30.4 นาที ในการศึกษาตัวทำละลายวนซ้ำได้ถูกนำมาทดสอบสกัดน้ำมันซ้ำจากการสกัดน้ำมันกาแฟด้วยชุดใหม่ สำหรับการสกัดซ้ำ 6 รอบ ด้วยตัวทำละลายวนซ้ำ พบว่าประสิทธิภาพและความมีเสถียรภาพของปริมาณผลได้น้ำมันกาแฟในแต่ละรอบแตกต่างกันน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เชกเซนบริสทธิ์สกัด สำหรับตันทุนแปรผันเฉลี่ยในการสกัดน้ำมันกาแฟเท่ากับ 495.46 บาทต่อกิโลกรัม และ 95% ของตันทุนแปรผันเฉลี่ยเนื่องจากการสกัดน้ำมันถูกติดตั้งในกระบวนการสกัดน้ำมันกาแฟจะลดลงเหลือประมาณ 25.67 บาท

<b>Thesis</b>	Extraction of Oil from Spent Coffee Grounds with Solid-Liquid Extraction
<b>Author</b>	Mr.Pichai Eawlex
<b>Major Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Academic Year</b>	2015

## ABSTRACT

Optimization of two parameters in espresso coffee oil extraction: extraction time and mass ratio of dried spent coffee grounds (DSCG)-to-solvent were conducted on DSCG employing four solvents. Yield of coffee oil from extraction process were investigated using response surface methodology (RSM). Predicted models from evaluating with RSM were verified by actual experiments of each optimal condition. The results showed that the experimental yields of 14.68 wt.% (using hexane), 13.13 wt.% (using anhydrous ethanol), 11.80 wt.% (using hydrous ethanol), and 7.52 wt.% (using methanol), were achieved. Prototype extraction was tested using the circulation process. Approx. 11.83 wt.% oil yield of prototype extraction can be extracted from DSCG under optimal condition: 22.5 g.g<sup>-1</sup> mass ratio of DSCG-to-hexane, and 30.4 min extraction time from laboratory-scale results. In this study, the repeated miscella was investigated to repeatedly extract the oil in freshly DSCG. For six time in the oil extraction process using repeated miscella, the repeated miscella of each time has the high efficiency and stability of coffee oil yield same as freshly hexane. Average variable cost (AVC) for coffee oil extraction process are 495.46 Baht per kilogram of oil, then the 95% of them due to the loss of residual hexane in defatted spent coffee grounds (DFSCG) after extraction process. Therefore, if the residual hexane recovery system in DFSCG is installed in this extraction process, the AVC of coffee oil will be decreased to approximately 25.67 Baht per kilogram.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.กฤษ สมนึก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้คำแนะนำนำ และข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ จันวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร รศ.ดร.ผกามาศ เจริญพัฒนานนท์ รศ.ดร.สุธีระ ประเสริฐสรพ์ และ รศ.กำพล ประทีปชัยกุร ที่กรุณาสละเวลา มาเป็นกรรมการสอบและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาศิลกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวย ความสะดวกด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

พิชัย เอี่ยวนเล็ก

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(16)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.2.1 ประวัติความเป็นมาของกาแฟ	2
1.2.2 สถานการณ์การบริโภคกาแฟ	3
1.2.3 เมล็ดกาแฟ	6
1.2.4 การผลิตและการซงกาแฟ	8
1.2.4.1 การผลิตเมล็ดกาแฟ	8
1.2.4.2 การซงกาแฟด้วยวิธีอสเพรสโซ	10
1.2.5 ลักษณะกาแฟทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี	11
1.2.6 การใช้ประโยชน์จากการโดยทั่วไปในปัจจุบัน	13
1.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากการกาแฟด้านการพัฒนา เป็นเชื้อเพลิง	13
1.2.7.1 เผาไหม้โดยตรง	13
1.2.7.2 เชื้อเพลิงอัดแห่งจากการกาแฟ	14
1.2.7.3 ไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟ	15
1.2.7.4 ไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟ	15
1.2.8 การสกัดน้ำมันจากการกาแฟ	17
1.2.9 เทคโนโลยีเครื่องสกัดของแข็งด้วยของเหลว	19
1.2.9.1 กระบวนการสถานะไม่คงที่	19
1.2.9.1.1 การสัมผัสหลายครั้งด้วยกระถางสวนทาง	20
1.2.9.1.2 การซะแบบอัดกรอง	21
1.2.9.1.3 ถังกวาน	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.2.9.2 กระบวนการสถานะคงที่	22
1.2.9.2.1 ถังกวาน (ประยุกต์ใช้แบบต่อเนื่อง)	22
1.2.9.2.2 ถังกรอก	22
1.2.9.2.3 ไซโคลนน้ำ	24
1.2.9.2.4 เครื่องจำแนก	25
1.2.9.2.5 ประเภทเครื่องสกัดเมล็ดพืช	25
1.2.9.2.6 โรติเซล	25
1.2.9.2.7 เครื่องสกัดแบบเคนเนดี้	26
1.2.9.2.8 เครื่องสกัดแบบโบล์แมน	27
1.2.10 สรุปการตรวจเอกสาร	28
1.2.10.1 ศักยภาพและแนวทางการวิจัยใช้ประโยชน์จากกาแฟ	28
1.2.10.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการสกัด	29
1.3 วัตถุประสงค์	31
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	31
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	31
<b>2 ทฤษฎี</b>	<b>32</b>
2.1 การสกัดน้ำมัน	32
2.1.1 การเจียรา	32
2.1.2 การหีบหรือการอัด	32
2.1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลาย	32
2.1.3.1 ประเภทการสกัดด้วยตัวทำละลาย	33
2.1.3.1.1 สารที่เป็นตัวถูกละลายและตัวทำละลาย	33
สถานะของเหลว	
2.1.3.1.2 สารที่เป็นตัวถูกละลายสถานะของแข็งตัวทำละลาย	33
สถานะของเหลว	
2.1.3.2 กลไกที่มีอิทธิพลต่อการละลาย	33
2.1.3.2.1 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี	33
2.1.3.2.2 การแพร์	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 การกรองกาแฟ 35	35
2.2.1 ความละเอียด 35	35
2.2.2 การแยกขนาดด้วยตะแกรง 36	36
2.2.3 ไมโครฟิลเตอร์ชั้น 36	36
2.3 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง 37	37
2.3.1 วิธีการออกแบบการทดลอง 37	37
2.4 การกลั่น 39	39
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือดของของเหลว 40	40
2.4.2 การกลั่นอย่างง่าย 41	41
2.5 การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น 43	43
3 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย 45	45
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี 45	45
3.1.1 วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมัน 45	45
3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบในกาแฟและน้ำมันกาแฟ 46	46
3.3 ขั้นตอนการทดลองแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ 47	47
3.3.1 การวางแผนการทดลอง 48	48
3.3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด 49	49
3.3.3 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ 50	50
3.3.4 การสกัดชี้้าด้วยตัวทำละลายวนชี้้า 51	51
3.4 การสกัดน้ำมันจากการกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน 51	51
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล 55	55
4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากการกาแฟ 55	55
4.2 ผลการทดสอบเครื่องสกัดน้ำมันกาแฟแบบหมุนวน 61	61
4.3 ผลการสกัดน้ำมันจากการกาแฟด้วยตัวทำละลายวนชี้้าด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน 64	64
4.4 ผลทดสอบตัวอย่างกาแฟและน้ำมันน้ำมันสกัดจากการกาแฟ 67	67
4.5 การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น 70	70

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	74
5.1 บทสรุป	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก	83
ก ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง	84
ข แบบเครื่องสักดันน้ำมันแบบหมุนวน	87
ค การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับการตรวจเอกสาร	96
ง การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับการทดลองเบื้องต้น	103
จ การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับการหาสภาวะที่เหมาะสม	110
ของการสักดันน้ำมันแบบกะและด้วยเครื่องสักดันแบบหมุนวน	
ฉ การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านสิ่งประดิษฐ์	145
ประวัติผู้เขียน	162

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 อันดับประเทศไทยแฟร์ ระหว่างปี 2554-2556	6
1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดกาแฟดิบ	8
1.3 ข้อกำหนดตัวแปรควบคุมและน้ำกาแฟสดจากการชงกาแฟด้วยวิธี เอสเพรสโซ	11
1.4 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของกาแฟ	13
1.5 คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	15
1.6 การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงอัดเม็ดในหม้อต้ม	15
1.7 คุณสมบัติใบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟเปรียบเทียบมาตรฐาน	16
1.8 การทดสอบสดน้ำมันกาแฟ	18
1.9 คุณสมบัติน้ำมันกาแฟ	19
3.1 ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ	50
4.1 ผลการสดน้ำมันกาแฟทดลองด้วยเทคนิค RSM	55
4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์และ $p$ -value สมการทำนายความสัมพันธ์	56
4.3 การวิเคราะห์ ANOVA สำหรับสมการทำนายความสัมพันธ์	57
4.4 สรุปว่าที่เหมาะสมที่สุดในการสดด้วยตัวทำละลายประเภทต่างๆ	59
4.5 ระยะเวลาในการสดน้ำมันด้วยเครื่องสดแบบหมุนวน	66
4.6 คุณสมบัติทางกายภาพของกาแฟ กาแฟปราศจากน้ำมัน และ น้ำมันกาแฟที่สดด้วยเยกเซน	68
4.7 องค์ประกอบกรดไขมัน	69
4.8 คุณสมบัติวัสดุที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบผล การศึกษา	69
4.9 ต้นทุนคงที่การสดน้ำมันจากการชงกาแฟด้วยเครื่องสดแบบหมุนวน ขนาดกาแฟแห้ง 1,200 กรัม	71
4.10 ต้นทุนแปรผันของการผลิตน้ำมันกาแฟด้วยเครื่องสดแบบหมุนวน	72
4.11 คุณสมบัติและราคาของตัวทำละลาย	72

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 ปริมาณการผลิตเมล็ดกาแฟแต่ละภูมิภาค 50 ปีย้อนหลัง	4
1.2 ปริมาณความต้องการใช้งานเมล็ดกาแฟของประเทศไทยในแบบເອເຊີຍ ตะວັນອອກເນື່ອງໃຕ້	5
1.3 (ก) ผลกาแฟพันธุ์อาราบิกา	7
(ข) เมล็ดกาแฟดิบพันธุ์อาราบิกา	
(ค) ผลกาแฟพันธุ์robusta	
(ง) เมล็ดกาแฟดิบพันธุ์robusta	
1.4 พื้นที่เพาะปลูกกาแฟทั่วโลก	7
1.5 องค์ประกอบของผลกาแฟและเมล็ดกาแฟ	10
1.6 (ก) กาแฟเหลือทิ้งจากการซงกาแฟ	12
(ข) กาแฟอบแห้งก่อนสกัดน้ำมัน	
(ค) กาแฟหลังสกัดน้ำมัน	
1.7 (ก) ภาพถ่ายกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด SCG	12
(ข) ภาพถ่ายกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด DFSCG	
1.8 ถังดิฟิวเซอร์ใช้ในการสกัดน้ำตาล	20
1.9 การสัมผัสรายครั้งแบบกระแสสวนทาง	21
1.10 (ก) ลักษณะถังกวานแนวตั้ง	22
(ข) ถังกวานแนวนอน	
(ค) ถังกวานแบบถังหมุน	
1.11 ถังกรอก	23
1.12 ชุดถังกรอกออกแบบการทำงานให้เรียงต่อ กันเป็นอนุกรม	23
1.13 การใช้ถังกรอกและอุปกรณ์อื่นๆร่วมกัน	24
1.14 ไซโคลนน้ำ	24
1.15 เครื่องจำแนก	25
1.16 เครื่องໂຣໂຕເຊລ	26
1.17 เครื่องสกัดแบบเคนเนດี้	26

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
1.18	เครื่องสกัดแบบโบล์แมนแนวตั้ง	27
1.19	เครื่องสกัดแบบโบล์แมนแนวนอน	27
1.20	แนวทางการวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์จากการแปรเปลี่ยนด้านการเป็นพลังงานทดแทน	28
1.21	ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันสกัด	30
2.1	การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดอนุภาค	36
2.2	ลักษณะกราฟพื้นผิวตอบสนอง	39
2.3	การออกแบบการทดลอง central composite design	39
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของสารกับความดันบรรยากาศ	40
2.5	พฤติกรรม 3 แบบของอุณหภูมิขณะกลั่นแบบธรรมดากําลัง	41
2.6	เฟสไดอะแกรมของ vapor-liquid ของของเหลว 2 ชนิดสมมติกัน	42
2.7	เครื่องมือการกลั่นอย่างง่าย	43
3.1	ขั้นตอนการทดลองแบบในระดับห้องปฏิบัติการ	48
3.2	แผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	53
3.3	ภาพเครื่องสกัดน้ำมันจากกาแฟแห้ง ปริมาณกาแฟ 1,200 กรัม	54
4.1	กราฟ contour ของปริมาณน้ำมันสูงสุด (wt.%) ที่ค่าสัดส่วนกาแฟต่อตัวทำละลาย และ เวลาในการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายประเภท (ก) hexane (ข) anhydrous ethanol (ค) hydrous ethanol (ง) methanol	59
4.2	สมดุลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	61
4.3	(ก) กาแฟ (SCG) (ข) น้ำมันกาแฟ (ค) กาแฟแห้ง (DSCG) (ง) กาแฟเร็นน้ำมัน (DFSCG)	63

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	ปริมาณน้ำมันกาแฟสะสมใน miscella ต่อรอบการสกัดชำด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	64
4.5	ประสิทธิภาพการดึงน้ำมันออกจากกาแฟชุดใหม่ด้วย miscella ใช้ชาลักษณะสีของ miscella แต่ละรอบการสกัด	65
4.6	ระยะเวลาแต่ละขั้นตอนในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องสกัดหมุนวน	65
4.7	(ก) ภาพถ่ายกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด DSCG	66
4.8	(ข) ภาพถ่ายกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด DFSCG	67
4.9	กราฟเวลาและต้นทุนแปรผันในการสกัด	73

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

คำย่อ/ตัวย่อ	ชื่อเต็มภาษาอังกฤษ	ชื่อเต็มภาษาไทย
ANOVA	analysis of variance	การวิเคราะห์ความแปรปรวน
AOCS	American Oil Chemists' Society	องค์กรวิชาชีพเกี่ยวกับไขมันและน้ำมัน
AV	acid value	ค่ากรดไขมันอิสระ
AVC	average variable cost	ต้นทุนแปรผันเฉลี่ย
C	carbon	คาร์บอน
CCD	central composite design	การออกแบบส่วนประสานกลาง
DFSCG	defatted spent coffee grounds	กาแฟแฟประศาจากน้ำมัน
DOE	design of experiment	การออกแบบการทดลอง
DSCG	dried spent coffee grounds	กาแฟแฟแห้ง
F	fluorine	ฟลูออรีน
FC	fixed cost	ต้นทุนคงที่
FFA	free fatty acid	กรดไขมันอิสระ
FFD	full factorial design	การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเต็มรูปแบบ
GCB	green coffee beans	เมล็ดกาแฟสด
GC/FID	gas chromatography/flame ionization detector	-
H	hydrogen	ไฮโดรเจน
H-bond	hydrogen bond	พันธะไฮโดรเจน
HF	hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
HHV	higher heating value	ค่าความร้อนสูง
ICO	International coffee organization	องค์การกาแฟระหว่างประเทศ
k	number of variables	จำนวนตัวแปรอิสระ
MF	microfiltration	ไมโครฟิวเตอร์ชัน
MM	molecular mass	มวลโมเลกุล
N	nitrogen	ไนโตรเจน

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

คำย่อ/ตัวย่อ	ชื่อเต็มภาษาอังกฤษ	ชื่อเต็มภาษาไทย
O	oxygen	ออกซิเจน
PSD	particle-size distribution	การกระจายของขนาดสัดมูลรวม
Q	quantity	ปริมาณ
RCB	roasted coffee bean	เมล็ดกาแฟคั่ว
RSM	response surface methodology	วิธีการพื้นผิวตอบสนอง
S	sulfur	ซัลเฟอร์
SCG	spent coffee grounds	กาแฟเหลือ
cSt	centistokes	-
TC	total cost	ต้นทุนรวม
TLC/FID	thin layer chromatography/flame ionization detection	-
VC	variable cost	ต้นทุนแปรผัน
vol.%	volume percent	ร้อยละโดยปริมาตร
WSCG	wet spent coffee grounds	กาแฟเหลือมีความชื้น
wt.%	weight percent	ร้อยละโดยมวล

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

การบริโภคกาแฟ เริ่มได้รับความนิยมตั้งแต่ประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 16 [1] และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ความต้องการเมล็ดกาแฟจำนวนมากในทุกภูมิภาค ทำให้ราคาเมล็ดกาแฟและมูลค่าตลาดที่สูงเป็นอันดับต้นๆ ของสินค้าบริโภคในตลาดโลก [2] ในระยะเวลา 50 ปีที่ผ่านมา ประเทศผู้ผลิตได้ร่วมกันจัดตั้งองค์การกาแฟระหว่างประเทศ (International coffee organization, ICO) [3] เพื่อส่งเสริมการพัฒนาการปลูก ป้องกันการเก็งกำไร และบริหารความเสี่ยงในตลาดเงินทุน ทั้งหมดนี้ส่งเสริมให้ระบบการค้าและการผลิตกาแฟมีมูลค่าทางการค้าและเสถียรภาพที่สูง ประมาณเมล็ดกาแฟสดพร้อมคั่วในตลาดซื้อขายในปี พ.ศ. 2557 หัวโล้มีประมาณ 8.71 ล้านตัน [4] และการใช้บริโภคภายในประเทศไทย 7.5 และ 8.0 หมื่นตัน ในปี พ.ศ. 2557 และ พ.ศ. 2558 ตามลำดับ [5] ด้วยปริมาณการบริโภคที่สูง ทำให้กาแฟเหลือทิ้งมีปริมาณมาก กล้ายเป็นขยะอินทรีย์ ความชื้นสูงที่สร้างปัญหาในการจัดการ [6] แต่หากมองในทางกลับกันในเรื่องการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งเพื่อผลิตพลังงาน กาแฟจะเป็นวัตถุที่มีศักยภาพในด้านปริมาณ มีความต่อเนื่องที่ไม่ขึ้นกับฤดูกาลต่างจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิด เช่น พังข้าว แกนข้าวโพด แกลบ และทางใบปาล์ม เป็นต้น

ปัจจุบันมีความพยายามศึกษาใช้ประโยชน์จากการกาแฟ (spent coffee grounds, SCG) เพื่อเพิ่มมูลค่าในหลายๆ ลักษณะ แต่ที่สอดคล้องกับความต้องการคือการพัฒนาศักยภาพในด้านเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงประเภทข้อมูลมีความต้องการใช้ในประเทศไทยสูง แต่มีการใช้งานน้อยเมื่อเทียบกับความต้องการ ซึ่งหากพิจารณาเพียงองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณคาร์บอน เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงจะให้ค่าความร้อนสูง ซึ่ง SCG มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 67.3% [7] ซึ่งมากกว่าข้อมูลที่นำไปเก็บทุกประเภทที่มีใช้งานในปัจจุบัน หากมีการทำวิจัยที่เป็นระบบเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากการกาแฟ เพื่อเป็นพลังงานทดแทนในการผลิตใบโอดีเซลและเชื้อเพลิงข้อมูลอัดเม็ด ก็อาจจะสามารถพัฒนาศักยภาพทางด้านพลังงานทางเลือก เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางทางความร้อน คุณสมบัติทางพลังงาน และความคุ้มค่าของปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้เปลี่ยนสารอินทรีย์จากการกาแฟให้ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวใบโอดีเซลและเชื้อเพลิงแข็งจากการกาแฟปราศจากน้ำมัน (defatted spent coffee grounds, DFSCG) อีกทั้งจากการกาแฟยังเป็นวัตถุที่ไม่ได้นำมา

บริโภค (gonfood) จึงช่วยลดปริมาณการใช้น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง เพื่อนำมาผลิตไบโอดีเซล ได้ในอนาคต

วัตถุประสงค์การศึกษาวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นในเรื่องการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยตัวทำละลายซึ่งเป็นกระบวนการขั้นต้นในการนำน้ำมันกาแฟมาผลิตเป็นไบโอดีเซลและการกาแฟปราศจากน้ำมันไปเผาไหม้โดยตรงหรือนำไปอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนนำไปเป็นเชื้อเพลิง การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดตลอดจนออกแบบและสร้างเครื่องตันแบบในการสกัดน้ำมันกาแฟในระดับชุมชนขนาดเล็ก เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆต่อไป

## 1.2 การตรวจเอกสาร

### 1.2.1 ประวัติความเป็นมาของกาแฟ

ปัจจุบันประวัติศาสตร์ของการเผยแพร่ย้อนหลังไปก่อนคริสต์ศตวรรษแรกที่ 16 ยังเป็นเรื่องที่คลุมเครือ [8] ตามเรื่องเล่าจากบรรพบุรุษของชาวเอธิโอเปีย กาแฟ เป็นที่รู้จักของมนุษย์ประมาณช่วงคริสตศรรษัตรรษที่ 6 ปี ค.ศ. 575 โดยกาแฟเป็นพืชพื้นเมืองของเมือง คัฟฟา ปัจจุบันเป็นพื้นที่ของประเทศเอธิโอเปีย ทวีปแอฟริกา บางตำนานเล่าถึงช่วงคริสตศรรษัตรรษที่ 9 เด็กเลี้ยงแกะชื่อ คาลตี เป็นผู้สังเกตเห็นแพะมีอาการกระปรี้กระเปร่าของแพะเมื่อกินผลไม้สีแดงข้าไปภายในหลังมีการทดสอบจนแน่ใจว่าการกินเมล็ดกาแฟทำให้รูสึกกระฉับกระเฉง [9] ในอดีตกาแฟไม่ได้นำมากินเป็นเครื่องดื่ม แต่นำเมล็ดกาแฟดิบ (green coffee beans, GCB) มาเคี้ยวเพื่อกระตุ้นระบบประสาทและพัฒนามาเป็นการชงกาแฟเพื่อดื่มเมื่อ晚ปัจจุบัน การดื่มกาแฟเริ่มแพร่หลายในเอธิโอเปีย และถูกส่งจากทวีปแอฟริกาข้ามทะเลเดียงข้ามสู่เยเมน หลักฐานเก่าซึ่งเชื่อถือได้ระบุถึงการดื่มกาแฟในวิหารซูฟในเมืองม็อกค่าในเยเมน และจากบันทึกของแพทย์ชาวเยอรมัน เลโอนาร์ด เรอาอล์ฟ ซึ่งอธิบายลักษณะสรรพคุณทางยาของการดื่มกาแฟ ในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 16 ปี คริสต์ศกราช 1583 จากนั้นกาแฟได้ถูกนำเข้าไปยังตะวันออกกลาง เริ่มจากเมืองเปอร์เซีย (ปัจจุบันเป็นพื้นที่ของประเทศไทย) ไปยังประเทศตุรกีและได้รับความนิยมจนเข้าไปในแอฟริกาเหนือในขณะนั้นอิตาลีเริ่มติดต่อค้าขายระหว่าง เมืองเวนิส ภูมิภาคแอฟริกาเหนือและตะวันออกกลาง ประเทศอิตาลีรับสินค้าจากต่างประเทศเข้ามาขาย กาแฟเป็นสินค้าประเภทหนึ่งที่เดินทางเข้ามายังเมืองเวนิส หลังจากนั้นไม่นานกาแฟจากเมืองเวนิสก็กระจายไปในหลายพื้นที่ในยุโรป ในยุคของการเดินเรือค้าขาย บริษัทอินเดียตะวันออกของอังกฤษเป็นผู้นำกาแฟเข้ามายังอังกฤษและเป็นที่นิยมของคนอังกฤษ ต่อมากาแฟได้แพร่กระจายเข้าสู่ประเทศไทยรั่งเศส ประเทศไทยอสเตรีย ประเทศโปแลนด์ สหราชอาณาจักร และได้กระจายไปทั่วโลก [1] [10]

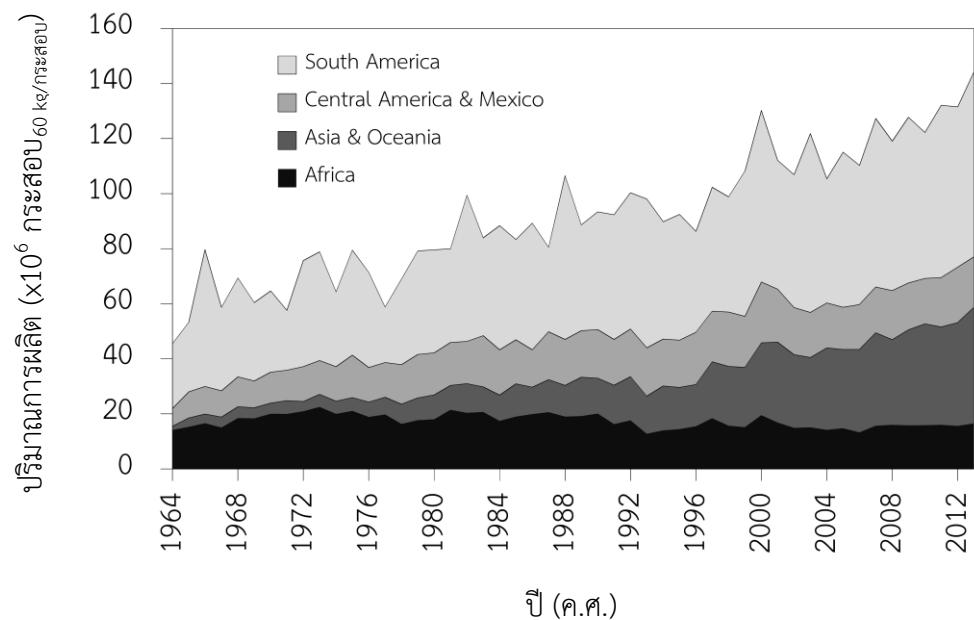
สำหรับในประเทศไทย มีการปลูกกาแฟตั้งแต่สมัยอยุธยา แต่การดีมกาแฟเริ่มได้รับความนิยมในช่วงรัตนโกสินทร์ โดยเฉพาะในช่วง รัชกาลที่ 3 และรัชกาลที่ 4 มีการปลูกกาแฟในหลายพื้นที่ของเขตกรุงรัตนโกสินทร์ (กรุงเทพมหานครในปัจจุบัน) และเริ่มมีกิจกรรมร้านกาแฟร้านแรกในช่วงสมัยรัชกาลที่ 6 และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นลำดับจนถึงปัจจุบัน [10]

### 1.2.2 สถานการณ์การบริโภคกาแฟ

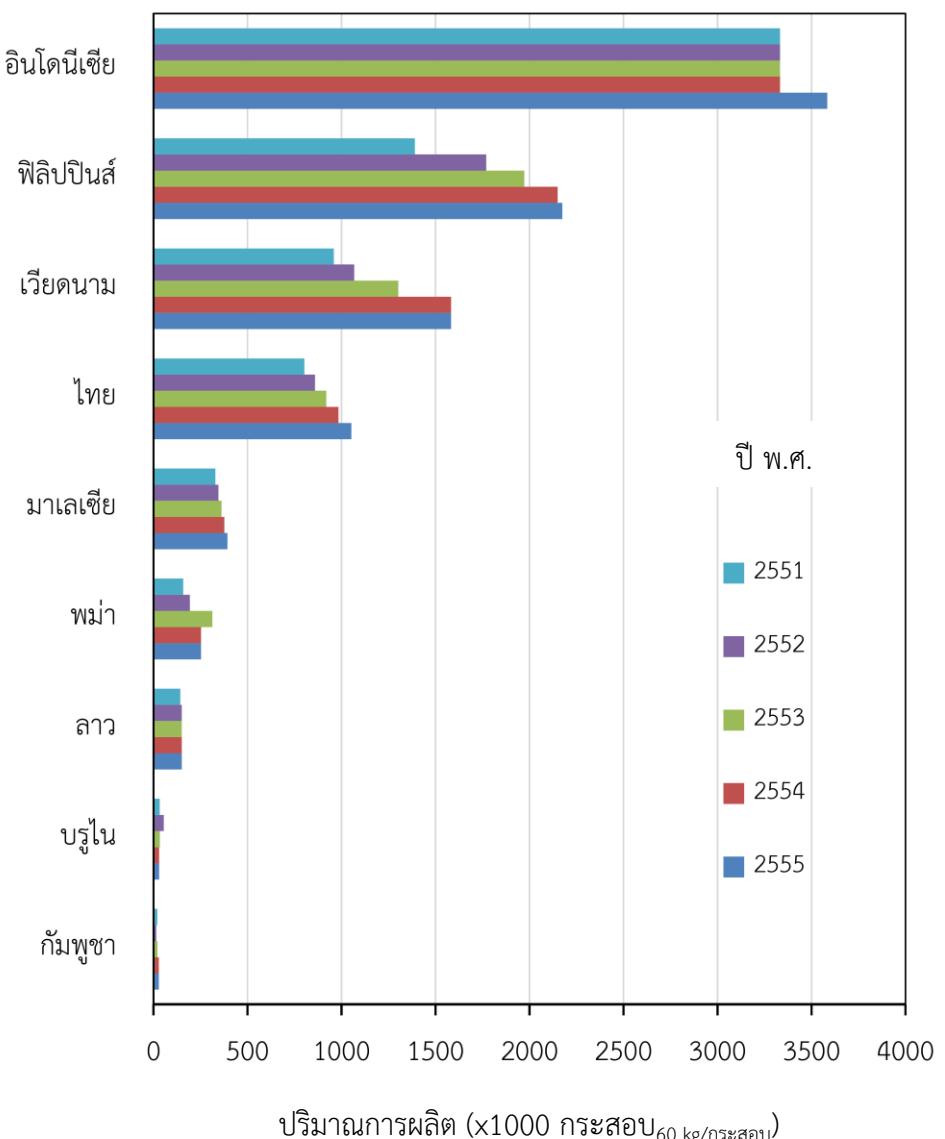
การบริโภคกาแฟได้รับความนิยมในทุกภูมิภาค จากข้อมูลการผลิตเมล็ดกาแฟสู่ตลาดโลกย้อนหลัง 50 ปี [11] แสดงถึงการผลิตที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 ในปี พ.ศ. 2506 มีความร่วมมือระหว่างประเทศไทยผู้ผลิตกาแฟ โดยจัดตั้งองค์การที่มีชื่อว่า ICO ซึ่งได้ดูแลการซื้อขายในตลาดโลก โดยเฉพาะเพื่อป้องกันการกักตุนสินค้าสำหรับเก็บกำไรที่มากเกินไปจนทำให้สินค้ามีราคาแพงเกินจริงและปริมาณเมล็ดกาแฟขาดตลาดหรือล้นตลาด จากข้อมูลของ ICO ในปี พ.ศ. 2556 มีกำลังการผลิตกาแฟทั่วโลกประมาณ 8.71 ล้านตัน [5] สำหรับการผลิตในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.2 [12] โดยประเทศที่มีผลผลิตส่งออกเมล็ดกาแฟติดมากที่สุดของโลกได้แก่ 巴西 (เบราซิล) เวียดนาม และ อินโดนีเซีย ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 จากข้อมูลการผลิตเมล็ดกาแฟจะเห็นได้ว่าตลาดกาแฟมีความเสถียรภาพสูงและมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องตามความต้องการบริโภคของประชากรโลก

สำหรับประเทศไทยมีกำลังการผลิตติดอันดับที่ 19 ของโลก และเป็นลำดับที่ 3 ของแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งสามารถผลิตได้ 124,620 ตัน ในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา และสามารถผลิตเมล็ดกาแฟได้ทั้งสายพันธุ์ robusta และ arabica และจากข้อมูลการสำรวจของกระทรวงพาณิชย์ ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีพื้นที่การปลูก 263,815 ไร่ มีผลผลิตออกสู่ตลาด 38,452 ตัน/ปี และจะมีพื้นที่เพาะปลูกเพิ่มขึ้นในปี 2558 อีกประมาณ 5,817 ไร่ [13]

จากการสำรวจปี พ.ศ. 2543 คนไทยมีอัตราการดื่มกาแฟอยู่ที่ 50 แก้ว/คน/ปี เพิ่มขึ้นเป็น 200 แก้ว/คน/ปี ในปี พ.ศ. 2553 [14] อัตราการเติบโตของธุรกิจร้านกาแฟสด ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2557 ขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 5.4 ต่อปี มูลค่าตลาดในปี พ.ศ. 2552 และ พ.ศ. 2557 เท่ากับ 14,083 ล้านบาท และ 17,400 ล้านบาท ตามลำดับ [15] เช่นเดียวกับตลาดกาแฟสำเร็จรูปที่มีมูลค่าตลาดปี พ.ศ. 2556 ประมาณ 9,650 ล้านบาท และคาดว่าสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 10,630 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2560 [16] และสำหรับในปี พ.ศ. 2557 ปริมาณความต้องการเมล็ดกาแฟของประเทศไทย มีประมาณ 7.5 หมื่นตัน [5] ภาคกาแฟได้มาจากกรุงเทพฯ และจากกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปเพื่อผลิตน้ำกาแฟและนำไปทำกาแฟผงด้วยกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฟอย (spray drying) ซึ่งมีการกาแฟเหลือทิ้งในปริมาณสูงและมีอัตราเพิ่มขึ้นในทุกๆปี



รูปที่ 1.1 ปริมาณการผลิตเมล็ดกาแฟแต่ละภูมิภาค 50 ปีย้อนหลัง [11]



รูปที่ 1.2 ปริมาณความต้องการใช้งานเมล็ดกาแฟของประเทศไทยและอาเซียนต่อวันออกเฉียบได้ [12]

ตารางที่ 1.1 อันดับประเทศผู้ผลิตกาแฟ ระหว่างปี 2554-2556 [17]

Ranking	Producing countries	Total production (million tons)		
		2013	2012	2011
1	Brazil	2.965	3.038	2.701
2	Viet Nam	1.461	1.565	1.277
3	Indonesia	0.699	0.691	0.639
4	Colombia	0.653	0.462	0.469
5	India	0.318	0.314	0.302
6	Honduras	0.273	0.343	0.284
7	Ethiopia	0.270	0.276	0.377
8	Peru	0.256	0.314	0.332
9	Guatemala	0.253	0.273	0.265
10	Mexico	0.232	0.246	0.237

### 1.2.3 เมล็ดกาแฟ

กาแฟที่นิยมปลูกมีเพียง 2 พันธุ์หลักๆ ได้แก่ พันธุ์อาราบิกา *Coffea Arabica* L. cv. *Caturra* (Arabica) และ พันธุ์โรบัสต้า *Coffea canephora* var. *robusta* (Robusta) [18] ตามรูปที่ 1.3 [19] โดยความแตกต่างของกาแฟทั้งสองชนิดนี้คือ อาราบิกาเจริญเติบโตได้ดีในที่อากาศเย็น จึงต้องปลูกในพื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 600–2,200 เมตร มีปริมาณน้ำฝน 1,200–2,200 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิประมาณ 15–24°C มีกลิ่นหอมมากกว่า ความขมน้อยกว่า และมีปริมาณ caffeine น้อยกว่าประมาณสองเท่า เมื่อเทียบกับสายพันธุ์โรบัสต้า ส่วนกาแฟพันธุ์โรบัสต้าสามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ที่มีฝนตกชุก อากาศร้อนชื้น ความสูงจากระดับน้ำทะเล ประมาณ 0–800 เมตร มีปริมาณน้ำฝน 2,200–3,000 มิลลิเมตรต่อปีที่อุณหภูมิประมาณ 18–36°C ผู้ผลิตกาแฟมักจะนำกาแฟพันธุ์อาราบิกามาผสมกับพันธุ์โรบัสต้าเพื่อเพิ่มความหอม แต่โรบัสต้าจะมีจุดเด่นเรื่องปริมาณ caffeine ที่มากกว่าพันธุ์อาราบิกา [20] แต่ทั้งสองสายพันธุ์สามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้จากทั้งเมล็ดกาแฟ (green coffee bean, GCB) และกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) โดยปริมาณน้ำมันในเมล็ดกาแฟอาราบิกา จะมีปริมาณมากกว่าโรบัสต้า Mussatto และค่อน [6] ทำการศึกษาลักษณะวัสดุเหลือทิ้งจากการกระบวนการแปรรูปกาแฟ มีการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟพันธุ์อาราบิกาและโรบัสต้า ไว้ดังแสดงในตารางที่ 1.2



(۸)

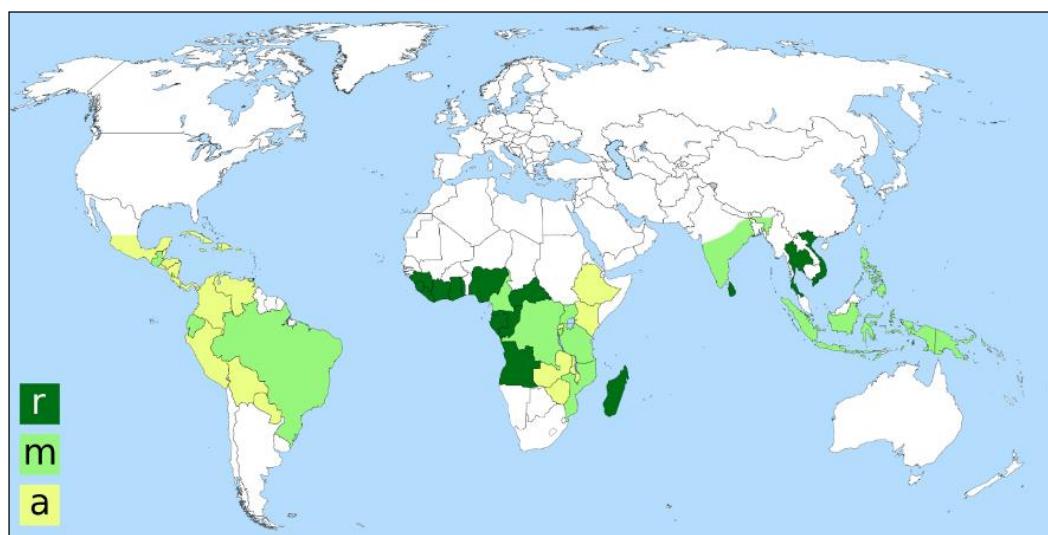
(۹)



(۹)

(۹)

รูปที่ 1.3 (ก) ผลการแพะพันธุ์อะระบิกา (ข) เมล็ดการแพะดิบพันธุ์อะระบิกา (ค) ผลการแพะพันธุ์โรบสต้า และ (ง) เมล็ดการแพะดิบพันธุ์โรบสต้า [19]



รูปที่ 1.4 พื้นที่เพาะปลูกกาแฟทั่วโลก [1]

(r คือ การแพ้พันธุ์โรบัสต้า m คือ การแพ้พันธุ์โรบัสต้าผสานอาระบิกา และ a คือ การแพ้พันธุ์อาระบิกา)

ตารางที่ 1.2 Chemical composition of green coffee bean [6]

Component	Arabica	Robusta
Soluble carbohydrates (wt.%)	9–12.5	6–11.5
Monosaccharides (wt.%)	0.2–0.5	0.2–0.5
Oligosaccharides (wt.%)	6–9	3–7
Polysaccharides (wt.%)	3–4	3–4
Insoluble polysaccharides (wt.%)	46–53	34–44
Hemicelluloses (wt.%)	5–10	3–4
Cellulose, $\beta$ (1–4)mannan	41–43	32–40
Acids and phenols		
Volatile acids (wt.%)	0.1	0.1
Nonvolatile aliphatic acids (wt.%)	2–2.9	1.3–2.2
Chlorogenic acid (wt.%)	6.7–9.2	7.1–12.1
Lignin (wt.%)	1–3	1–3
Lipids (wt.%)	15–18	8–12
Wax (wt.%)	0.2–0.3	0.2–0.3
Oil (wt.%)	7.7–17.7	7.7–17.7
N compounds	11–15	11–15
Free amino acids	0.2–0.8	0.2–0.8
Proteins	8.5–12	8.5–12
Caffeine	0.8–1.4	1.7–4.0
Trigonelline	0.6–1.2	0.3–0.9
Minerals	3–5.4	3–5.4

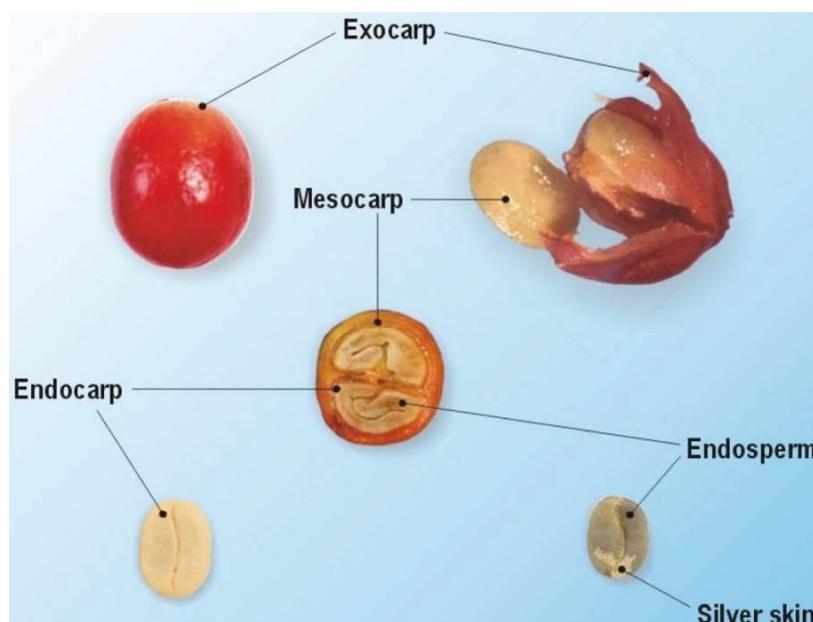
#### 1.2.4 การผลิตและการซองกาแฟ

##### 1.2.4.1 การผลิตเมล็ดกาแฟ

การผลิตเมล็ดกาแฟ [21] จากรูปที่ 1.5 ผลกาแฟสดจะมีสีแดง (coffee cherries) เมื่อเอาส่วนเนื้อ (pericarp) ออก เรียกว่า เมล็ดกาแฟดิบ (green coffee bean, GCB) ขั้นตอนการผลิตเมล็ดกาแฟ มี 2 รูปแบบคือ การผลิตเมล็ดกาแฟโดยวิธีแห้ง (dry processing) เป็นการผลิตสารกาแฟโดยการขัดสีส่วนที่เป็น pericarp ของผลกาแฟออกหลังจากการทำแห้ง เริ่มต้นจาก การคัดเลือกผลกาแฟ และเป็นผลที่สุกเกินไป ผลแห้งหรือผลที่ถูกแมลงทำลาย จากนั้นนำผลกาแฟที่

คุณภาพดีไปทำแห้ง (dehydration) โดยการตากแดด (sun drying) บนลานซีเมนต์หรือในถุงแล้ว กับลับเป็นระยะๆ เพื่อป้องกันการหมักและสีของผลกาแฟไม่สมำเสมอ การตากแห้งจะทำจนกาแฟเหลือความชื้นไม่เกิน 12% เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของ รา และแบคทีเรีย จากนั้นจึงนำมา กะเทาะเปลือก (hulling) ผลกาแฟที่แห้งจะถูกกะเทาะเปลือกเพื่อเอาส่วนที่เรียกว่า pericarp ออก ซึ่งสามารถใช้มือหรือใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะคล้ายครกกับสาก หรือใช้เครื่องกะเทาะเปลือก โดยเครื่อง กะเทาะเปลือกจะใช้สกรูเป็นองค์ประกอบหลักในการทำให้เปลือกส่วน pericarb หลุดออกแล้วจึงการ ทำความสะอาด (cleaning) เมล็ดกาแฟที่ถูกกะเทาะเปลือกเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาทำความสะอาด โดยการใช้ลมเป่า ส่วนการผลิตสารกาแฟแบบวิธีเปียก (wet process or wash method) เป็น วิธีการที่นิยมกันแพร่หลาย เพราะจะได้สารกาแฟที่มีคุณภาพ รสชาติดีกว่า ราคาสูงกว่าวิธีแห้ง (dry process) โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการมีขั้นตอน ดังนี้ การปอกเปลือก (pulping) โดยการนำผล กาแฟสุกมาปอกเปลือกนอก โดยเครื่องลอกเปลือก (pulper) โดยใช้น้ำสะอาดเป็นตัวหล่อลื่น การ ลอกเปลือกควรทำทันทีหลังจากการเก็บเกี่ยว เพื่อไม่ให้ผลกาแฟเกิดการหมัก (fermentation) ซึ่งทำ ให้คุณภาพของสารกาแฟ กลืน และรสชาติเสียไป ขั้นตอนต่อมา การกำจัดเมือก (demucilaging) เมล็ดกาแฟที่ปอกเปลือกนอกออกแล้ว จะมีเมือก (mucilage) ห่อหุ้มเมล็ดอยู่ซึ่งจะต้องกำจัดออกไป ซึ่งมีวิธีการคือ การกำจัดเมือกโดยวิธีการหมักตามธรรมชาติ (natural fermentation) เป็นวิธีการที่ ปฏิบัติตั้งเดิม โดยนำเมล็ดกาแฟที่ปอกเปลือกออกแล้วมาแช่ ในบ่อซีเมนต์ ขนาด มีรูระบายน้ำออก ด้านล่าง ใส่เมล็ดกาแฟประมาณ 3/4 ของบ่อ และใส่น้ำให้ท่วมสูงกว่ากาแฟ แล้วคลุมบ่อด้วยผ้าหรือ พลาสติกปิดปากบ่อซีเมนต์ ทิ้งไว้ 24-48 ชั่วโมง ในการนี้ที่อุณหภูมิต่ำอากาศหนาวเย็น การหมัก อาจจะใช้เวลา 48-72 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยน้ำทิ้งแล้วนำเมล็ดมาล้างน้ำให้สะอาด นำเมล็ดมาขัดอีก ครั้งในตะกร้าตาถี่ ที่มีปากตะกร้ากว้างกันไม่ลึกมาก เมื่อขัดแล้วเมล็ดกาแฟจะไม่ลื่นแล้วล้างด้วยน้ำ สะอาดอีกครั้งก่อนที่จะนำไปตาก อีกวิธีหนึ่งการกำจัดเมือกโดยการใช้ด่าง (lye peeling) โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10% เทลงในบ่อซีเมนต์ที่ใช้หมักเมล็ดกาแฟ หลังจากเท เมล็ดกาแฟประมาณ 250-300 กิโลกรัม และเกลี่ยให้เสมอ กัน จากนั้นใช้ม้ำพายกวนเมล็ดกาแฟเพื่อให้ สารละลายกระจายให้ทั่วทั้งบ่อประมาณ 30-60 นาที หลังจากทิ้งไว้ 20 นาที แล้วตรวจสอบว่าด่าง ย่อยเมือกออกหมด หรือหากยังออกไม่หมดให้กวนอีกจนครบ 30 นาที แล้วตรวจสอบอีกครั้ง เมื่อ เมือกออกหมดต้องนำเมล็ดกาแฟไปล้างด้วยน้ำสะอาด 3-4 ครั้งก่อนนำไปฝังเดดให้แห้ง วิธีนี้จะใช้ เวลาประมาณไม่เกิน 1 ชั่วโมง (روبสตา 1 ชั่วโมง 30 นาที) หลังจากเมล็ดกาแฟผ่านการล้างทำความสะอาด แล้ว นำเมล็ดกาแฟทำแห้ง (dehydration) โดยการตากแดด (sun drying) บนลานซีเมนต์ หรือเทลงบนตาข่ายพลาสติกบนเครื่องไม่ไฟ เกลี่ยเมล็ดกาแฟกระจายสม่ำเสมอไม่ควรนานเกิน 4 นิ้ว ควรที่จะทำการเกลี่ยเมล็ดกาแฟวันละ 2-4 ครั้ง จะทำให้เมล็ดแห้งเร็วขึ้น และเวลากลางคืนควรกอง เมล็ดเป็นกองๆ และใช้พลาสติกคลุมเพื่อป้องกันน้ำฝนหรือน้ำค้าง ใช้เวลาตากประมาณ 7-10 วัน

เมล็ดจะมีความชื้นประมาณ 10-12% และจึงบรรจุเมล็ดกาแฟ (packing) โดยเมล็ดกาแฟที่แห้งแล้ว ควรเก็บไว้ในรูปของกาแฟกลา (parchment coffee) เพราะจะสามารถรักษาเนื้อกาแฟและป้องกันการดูดกลับความชื้นกาแฟได้ดี และควรบรรจุในกระสอบป่านใหม่และแห้งสนิท เก็บในโรงเก็บที่มีอากาศถ่ายเท ได้สะดวก ไม่อับชื้น ก่อนทำการคั่วสารกาแฟจะต้องผ่านขั้นตอนการสีกาแฟกลา (hulling) ซึ่งกาแฟกลาที่จะนำไปจำหน่ายควรจะทำการสีเพื่อเอาเปลือกออกด้วยเครื่องสีกาแฟจะได้สารกาแฟที่มีลักษณะผิวสีเขียวอมฟ้า เรียกว่าเมล็ดกาแฟดิบ (green coffee bean, GCB)



รูปที่ 1.5 องค์ประกอบของผลกาแฟ (coffee cherries) และเมล็ดกาแฟ (coffee beans) [22]

#### 1.2.4.2 การซองกาแฟด้วยวิธี(espresso)

โดยส่วนใหญ่หลังจากเมล็ดกาแฟดิบ (GCB) ผ่านการคั่วแล้ว จะได้เมล็ดกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) เมล็ดกาแฟคั่วจะถูกนำมาปรุงเป็นน้ำกาแฟและเข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เพื่อผลิตเป็นกาแฟของสำเร็จรูปและกาแฟกระป๋อง สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำกาแฟที่ผ่านกระบวนการซองแบบessoสเปรสโซ ซึ่งในกระบวนการซอง เมล็ดกาแฟคั่วจะถูกบดให้เป็นผงละเอียดเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของกาแฟ ทำให้น้ำร้อนที่สัมผัสกาแฟสามารถละลายสารอินทรีย์ในเนื้อกาแฟได้ดียิ่งขึ้น [23] ขนาดของผงกาแฟจะขึ้นอยู่กับวิธีการซองกาแฟ โดยการซองกาแฟด้วยกระบวนการessoสเปรสโซ ผงกาแฟควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3 มิลลิเมตร และมีขนาดโตขึ้น สำหรับการซองด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การซองกาแฟแบบ paper filter (ขนาด 0.5 มม.) metal filter (ขนาด 0.7 มม.) percolator (ขนาด 0.8 มม.) และ french press (ขนาด

0.9 มม.) [24] วิธีการชงแบบเอสเพรสโซใช้เป็นวิธีการสกัดกาแฟโดยผ่านน้ำที่มีความร้อนอุณหภูมิ  $88 \pm 2^\circ\text{C}$  และความดันสูง  $9 \pm 1$  bar ลงบนผงกาแฟบดละเอียดที่มีการอัดตัวอย่างสม่ำเสมอ น้ำร้อนแรงดันสูงจะแทรกผ่านชั้นผงกาแฟสกัดทั้งองค์ประกอบที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดยส่วนที่ไม่ละลายน้ำจะแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ แขวนลอย (คอลลอยด์) อยู่ในน้ำกาแฟสกัด ซึ่งคุณสมบัติเช่นนี้จะไม่สามารถทำได้จากการชงวิธีอื่นๆ วิธีการชงกาแฟและเครื่องชงกาแฟแบบเอสเพรสโซ มีต้นกำเนิดมาจากประเทศอิตาลี โดยนักประดิษฐ์ชื่อ Angelo Moriondo และได้จดสิทธิบัตรไว้ในเมือง Turin ในปี พ.ศ. 2427 [25] และในปี พ.ศ. 2541 ประเทศอิตาลีในฐานะต้นกำเนิดเอสเพรสโซ ได้ออกมาตราฐานการสกัดน้ำกาแฟโดยวิธีเอสเพรสโซ จากสถาบัน International Institute of Coffee Tasters and the Taster Study Center (Centro Studi Assaggiatori) ไว้ดังแสดงในตารางที่ 1.3 [26]

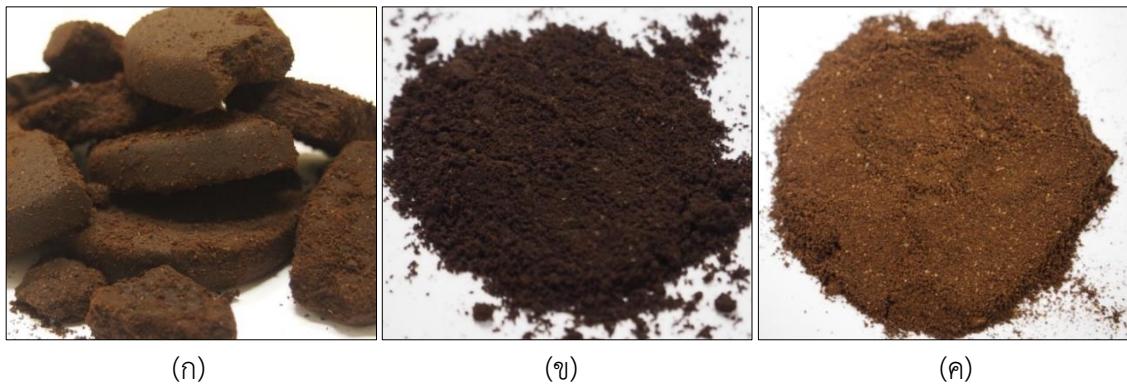
ตารางที่ 1.3 ข้อกำหนดตัวแปรควบคุมและน้ำกาแฟสกัดจากการชงกาแฟด้วยวิธีเอสเพรสโซ [26]

คุณลักษณะ	ปริมาณ (1 shot)
ปริมาณกาแฟที่ใช้ทั้งหมด (g)	$7.0 \pm 0.5$
อุณหภูมน้ำในการสกัด ( $^\circ\text{C}$ )	$88 \pm 2$
อุณหภูมิกาแฟในถ้วย ( $^\circ\text{C}$ )	$67 \pm 3$
แรงดันน้ำร้อน (bar)	$9 \pm 1$
เวลาในการซึมผ่านทั้งหมด (sec)	$25 \pm 5$
ลักษณะน้ำกาแฟสกัด	
ความหนืด ที่ $45^\circ\text{C}$ (mPa.s)	$> 1.5$
น้ำมันรวม ( $\text{mg.mL}^{-1}$ )	$> 2$
กาแฟอิน ( $\text{mg.cup}^{-1}$ )	$< 100$
ปริมาณรวมฟอง (mL)	$25.0 \pm 2.5$

### 1.2.5 ลักษณะกาแฟทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

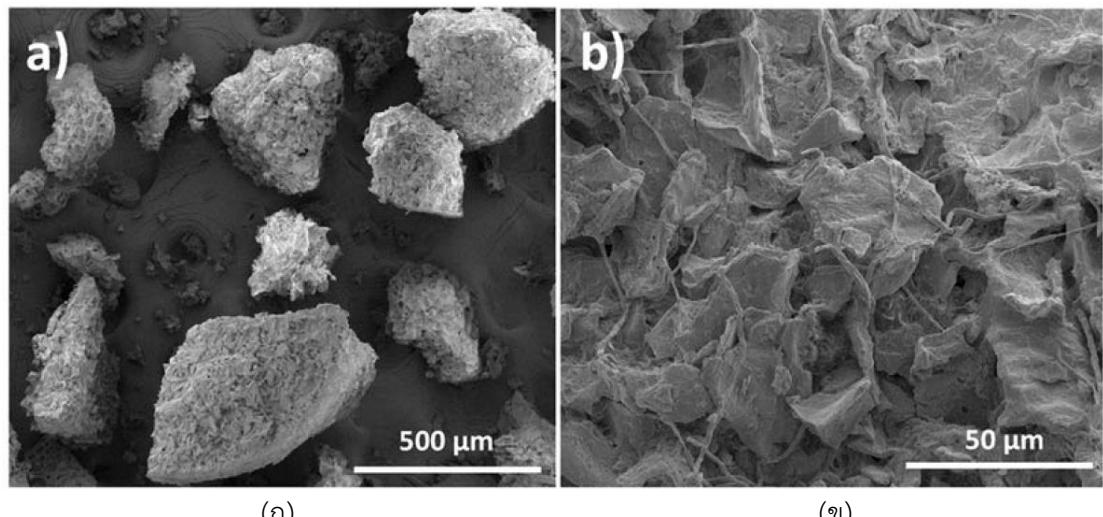
ส่วนเหลือทิ้งจากการสกัดน้ำกาแฟเพื่อนำไปชงเป็นกาแฟประเภทต่างๆ เรียกว่า กาแฟ废 (spent coffee grounds, SCG) ลักษณะเป็นผงเนื้อละเอียดมีความชื้นสูงเกากันเป็นก้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.6 มีน้ำมันอยู่บนผิวประมาณ 7-17 wt.% [27] สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพ กาแฟ废 (spent coffee grounds) กาแฟปราศจากน้ำมัน (defatted spent coffee grounds, DFSCG) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.4 ภาพกาแฟหลังจากการชงกาแฟ ภาพกาแฟก่อน

และหลังการสกัดน้ำมันและลักษณะพื้นผิว ก่อนและหลังจากการสกัดน้ำมันแสดงดังรูปที่ 1.6 และรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.6 (ก) กาแฟเหลือทิ้งจากการซงกาแฟ

(ข) กาแฟอบแห้งก่อนสกัดน้ำมัน และ (ค) กาแฟหลังสกัดน้ำมัน



รูปที่ 1.7 (ก) ภาพถ่ายกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด DSCG

และ (ข) DFSCG [28]

ตารางที่ 1.4 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของกาากาแฟ [29]

Parameter	DSCG			DFSCG
	[29]	[7]	[28]	[29]
Higher heating value (MJ.kg <sup>-1</sup> )	19.3	22.74	-	19
Moisture (wt.%)	65.7	-	-	9.4
Total carbon (wt.%)	67.3	54.61	-	69.5
Total nitrogen (wt.%)	2.2	3.97	2.79	2.0
Protein (g.100.g <sup>-1</sup> )	13.7	-	17.44	12.3
Ash (wt.%)	2.2	1.35	1.30	1.65
Cellulose (wt.%)	13.8	-	12.40	15.3
Klason lignin (wt.%)	31.9	-	17.59	30.9
Soluble lignin (wt.%)	1.7	-	6.31	1.6
Total lignin (wt.%)	33.6	33.32	23.90	32.5

### 1.2.6 การใช้ประโยชน์กาากาแฟในปัจจุบัน

กาากาแฟเหลือทิ้งจากร้านขายกาแฟสดในชุมชนปัจจุบันถูกนำมาใช้แปรรูปเพื่อการใช้ประโยชน์อย่างง่าย การใช้งานอาจมีข้อจำกัดและมีปริมาณการใช้งานน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณกาากาแฟเหลือทิ้ง โดยมีตัวอย่างการใช้งาน เช่น ใช้ทำวัสดุเพาะเห็ด วัสดุหดแทนไม้ กระเบื้องจากกาากาแฟ ใช้เป็นวัสดุผสมในการหมักไข่เค็ม ใช้ภาคดับกลิ่น ขัดผิว พอกหน้า ผสมสบู่ แชมพู ครีมนวด ใช้ทำปุ๋ยพืชสด ใช้เลี้ เมลังศัตtruพีช กาากาแฟดึงดูดไส้เดือนเป็นประโยชน์ต่อพีช กลินกาแฟสามารถใช้ไล่แมวได้ และผสมกาากาแฟอาบน้ำสุนัข ช่วยให้ขนเงาและไล่เห็บ เป็นต้น

### 1.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากกาากาแฟด้านการพัฒนาเป็นเชื้อเพลิง

ปัจจุบันมีกลุ่มนักวิจัยในหลายสาขาศึกษาการนำกาากาแฟไปใช้ประโยชน์ในหลายแนวทาง ซึ่งแบ่งกลุ่มการได้ดังนี้

#### 1.2.7.1 เผาไหม้โดยตรง

กาากาแฟมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่เผาไหม้ให้พลังงานความร้อนสูง ประกอบกับมีปริมาณชีวภาพสูง ปัจจุบันมีการใช้กาากาแฟเผาไหม้โดยตรงในเตาเผาของหม้อไอน้ำในโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูป เนื่องจากมีกาากาแฟเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งง่ายต่อการจัดการ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การกำจัดและช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานในการผลิต [30]

### 1.2.7.2 เชื้อเพลิงอัดแห่งจากกากกาแฟ

เชื้อเพลิงอัดแห่ง (briquette) มีลักษณะที่ง่ายต่อการจัดเก็บ การขนส่ง รวมทั้งมีมาตรฐานกำหนดคุณลักษณะที่ชัดเจนง่ายต่อการนำไปใช้งานสำหรับเตาเผามาตรฐาน อีกทั้ง กากกาแฟมีคุณสมบัติเหมาะสมเป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในด้านค่าความร้อน ปริมาณ คาร์บอนคงตัวและปริมาณไข้เล้า ดังแสดงในตารางที่ 1.5 ซึ่งมีการศึกษาและทดสอบเชื้อเพลิงอัดแห่ง จากกากกาแฟโดย Sudjaitham และคณะ [31] ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแห่งจาก กากกาแฟโดยใช้เครื่องอัดเย็น และมีตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย 3 ชนิดคือ ผักกาดขาวมักเทศมัน สำปะหลัง และแบงเปียก พร้อมทั้งวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพ ด้านเชื้อเพลิง และศึกษา ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตโดยใช้สถิติ พบร่วมกันว่าการใช้ตัวประสานจะทำให้ค่าความร้อน ลดลง มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง  $0.5\text{-}0.9 \text{ g.cm}^{-3}$  ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อตัวประสานที่ใช้ลดลง ค่า ตัวนี้แตกร่อนอยู่ระหว่าง  $0.82\text{-}0.99$  ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของเชื้อเพลิงในการทนต่อแรง กระแทกในการขนส่งได้ และมีค่าสัมประสิทธิ์การใช้งานของความร้อนร้อยละ  $13.3\text{-}23.4$  ซึ่งใกล้เคียง กับไม้ฟืน และได้สรุปว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน Limousy และคณะ [32] ทำการศึกษา ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากกากกาแฟเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับ เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขี้เลือยไม้สนและการกากกาแฟผสมขี้เลือยจากไม้สนในอัตราส่วนที่กำหนด จำนวน ทดลองการใช้งานใน Boiler ขนาดเล็ก  $12 \text{ kW}$  พบร่วมค่าความร้อนที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดกากกาแฟ เพียงอย่างเดียวมีค่ามากกว่าเชื้อเพลิงอัดแห่งจากไม้สน และเชื้อเพลิงอัดแห่งจากวัสดุผสมให้ค่าความ ร้อนที่สูงที่สุดโดยมีค่าความร้อนเท่ากับ  $19.55 \text{ MJ.kg}^{-1}$   $19.23 \text{ MJ.kg}^{-1}$  และ  $19.63 \text{ MJ.kg}^{-1}$  ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซไออกไซด์ได้แสดงในตารางที่ 1.6 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเชื้อเพลิง อัดเม็ดจากการกากกาแฟผสมขี้เลือยมีคุณสมบัติเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดใกล้เคียงกับ เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขี้เลือยในท้องตลาดและจากค่าความร้อนและความหนาแน่นที่แตกต่างกันของ เชื้อเพลิงอัดเม็ดกากกาแฟและขี้เลือย การใช้งานใน boiler อาจต้องการศึกษาปรับแต่งที่เหมาะสม เพิ่มเติม อีกทั้งกรณีหากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันและการที่เหลือจากการหมักอบทานอย่างคงมี คุณสมบัติในการเป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงซึ่งยังต้องการศึกษาและปรับปรุงต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 1.5 คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด [33]

Property	Content
Higher heating value ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	> 12.55
Fixed carbon (wt.%)	> 15
Ash (wt.%)	< 20
Total sulfur (wt.%)	< 2
Oxidizer (wt.%)	N/A
Explosive (wt.%)	N/A
Strong oxidizing agent (wt.%)	N/A

Note: N/A: is not available

ตารางที่ 1.6 การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงอัดเม็ดในหม้อต้ม [32]

Property	DSCG	Pine sawdust	Blend 50:50
Carbon monoxide ( $\text{ppm.vol}^{-1}$ )	11.8	7.9	6.7
Particles ( $\text{mg.Nm}^{-3}$ )	17.5	14.2	13.9
Higher heating value ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	19.6	19.2	19.6
Boiler combustion efficiencies (%)	86.3	90.8	91.9

### 1.2.7.3 ไบโอดีเซลจากกาแฟ

Eilhann และคณะ [34] ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลจากกาแฟเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของกากาแฟที่ส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบประเภทน้ำตาล เมื่อผ่านกระบวนการหมักด้วยยีสจจะได้ออทิลแอลกอฮอล์ หรือเรียกว่า เอทานอล โดยสรุปว่า กระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ของรา (ยีสต์) จะเกิดขึ้นได้ช้าเนื่องจากไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระที่อยู่ในกาแฟขัดขวางการเจริญเติบโต ในกระบวนการหมักจึงนิยมนำกาแฟสกัดส่วนที่เป็นน้ำมันออกก่อน ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ผลได้เท่ากับ  $0.46 \text{ g.g}^{-1}$  และ  $97.5 \pm 0.5\%$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไขมันและองค์ประกอบน้ำตาลทั้งหมดที่สกัดได้จากการกาแฟ

### 1.2.7.4 ไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟ

กาแฟที่ผ่านการซงกาแฟหรือผ่านกระบวนการสกัดสารกาแฟด้วยน้ำออกแล้วนั้น ยังคงเหลือองค์ประกอบที่เป็นน้ำมันเหลืออยู่  $7-17 \text{ wt.\%}$  [27] โดยน้ำมันจากการกาแฟมีคุณลักษณะต่างแสดงในตารางที่ 1.7 ซึ่งมีที่มีวิจัยของ Mebrahtu และคณะ [35] ทำการศึกษาการ

ผลิตไบโอดีเซลโดยเริ่มจากการสกัดน้ำมันจากการกาแฟโดยใช้เอกเซนเป็นตัวทำละลายและน้ำมันที่สกัดได้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งใช้กรดชัลฟิวริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเอสเทอราฟิเคชันและกระบวนการทรานส์เอสเทอราฟิเคชันตามลำดับ สามารถเปลี่ยนน้ำมันสกัดจากการกาแฟให้กลายเป็นไบโอดีเซลที่มีปริมาณผลได้เท่ากับ 73.4 wt.% โดยคุณภาพที่ได้ผ่านมาตรฐานน้ำมันสำหรับใช้ผสมน้ำมันชนิดกลางจากหอกลั่น (middle distillate fuels) เพื่อผลิตไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D 6751- 09 (B100) Grades S15 and S500 และทีมวิจัยของ Caetano และคณะ [29] ศึกษาการสกัดน้ำมันกาแฟด้วยตัวทำละลาย hexane และ isopropanol ที่อัตราส่วนและความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทดสอบปริมาณน้ำมันที่สามารถสกัดได้ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยใช้แอลกอฮอล์ประเภทเมทานอล และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็ว rob กวณ 80 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ความบริสุทธิ์ 86% ทีมวิจัยของ Todaka และคณะ [36] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟ น้ำมันสนับสำ และ น้ำมันเรพเชิด ด้วย methanol, ethanol, 1-propanol และ 1-butanol โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟที่ใช้ 1-butanol มีคุณสมบัติในด้านเชื้อเพลิงที่ดี มีความเสถียรต่ออุณหภูมิ (thermal stability) และ ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี โดยคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟได้แสดงในตารางที่ 1.7

ตารางที่ 1.7 คุณสมบัติไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟเปรียบเทียบมาตรฐาน

Property	[29]	[35]	[36]	[37]	EN 14214 [37]
Color	brown	brown	brown	brown	-
Appearance	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	-
Cloud point (°C)	-	-	12	13.1	-
Kinetic viscosity ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	-	-	11.2	5.19	3.5-5.0
Density ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	-	-	0.887	-	-
Reaction yield (wt.%)	37.3	60.5	66.5	-	-
Water content (ppm)	2708	-	-	632	< 500
Iodine value ( $\text{g I}_2 \cdot 100 \cdot \text{g}^{-1}$ )	70.0	2.14	-	-	< 120
Acid value ( $\text{mg KOH.g}^{-1}$ )	1.9	-	-	0.11	< 0.5
Methyl ester content (wt.%)	86.0	69.3	-	-	> 96.5

### 1.2.8 การสกัดน้ำมันกาแฟ

การสกัด (extraction) คือ กระบวนการแยก (separation) โดยใช้ของเหลวอีกชนิดหนึ่งเป็นตัวทำละลาย ละลายสารที่ต้องการแยกโดยให้ละลายออกมานิ่วทำละลาย สำหรับการสกัดน้ำมันออกจากกาแฟจะจัดอยู่ในประเภท การสกัดของแข็งด้วยของเหลว solid-liquid extraction หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการชะ (leaching) คือ การละลายส่วนประกอบที่ต้องการออกจากของผสมแข็งด้วยตัวทำละลายของเหลว สำหรับกรณีที่ส่วนประกอบที่ต้องการละลายอยู่บนผิวภายนอกแข็งที่ไม่ละลาย เป็นเพียงกระบวนการล้างออกด้วยตัวทำละลาย (elutriation หรือ elution) [38] การสกัดน้ำมันจากกาแฟ (SCG) กำลังเป็นที่สนใจศึกษาในหลายประเทศ ปัจจุบันมีความพยายามทดลองใช้ตัวทำละลายต่างๆ ทดสอบความสามารถในการสกัดน้ำมันจาก DSCG ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ Soxhlet extractor ซึ่งสามารถสกัดน้ำมันจากกาแฟได้ โดยใช้ตัวทำละลาย เช่น hexane, isopropanol, pentane และ acetone เป็นต้น ทีมวิจัยของ Ferrari และคณะ [39] ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) ของทั้งเมล็ดกาแฟพันธุ์ arabica และพันธุ์robusta โดยใช้สารละลาย pentane ทำการสกัดด้วย Soxhlet extraction เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบร่วม ตัวอย่างจากการแยกสารพันธุ์ arabica ให้น้ำมัน  $16.5 \pm 0.4$  wt.% และสารพันธุ์ robusta ให้ปริมาณน้ำมัน  $9.2 \pm 0.1$  wt.% เช่นเดียวกับ Al-Hamamre และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาการสกัดน้ำมันจาก DSCG จากตัวทำละลายแบบมีขี้ว (polar) และไม่มีขี้ว (non-polar) ด้วย Soxhlet extraction ใช้เวลาสกัด 30 นาที ด้วยตัวทำละลายแบบไม่มีขี้ว (pentane, hexane, toluene, chloroform) ได้ปริมาณน้ำมัน  $15.18$  wt.%  $15.28$  wt.%  $14.32$  wt.% และ  $8.60$  wt.% ตามลำดับ และ ตัวทำละลายแบบ polar solvents ได้แก่ acetone, isopropanol และ ethanol เท่ากับ  $12.92$  wt.%  $10.68$  wt.% และ  $9.18$  wt.% ตามลำดับ และมีทีมวิจัยอื่นๆ ที่ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากกาแฟซึ่งได้สรุปเงื่อนไขการสกัดน้ำมันด้วยเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.8 และมีคุณสมบัติน้ำมันดังตารางที่ 1.9

ตารางที่ 1.8 การทดสอบสกัดน้ำมันกาแฟ

Extraction method	Time (min)	Type of solvent	Solvent to DSCG (mL.g <sup>-1</sup> )	Yield (wt.%)	Ref.
Ultrasound	45	hexane	4.0:1	12	[41]
Soxhlet	30	pentane	4.2:1	15.18	[40]
Soxhlet	30	hexane	4.2:1	15.28	[40]
Soxhlet	30	toluene	4.2:1	14.32	[40]
Soxhlet	40	chloroform	4.2:1	11.15	[40]
Soxhlet	30	acetone	4.2:1	12.92	[40]
Soxhlet	50	isopropanol	4.2:1	10.92	[40]
Soxhlet	40	ethanol	4.2:1	11.9	[40]
Soxhlet	150-570	50:50 (hex:iso)	20:1	21.5	[42]
Soxhlet	150-570	isopropanol	20:1	21	[42]
Soxhlet	150-570	80:20 (hex:iso)	20:1	19.5	[42]
Soxhlet	150-570	n-octane	20:1	26	[42]
Soxhlet	150-570	hexane	20:1	16	[42]
Soxhlet	150-570	ethanol	20:1	16	[42]
Soxhlet	150-570	60:40 (hex:iso)	20:1	17	[42]
Soxhlet	150-570	70:30 (hex:iso)	20:1	21	[42]
Soxhlet	150-570	heptane	20:1	18	[42]

หมายเหตุ hex:iso คือ hexane ต่อ isopropanol

ตารางที่ 1.9 คุณสมบัติน้ำมันกาแฟ

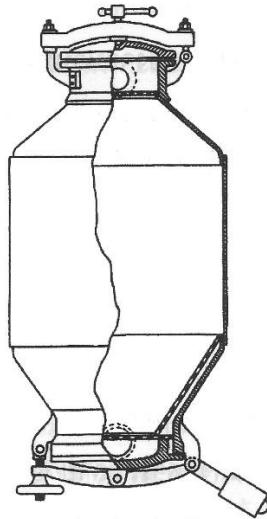
Property	[37]	[36]	[29]
Color	Dark brown	Dark brown	Dark brown
Moisture (%)	-	-	0.118
HHV (MJ.kg <sup>-1</sup> )	-	-	40.8
Density at 15°C (kg.m <sup>-3</sup> )	941	904.2	912
Viscosity 40°C (mm <sup>2.s</sup> <sup>-1</sup> )	49.64	33.92	39.8
Acid value (mg KOH.g <sup>-1</sup> )	11.27	8.0	9.9
Iodine value (g Iodine.g <sup>-1</sup> )	-	-	0.476

### 1.2.9 เทคโนโลยีเครื่องสกัด

ประเภทกระบวนการทำงาน อาจแบ่งออกได้เป็น กระบวนการสถานะไม่คงที่ (unsteady-state operation) และกระบวนการสถานะคงที่ (steady-state operation)

#### 1.2.9.1 กระบวนการสถานะไม่คงที่ [38]

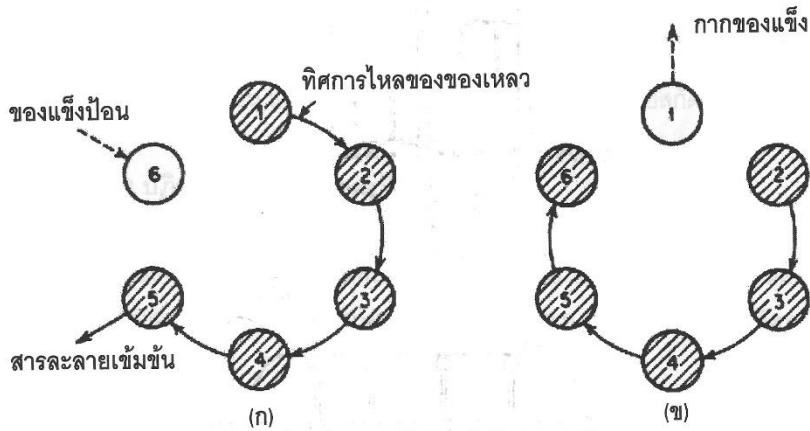
กระบวนการสถานะไม่คงที่ (unsteady-state operation) เป็นกระบวนการในลักษณะที่ของแข็งจำนวนหนึ่ง ถูกชักด้วยของเหลวจำนวนหนึ่งเป็นครั้งๆ (batch operation) หรือในลักษณะที่กึ่งต่อเนื่อง (semi-batch or semi-continuous operation) ซึ่งของแข็งจะถูกชักด้วยของเหลวซึ่งให้อย่างต่อเนื่อง ของแข็งที่เป็นก้อนใหญ่มักจะถูกสกัดด้วยการแซ่ (percolation) ในเครื่องสกัดแบบเบดนิ่ง (fixed bed) ส่วนของแข็งที่เป็นอนุภาคเล็กๆ แพร่ลงโดยจ่าย มักจะถูกสกัดในเครื่องสกัดที่มีใบกวน (agitator) ลักษณะการแซ่และลักษณะของเครื่องสกัดในหมวดนี้ได้แก่ ของแข็งที่มีอนุภาคปานกลาง สามารถแซ่โดยการใช้ถังเปิด อาจมีระบบสูบหมุนเวียนของเหลว ถังมีลักษณะหลักหลายขั้นกับธรรมชาติของสารป้อน การขนส่ง และปริมาณของสารป้อน ขนาดอนุภาคควรใกล้เคียงกัน เมื่อแซ่ของแข็งในสารละลายเวลานานพอจะนำสารละลายสกัดออกทางก้นถัง หรือหากทำแบบกึ่งต่อเนื่องจะผ่านของเหลวเข้าและออกจากก้นถังอย่างต่อเนื่อง การแซ่อาจทำในถังปิดเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายหรือเพื่อต้องการเพิ่มความดันเพื่อช่วยในการสกัด ถังปิดมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ดิฟฟิวเซอร์ (diffuser) ตามรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 ถังดิฟฟิวเซอร์ใช้ในการสกัดน้ำตาล [38]

#### 1.2.9.1.1 การสัมผัสหลายครั้งด้วยกระแสสวนทาง [38]

การซะหรือล้างของแข็งจำนวนหนึ่งด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ในถังแซ่หอยๆครั้งในลักษณะที่เรียกว่า กระแสไฟลข้าม (cross-current) สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นต่ำ หากเปลี่ยนกระบวนการเป็นแบบการสัมผัสหลายครั้งด้วยกระแสสวนทาง (counter-current multiple contract) ประสิทธิภาพการสกัดจะดียิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.9 แต่เพื่อหลีกเลี่ยงการถ่ายของแข็งจากถังหนึ่งสู่อีกถังหนึ่งอาจออกแบบให้เป็นระบบต่อเนื่องซึ่งถ่ายเฉพาะของเหลวจากถังหมายเลขต่ำสู่ถังหมายเลขสูงขึ้น เมื่อของแข็งในถังหมายเลขต่ำสุดถูกชะนาณพอก็จะถ่ายทิ้ง บรรจุของแข็งใหม่แทน ทำเป็นวงจรแบบนี้ต่อไปเรื่อยๆ ถังอาจเรียงในลักษณะวงกลมหรือเป็นแคลอนุกรม เรียกว่า แบบเตอร์รีการสกัด (extraction battery) และมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ระบบแซงค์ (Shank system) เพื่อเป็นเกียรติแก่ เจม แซงค์ (Jame Shanks) ชาวอังกฤษผู้ริเริ่มใช้ระบบดังกล่าวครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1841 ในกระบวนการใช้เดิมคาร์บอนเอนแท



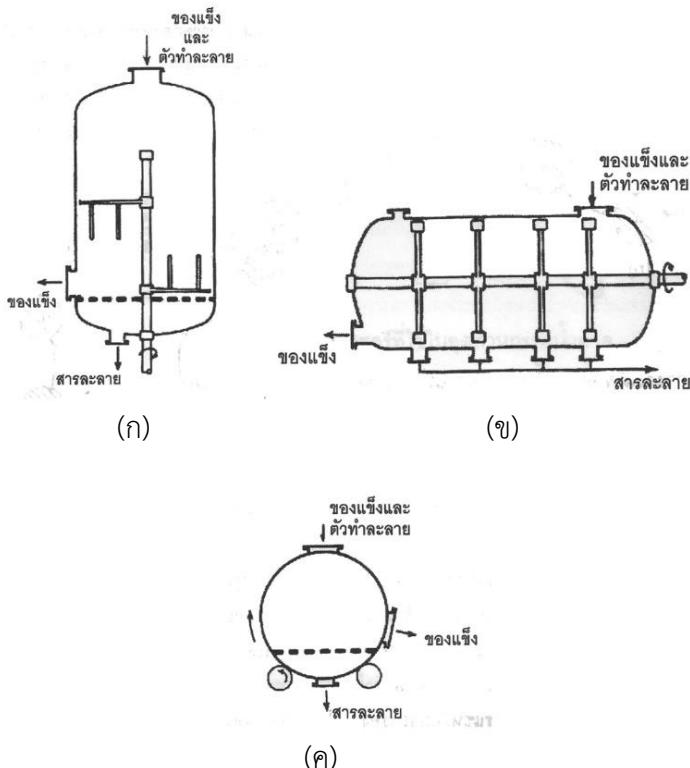
รูปที่ 1.9 การสัมผัสหلامยครั้งแบบกระแสสวนทาง [38]

#### 1.2.9.1.2 การจะแบบอัดกรอง [38]

การจะแบบอัดกรอง (filter-press leaching) เป็นวิธีกรองในกรณีของแข็งมีขนาดอนุภาคเล็กมากเกินกว่าจะใช้ถังแซ่ อาจใช้วิธีจะโดยสูบของเหลวผ่านชั้นของแข็งในเครื่องกรองแบบอัดกรอง นิยมใช้กับการล้างสารละลายออกจากตะกอน

#### 1.2.9.1.3 ถังกรอง [38]

ถังกรอง (agitator vessel) ถูกออกแบบเพื่อแก้ไขข้อเสียของการจะหรือการกรอง คือ การจะเกิดชำและมักเกิดช่องในเบดของแข็ง ทำให้ของเหลวไหล่หล่อผ่านอนุภาคได้ไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กจึงมีการประยุกต์ใช้การวนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว การวนอาจใช้ใบกรวยหรือจากอาศัยหลักพลศาสตร์ของไอล เมื่อต้องการแยกของแข็งออกจากกรองจะทำโดยหยุดกรอง ทิ้งของแข็งให้ตกตะกอน และล้างrinหรือสูบของเหลวออกดังแสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ลักษณะถังการแบบต่างๆ [38]

(ก) ถังการแนวตั้ง (ข) ถังการแนวอน (ค) ถังการแบบถังหมุน

### 1.2.9.2 กระบวนการสถานะคงที่ [38]

กระบวนการสถานะคงที่ (steady-state operation) เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องโดยทั้งของแข็งและตัวทำลายสามารถสลายสกัดให้หล่อลงตามทิศทางต่างกันตามการออกแบบ จากถังหนึ่งไปสู่อีกถังหนึ่ง ลักษณะการซะและเครื่องสกัดที่จัดอยู่ในประเภทนี้ ได้แก่

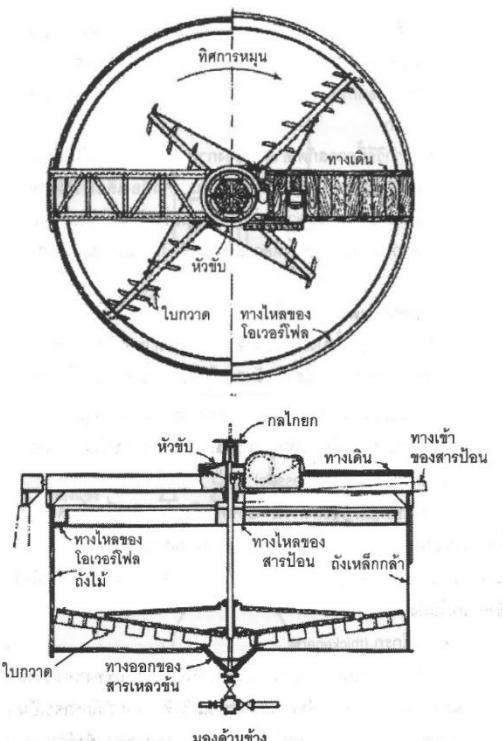
#### 1.2.9.2.1 ถังกวน (ประยุกต์ใช้แบบต่อเนื่อง) [38]

ถังกวน (agitated vessels) สามารถประยุกต์ใช้แบบต่อเนื่องโดยป้อนทั้งของแข็งและของเหลวเข้าสู่ถังกวนและดึงสารแขวนลอยและสารละลายสกัดออกจากถังอย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการนี้ระบบจะอยู่ในสถานะคงที่ได้ต่อเมื่อไม่มีของแข็งสะสมในถังกวน

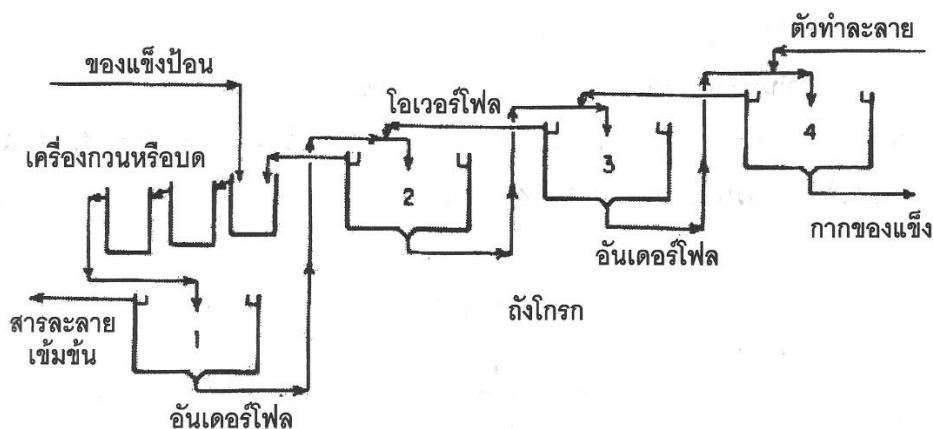
#### 1.2.9.2.2 ถังโกรก [38]

ถังโกรก (thickeners) ตามรูปที่ 1.11 ได้ออกแบบเพื่อเพิ่มอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวของสารแขวนลอยเจือจากโดยอาศัยการตกตะกอน สิ่งที่ได้จากการถังโกรกจะเป็นกากตะกอนและสารละลายใส ในบางกรณีอาจใช้ถังโกรกเรียงต่อกันเป็นอนุกรมตามรูปที่ 1.12

และในบางกรณีอาจใช้หอยอยู่ปัจจุบันร่วมกับตัวกรอกตามรูปที่ 1.13 เช่น สารละลายจากการชะล้างถังหรือเครื่องบดต่อเข้าถังกรอกเพื่อการล้างของแข็งอย่างต่อเนื่อง

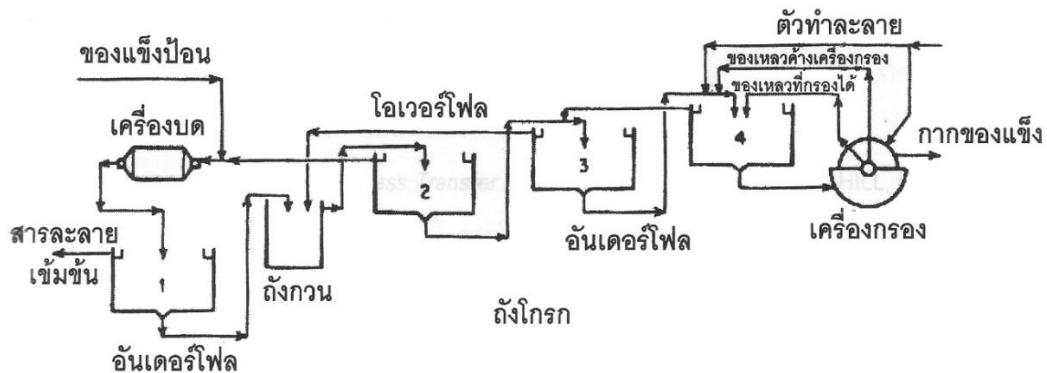


รูปที่ 1.11 ถังกรอก [38]



รูปที่ 1.12 ชุดถังกรอกออกแบบการทำงานให้เรียงต่อกันเป็นอนุกรม [38]

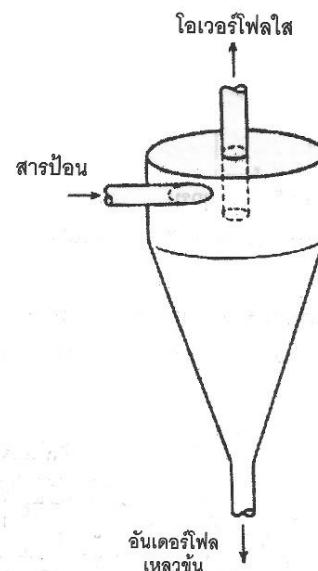
ในบางกรณี อาจมีการใช้อุปกรณ์ต่างๆร่วมกัน เช่น สารละลายจากการชะในถังกวนหรือเครื่องบด  
อาจถูกป้อนเข้าสู่ถังกรอกอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1.13 การใช้ถังโกรกและอุปกรณ์อื่นๆร่วมกัน [38]

#### 1.2.9.2.3 ໃຈໂຄລນ້າ [38]

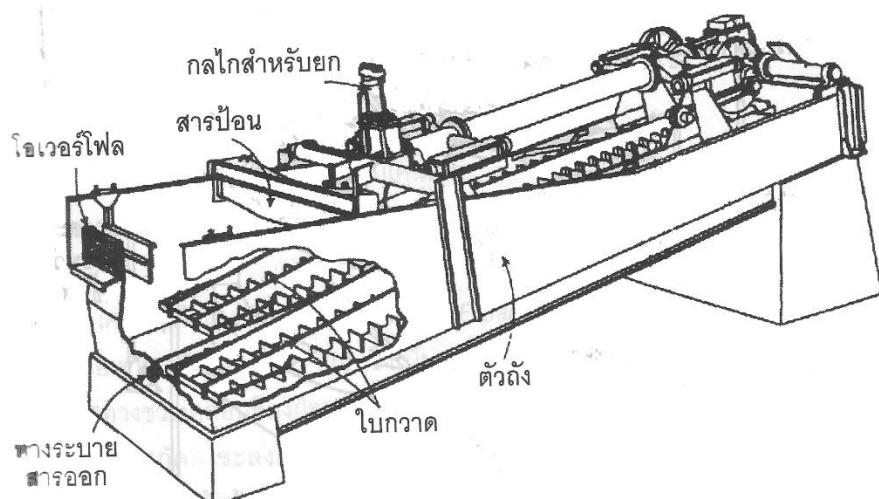
จุดประสงค์หลักของไฮโคลนน้ำ (hydro cyclones) เพื่อแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว โดยของผสมป้อนให้วนในไฮโคลนจากนั้นของแข็งจะตกลงด้านล่างเนื่องจากน้ำหนักและของเหลวใส่หลันออกด้านบนตามรูปที่ 1.14



รูปที่ 1.14 ใช้โคลนน้ำ [38]

#### 1.2.9.2.4 เครื่องจำแนก [38]

เครื่องจำแนก (classifiers) ออกแบบให้มีพื้นอุ่น มีใบการเดือดเพื่อ  
การดูดของแข็งบนพื้นอุ่นจากล่างขึ้นบนสวนทางกับของเหลวที่หลุดจากพื้นอุ่นจากด้านบนลงสู่  
ด้านล่างตามรูปที่ 1.15



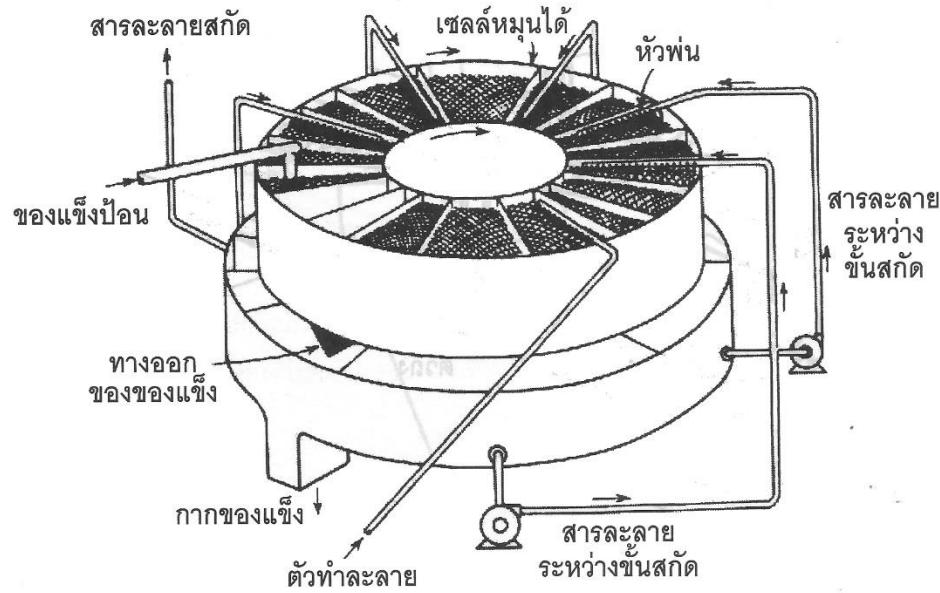
รูปที่ 1.15 เครื่องจำแนก [38]

#### 1.2.9.2.5 ประเภทเครื่องสกัดเมล็ดพีช [38]

เมล็ดพีชที่มีน้ำมันอยู่มากนิยมสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ การ  
เตรียมเมล็ดพีชก่อนการสกัดอาจกราดเปลือก การผ่านความร้อน หรือการบดหีบอาจนำน้ำมันออกไป  
รอบหนึ่งก่อน มากใช้ตัวทำละลายได้แก่ เอกเซนหรือปิโตรเลียมแวน ila ซึ่งเป็นส่วนที่กลับได้กลับเดียว  
กับเอกเซนแต่จะไม่นิยมใช้พากตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีน เพราะอาจจะเจือปนกับหาก  
ของแข็งหลังการสกัดและเป็นพิษ ไม่สามารถใช้ประโยชน์เป็นอาหารสัตว์ต่อได้ กระบวนการสกัด  
น้ำมันจากเมล็ดพีชนี้จะเรียกว่าสารละลายสกัด (ของสมระห่วงตัวทำละลายและน้ำมัน) ว่า มิสเซลล่า  
(miscella) และเรียกการของแข็งว่า مارك ดังนี้

#### 1.2.9.2.6 โรโตเซล [38]

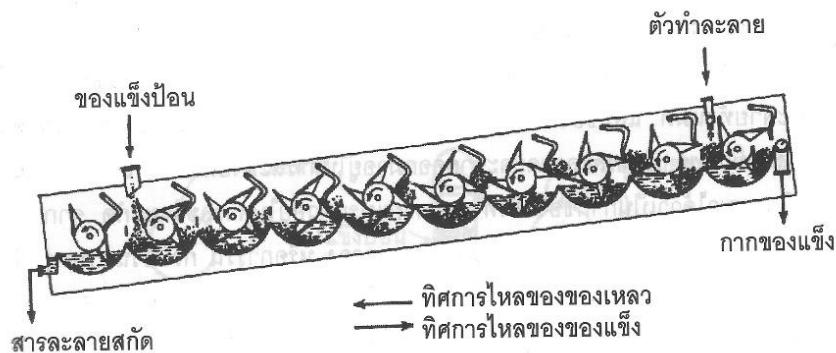
โรโตเซล (Rotocel) เป็นเครื่องมือที่ดัดแปลงมาจากระบบแซงค์  
โดยแบ่งถังจะเป็นห้องๆ และถังหมุนไปพร้อมๆ กับการพ่นตัวทำละลายด้านบนหนึ่งตำแหน่ง ของแข็ง  
ป้อนอีกหนึ่งตำแหน่ง และมีการสูบสารละลายสกัดระหว่างกระบวนการพ่นบริเวณด้านบนในตำแหน่ง  
ห้องอื่นๆ เมื่อหมุนครบรอบกากของแข็งจะถูกปล่อยออกจากทางด้านล่างตามรูปที่ 1.16



รูปที่ 1.16 เครื่องโรเตเชล [38]

#### 1.2.9.2.7 เครื่องสกัดแบบเคนเนดี้ [38]

เครื่องสกัดแบบเคนเนดี้ (Kennedy extractor) เป็นเครื่องสกัดที่มีการสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลวเป็นขั้นๆ โดยของแข็งจะถูกพาจากขั้นหนึ่งไปสู่อีกขั้นหนึ่งด้วยใบภาดเจาะรู ขณะที่ป้อนตัวทำละลายสกัดให้ไหลสวนทางกันตามรูปที่ 1.17

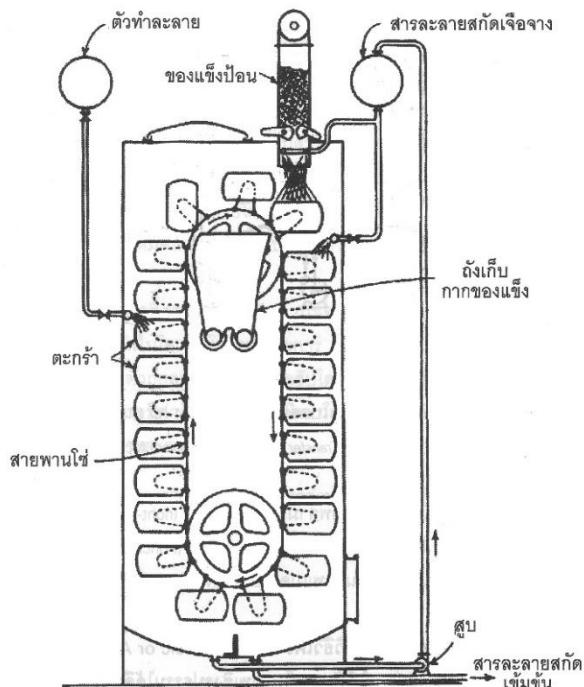


รูปที่ 1.17 เครื่องสกัดแบบเคนเนดี้ [38]

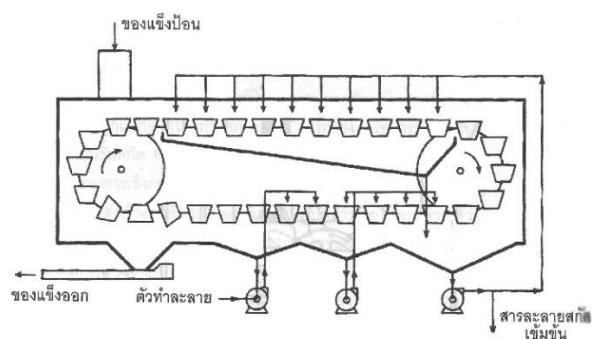
#### 1.2.9.2.8 เครื่องสกัดแบบโบลล์แมน [38]

เครื่องสกัดแบบโบลล์แมน (Bollman extractor) เป็นชุดตะกร้าเจาะรูต่ออนุกรมกันบนสายพาน ซึ่งอาจถือว่าเป็นเครื่องโบลล์แมนแนวตั้งตามรูปที่ 1.18 โดยขณะที่

ตะกร้าทางขวาเคลื่อนที่ลงก็จะถูกชะตัวโดยสารละลายสกัดเจือจางที่ถูกสูบมาจากก้นถังสกัด ขณะผ่านตะกร้าบรรจุของแข็งและสะสมที่ก้นถังด้านขวาเป็นสารละลายสกัดเข้มข้น ส่วนตะกร้าทางด้านซ้ายจะถูกชะตัวทำลายบริสุทธิ์แบบกระแสวันทาง ได้สารละลายสกัดเจือจางสะสมที่ก้นถังด้านซ้าย เครื่องสกัดแบบนี้ออกแบบให้อยู่ในแนวโนนได้ด้วยเช่นกันตามรูปที่ 1.19



รูปที่ 1.18 เครื่องสกัดแบบโบล์แมนแนวตั้ง [38]

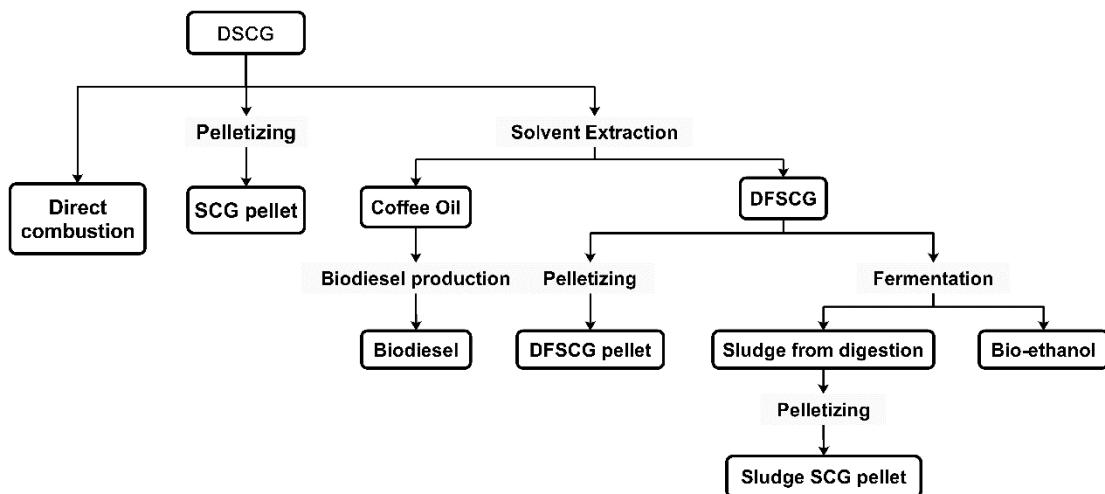


รูปที่ 1.19 เครื่องสกัดแบบโบล์แมนแนวโนน [38]

### 1.2.10 สรุปการตรวจสอบเอกสาร

#### 1.2.10.1 ศักยภาพและแนวทางการวิจัยใช้ประโยชน์จากการแปรรูป

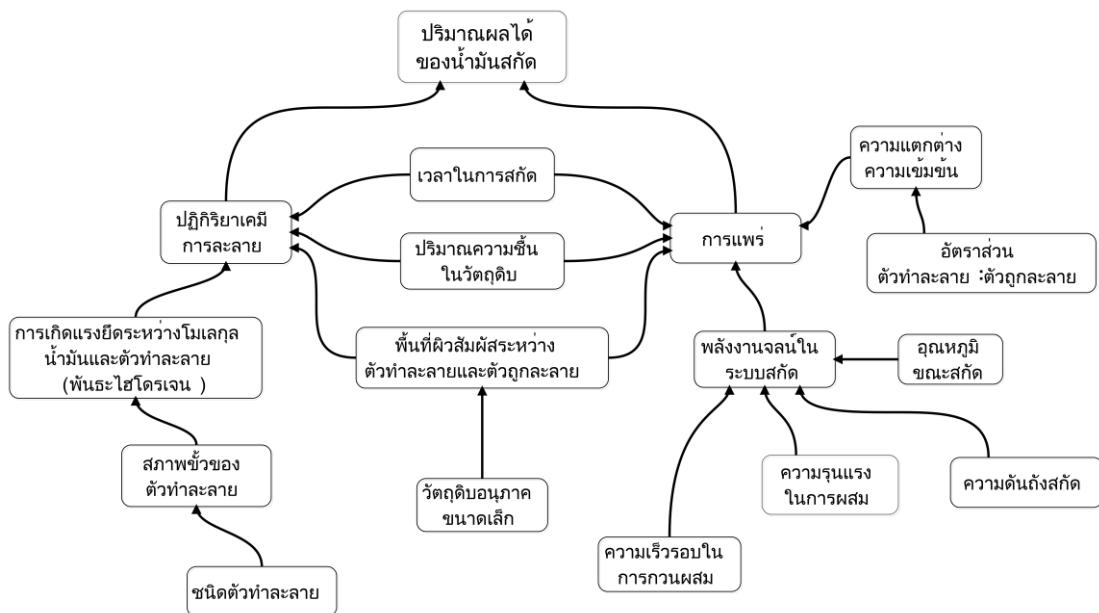
จากการตรวจสอบเอกสารสามารถสรุปได้ว่า การบริโภคกาแฟได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาระยะนาน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในทุกปี และยังได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องในอนาคต การค้ากาแฟมีมูลค่าสูง มีองค์กรระหว่างประเทศและความเสี่ยงตลาดกาแฟโดยเฉพาะ ส่งผลให้การใช้เมล็ดกาแฟและการกาแฟเหลือทิ้งในแต่ละพื้นที่มีความมั่นคงทั้งปริมาณและความต่อเนื่องในขณะที่กาแฟมีศักยภาพในการปรับปรุงใช้งานในหลายลักษณะโดยเฉพาะมีคุณสมบัติด้านพลังงานตามรูปที่ 1.20 การวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานของกาแฟ จำเป็นต้องแยกน้ำมันออกจากกาแฟด้วยวิธีสกัดตัวทำละลาย เนื่องจากหั้งตัวน้ำมันและการกาแฟปราศจากน้ำมันมีมูลค่า เช่น การผลิตเอทานอลโดยการหมักกาแฟด้วยจุลินทรีย์ องค์ประกอบไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมัน อิสระจะยังคงการเจริญเติบโตของเชื้อ การสกัดน้ำมันออกช่วยให้เกิดการหมักในการปราศจากน้ำมันได้ดีขึ้นและน้ำมันที่ได้สามารถนำไปผลิตใบโอดีเซลได้ ฉะนั้นการศึกษาระบวนการสกัดอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ต้องการหลังการสกัดมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1.20 แนวทางการวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์จากการแปรรูปเหลือทิ้งด้านการเป็นพลังงานทดแทน  
(SCG คือ spent coffee grounds, DSCG คือ dried spent coffee grounds  
และ DFSCG คือ defatted spent coffee grounds)

### 1.2.10.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการสกัด

จากการตรวจสอบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีพื้นฐานการสกัดในปัจจุบัน สรุปปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันสกัดด้วยวิธี solid-liquid extraction จากกากรกาแฟได้ 2 ปัจจัยหลัก คือ อันดับแรกเป็นปัจจัยทางกายภาพของกากาแฟ ได้แก่ ขนาดอนุภาคกากาแฟ ความชื้นและสายพันธุ์กากาแฟ ขนาดวัตถุดิบที่เล็กลงช่วยเพิ่มผิวสัมผัสและโอกาสสัมผัสระหว่างกากาแฟและตัวทำละลาย ทำให้ละลายน้ำมันออกมากได้มากขึ้นได้มากขึ้น ในขณะที่ความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการสกัดน้ำมันจากกากาแฟลดลง และปริมาณน้ำมันที่สะสมอยู่ในกาจะมีประมาณ 15-20 wt.% ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสถานที่ปลูก อันดับที่สองคือ สภาพส่งเสริมการละลายน้ำมันจากกากาแฟอย่างตัวทำละลาย สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเด็น ซึ่งประเด็นที่ 1 คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมีในการละลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำมันกาแฟและตัวทำละลายโดยตัวทำละลายประเภทที่ไม่มีสภาพข้าวหรือมีสภาพข้าวต่ำ สามารถละลายน้ำมันกาแฟได้ดีกว่า พันธุ์ที่เกิดขึ้นระหว่างไม่เกิดขึ้นของน้ำมันและไม่เกิดขึ้นของตัวทำละลายเป็นพันธุ์ไฮโดรเจน และตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีไม่เกิดขึ้นแบบใดๆ เช่น เอกเซน สามารถใช้สกัดน้ำมันกาแฟได้ดีกว่าตัวทำละลายชนิดอื่นๆ และประเด็นที่ 2 คือ ความสามารถในการแพร่องน้ำมันสู่ตัวทำละลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสองวัสดุ โดยอนุภาคจะแพร่องจากจุดที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายต่อกากาแฟจะช่วยให้การละลายน้ำมันจากกากาแฟมีปริมาณเพิ่มขึ้น และ ระดับพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัด เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มความดัน การเพิ่มความรุนแรงในการกวนผสม ปัจจัยดังกล่าวจะช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ในระบบและเพิ่มความสามารถในการสกัดน้ำมันจากกากาแฟสู่ตัวทำละลายทั้งสิ้น สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันไว้ในรูปที่ 1.21 สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการทดสอบตัวแปรในการสกัด ประเมินและตัดบางตัวแปรที่มีความสำคัญหรือมีความคุ้มค่าน้อย ตลอดจนออกแบบและสร้างเครื่องสกัดต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริง รวมถึงวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิต เพื่อสามารถนำไปใช้งานในระดับชุมชน หรือเป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบสกัดในอุตสาหกรรมกาแฟขนาดใหญ่หรืออุตสาหกรรมที่มีลักษณะวัตถุดิบคล้ายคลึงกันต่อไป



รูปที่ 1.21 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลได้ของน้ำมันสกัด

### 1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสกัดน้ำมันจากกาแฟเหลือทิ้งด้วยวิธีสกัดแบบของแข็ง-ของเหลวแบบกะ
- 1.3.2 เพื่อสร้างเครื่องสกัดน้ำมันจากกาแฟเหลือทิ้ง

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้จากการสกัดน้ำมันกาแฟ เช่น ประเภทของตัวทำละลาย อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแพเฟหัง และ เวลาสกัดน้ำมัน
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างระบบสกัดน้ำมันจากกาแฟแพดด้วยตัวทำละลายที่สามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้ครั้งละ 150 มิลลิลิตร
- 1.4.3 ระบบสกัดน้ำมันจากกาแฟสามารถกลั่นเพื่อแยกตัวทำละลายกลับคืนได้
- 1.4.4 ศึกษาผลได้ผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถทราบค่าพลังงานที่ได้จากการผลิตภัณฑ์รวมทั้งหมด ต่อวัตถุติดบและพลังงานที่ใช้เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์
- 1.5.2 สามารถนำข้อมูลจากการวิจัยเรื่องสภาพที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันและหลักการออกแบบเครื่องสกัดน้ำมันจากกาแฟปรับใช้กับกาแฟแพที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปกาแฟของโรงงานขนาดใหญ่ ซึ่งมีกาแฟในปริมาณมากได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การสกัดน้ำมัน

การสกัด (extraction) คือ การแยกสารที่ต้องการออกจากของผสม สำหรับการสกัดน้ำมันพืชและไขมันสัตว์โดยเฉพาะแล้ว จะมีกระบวนการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ดังนี้

##### 2.1.1 การเจียว

การเจียว (rendering) เป็นการให้ความร้อนกับวัตถุดิบจนทำให้เปรตินในผนังเซลไขมันแข็งเสียรูปจนไม่สามารถกักเก็บน้ำมันไว้ได้ การเจียวมี 3 วิธีคือ การเจียวแห้ง (dry rendering) โดยการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวที่ความดันบรรยายกาศ การเจียวเปียก (wet rendering) โดยใช้ทั้งความร้อนและน้ำ เช่น การสกัดน้ำมันออกจากผลปาล์ม และการเจียว>y่อย (digestive rendering) คล้ายการเจียวเปียก แต่มีการใช้สารเคมีหรือเอนไซม์ประกอบด้วย [43] [44]

##### 2.1.2 การทึบหรือการอัด

การทึบ (pressing) หรือการอัด (expelling) โดยเครื่องบีบอัดทางกลใช้กับวัตถุดิบที่มีค่าความชื้นต่ำกว่า 10 wt.% และจะต้องมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในเนื้อมากกว่า 25 wt.% หลังจากบีบอัดต้องทิ้งน้ำมันให้สิ่งสกปรกตกgonแล้วแยกน้ำมันออก เช่น การทึบน้ำมันปาล์มจากผลปาล์ม ผลมะกอก และมะพร้าว [43] [44]

##### 2.1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) คือ กระบวนการแยก (separation) โดยใช้ของเหลวอีกชนิดหนึ่งเป็นตัวทำละลาย ละลายสารที่ต้องการแยกโดยให้ละลายออกมากในตัวทำละลาย วิธีนี้จะใช้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 25 % เช่น ถั่วเหลือง เมล็ดฝ้าย เมล็ดถั่ว เป็นต้น โดยตัวทำละลายที่ใช้จะต้องสามารถทำละลายน้ำมันในเนื้อวัตถุดิบได้ ปัจจุบันนิยมใช้โซเดียมโซเดียมและโซเดียมโซเดียม [38] [43] [44]

###### 2.1.3.1 ประเภทการสกัดด้วยตัวทำละลาย

แบ่งตามสถานะของตัวทำละลายและตัวถูกละลายได้ คือ

### 2.1.3.1.1 สารที่เป็นตัวถูกละลายและตัวทำละลายสถานะของเหลว

กรณีทั้งสารที่เป็นตัวถูกละลายและตัวทำละลายสถานะของเหลว (liquid–liquid extraction) เช่น การสกัด penicillin ออกเหลวจากการหมักโดย butanol การสกัด oxygenated terpenoids จาก citrus essential oils โดยใช้อุปกรณ์เป็นตัวทำละลาย liquid–liquid extraction หรือ partitioning ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมยาและเทคโนโลยีชีวภาพ [38]

### 2.1.3.1.2 สารที่เป็นตัวถูกละลายสถานะของแข็งตัวทำละลายสถานะของเหลว

ในกรณีสารที่เป็นตัวถูกละลายอยู่สถานะของแข็งและตัวทำละลายอยู่ในสถานะของเหลว (solid–liquid extraction) เช่น การสกัดเกลือจากก้อนหินโดยใช้น้ำ เป็นตัวทำละลาย การสกัดสารกาแฟจากผงกาแฟคั่วบดในการผลิต soluble coffee การสกัดน้ำมันที่สามารถรับประทานได้จากเมล็ดพืชด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ การสกัดสารโปรตีนจากถั่วเหลือง ในกระบวนการผลิต isolated soybean protein เป็นต้น ซึ่งวิธีสกัดแบบ solid–liquid extraction อาจรู้จักกันในชื่อ leaching หรือ elution กลไกที่มีผลต่อการสกัดขึ้นกับความสามารถในการแทรกซึมของตัวทำละลายเข้าไปในของแข็งที่ต้องการสกัด ความสามารถละลายได้ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสกัด การแพร่ของสารที่ต้องการละลายจากเนื้อของแข็งออกสู่ผิwtทำละลายภายนอกโดยขึ้นกับความแตกต่างของความหนาแน่นรวม และการกวนผสม

### 2.1.3.2 กลไกที่มีอิทธิพลต่อการละลาย

ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยโมเลกุลของสารละลายสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลเดิมโมเลกุลตัวถูกละลายออกมากลายเป็นสารประกอบใหม่ที่ยึดกันด้วยแรงดึงดูดมวลๆ ซึ่งอาจเป็นแรงดึงดูดระหว่างชี้วัวในตัวทำละลายมีสภาพข้าวหรือเกิดจากแรงเนื้องจากพันธะไฮโดรเจน แต่มีค่าน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในโมเลกุลมาก อีกประการคืออัตราการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อย โดยอัตราการแพร่จะเกิดมากขึ้นเมื่อมีการกวนผสม

#### 2.1.3.2.1 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

กรณีการเกิดพันธะโคเวเลนต์ (เกิดจากอะตอมจำนวน 2 อะตอมใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน) หากอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเคลื่อนที่อยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 อะตอม นั่นแสดงถึงแรงดึงดูดจากอะตอมทั้ง 2 มีค่าเท่ากัน และแรงดึงอิเล็กตรอนของธาตุนี้เรียกว่า อิเล็กโตรเนกาติวิตี้ (electronegativity) จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนประจุในนิวเคลียส และระยะระหว่างเวลาenต์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียส ธาตุที่มีจำนวนประจุในนิวเคลียสมาก แต่มีระยะระหว่างเวลาenต์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสห่างกันน้อย จะมีค่าค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี้สูงกว่าธาตุที่มีจำนวนประจุในนิวเคลียสน้อย แต่มีระยะระหว่างเวลาenต์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสห่างกันมาก และถ้าพันธะโคเวเลนต์เกิดจากอะตอมที่มีค่าค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี้เท่ากัน ระยะห่างจากแต่ละอะตอมถึงอิเล็กตรอนคู่ร่วม

พันธะเท่ากัน โมเลกุลมีความสมมาตร เรียกพันธะโคเวเลนต์สักขณะนี้ว่า พันธะโคเวเลนต์ไม่มีข้า และ หากพันธะโคเวเลนต์เกิดจากอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี้ต่างกัน อะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี้มากกว่า จะดึงอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเข้ามาใกล้ตัวมันเอง อะตอมนี้จะแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นลบ และ อะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี้น้อยกว่าจะถูกดึงอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะไป อะตอมนี้จะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวก เราเรียกพันธะโคเวเลนต์ชนิดนี้ว่า พันธะโคเวเลนต์มีข้า สร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล โคเวเลนต์ในโมเลกุลที่ใกล้กัน

สารทุกชนิดมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ สถานะของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ และประเภทของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล โคเวเลนต์ แบ่งได้ดังนี้ คือ แรงлонดอน (London force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงอ่อนๆ เกิดขึ้นในสารทั่วไป และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุลของสาร แรงดึงดูดระหว่างข้า (dipole-dipole force) คือ แรงดึงดูดทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแรงกระทำระหว่างข้าบวกกับข้าลบของโมเลกุลที่มี พันธะโคเวเลนต์มีข้า และท้ายสุด พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond, H-bond) คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากไฮโดรเจนอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์ กับอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี้สูงๆและมีขนาดเล็ก ได้แก่ fluorine (F), oxygen (O) และ nitrogen (N) และเกิดพันธะโคเวเลนต์มีข้าชนิดมีสภาพข้าแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นนี้อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะจะถูกดึงเข้ามาใกล้อะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี้สูง มากกว่าทางด้านอะตอมของไฮโดรเจนมาก และอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี้สูง ยังมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว จึงเกิดดึงดูดกันระหว่างอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว กับอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมีอำนาจไฟฟ้าบวกสูงของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน ทั้งนี้โมเลกุลกลุ่มสารโคเวเลนต์มีข้า จะสามารถยึดเหนี่ยวกันได้ด้วยแรงلونดอนกับแรงดึงดูดระหว่างข้า และเรียกแรง 2 แรงรวมกันว่า แรงวนเดอร์瓦ลส์ ส่วนโมเลกุลไม่มีสภาพข้าดังเช่นน้ำมันกาแฟและไข่เซนในการทดสอบจะสร้างแรงยึดเหนี่ยวจากพันธะไฮโดรเจนได้ดีกว่า

#### 2.1.3.2.2 การแพร่

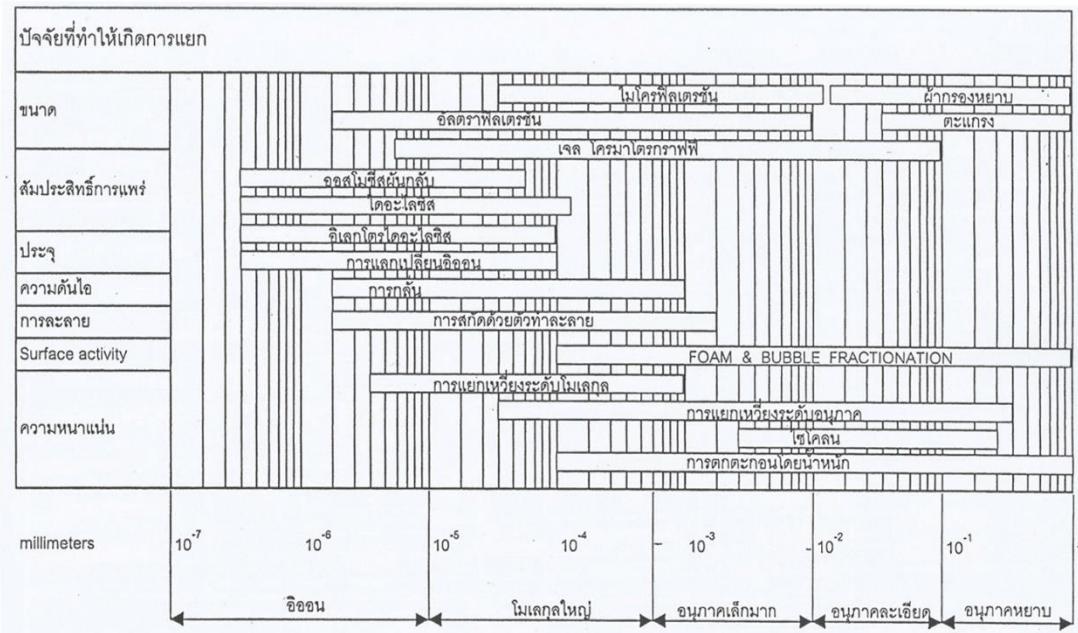
การแพร่ (diffusion) คือการเคลื่อนที่ของอนุภาคสารจากบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นของสารต่ำ โดยอาศัยพลังงานจลน์ของสารเอง กล่าวคือสารตัวถูกจะแพร่ไปยังพื้นที่ของสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า สำหรับกรณีการสกัดแบบ solid-liquid extraction การกวนผสมช่วยเพิ่มโอกาสให้ตัวทำละลายแทรกผ่านและสัมผัสกับตัวถูกจะลดลงได้ดีขึ้น และสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด การเพิ่มความดัน หรือการกวนผสมช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ให้ออนุภาคของกาแฟและอนุภาคของน้ำมันในการกาแฟ และอุณหภูมิสูงขึ้น มีผลทำให้ความหนืดต่ำลง ทั้งหมดนี้ช่วยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการแพร่ดีขึ้น

## 2.2 การกรองและการแยก

การกรอง (filtration) คือ กระบวนการแยก (separation) อย่างหนึ่งจัดอยู่ในการแยกทางกล เพื่อแยกอนุภาคของแข็งที่ไม่ละลาย ซึ่งแขวนลอยอยู่ในสารละลายหรือออกจากส่วนที่เป็นของเหลว โดยให้ของผสมที่มีทั้งส่วนของเหลวและของแข็งที่ไม่ละลาย ไหลผ่านวัสดุกรองซึ่งมีขนาดรูเปิดเล็กกว่าอนุภาคของแข็ง ซึ่งสามารถแยกของเหลวที่ผ่านวัสดุกรอง (filtrate) และอนุภาคของแข็ง ตกค้างบนวัสดุกรอง (residue) ออกจากกัน การพิจารณาเลือกใช้กระบวนการแยกที่เหมาะสมโดยส่วนใหญ่จะพิจารณาจากขนาดอนุภาคเป็นสำคัญ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการและขนาดอนุภาคแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 [45]

### 2.2.1 ความละเอียด

ความละเอียด (fineness) เป็นสมบัติหนึ่งที่ใช้สำหรับวัสดุที่มีลักษณะเป็นผง หรือก้อนขนาดเล็ก โดยความละเอียดถูกจำแนกและเปรียบเทียบขนาดตามลักษณะวิธีการทดสอบ ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทก็จะมีวิธีในการทดสอบ เปรียบเทียบ และวัดค่าความละเอียดแตกต่างกัน การกำหนดขนาดความละเอียดไม่สามารถกำหนดเป็นแบบเฉพาะเจาะจงได้ เนื่องจากอนุภาคของวัสดุโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอนุภาคหลายขนาด ส่วนมากนิยมใช้การร่อนด้วยตระแกรง (sieve analysis) เพื่อกำหนดขนาด เป็นช่วงของความละเอียด หรือ การกระจายความละเอียด (particle size distribution) ขนาดของอนุภาค ที่แบ่งตามการกระจายความละเอียด สามารถแบ่งออกเป็น 3 พากใหญ่ ๆ คือ อนุภาคขนาดใหญ่กว่าขนาด colloidal (non-colloidal size) คือ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 0.2 ไมโครเมตร อนุภาคขนาด colloidal size คือ อนุภาคที่เล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร จนถึง 0.001 ไมโครเมตร และ อนุภาคขนาดโมเลกุล (molecules) คือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.001 ไมโครเมตร ถึง 0.0001 ไมโครเมตร และอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.0001 ไมโครเมตร เรียกว่า อะตอม (atom) [46]



รูปที่ 2.1 การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดอนุภาค [46]

### 2.2.2 การแยกขนาดด้วยตะแกรง

การแยกขนาดด้วยตะแกรง (sieving techniques) เป็นการแยกขนาดของอนุภาคโดยให้วัสดุลอดผ่านรูเปิด (opening) ที่มีการควบคุมด้วยขนาดของตะแกรง漉ด รูเปิดของตะแกรงที่เล็กที่สุดที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมีขนาดรูเปิดสม่ำเสมอประมาณ 37 ไมโครเมตร และด้วยเทคโนโลยี monolithic electrodepositon ในปัจจุบันสามารถทำตะแกรงโลหะที่มีรูเปิดเล็กเท่ากับ 2 ไมโครเมตร โดยขนาดความละเอียดของตะแกรงจะระบุด้วยความถี่ของตะแกรง (mesh size) การแยกด้วยตะแกรง นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย การทำงานไม่ซับซ้อน และราคาถูก [47]

### 2.2.3 ไมโครฟิลเตอร์ชั้น

กระบวนการไมโครฟิลเตอร์ชั้น (microfiltration, MF) [46] เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ ในการแยกสารละลายที่มีตัวถูกละลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก คอนลอยด์ อิมลชั้น หรือสารแขวนลอย โดยความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลายอยู่ในช่วง 1-5 ความดันบรรยากาศ เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตอร์ชั้น มีขนาดรูพุนระหว่าง 0.1-10 ไมโครเมตร ตัวถูกละลายที่ใช้แยกด้วยวิธีนี้มีขนาดเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300,000 ขึ้นไป หนึ่งในวัสดุเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตอร์ชั้นที่ได้รับความนิยมคือ วัสดุเซรามิก เนื่องจากเซรามิกเป็นสารพันธะแข็งแรง มีจุดเด่นที่สำคัญ คือ ทนอุณหภูมิสูง สามารถใช้งานกับสารละลายที่มีอุณหภูมิสูง ใช้ได้กับอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการผ่าเชื้อด้วย

อุณหภูมิสูง ทนต่อตัวกลางที่เป็นสารเคมี ทนต่อสภาพ กรด-ด่าง สามารถใช้ตัวทำละลายทำความสะอาดได้หลายชนิด ทนต่อการถูกทำลายด้วยจุลินทรีย์ มีความทนทานกลสูง และอายุการใช้งานนาน 3-5 ปี แต่ยังมีข้อจำกัดที่ราคาแพงเมื่อเทียบกับวัสดุโพลีเมอร์ประมาณ 10 เท่า และแข็งแต่erasible ทนแรงกระแทก [46]

### 2.3 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองจากตัวแปรต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างรูปแบบสมการที่สามารถคำนวณสัมพันธ์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมสมดุลของตัวแปรนั้น ตัวอย่างเช่น กำหนดตัวแปรอิสระ  $X_1$  และ  $X_2$  ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม  $Y$  สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.1) นักใช้ฟังก์ชันแบบโพลีโนเมียล (polynomial) ลำดับหนึ่ง (first-order) หรือลำดับสอง (second-order) และแสดงผลการตอบสนองและมีลักษณะภาพ 3 มิติของผลตอบสนองโครงสร้างพื้นผิวดังรูปที่ 2.2

$$Y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

โดยที่  $Y$  คือ ปริมาณผลได้  $x_1$  คือ ตัวแปรอิสระที่ 1  $x_2$  คือ ตัวแปรอิสระที่ 2 และ  $\varepsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการสังเกตค่า  $Y$

#### 2.3.1 วิธีการออกแบบการทดลอง

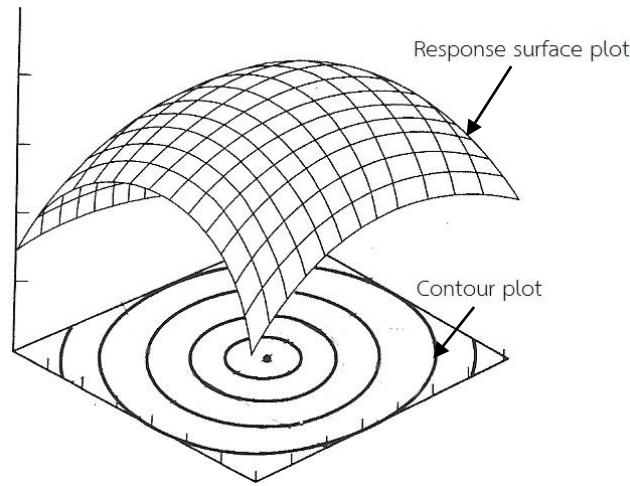
การออกแบบการทดลอง (design of experiment, DOE) ในหลายลักษณะ อาจต้องศึกษาระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโถง (quadratic relationship) เช่น ในการนิยมผลของกระบวนการที่ประกอบด้วยหลายตัวแปร การเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรได้ตัวแปรหนึ่ง ผลตอบสนองโดยรวมอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเส้นตรง แต่มีลักษณะเป็นเส้นโถง การออกแบบการทดลองให้ครอบคลุมทุกตัวแปรสามารถใช้เทคนิค full factorial design (FFD) ในการออกแบบ ซึ่งนิยมกำหนดแบบ  $3^k$  factorial ซึ่งการศึกษาผลที่เกิดจากตัวแปรร่วม 3 ตัวแปร 4 ตัวแปร 5 ตัวแปร มีจำนวนการทดลองเท่ากับ  $3^3$   $3^4$   $3^5$  หรือ 27 การทดลอง 81 การทดลอง และ 243 การทดลอง เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปการทดลองจำนวนมากไม่เหมาะสมในงานอุตสาหกรรม หรืองานที่ต้องใช้เวลา ทรัพยากรและต้นทุน ในการทดลอง จึงมีการพัฒนาการออกแบบ central composite design (CCD) จากพื้นฐานแบบ FFD ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

การทดลองแบบส่วนประสมกล่าง central composite design, CCD (หรือ box-wilson design) กรณีเป็นการทดลองที่ 3 ระดับ (แทนตัวแปรด้วยค่า coded level เท่ากับ -1, 0, +1) คือ จะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไปตัวแปรละ 3 ค่า แต่แทนที่จะปรับตัวแปรแบบ full combination หรือ full factorial กลับเลือกบางสภาวะการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอ ต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดย model ที่ได้จะยังคงมีทั้ง main effect, interaction และ quadratic terms โดยใช้ทรัพยากรไม่มากจนเกินไป โดยตัวอย่าง CCD ที่ศึกษาตัวแปร 3 ตัว ในการออกแบบ DOE จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ factorial points คือการนำ 2-level จาก FFD มาเป็น ส่วนหนึ่งของการทดลอง ถัดมากำหนด axial points เป็นการปรับค่าตัวแปรโดยตัวแปรหนึ่งในขณะที่ กำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นคงที่อยู่ที่ค่ากลาง (หรือค่า coded level เท่ากับ 0) และ center points เป็น การปรับค่าของตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง (หรือค่า coded level เท่ากับ 0) [48]

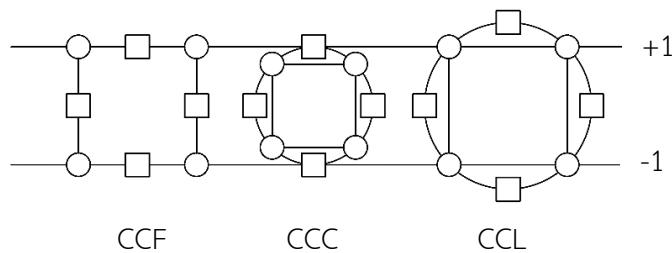
เมื่อพิจารณา factorial points และ axial points สามารถกำหนดรูปแบบการ พิจารณาได้ดังนี้ (ตามรูปที่ 2.3) แบบที่ 1 คือ face centered เป็นการกำหนดให้จุดการทดลองบน axial points อยู่บนขอบที่เกิดจาก factorial points รอบ center points การพิจารณาในแต่ละตัว แปรจะเท่ากับ 3 ระดับ สามารถลดจำนวนการทดลองลงได้เนื่องจากมีจุดการทดลองที่ใช้ร่วมกัน แบบ ที่ 2 คือ inscribed เป็นการพิจารณาการทดลองห่างจากค่ากลางเท่ากันทั้งหมด ซึ่งต้องแนใจว่า การทดลองที่ให้ผลได้สูงสุดต้องอยู่ในช่วงแกน axial points ที่กำหนดนี้ การพิจารณาในแต่ละตัวแปรจะ เท่ากับ 5 ระดับ และ แบบที่ 3 คือ circumscribed ลักษณะคล้ายแบบ inscribed ซึ่งต้องแนใจว่า การทดลองที่ให้ผลได้สูงสุดต้องอยู่ ระหว่าง factorial points -1 ถึง +1 ทุกตัวแปร การพิจารณาใน แต่ละตัวแปรจะเท่ากับ 5 ระดับ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีการทดลองประกอบด้วย 2 ตัวแปรอิสระ จำนวนการทดลองจาก factorial points คือ (-1,-1), (+1,-1), (-1,+1), (+1,+1) และ axial points คือ (- $\alpha$ , 0), (+ $\alpha$ , 0), (0, - $\alpha$ ), (0, + $\alpha$ ) และค่ากลาง (center point) คือจุด (0,0) เมื่อพิจารณาแต่ละ แกนการทดลองจะได้ 5 ระดับคือ (- $\alpha$ , -1, 0, +1, + $\alpha$ ) ตามลำดับ ทั้งนี้  $\alpha$  (alpha) คือ ค่าระยะจาก axial point ไปยัง center point สามารถหาที่เหมาะสมจากสมการที่ (2.2)

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ จุดบนแกน  $k$  คือ จำนวนตัวแปรอิสระ



รูปที่ 2.2 ลักษณะกราฟพื้นผิวตอบสนอง  
ที่มา ดัดแปลงจาก [49]

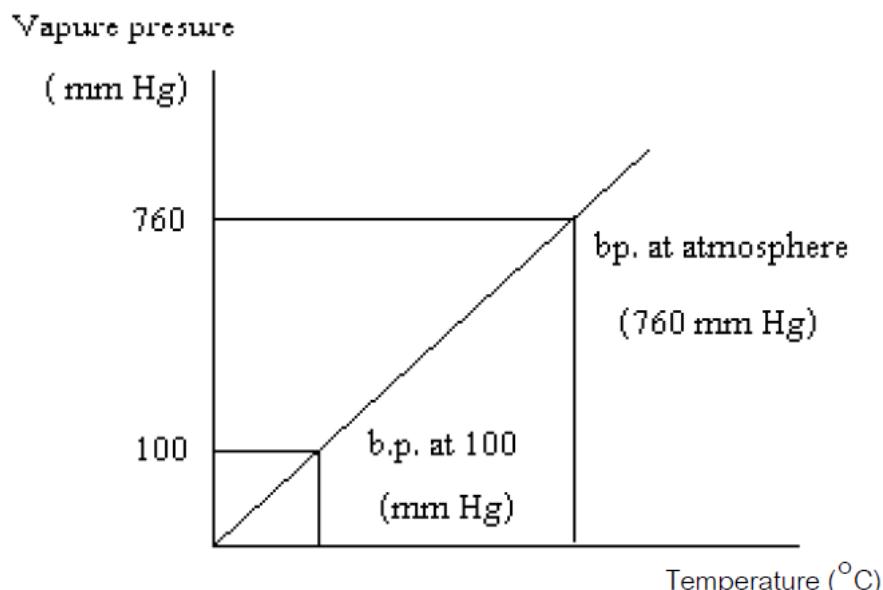


รูปที่ 2.3 การออกแบบการทดลอง central composite design  
ที่มา ดัดแปลงจาก [50]

#### 2.4 การกลั่น

การกลั่น เป็นวิธีการทำสารให้บริสุทธิ์ ซึ่งสำคัญความแตกต่างของความดันไอของสารในของผสม เมื่อของเหลวได้รับพลังงานความร้อนจะสั่นสะเทือนโมเลกุลและทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกระทั้งกล้ายเป็นไอ เมื่อความดันไอของเหลว เท่ากับความดันบรรยากาศหนึ่งของเหลวนั้น พอดี ของเหลวจะเดือด จุดเดือดของของเหลวเดียว จึงเป็นอุณหภูมิที่ของเหลวและไออยู่ในสภาวะสมดุล โดยปกติการวัดจุดเดือดจะวัดเมื่อของเหลวมีความดันไอเท่ากับ 1 บรรยากาศ หรือ 760 托ร์ (1 torr = 1 mm Hg) จุดเดือดนี้จะเรียกว่าจุดเดือดปกติ (ซึ่งถ้าทำการทดลองหากจุดเดือดของสารในที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศปกติ จุดเดือดของสารก็จะต่ำลงด้วย) รูปที่ 2.4 จากสถานะไอ

ของสารผสม เมื่ออุณหภูมิลดลง ของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะกลั้นแยกตัวออกมาก่อน ซึ่งโดยปกติ แล้วของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะเดือดกลایเป็นไอก่อน และแยกไอน้ำควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวให้หลงในภาชนะอีกใบหนึ่ง ซึ่งการแยกในลักษณะนี้จะได้สารที่มีความบริสุทธิ์สูงหากจุดเดือดของสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันมาก (แตกต่างเกิน  $100^{\circ}\text{C}$ ) การเก็บของเหลวจะเก็บไว้ตามแต่ ละจุดเดือดของของเหลวแต่ละตัวในของผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การกลั้นอย่างง่ายเพื่อดึงสารทำ ละลายออกจากของผสมระหว่างตัวทำละลายและน้ำมันกาแฟ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ [51]



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของสารกับความดันบรรยากาศ [51]

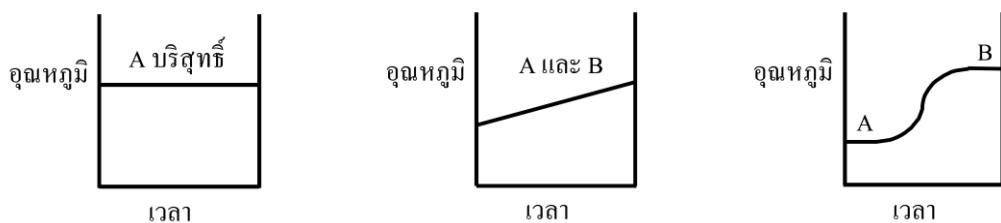
#### 2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือดของของเหลว

จุดเดือดของของเหลวบริสุทธิ์ใดๆ มีค่าคงที่เฉพาะตัวที่ความดันค่าหนึ่ง โดยปัจจัย ที่ทำให้สารมีจุดเดือดปกติต่างกันคือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (intermolecular force) ซึ่งมีผลมา จากค่าอิเล็กโตรเนกติกวิตตี้ (electronegativity) ของธาตุองค์ประกอบ น้ำหนักโมเลกุล (molecular mass, MM) ขนาดและรูปร่างของโมเลกุล (size and shape) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแบ่งตาม ลักษณะการเกิดแรงได้หลายชนิด ได้แก่ แรงلونดอน (London force or dispersion force) และ เนนียวน์ (debye force or dipole-induce dipole force) และดึงดูดระหว่างขี้ว (dipole-dipole force) ทั้ง 3 ชนิดรวมเรียกว่า แรงแวนเดอร์วัลส์ (van der Waals force) และสุดท้ายคือ แรงที่เกิด จากพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ซึ่งแรงแต่ละชนิดมีขนาดต่างกันและส่งผลโดยรวมให้จุดเดือดของสารต่างกัน เช่น สารมีขี้วมีจุดเดือดสูงกว่าสารไม่มีขี้ว เพราะมีแรงแวนเดอร์วัลส์มีค่าสูง กลุ่ม สารไฮโดรคาร์บอน ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) จัดอยู่ในประเภทไม่มีขี้วมีแรงดึงดูดแบบแรงلونดอนเพียงอย่างเดียวจะมี

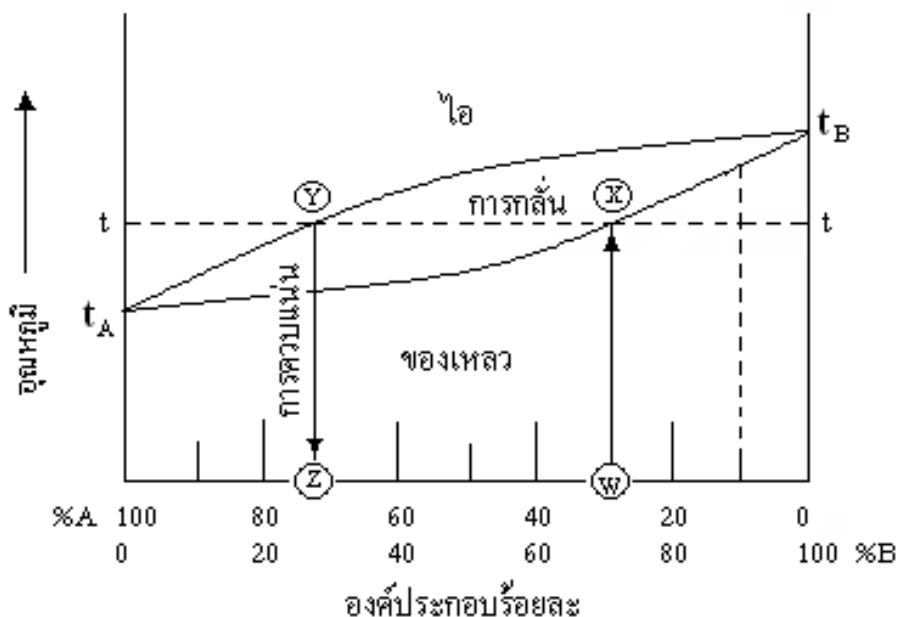
จุดเดือดต่ำโดยที่โมเลกุลขนาดเล็กกว่า (มีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่า) จะมีจุดเดือดที่ต่ำกว่า และกรณีกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid, HF) ที่อะตอมมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงกว่าน้ำ ( $H_2O$ ) แต่กลับมีจุดเดือดที่ต่ำกว่า เนื่องจากพันธะไฮโรเจนเกิด 1 พันธะต่อมोเลกุล ในขณะที่น้ำเกิด 2 พันธะต่อโมเลกุลซึ่งโดยรวมทำให้เกิดแรงยึดที่สูงกว่า เป็นต้น

#### 2.4.2 การกลั่นอย่างง่าย

การกลั่นอย่างง่าย [51] เป็นการกลั่นภายใต้ความดันปกติ (1 บรรยากาศ) โดยเมื่อกลั่นของเหลวบริสุทธิ์ ไอของของเหลวจะผ่านไปยังตัวควบแน่นกล้ายเป็นของเหลว อุณหภูมิระหว่างการกลั่นของเหลวบริสุทธิ์จะคงที่ตลอดเวลา (รูปที่ 2.5 ซ้าย) เมื่อกลั่นของเหลวผสมที่มีจุดเดือดต่างกันไม่มากนัก อุณหภูมิมักไม่คงที่ แต่เพิ่มขึ้นตลอดการกลั่นเนื่องจากองค์ประกอบของไอที่กลั่นสัดส่วนของสาร A และ B มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการกลั่น (รูปที่ 2.5 กลาง) เมื่อกลั่นของเหลวผสมสองชนิดที่มีจุดเดือดต่างกันมาก (รูปที่ 2.5 ขวา) อุณหภูมิจะคงที่ที่จุดเดือดของของเหลวทั้งสอง การแยกจะเกิดขึ้น เมื่อกลั่นของเหลวผสม องค์ประกอบของไอที่สมดุลกับสารละลายที่ร้อนจะแสดงตั้งรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นแผนผังวัฏจักรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไอของของเหลวของระบบสองส่วนประกอบอยู่ ( $A + B$ ) โดย  $tA$  และ  $tB$  คือจุดเดือดของสาร A และสาร B ตามลำดับ

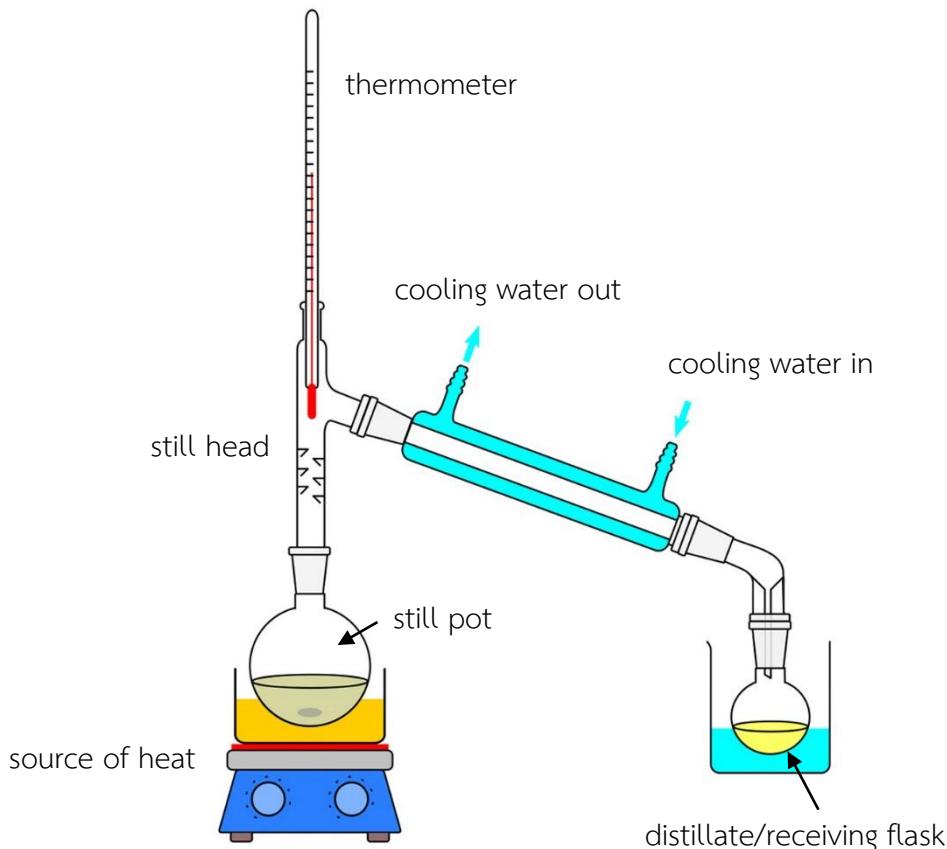


รูปที่ 2.5 พฤติกรรม 3 แบบของอุณหภูมิขณะกลั่นแบบธรรมด้า [51]



รูปที่ 2.6 เฟสไดอะแกรมของ vapor-liquid ของของเหลว 2 ชนิดผสมกัน [51]

จากรูปที่ 2.6 ของเหลวที่มีองค์ประกอบ W (30% A, 70 % B) ถูกให้ความร้อนจนเริ่มระเหยกล่ายเป็นไอที่อุณหภูมิ  $t$  ที่จุด X และจะกล่ายเป็นไอทั้งหมดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อลดอุณหภูมิลง ไอจะเริ่มกลับตัวโดยสาร B ที่จุดเดือดสูงกว่า จะกลับตัวในอัตราที่มากกว่าจันกระหั่งจุด Y ที่อุณหภูมิ  $t$  เดียวกัน สารประกอบจะมีองค์ประกอบ Z (70% A และ 30% B) ด้วยเหตุนี้ สารละลายบางประเภทจึงไม่สามารถแยกสารผสมได้อย่างสมบูรณ์โดยการกลับแบบธรรมดा แต่ต้องใช้การกลับแบบลำดับส่วนเพื่อยกสารให้มีความบริสุทธิ์ตามต้องการ อย่างไรก็ตามการแยกของเหลวโดยวิธีกลับแบบธรรมดาก็ได้สารค่อนข้างบริสุทธิ์สามารถทำได้ 2 กรณี กรณีแรกเมื่อจุดเดือดของสาร A และ B แตกต่างกันค่อนข้างมาก (ประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$ ) กรณีที่สองเมื่อสาร A มีสาร B ปนอยู่เล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 10) และได้แสดงเครื่องมือกลับน้อยอย่างง่ายไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องมือการกลั่นอย่างง่าย [49]

## 2.5 การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

ต้นทุนการผลิตรวมหรือต้นทุนรวม (total cost, TC) แบ่งตามลักษณะการผลิตสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ ต้นทุนคงที่ (fixed cost, FC) เป็นต้นทุนที่ไม่แปรผันไปตามปริมาณการผลิต แม้ว่าจะผลิตมากหรือน้อย หรือไม่ผลิตเลย ก็จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายประเภทนี้ เช่น ค่าเครื่องสกัด ค่า ก่อสร้างโรงงาน อีกประเภทคือ ต้นทุนแปรผัน (variable cost, VC) เป็นต้นทุนที่แปรผันตามปริมาณ จำนวนการผลิต และไม่มีค่าใช้จ่ายหากไม่ผลิต เช่น ค่าแรงงาน ค่าไฟฟ้า ค่าสาธารณูปโภค ฯลฯ ที่มีส่วนใหญ่เสียในการผลิต เป็นต้น ทั้งสองประเภทรวมกันเรียกว่าต้นทุนรวม (total cost, TC) แสดงตามสมการที่ (2.3) สำหรับ ต้นทุนน้ำมันสกัดจากการผลิตอ่อนไหว (quantity, Q) หลังจากการลงทุน พิจารณาจาก ต้นทุนแปรผันเฉลี่ย (average variable cost, AVC) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.4)

$$TC = TFC + TVC \quad (2.3)$$

$$AVC = \frac{TVC}{Q} \quad (2.4)$$

โดยที่  $TC$  คือ ต้นทุนรวม (total cost)  $TFC$  คือ ต้นทุนคงที่รวม (total fixed cost)  $TVC$  คือ ต้นทุนแปรผันรวม (total variable cost)  $AVC$  คือ ต้นทุนแปรผันเฉลี่ย (total variable cost) และ  $Q$  คือ ปริมาณผลผลิต (quantity)

## บทที่ 3

### การออกแบบอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วน โดยในส่วนแรกเป็นการทดสอบสภาพที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันกาแฟในระดับห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสู่การออกแบบเครื่องสกัดน้ำมัน และศึกษาสภาพที่เหมาะสมในการสกัดด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมัน

###### 3.1.1.1 วัตถุดิบ

กาแฟสายพันธุ์อาราบิกาหลังจากการซองด้วยวิธีอสเพรสโซ

###### 3.1.1.2 สารเคมีใช้ในกระบวนการสกัด

3.1.1.2.1 เยกเซนเกรดเชิงทางการค้า (29.7 wt.% commercial grade of hexane)

3.1.1.2.2 เอทานอลปราศจากน้ำเกรดเชิงทางการค้า (99.9 wt.% commercial grade of anhydrous ethanol)

3.1.1.2.3 เอทานอลเกรดเชิงทางการค้า (95 vol.% commercial grade of hydrous ethanol)

3.1.1.2.4 เมทานอลเกรดเชิงทางการค้า (99.9 vol.% commercial grade of methanol)

###### 3.1.1.3 สารเคมีใช้ในกระบวนการวิเคราะห์

3.1.1.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.1.1.3.2 ไอโซโพพานอล

3.1.1.3.3 พีนอลฟทาลีน

### 3.1.1.4 อุปกรณ์ในการสกัดน้ำมัน

3.1.1.4.1 ขวดรูปซมพู'

3.1.1.4.2 กรวยแก้ว

3.1.1.4.3 บีกเกอร์

3.1.1.4.4 เตาให้ความร้อนแบบมีเครื่องควบคุมด้วยแม่เหล็ก

3.1.1.4.5 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ความละเอียด 11  $\mu\text{m}$  W. & R. Balston Ltd. Genuine

3.1.1.4.6 เตาอบไฟฟ้า

3.1.1.4.7 เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ความละเอียด 0.0001 กรัม  
model: AL204 Mettler-Toledo

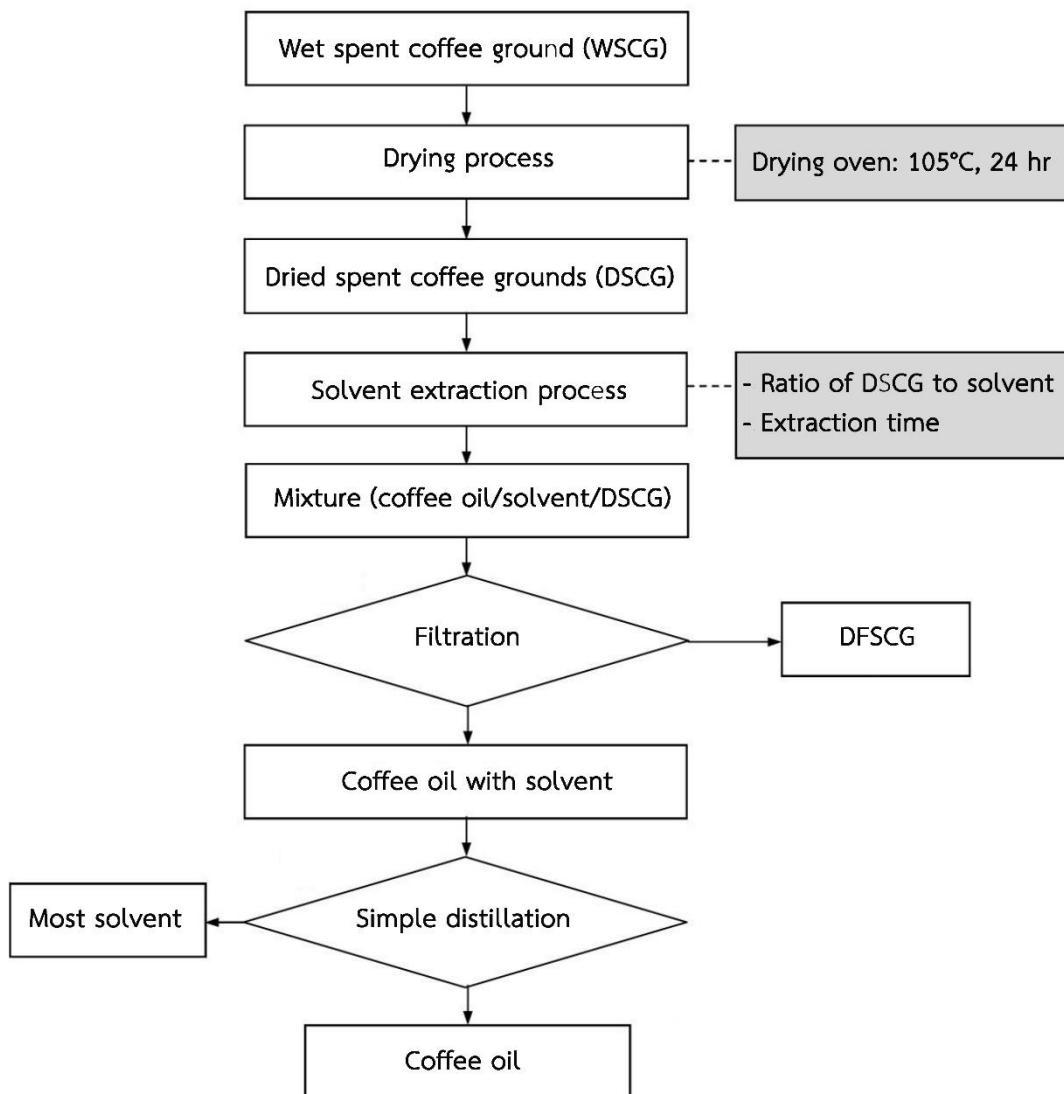
3.1.1.4.8 แผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์

## 3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบในกาภากาแฟและน้ำมันกาไฟ

การหาค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) โดยใช้เทคนิค calorific method ในการตรวจสอบด้วยเครื่อง IKA ® Calorimeter System C5000 control, Germany การหาปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ในไตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ CHNS-O analyzer CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy การหาขนาดอนุภาค particle-size distribution (PSD) โดยวัดการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำด้วยลำแสงเลเซอร์ ด้วยเครื่อง laser particle size analyzer, LS 230, Coulter, USA การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (acid value) เพื่อหาค่าความเป็นกรด (acid value, AV) ด้วยวิธี American Oil Chemists' Society Official Method Cd 3a-63 การวิเคราะห์ประเภทกรดไขมันในน้ำมันสกัด โดยใช้วิธี gas chromatograph-flame ionization detector (GC-FID) ด้วยเครื่อง gas chromatograph, HP 6850, Hewlett Packard, USA การหาปริมาณเถ้า (ash) โดยวิธี AOAC 942.05 (gravimetric method) ด้วยเครื่อง Balance 4-digit, ME2358, Sertorius, Germany โปรดตีน ไขอาหาร วิเคราะห์โดยวิธี AOAC 984.13 (Kjeldahl method) และ Fiber Analyzers (ANKOM200) ตามลำดับ การทดสอบความบริสุทธิ์ของตัวทำละลาย โดยใช้วิธี GC-FID ด้วยเครื่อง gas chromatograph, HP 6890, Agilent, USA

### 3.3 ขั้นตอนการทดลองแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนการสกัดแสดงได้ตามแผนผังในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนแรกนำกาแฟเหลือทิ้งหลังการสกัดน้ำกาแฟออกไปใช้งานด้วยวิธีอสเพรสโซจากในร้านจำหน่ายกาแฟสดมากำจัดความชื้นด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้กาแฟเหลืองเพื่อเป็นวัตถุติดตั้งต้นในการสกัดด้วยตัวทำละลายเริ่มจากนำกาแฟเหลือง 10 กรัม และตัวทำละลายปริมาณตามสัดส่วนที่ออกแบบ (กรัม) ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มล. ใส่แท่งแม่เหล็กวนสาร (magnetic bar) และปิดภาชนะด้วยแผ่นอลูมิเนียมพอยล์เพื่อป้องกันการระเหย จากนั้นกวนผสมกาแฟและตัวทำละลายภายใต้เครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็ก (magnetic stirrer) โดยใช้เวลาและความเร็วรอบที่กำหนดภายใต้อุณหภูมิห้องเมื่อเสร็จสิ้นการกวนผสมแล้ว แยกกาแฟปราศจากน้ำมันออกจากของผสมด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เก็บลงในขวดรูป楚มพู่ขนาด 250 มล. ของเหลวใสที่ผ่านกระดาษกรองคือตัวทำละลายปนน้ำมันกาแฟ (miscella) เข้าสู่กระบวนการสุดท้ายคือแยกตัวทำละลายออกจากน้ำมันด้วยการกลั่นอย่างง่าย ของเหลวส่วนที่เหลือในขวดรูป楚มพู่ภายหลังการกลั่น คือน้ำมันกาแฟบริสุทธิ์ ซึ่งน้ำหนักน้ำมันกาแฟด้วยเครื่องชั่งความละเอียดศูนย์ 4 ตำแหน่งและบันทึกค่าทั้งนี้เอกสารจากกระบวนการกรองคืนสามารถนำมาใช้เป็นตัวทำละลายช้าภายหลังได้อีกสำหรับการสกัดครั้งถัดไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ

### 3.3.1 การวางแผนการทดลอง

จากการตรวจสอบเอกสาร สามารถตั้งสมมติฐานถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสกัด ได้แก่ ประเภทตัวทำละลาย อัตราส่วนผสมระหว่างตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแฟและในการสกัด เวลาในการสกัด ความรุนแรงในการกรองผสาน อุณหภูมิ และความดันในการสกัด โดยในการสกัดแต่ละ ปัจจัยมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน มีผลทำให้ปริมาณผลได้ของน้ำมันที่แตกต่างกันซึ่งปัจจัยในกระบวนการ สกัดสามารถนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้ในระดับชุมชนหรือระดับอุตสาหกรรมตามความ เหนี่ยวแน่นของต้นทุนและความต้องการของแต่ละระดับที่แตกต่างกัน

สำหรับการทดสอบปัจจัยอุณหภูมิ และ ความดัน ออกรูปแบบการสกัดตามหัวข้อ 3.3 ขั้นตอนการทดลองแบบง่ายในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเพิ่มอุปกรณ์อ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิในขั้นตอนการสกัด โดยควบคุมการสกัดที่อุณหภูมิ 40-60°C และสกัดในชุดรูปซึ่งปิดสนิทด้วยจุกยางเปรียบเทียบกับอุณหภูมิบรรยายกาศ พบร่วมกับการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ตัวทำละลายในกระบวนการสกัดระเหยกล้ายเป็นไอ เกิดแรงดันไออัดแน่นในชุดทดลอง เมื่อเปิดจุกยางเพื่อเตรียมเทองผสานผ่านกระดาษกรอง จะเกิดไโอเรเยของเอกเซนจำนวนมากพุ่งออกมายากหาด เมื่อกรองเสร็จแล้วเสร็จจะเหลือ miscella และน้ำมันกาแฟหลังการอุ่นแยกในปริมาณน้อยกว่าการสกัดลักษณะเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหากพิจารณาการอกรูปแบบเครื่องสกัดและวิธีการทำงานเพื่อป้องกันการสูญเสียจากการระเหย อาจมีความซับซ้อนใช้งานยากและมีราคาสูง ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิต้องใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายแก่ระบบสกัด อีกทั้งการอกรูปแบบชุดสกัดที่สามารถอุณหภูมิและแรงดันสูงให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน จำเป็นต้องออกแบบให้ถังมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ทุกชิ้นต้องกันรั่วซึ่งของก๊าซและทนต่อแรงดัน มีอุปกรณ์ระบายน้ำแรงดันหากเกิดแรงดันส่วนเกิน ซึ่งทำให้เครื่องสกัดมีราคาโดยรวมสูง อีกทั้งไอสารเคมีขณะใช้งานเครื่องเป็นก๊าซไวไฟและเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจทำให้ความปลอดภัยในการใช้งานลดลง ซึ่งเหตุผลข้างต้นทำให้ลักษณะปัจจัยอุณหภูมิและความดันในการพัฒนาเครื่องสกัดน้ำมันจากกาแฟ

### 3.3.2 การหาส่วนที่เหมาะสมในการสกัด

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยวิธีสกัดแบบ solid-liquid extraction กระทำโดยใช้เทคนิค RSM และ แผนการทดลองแบบ central composite design (CCD) ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง จากการตรวจสอบเอกสารและการทดลองเบื้องต้นทราบว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อปริมาณผลได้ของน้ำมัน (oil yield) คือ อัตราส่วนผสมระหว่างกาแฟและตัวทำละลายในการสกัด และ เวลาในการสกัด ซึ่งอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (3.1) และสมการปริมาณผลได้ของน้ำมันได้แสดงในสมการที่ (3.2)

$$Y = f(R, T) \quad (3.1)$$

โดยที่  $Y$  คือ ปริมาณผลได้น้ำมันกาแฟ  $R$  คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟ กาแฟแห้ง และ  $T$  คือ ระยะเวลาในการสกัด

$$Y = \frac{W_{CO}}{W_{DSCG}} \times 100\% \quad (3.2)$$

โดยที่  $Y$  คือ ปริมาณผลได้โดยมวลของน้ำมันกาแฟ (wt.%)  $W_{CO}$  คือ มวลน้ำมันกาแฟ (g) และ  $W_{DSCG}$  คือ มวลกาแฟแห้ง (g)

การออกแบบแผนการทดลองแบบ CCD กรณีที่ 2 ตัวแปรอิสระ การออกแบบประกอบด้วย 5 ระดับปัจจัย คือ (-1.414, -1, 0, +1, +1.414) และจุดศูนย์กลางจะกระทำชำ້າ 4 การทดลอง โดยใช้โปรแกรม essential experimental design 2.216 and essential regression 2.220 จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง ทั้งนี้จากการทดสอบสกัดเบื้องต้นสามารถกำหนดค่าของ experimentation ที่ดีที่สุดได้ โดยกำหนดให้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้ง ตั้งแต่ 5.1 ถึง 24.9 ( $\text{g.g}^{-1}$ ) และ ระยะเวลาในการสกัดตั้งแต่ 0.2 ถึง 39.8 นาที ซึ่งสามารถแสดงแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆตามช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	หน่วย	ระดับของตัวแปรอิสระ				
		-1.414	-1	0	+1	+1.414
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่ง $\text{g.g}^{-1}$	หน่วยมวลกาแฟแห้ง	5.1	8	5	22	24.9
เวลาในการสกัด	นาที	0.2	6	20	34	39.8

นอกจากนั้นกรณีใช้ตัวทำละลายต่างชนิดกันให้ความสามารถในการสกัดน้ำมันต่างกัน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดกับตัวแปรอิสระทั้ง 2 จึงอาจมีความแตกต่างกัน และสำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพื่อเปรียบเทียบตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ เอกเซน (hexane) เอทานอล ปราศจากน้ำ (anhydrous ethanol) เอทานอล (hydrous ethanol) และเมทานอล (methanol)

### 3.3.3 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์

การหารูปแบบสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระ ได้ใช้เทคนิค response surface methodology (RSM) ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ multiple regression ในการวิเคราะห์รูปแบบ second-order model ซึ่งมีรูปแบบสมการทั่วไปดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.3)$$

โดยที่  $y$  คือ ผลตอบสนอง  $k$  คือ จำนวนตัวแปรอิสระ  $\beta_0, \beta_i, \beta_j$  และ  $\beta_{ij}$  คือ ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์พจน์ ตัวแปรกำลังหนึ่ง ตัวแปรกำลังสอง และ ตัวแปรร่วม ตามลำดับ  $\beta_0$

### 3.3.4 การสกัดช้ำด้วยตัวทำละลายน้ำมัน

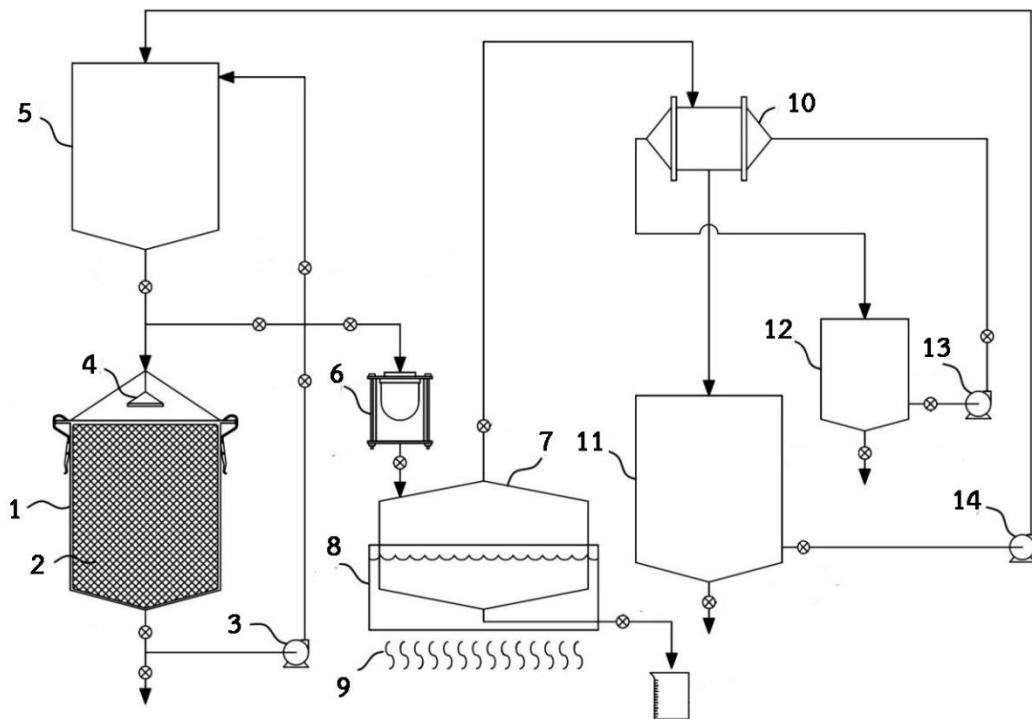
หากพิจารณาถึงพลังงานในการสกัดน้ำมันจากการกาแฟ การใช้พลังงานอุ่นแยกตัวทำละลายออกจากน้ำมันต้องใช้พลังงานมากส่งผลต่อต้นทุนที่มากขึ้นเช่นกัน การใช้ตัวทำละลายปนน้ำมัน (miscella) ทำการสกัดน้ำมันจากการกาแฟชุดใหม่ชั้นกรองทั้ง miscella สกัดน้ำมันออกจากกาแฟ Jen อีมตัว แล้วทำการอุ่นแยกในครั้งเดียวจะเป็นแนวทางที่จำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อช่วยลดต้นทุนในการสกัดโดยรวม จึงออกแบบการทดลองเริ่มจากเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดในห้องปฏิบัติการจากหัวข้อที่ 3.3.3 โดยขั้นตอนการทดลองเก็บ miscella ไว้ไม่ทำการอุ่นไليسายหลังสกัดน้ำมันกาแฟเสร็จแล้วของแต่ละรอบสกัด จากนั้นนำ miscella ที่ได้จากการอบก่อนหน้าทำการสกัดช้ำโดยใช้กาแฟชุดใหม่ในรอบถัดไปโดยควบคุมปริมาณกาแฟต่อ miscella ให้ได้ตามสัดส่วนที่กำหนด แล้วแบ่ง miscella ในแต่ละรอบใส่ขวดรูปทรงพู่ปริมาณ 100 กรัม จากนั้นอุ่นไليسายเซนและหาประมาณน้ำมันสะสมใน miscella ของแต่ละรอบการสกัดช้ำด้วยตัวทำละลายในระดับห้องปฏิบัติการ

## 3.4 การสกัดน้ำมันจากการกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

ได้แสดงแผนภาพกระบวนการสกัดน้ำมันจากการกาแฟด้วยระบบหมุนวนตามรูปที่ 3.2 โดยขั้นตอนในการสกัดน้ำมันกาแฟ เริ่มจากเตรียมกาแฟแห้งสำหรับตั้งตะแกรงกรอง (หมายเลข 2) ซึ่งอยู่ภายในถังหมุนวน (หมายเลข 1) โดยมีความละเอียด 25 มิลลิเมตร จึงทำให้กาแฟส่วนใหญ่ยังอยู่ในตะแกรงดังกล่าว เปิดเครื่องสกัดน้ำมันโดยตัวทำละลายจะถูกปั๊มจากถังเก็บตัวทำละลายบริสุทธิ์ (หมายเลข 11) ไปในถังเก็บ miscella (หมายเลข 5) ตามอัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้งจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองระดับห้องปฏิบัติการด้วยปั๊มสารเคมี (หมายเลข 14) จากนั้นปล่อยตัวทำละลายบริสุทธิ์ลงไปผสมกับกาแฟในถังหมุนวน ปรับทิศทางว่าล้วงบังคับให้ตัวทำละลายไหลออกทางด้านล่างลงสู่ถังหมุนวนโดยปล่อยออกบริเวณส่วนบนถังด้วยหัวพ่นฟอย (หมายเลข 4) และเปิดปั๊มหมุนวน (หมายเลข 3) ทำการสกัดน้ำมันกาแฟตามเวลาที่กำหนด จากนั้นปิดปั๊ม ปรับทิศทางว่าล้วง แล้วใช้ปั๊มตัวเดิม (ปั๊มหมุนวน) สรู miscella จากก้นถังหมุนวนไปสู่ถังเก็บ

miscella (หมายเลขอ 5) เพื่อเตรียมใช้สกัดข้าในรอบต่อไป เปลี่ยนจากการแพฟชุดใหม่โดยเปิดฝาถังหมุน วนและยกถังตะแกรง (หมายเลขอ 2) พร้อมการซุดเก่าออก ใส่ตะแกรงและการการแพฟชุดใหม่และเริ่ม กระบวนการสกัดเช่นเดิมอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนกระทั่งมีน้ำมันกาแฟหลายอยู่ใน miscella มากพอ และในรอบสุดท้ายปรับทิศทางวาร์วเพื่อสูบ miscella จากด้านล่างถังหมุนวนเข้าสู่ชุดกรองละเอียด (หมายเลขอ 6) ซึ่งมีความละเอียด 10 ไมโครเมตร และผ่านไปเก็บไว้ในถังอุ่นໄล์ชั้นใน (หมายเลขอ 7) การอุ่นໄล์ตัวทำละลายจะใช้ความร้อนจากเตาแก๊สหุงต้ม (หมายเลขอ 9) ผ่านมาอย่างถังน้ำร้อนชั้นนอก ของถังอุ่นໄล์ (หมายเลขอ 8) ซึ่งบรรจุน้ำไว้จากนั้นน้ำร้อนถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ miscella ภายในถังอุ่น ໄล์ (หมายเลขอ 7) ในต่อไป เมื่อตัวทำละลายที่อยู่ใน miscella ได้รับความร้อนก็จะระเหยและ ควบแน่นในชุดกลั่นคืนตัวทำละลาย (หมายเลขอ 10) ตกลงสู่ถังเก็บตัวทำละลายบริสุทธิ์ (หมายเลขอ 11) และส่วนที่เหลือในถังอุ่นໄล์คือน้ำมันกาแฟบริสุทธิ์ถ่ายออกตัวยวาร์วกันถัง สำหรับระบบประbay ความร้อน น้ำจะถูกสูบจากถังน้ำระบายน้ำร้อน (หมายเลขอ 12) ด้วยปั๊มน้ำ (หมายเลขอ 13) เข้าสู่ชุด กลั่นคืนตัวทำละลาย (หมายเลขอ 10) และให้หลักลับมายังถังน้ำระบายน้ำร้อน (หมายเลขอ 12) โดย กระบวนการทั้งหมดนี้สามารถใช้กับตัวทำละลายอื่นๆได้ เช่น เอทานอล และ เมทานอล เป็นต้น

เครื่องสกัดน้ำมันแบบหมุนวนที่ได้จัดสร้างทำจากวัสดุสแตนเลส ขนาดฐานเครื่อง ความ กว้าง ความยาว และ ความสูง เท่ากับ 1.2 เมตร 1.5 เมตร และ 1.65 เมตรตามลำดับ ประกอบด้วย ระบบสกัดแบบหมุนวน ระบบสกัดข้า ระบบกรอง และระบบกลั่นคืนตัวทำละลาย ตั้งแสดงในรูปที่ 3.3 ขนาดถังสกัดมีขนาดความจุ 40 ลิตร ออกแบบให้สอดคล้องกับผลการศึกษาตามเงื่อนไขที่ เหามาสมของการสกัดน้ำมันในห้องปฏิบัติการ โดยเครื่องสกัดที่เป็นแบบหมุนวนนี้ สามารถสกัดน้ำมัน ได้ 142 กรัม (153.51 มิลลิลิตร) จากกาแฟ 1,200 กรัม สามารถเพิ่มกาแฟแพแห้งได้มากกว่า ปริมาณตั้งกล่าวแต่ต้องลดปริมาณตัวทำละลาย เนื่องจากระบบสกัดน้ำมันแบบหมุนวนมีความจุ 40 ลิตร แต่การลดปริมาณตัวทำละลายอาจจะทำให้ปริมาณผลได้ของน้ำมันลดลงได้และได้เขียนแบบ เครื่องสกัดน้ำมันแบบหมุนวนในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.2 แผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันจากการกำจัดด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

(1 คือ ถังสกัดหมุนวน 2 คือ ถังตะแกรงกรองสแตนเลสขนาดความลึกเอียง 25 ไมโครเมตร 3 คือ ปั๊มหมุนวน 4 คือ หัวพ่นฟอย 5 คือ ถังเก็บ miscella 6 คือ ชุดกรองละเอียดขนาดความลึกเอียง 10 ไมโครเมตร 7 คือ ถังอุ่นไอลีชั่นใน 8 คือ ถังน้ำร้อนชั่นนอก 9 คือ แหล่งความร้อนอุ่นไอลีตัวทำละลาย 10 คือ ชุดกลั่นคืนตัวทำละลาย 11 คือ ถังเก็บตัวทำละลายบริสุทธิ์ 12 คือ ถังน้ำระบายน้ำร้อน 13 คือ ปั๊มน้ำ และ 14 คือ ปั๊มสารเคมี)



รูปที่ 3.3 ภาพเครื่องสกัดน้ำมันจากการกาแฟแท้ บวมานกาแฟ 1,200 กรัม  
 (1 คือ ถังสกัดหมุนวน 2 คือ ปั๊มหมุนวน 3 คือ ถังตะแกรงสแตนเลสขนาดความล瑜เอียด 25  
 ไมโครเมตร 4 คือ ถังเก็บ miscella 5 คือ ชุดกรองละเอียดขนาดความล瑜เอียด 10 ไมโครเมตร 6 คือ  
 ถังอุ่นไอลีชั่นใน 7 คือ ถังน้ำร้อนชั่นนอก 8 คือ ชุดกลั่นคืนตัวทำละลาย 9 คือ ถังเก็บตัวทำละลาย  
 บริสุทธิ์ 10 คือ ตู้ควบคุม และ 11 คือ ปั๊มสารเคมี)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 สรุปภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกาแฟ

ผลการศึกษาปริมาณผลได้น้ำมันกาแฟที่สามารถสกัดได้เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้ง และ เวลาในการสกัด เปรียบเทียบตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ เอกซาน (hexane) เอทานอลปราศจากน้ำ (anhydrous ethanol) เอทานอล (hydrous ethanol) และ เมทานอล (methanol) ภายใต้การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM และแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการสกัดน้ำมันกาแฟทดลองด้วยเทคนิค RSM

ลำดับ	อัตราส่วนตัวทำละลาย ต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟ กาแฟแห้ง ( $\text{g.g}^{-1}$ )	เวลาในการสกัด (min)	ปริมาณผลได้ของน้ำมันกาแฟ (wt.%)			
			Hexane ethanol	Anhydrous ethanol	Hydrous ethanol	Methanol
1	22.0	34.0	14.5700	12.9880	11.1277	8.1410
2	8.0	34.0	12.6580	11.3193	10.8025	4.4457
3	15.0	20.0	14.0237	12.3297	11.2660	6.4753
4	22.0	6.0	14.4017	11.8473	11.1230	7.0665
5	24.9	20.0	14.6323	12.8570	11.2040	6.5310
6	15.0	20.0	14.0283	12.3700	10.2660	6.3433
7	8.0	6.0	12.4070	10.4837	6.9047	4.0377
8	15.0	39.8	14.1125	12.6163	11.2660	4.3570
9	15.0	20.0	13.9887	12.2723	10.7830	6.2563
10	5.1	20.0	10.7623	9.3073	7.4247	2.9250
11	15.0	0.2	12.6600	9.7380	7.6667	6.6507
12	15.0	20.0	13.9773	12.2740	10.5970	6.1607

จากการทดลองข้างต้น นำไปวิเคราะห์ ด้วยวิธี RSM เพื่อหาสรุปภาวะที่เหมาะสมที่สุดของ การสกัดและหารูปแบบสมการนำความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง (ปริมาณผลได้น้ำมันสูงสุด) ต่อตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้ง และ เวลาใน

การสกัด) หลังผ่านกระบวนการ RSM สามารถสร้างสมการทำนายความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ (4.1) และสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละพจน์ ( $\beta_0$  ถึง  $\beta_5$ ) และ  $p$ -value ของตัวทำละลาย 4 ชนิด ได้แสดงในตารางที่ 4.2 และ ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวน analysis of variance (ANOVA) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

$$Y = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 R + \beta_3 T^2 + \beta_4 TR + \beta_5 R^2 \quad (4.1)$$

โดยที่  $Y$  คือ ปริมาณน้ำมันกาแฟที่สามารถสกัดได้ (wt.%)  $R$  คือ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้ง ( $\text{g.g}^{-1}$ )  $T$  คือ เวลาในการสกัด (นาที) และ  $\beta_0$  ถึง  $\beta_5$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ สมการทำนายความสัมพันธ์

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์และ  $p$ -value ของสมการทำนายความสัมพันธ์

	Hexane		Anhydrous ethanol		Hydrous ethanol		Methanol	
	value	$p$ -value	value	$p$ -value	value	$p$ -value	value	$p$ -value
$\beta_0$	8.130	0.000262	6.207	0.00307	-0.04543	0.972	0.853	0.707
$\beta_1$	0.06449	0.231	0.131	0.06835	0.327	0.00121	-0.000235	0.998
$\beta_2$	0.500	0.00452	0.423	0.02232	0.716	0.00173	0.538	0.05888
$\beta_3$	-0.000981	0.295	-0.00222	0.07796	-0.00245	0.05072	-0.00102	0.578
$\beta_4$	-0.000211	0.926	0.000778	0.778	-0.00993	0.00801	0.00170	0.713
$\beta_5$	-0.01095	0.01856	-0.00984	0.05667	-0.01137	0.03030	-0.01202	0.135
$R^2$	0.927		0.903		0.951		0.819	
$R^2_{\text{adjusted}}$	0.866		0.822		0.910		0.668	

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ ANOVA สำหรับสมการทำนายความสัมพันธ์

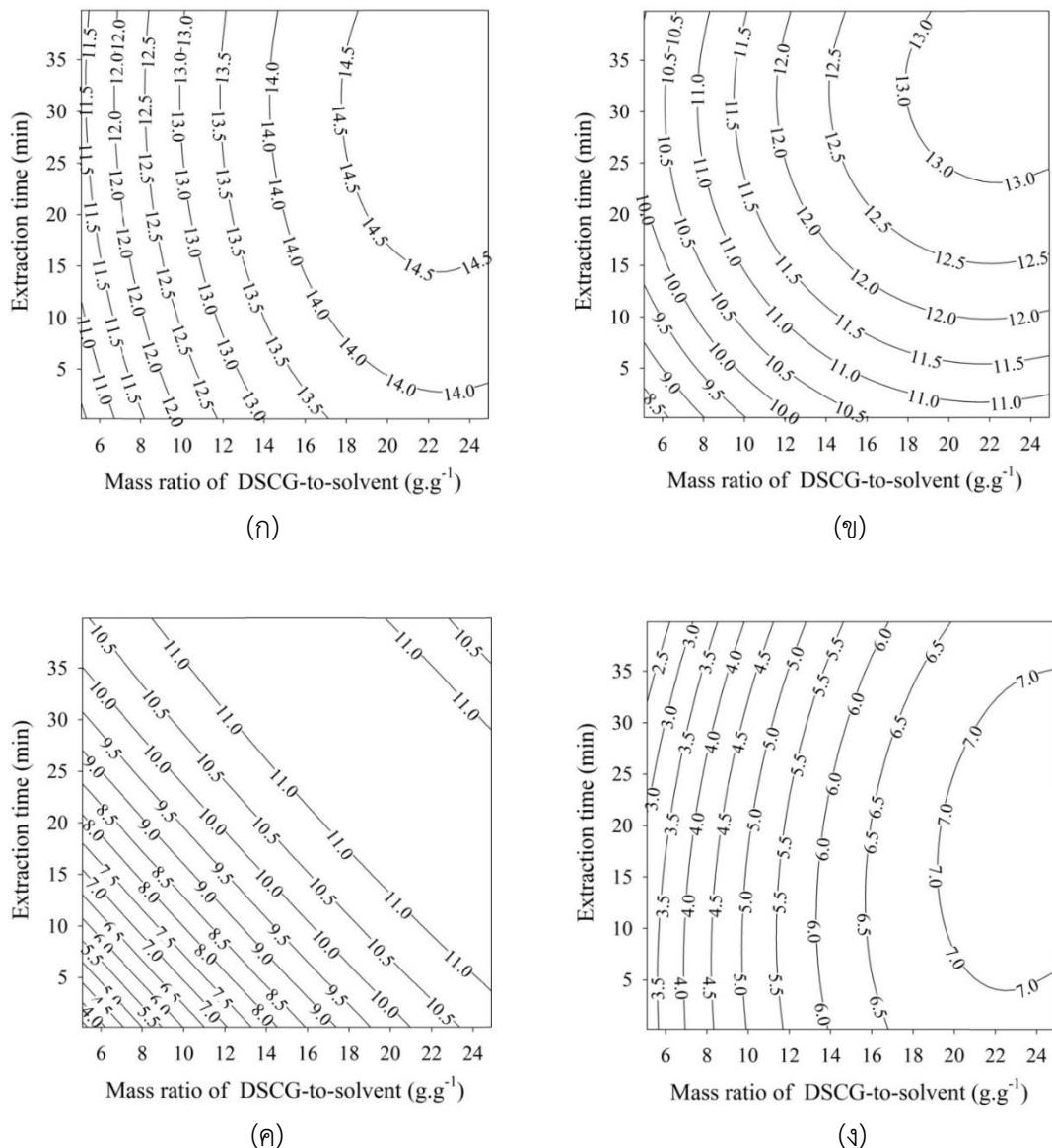
Source	SS	MS	$F_0$	$F_{signif}$	DOF
<i>For hexane</i>					
Regression	13.66	2.731	15.18	0.00237	5
Residual	1.079	0.180	-	-	6
LOF Error	1.077	0.359	559.8274	0.000128	3
Pure Error	0.00192	0.000642	-	-	3
Total	14.74	-	-	-	11
<i>For anhydrous ethanol</i>					
Regression	14.95	2.990	11.14	0.00538	5
Residual	1.610	0.268	-	-	6
LOF Error	1.603	0.534	239.5678	0.000454	3
Pure Error	0.00669	0.00223	-	-	3
Total	16.56	-	-	-	11
<i>For hydrous ethanol</i>					
Regression	29.02	5.803	23.26	0.000733	5
Residual	1.497	0.250	-	-	6
LOF Error	0.974	0.325	1.8623	0.311	3
Pure Error	0.523	0.174	-	-	3
Total	30.51	-	-	-	11
<i>For methanol</i>					
Regression	20.24	4.048	5.424	0.03136	5
Residual	4.477	0.746	-	-	6
LOF Error	4.424	1.475	82.4973	0.00222	3
Pure Error	0.05362	0.01787	-	-	3
Total	24.72	-	-	-	11

ความใกล้เคียงระหว่างผลจากการทดลองกับสมการทำนายความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น สามารถประเมินจากค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) (ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยหากค่าจากการคำนวณด้วยสมการทำนายความสัมพันธ์มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองทุกจุด ค่า  $R^2$  จะมีค่าเท่ากับ 1) และค่า adjusted coefficient of determination ( $R^2_{adjusted}$ ) แสดงถึงความถูกต้องของค่า  $R^2$  ใน

กรณีที่มีจำนวนตัวแปรต้นในการพิจารณาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหากพิจารณาหั้งค่า  $R^2$  และ  $R^2_{\text{adjusted}}$  จากผลการทดลองด้วยตัวทำละลายทั้ง 4 ประเภทซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า สมการทำนายความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับพฤติกรรมการสกัดจริงในชุดทดลอง ส่วนค่า probability value ( $p$ -value) ในพจน์สัมประสิทธิ์  $\beta_0 - \beta_5$  แสดงถึงระดับนัยสำคัญในแต่ละพจน์ และกรณีที่กำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% พจน์ที่มีค่า  $p$ -value หากกว่า 0.05 จะถือว่าไม่มีนัยสำคัญต่อสมการโดยรวม ซึ่งหากพิจารณาจากตารางที่ 4.2 ทั้ง 4 สมการจาก 4 ประเภทตัวทำละลายสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง มีผลต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดมากที่สุด ในขณะที่ตัวแปรเวลาไม่ผลต่อการสกัดน้อยกระทั้งจากล่า่ำได้ว่าพจน์ที่มีตัวแปรเวลาไม่นัยสำคัญต่อสมการที่ระดับความเชื่อมั่นต่ำกว่า 95% สามารถลดเวลาริบการพิจารณาปัจจัยเวลาการสกัดได้ แต่เพื่อยังการเปรียบเทียบการสกัดด้วยตัวทำละลาย 4 ชนิด จึงเม่ได้ทำการตัดพจน์ตัวแปรเวลาในการสกัด แต่ยืนยันความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันจากการคำนวณด้วยสมการทำนายความสัมพันธ์กับชุดการทดลองจริงที่เงื่อนไขสภาพที่เหมาะสมสูงสุดในการสกัดซึ่งพบว่าปริมาณน้ำมันที่สกัดได้มีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 4.4 สำหรับผลวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ด้วยเทคนิค RSM พบว่า สามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้ปริมาณผลได้ คือ 14.75 wt.% 13.24 wt.% 11.42 wt.% และ 7.24 wt.% ด้วยตัวทำละลาย hexane, anhydrous ethanol, hydrous ethanol และ methanol ตามลำดับ และได้แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันกาแฟในตารางที่ 4.4 และได้แสดงกราฟ contour ของปริมาณน้ำมันสูงสุด (wt.%) ที่ค่าอัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง และ เวลาในการสกัดได้ดังแสดงรูปที่ 4.1 ซึ่งผลการทดลองแสดงให้ทราบว่าการใช้เอกเซนเป็นตัวทำละลายสามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้ปริมาณสูงที่สุด ตามสภาพที่เหมาะสมสำหรับตัวทำละลายแต่ละประเภทและน้ำมันที่ได้มีคุณภาพดี มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) สูง และมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ต่ำเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพเป็นไปได้ ในการทดลองที่ตัวทำละลายอื่นๆ จัดอยู่ในกลุ่มแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นตัวทำละลายประเภทโมเลกุลทั้งมีและไม่มีขี้ว สภาพขี้วอาจดึงโมเลกุลอื่นๆ ที่มีขี้วออกจากกาแฟด้วยเช่นกัน ทำให้สภาพกรดโดยรวมสูงขึ้นต่างจากเอกเซนที่ไม่มีสภาพขี้ว สามารถดึงได้เพียงน้ำมันที่ไม่มีสภาพขี้วของมาเพียงอย่างเดียว เอกเซนจึงถูกเลือกใช้เป็นตัวทำละลายในเครื่องสกัดและใช้ข้อมูลสภาวะการสกัดที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องสกัด นอกจากนั้นกราฟ contour ของปริมาณน้ำมันสูงสุดยังสามารถใช้ประโยชน์ในการทำนายปริมาณน้ำมันที่สกัดได้เบื้องต้นจากเครื่องสกัดที่เงื่อนไขต่างๆ ตามความต้องการของผู้ใช้งานเพื่อการควบคุมต้นทุนหรือเวลาในการสกัด

ตารางที่ 4.4 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดด้วยตัวทำละลายประเภทต่างๆ

รายการ	ประเภทตัวทำละลาย			
	Hexane	Anhydrous ethanol	Hydrous ethanol	Methanol
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวล ากกาแฟแห้ง ( $\text{g.g}^{-1}$ )	22.5	22.8	20.3	23.8
เวลาในการสกัด (min)	30.4	33.5	25.5	19.6
ปริมาณผลได้ของน้ำมัน (wt.%)				
จากสมการทำนายความสัมพันธ์	14.7517	13.2410	11.4224	7.2366
จากผลการทดลองจริง	14.6822	13.1260	11.7980	7.5198
องค์ประกอบน้ำมัน				
Free fatty acid (wt.%)	0.412	1.406	1.296	0.872
Triglyceride (wt.%)	81.156	9.562	9.487	8.044
Diglyceride (wt.%)	5.926	0.618	0.816	0.751
Monoglyceride (wt.%)	11.428	85.183	84.894	90.148
Ester (wt.%)	1.078	3.230	3.507	0.185



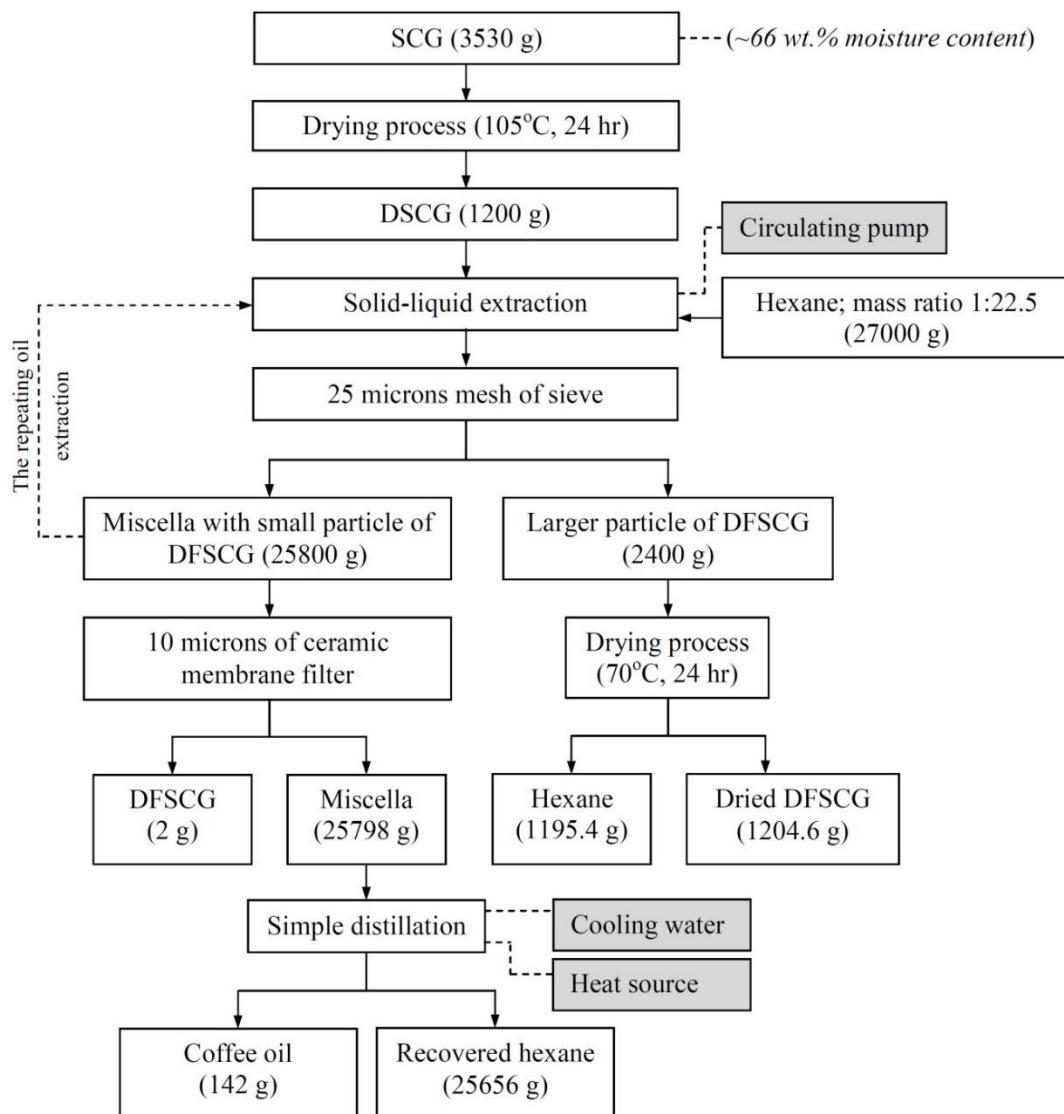
รูปที่ 4.1 กราฟ contour ของปริมาณผลได้ของน้ำมัน (wt.%) ที่อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลการกาแฟเหง้า และ เวลาในการสกัดเมื่อใช้ตัวทำละลายประเภท (η) hexane  
 (ηη) anhydrous ethanol (κ) hydrous ethanol และ (ηκ) methanol

## 4.2 ผลการทดสอบเครื่องสกัดน้ำมันกาแฟแบบหมุนวน

ในการเลือกตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด นอกจากสภาพที่สามารถสกัดน้ำมันได้สูงสุดแล้ว (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้ง และ เวลาในการสกัด) ปัจจัยที่ต้องพิจารณา ร่วมคือ ความสามารถในการสกัดน้ำมันด้วย miscella วนช้า ราคาตัวทำละลาย ความปลอดภัยในการใช้งาน ความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และอีกปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้น้ำมันกาแฟเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการปรุงคุณภาพเป็นไปโดยใช้เวลาคือค่ากรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) ซึ่งหากมีค่ามากกว่า 1 wt.% แล้ว การเปลี่ยนองค์ประกอบไตรกลีเซอไรต์เป็นเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอเรติฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่ง จะทำให้เกิดปฏิกิริยา saponification ได้ของเสียกล้ายเป็นสบู่ ทำให้ปริมาณเอสเทอร์ที่ต้องการลดลง ซึ่งในการผลิตไปโดยใช้เวลาทั่วไปในน้ำมันกรดสูง จำเป็นต้องลดกรดไขมันอิสระลงก่อนด้วยกระบวนการ(eso)ทรานส์เอสเทอเรติฟิเคชันเพื่อลดกรดไขมันอิสระก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอเรติฟิเคชันซึ่งเป็นการเพิ่มกระบวนการและต้นทุนในการผลิตไปโดยใช้เวลา

สำหรับกรณีน้ำมันสกัดจากการกาแฟด้วยเครื่องสกัดน้ำมันกาแฟแบบหมุนวน ตัวทำละลาย เอกเซนถูกเลือกใช้เนื่องจากสามารถสกัดน้ำมันได้สูงสุดเมื่อเทียบกับตัวทำละลายชนิดอื่นๆ ประกอบกับน้ำมันที่สกัดมีค่ากรดไขมันอิสระต่ำ รวมทั้ง เอกเซน มีจุดเดือดต่ำกว่าตัวทำละลายประเภทอื่นๆ ทำให้การใช้พลังงานในการกลั่นคืนตัวทำละลายต่ำกว่า

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องสกัดน้ำมันโดยใช้กาแฟเริ่มต้นประมาณ 1,200 กรัม ผสมกับเอกเซนในอัตราส่วน 1:22.5 หรือเท่ากับ 27,000 กรัม สามารถผลิตน้ำมันกาแฟเมื่อ สิ้นสุดกระบวนการ เท่ากับ 142 กรัม หรือคิดเป็น 11.83 wt.% เมื่อเทียบกับน้ำหนักกาแฟแห้ง เริ่มต้น และสามารถกลั่นกลับคืนเอกเซนได้ปริมาณ 25,656 กรัม โดยส่วนที่เหลือสูญเสียไปกับกาแฟ กาแฟหลังการสกัด และเมื่อนำกาแฟเข้าอบเพื่อคำนวนน้ำหนักเอกเซนที่อยู่ในกาแฟ พบร่วมค่าเท่ากับ 1,195.4 กรัม หรือคิดเป็น 4.97 wt.% เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเอกเซนเริ่มต้นการสกัด และสำหรับการทำสมดุลมวล กระบวนการสกัดสามารถแสดงได้โดยรูปที่ 4.2 และได้แสดงภาพ กาแฟแห้งเหลือ ทึ้ง กาแฟอบแห้งก่อนการสกัด กาแฟแห้งเร้น้ำมันหลังการสกัด และผลิตภัณฑ์น้ำมันกาแฟจาก เครื่องสกัดไว้ในรูปที่ 4.3 ทั้งนี้หากพิจารณาต่ำสุดก่อนสกัด 1,200 กรัม ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันกาแฟ 142 กรัม กาแฟแห้งเร้น้ำมันทั้งที่ตอกค้างในสีกรองจะอ่อนและกากส่วนใหญ่ในตะกรงกรองที่ผ่านการอบแล้วเท่ากับ 1,206.6 กรัม แสดงให้ทราบว่ายังคงมีเอกเซนหลงเหลืออยู่ในกาแฟเริ่มน้ำมันอีกประมาณ 148.6 กรัม ที่ไม่สามารถแยกออกจากกาแฟด้วยวิธีการอบด้วยอุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 สมดุลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันจากกาแฟเด็ดด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

(SCG คือ spent coffee grounds, DSCG คือ dried spent coffee grounds

และ DFSCG คือ defatted spent coffee grounds)



(۱)



(۹)



(၁၂)

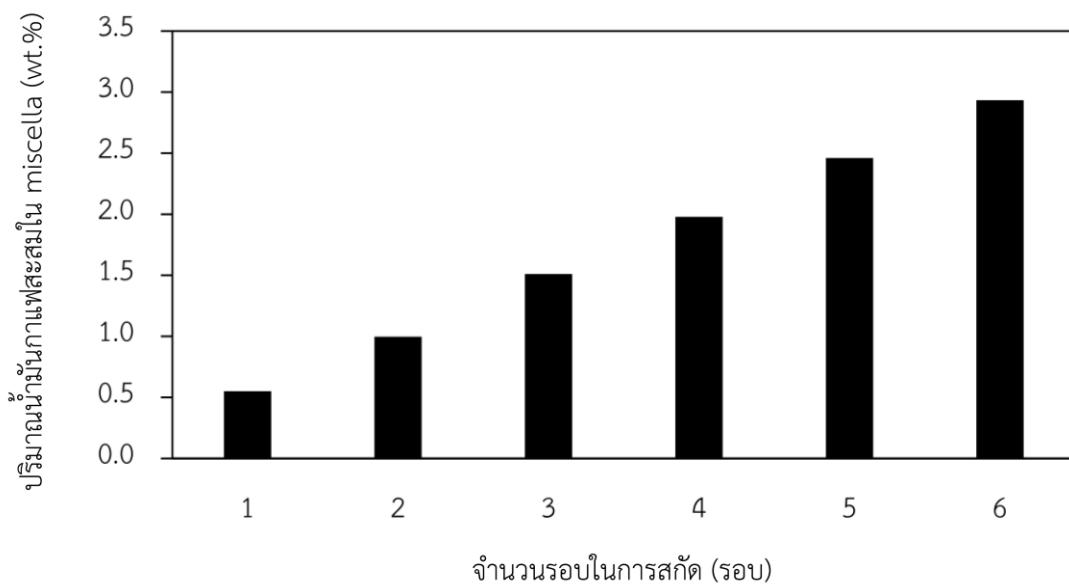


(۹)

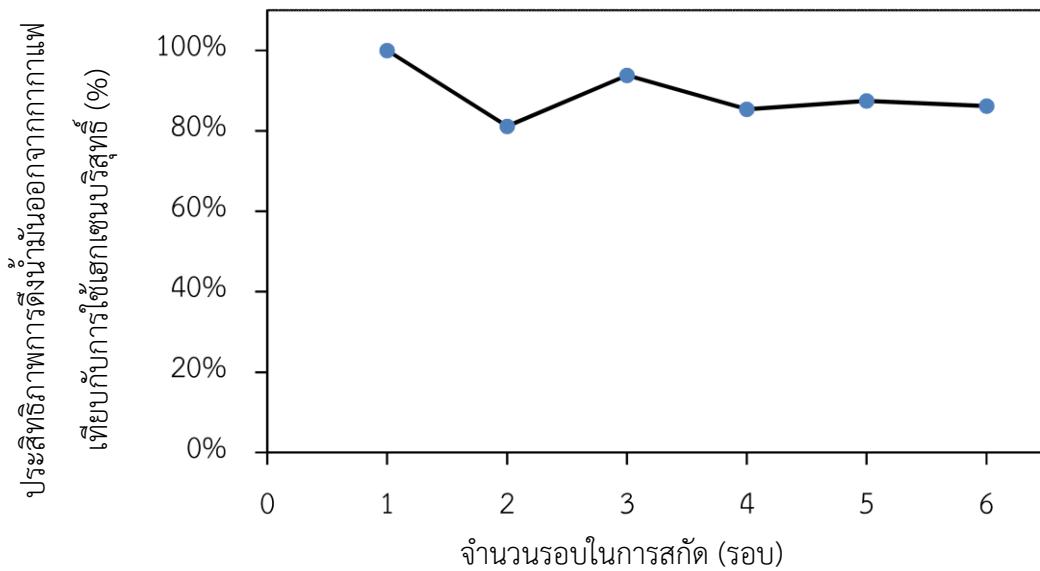
รูปที่ 4.3 การก้าแฟและน้ำมันก้าแฟ (ก) การก้าแฟ SCG (ข) น้ำมันก้าแฟ (ค) การก้าแฟแห้ง (DSCG)  
(ง) การก้าแฟไร้น้ำมัน (DFSCG)

### 4.3 ผลการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยตัวทำละลายข้าด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

ประสิทธิภาพในการสกัดของตัวทำละลายหรือประสิทธิภาพในการละลายน้ำมันจากกาแฟมาสูตร้าทำละลาย แสดงได้ด้วยค่าความเข้มข้นของน้ำมันใน miscella วัดค่าจากน้ำหนักของน้ำมันสะสมต่อน้ำหนัก miscella ในแต่ละรอบการสกัด ผลการสกัดข้าแสดงในรูปที่ 4.4 โดยปริมาณน้ำมันสะสมใน miscella ในรอบการสกัดที่ 1 ถึง 6 เท่ากับ 0.55 wt.% 0.99 wt.% 1.51 wt.% 1.98 wt.% 2.46 wt.% และ 2.93 wt.% ตามลำดับ และหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันออกจากกาแฟชุดใหม่ โดยเทียบจากปริมาณน้ำมันเฉพาะส่วนที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการสกัด ระหว่างการใช้ miscella ข้าของรอบสกัดก่อนหน้าเพื่อสกัดในรอบที่ 2 ถึง 5 กับการใช้เอกเซนบริสุทธิ์ (กำหนดให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันด้วยเอกเซนใหม่เท่ากับ 100%) พบว่าประสิทธิภาพการสกัดด้วย miscella วนข้าในทุกรอบยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 หากสังเกตลักษณะทางกายภาพของ miscella แต่ละรอบการสกัดจะมีสีเข้มข้นเนื่องจากสีของน้ำมันการแฟที่ละลายอยู่ใน miscella เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ miscella มีความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นกัน การกรองละเอียดในชุดกรองเซรามิกอาจต้องเวลาหรือความดันในการกรองมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อต้นทุนพลังงานในการผลิตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 ปริมาณน้ำมันกาแฟสะสมใน miscella ต่อรอบการสกัดข้าด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน (รอบที่ 1 คือ การสกัดด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ และรอบที่ 2 ถึงรอบที่ 5 คือการสกัดด้วย miscella จากการสกัดรอบก่อนหน้า)



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการดึงน้ำมันออกจากการกาแฟชุดใหม่ โดยเทียบจากปริมาณน้ำมันเฉพาะส่วนที่เพิ่มขึ้นแต่ละรอบการสกัด ระหว่างการใช้ miscella เดิมในรอบการสกัดที่ 2 ถึง 5 กับการใช้เอกเซนบริสุธ์ในรอบการสกัดที่ 1

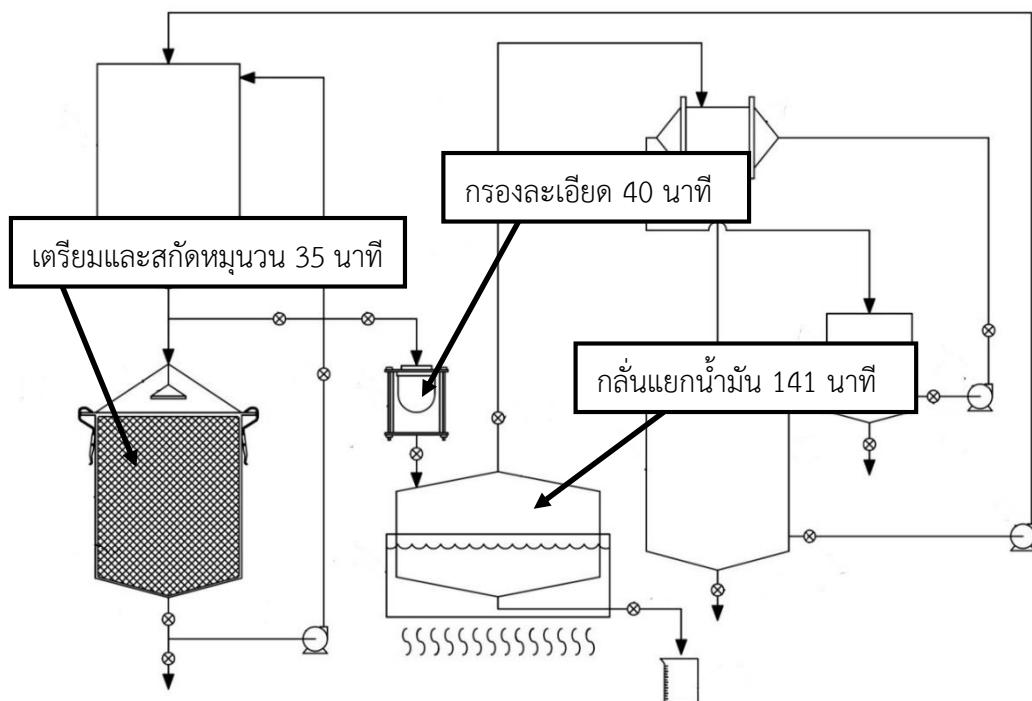


รูปที่ 4.6 ลักษณะสีของ miscella แต่ละรอบการสกัด

ระยะเวลาการสกัดน้ำมันเริ่มตั้งแต่เตรียมกาแฟแห้งและตัวทำละลายลงในถังสกัดจนกระทั่งได้น้ำมันกาแฟในขั้นตอนสุดท้ายต่อ 1 รอบการสกัดรวม 216 นาทีต่อการสกัดน้ำมัน 142 กรัม และหากใช้การสกัดวนซ้ำ 6 รอบ จะใช้เวลารวม 391 นาที จะได้น้ำมันกาแฟ 852 กรัม ตั้งนั้นการสกัด 6 รอบ ด้วย miscella ของรอบก่อนหน้า และทำการอุ่นไล่และกล่อมเอกเซนกลับคืน จะสามารถลดเวลาลงได้ 70% รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และแผนผังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

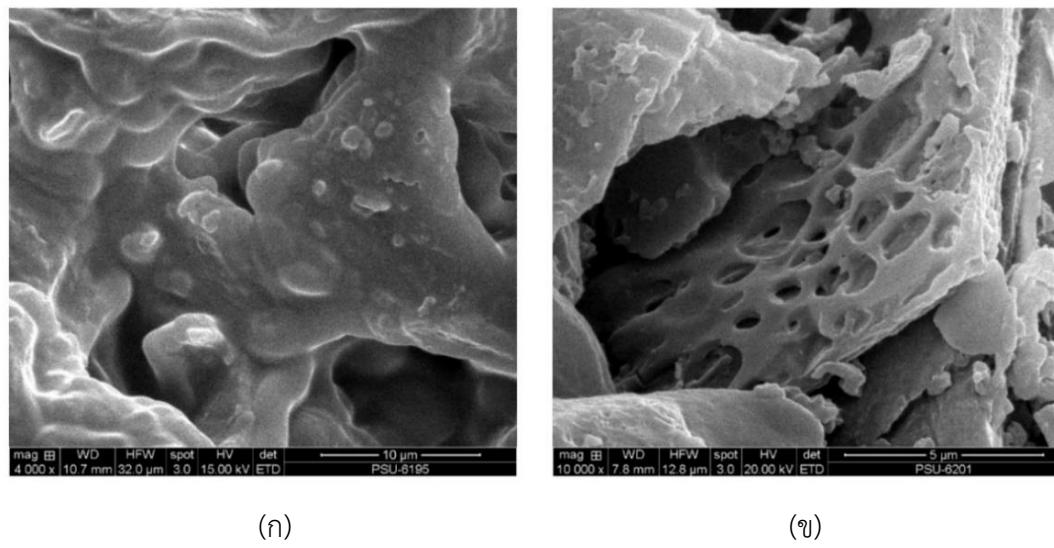
ขั้นตอนที่	กระบวนการ	ระยะเวลา (นาที)	
		1 รอบ	6 รอบ
1	เตรียม/เปลี่ยน วัตถุดิบและสกัดหมุนวน (นาที)	35	210
2	กรอง miscella ด้วยไส้กรองเซรามิก (นาที)	40	40
3	กลั่นแยกน้ำมันกาแฟ (นาที)	141	141
	รวมระยะเวลา (นาที)	216	391



รูปที่ 4.7 ระยะเวลาแต่ละขั้นตอนในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

#### 4.4 ผลทดสอบตัวอย่างจากการแพรและน้ำมันน้ำมันสกัดจากการแพร

ได้นำตัวอย่างจากการทดลองวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดตามรูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวหลังสกัดจะมีลักษณะเป็นรูพรุนและมีความชุ่มชะของพื้นผิวอย่างเห็นได้ชัด แสดงถึงองค์ประกอบส่วนหนึ่งถูกชะออกจากการผิวน้ำด้วยตัวทำละลาย คาดว่าองค์ประกอบดังกล่าว คือ น้ำมันซึ่งแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนและพื้นผิวของการแพรโดยตัวทำละลายสามารถสกัดออกมาและละลายเป็นเนื้อเดียวกันปนอยู่ใน miscella และ น้ำมันกาแฟจะถูกแยกหลังจากการกรั่นแยกตัวทำละลายเสร็จสิ้น สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบโมเลกุln้ำมันกาแฟ ชนิดกรดไขมัน และคุณสมบัติด้านการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายการแพรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (ก) DSCG

และ (ข) DFSCG

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกายภาพของการกาแฟ กากกาแฟปราศจากน้ำมัน และน้ำมันกาแฟที่สกัดด้วยไฮโดรเจน

Property	DSCG	DFSCG	Coffee oil
Water content (wt.%)	65	-	-
Mean particle size ( $\mu\text{m}$ )	237.2	216.2	-
HHV ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	23.07	20.39	38.38
Carbon (wt.%)	52.95	48.34	-
Nitrogen (wt.%)	2.10	2.39	-
Hydrogen (wt.%)	6.67	6.17	-
Sulfur (wt.%)	0.12	0.09	-
Ash content (wt.%)	1.59	1.86	-
Protein (wt.%)	14.39	14.8	-
Crude fiber (wt.%)	21.43	20.44	-
Free fatty acid (wt.%)	-	-	0.412
Triglyceride (wt.%)	-	-	81.156
Diglyceride (wt.%)	-	-	5.926
Monoglyceride (wt.%)	-	-	11.428
Ester (wt.%)	-	-	1.078
Viscosity @30°C (cSt)	-	-	132.6
Density @30°C ( $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			0.925

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบกรดไขมัน

Common name	Fatty acid	Content (wt.%)
Caprylic acid	C8:0	0.01
Nonanoic acid	C9:0	0.00
Capric acid	C10:0	0.01
Lauric acid	C12:0	0.02
Myristic acid	C14:0	0.09
Pentadecanoic acid	C15:0	0.00
Palmitic acid	C16:0	34.44
Palmitoleic acid	C16:1	0.04
Stearic acid	C18:0	0.00
Oleic acid	C18:1	7.74
Linoleic acid	C18:2	43.12
Alpha linolenic acid	C18:3	1.18
Arachidic acid	C20:0	2.83
Paullinic acid	C20:1	0.27
Behenic acid	C22:0	0.59
Erucic acid	C22:1	0.19
Lignoceric acid	C24:0	0.29
Nervonic acid	C24:1	0.01

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติวัสดุที่เหมาะสมสำหรับผลิตเข็วเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบผลการศึกษา

Property	DSCG	DFSCG	Standard [33]
Higher heating value (MJ.kg <sup>-1</sup> )	19.3	16	> 12.55
Fixed carbon (wt.%)	19.83	12	> 15
Ash (wt.%)	2.2	1.65	< 20
Total sulfur (wt.%)	0	14	< 2
Oxidizer (wt.%)	N/A	N/A	0
Explosive (wt.%)	N/A	N/A	0
Strong oxidizing agent (wt.%)	N/A	N/A	0

Note: N/A is not available

#### 4.5 การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

ได้วิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์ตามเงื่อนไขการทำงานคือ ในหนึ่งรอบการสกัดใช้กาแฟแห้งเริ่มต้นประมาณ 1,200 กรัม ผสมกับเยกเซนในอัตราส่วน 1:22.5 หรือเท่ากับ 27,000 กรัม สามารถผลิตน้ำมันกาแฟเมื่อสิ้นสุดกระบวนการได้เท่ากับ 142 กรัม สำหรับการพิจารณาต้นทุนคงที่รวม (total fixed cost) ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ต้นทุนในการสร้างเครื่องสกัดน้ำมันประกอบด้วยค่าผลิตถังสกัด ปั๊มสารเคมี รวมถึงระบบห้อง และต้นทุนสารเคมีในระบบก่อนเริ่มต้นสกัด ได้แก่ เยกเซน มีมูลค่ารวมทั้งสิ้น 54,158 บาท โดยมีรายการตั้งแสดงในตารางที่ 4.9 ในการใช้งานจริงทำการสกัดวนซ้ำหากกาแฟชุดใหม่กับ miscella เดิมอย่างน้อย 6 รอบ เพื่อประหยัดเวลาและต้นทุนในกระบวนการกรองละเอียดและการกลั่นแยกตัวทำลาย ซึ่งต้นทุนแปรผันรวม (total variable cost) คิดรวมในรอบที่ 6 ได้ประมาณน้ำมันกาแฟประมาณ 852 กรัม โดยมีต้นทุนแปรผันรวม 422.13 บาท ตั้งแสดงในตารางที่ 4.10 หรือการสกัดมีต้นทุนแปรผันเฉลี่ย (average variable cost) เท่ากับ 0.4954 บาทต่อน้ำมันกาแฟ 1 กรัม หรือ คิดเป็น 495.46 บาทต่อกิโลกรัม ตั้งแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4.10 โดยข้อมูลประเภทและราคาตัวทำลายที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 ทั้งนี้การคำนวณยังไม่นำค่าใช้จ่ายในการรับรวมวัตถุดิบและค่าแรงงานในการผลิตโดยต้นทุนแปรผันเฉลี่ยต่อหน่วยการผลิตน้ำมันกาแฟส่วนใหญ่ เป็นค่าสารเคมีที่สูญเสียอยู่ในการหลังการสกัด ลำดับถัดมาคือค่าใช้จ่ายในการกลั่นแยก น้ำมันกาแฟออกจากเยกเซน

ตารางที่ 4.9 ต้นทุนคงที่การสกัดน้ำมันจากกาแฟเพด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวนขนาดกาแฟแพเฟเน็ง 1,200 กรัม

รายการ	ราคา (บาท)
เครื่องสกัดน้ำมัน	
ถังสกัดและระบบห่อ	28,000
ถังกรองสแตนเลสความล่ำเอียด 25 ไมโครเมตร	13,000
ปั๊มหมุนวน	4,240
ปั๊มสารเคมี	4,300
ปั๊มน้ำ	260
ไส้กรองล่ำเอียด ขนาดความล่ำเอียด 10 ไมโครเมตร	200
เตาแก๊สครัวเรือน	450
ถังแก๊สหุงต้มขนาด 15 กิโลกรัม	2,200
สารเคมี	
เยกเซนหมุนวนในระบบ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อ หนึ่งหน่วยมวลกาแฟแพเฟเน็ง เท่ากับ $22.5 \text{ g g}^{-1}$	1,507
น้ำประปา	0.85
รวมทั้งสิ้น	54,158

ตารางที่ 4.10 ต้นทุนแปรผันของการผลิตน้ำมันกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

ต้นทุนแปรผัน	จำนวนรอบในการสกัด	
	1 รอบ	6 รอบ
ไฮโดรเจนสูญเสีย (บาท)	66.71	400.26
ค่าไฟฟ้า ปั๊มน้ำ (บาท)	0.07	0.42
แก๊สหุงต้มให้ความร้อน (บาท)	20.54	20.54
ค่าไฟฟ้า ปั๊มกรอง (บาท)	0.91	0.91
ค่าแรงงาน (บาท)	0	0
รวม (บาท)	88.23	422.13
ปริมาณน้ำมันกาแฟ (กรัม)	142	852
ต้นทุนแปรผันเฉลี่ยในการสกัดน้ำมัน 1 กิโลกรัม (บาท)	621.34	495.46

หมายเหตุ 1 รอบ คือ การสกัดด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แล้วกลับตัวทำละลายกลับคืนต่อรอบ และ 6 รอบ คือ ใน การสกัดรอบที่ 1 ใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ และ ในรอบที่ 2-6 ใช้ miscella ของการสกัดรอบก่อนหน้า แล้วกลับตัวทำละลายกลับคืนในการสกัดรอบสุดท้าย

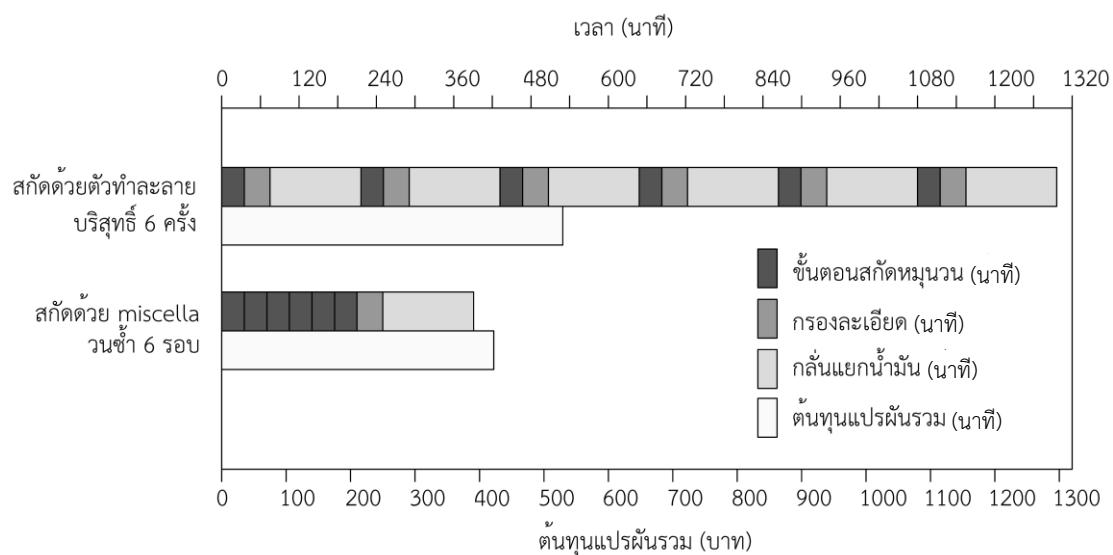
ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติและราคาของตัวทำละลาย

Property	Hexane	Anhydrous ethanol	Hydrous ethanol	Methanol
Purity (%), min.	29.7 (wt.%)	99.9 (vol.%)	95 (vol.%)	99.9 (wt.%)
Density @30°C (kg.L <sup>-1</sup> )	0.664	0.784	0.800	0.782
Boiling point (°C)	62.40	78.50	78.15	64.70
Price (USD.kg <sup>-1</sup> )	1.54 [52]	0.46 [53]	0.41 [53]	0.37 [52]
(Bath.kg <sup>-1</sup> )	55.80	16.67	14.86	13.40

Note: 36.24 Baht/USD (accessed Dec 23, 2015)

การสกัดน้ำมันกาแฟกาแฟชุดใหม่กับ miscella เดิมจากจะช่วยลดต้นทุนแล้ว ยังช่วยลดเวลาในการทำงานลงได้โดยได้เปรียบเทียบต้นทุนแปรผันและเวลา กรณีการสกัดกาแฟแบบปกติ ด้วยไฮโดรเจนบริสุทธิ์เพียงครั้งเดียวและกลับคืนแยกไฮโดรเจนทุกครั้งหลังสกัด กับกรณีใช้ miscella จากการสกัดรอบก่อนหน้า สกัดซ้ำกับกาแฟชุดใหม่ โดยเปรียบเทียบที่ 6 รอบการสกัด การสกัดแบบกลับคืนไฮโดรเจนทุกครั้งใช้เวลารวม 1,296 นาที ในขณะที่การใช้ miscella สกัดซ้ำและกลับคืนเพียง

ครั้งเดียวใช้เวลา 391 นาที ซึ่งคิดเป็น 30% จากการสกัดแบบเดิม โดยรายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟเวลาและต้นทุนแปรผันในการสกัดกรณีใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์สกัดแล้วกับลั่นคีน 6 ครั้ง และ การสกัดช้าด้วย miscella จากการสกัดรอบก่อนหน้า

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

ผลการทดสอบชนิดของตัวทำละลายและสภาพที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยวิธี solid-liquid extraction รวมถึงการสร้างเครื่องสกัดน้ำมันและทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

สภาพที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกาแฟในระดับห้องปฏิบัติการ สามารถหาได้ด้วยวิธี response surface methodology (RSM) จากการออกแบบทดลองด้วยวิธี central composite design CCD มีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร คือ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้ง และ เวลาในการสกัด โดยมีผลได้น้ำมันสูงสุดเท่ากับ 14.68 wt.% 13.13 wt.% 11. 80 wt.% และ 7.52 wt.% เมื่อสกัดที่เงื่อนไขตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้ง (R) และ เวลาในการสกัด (T) คือ  $22.5 \text{ g.g}^{-1}$  เวลา  $30.4 \text{ นาที}$  (ด้วย hexane)  $22.8 \text{ g.g}^{-1}$  เวลา  $33.5 \text{ นาที}$  (ด้วย anhydrous ethanol)  $20.3 \text{ g.g}^{-1}$  เวลา  $25.5 \text{ นาที}$  (ด้วย hydrous ethanol) และ  $23.8 \text{ g.g}^{-1}$  เวลา  $19.6 \text{ นาที}$  (ด้วย methanol) และพิจารณาเลือกใช้ข้อมูลกรณีเอกเซนเป็นตัวทำละลายในการออกแบบและทดสอบเครื่องสกัด เนื่องจากเอกเซนให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงสุดรวมทั้งน้ำมันที่ได้มีค่ากรดไขมันอิสระเท่ากับ 0.412 wt.% ต่ำกว่าน้ำมันจากการสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดอื่นๆ สามารถใช้เป็นน้ำมันตั้งต้นในการผลิตไปออดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอราฟิเคชันภายในขั้นตอนเดียวซึ่งช่วยลดต้นทุนสารเคมีในการผลิตไปออดีเซล

เครื่องสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวนถูกออกแบบตามสภาพที่เหมาะสมจากการสกัดโดยใช้เอกเซนเป็นตัวทำละลายในระดับห้องปฏิบัติการ เครื่องสกัดสามารถสกัดกาแฟแห้งได้ครั้งละ 1,200 กรัม ผลิตน้ำมันกาแฟได้ประมาณ 142 กรัม ต่อหนึ่งรอบการสกัด ที่อัตราส่วนเอกเซนต่อหนึ่งหน่วยมวลกาแฟแห้งเท่ากับ  $22.5 \text{ g.g}^{-1}$  เวลาในการสกัด  $30.4 \text{ นาที}$  ตัวเครื่องประกอบด้วยถังสกัดแบบหมุนวน ระบบใช้ miscella สกัดช้า ระบบกรองกาแฟตอกค้างใน miscella ความละเอียดต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร และระบบกลั่นคืนสารละลายในกระบวนการแยกน้ำมันออกจากตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามยังคงมีเอกเซนสูญเสียตอกค้างอยู่ในกาแฟไว้เรือน้ำมันหลังการสกัดประมาณ 1,195.4 กรัม หรือคิดเป็น 4.43 wt.% เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเอกเซนเริ่มต้นการสกัด

ต้นทุนในการผลิตเครื่องสกัดแบบเป็นต้นทุนคงที่ (เงินลงทุนค่าเครื่องและค่าสารเคมีเริ่มต้น) ประมาณ 54,158 บาท และมีต้นทุนแปรผันเฉลี่ยในการสกัดตามเงื่อนไขการสกัดน้ำมัน คือ

อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากาแฟแห้ง  $22.5 \text{ g.g}^{-1}$  และ เวลาในการสกัด 30.4 นาที จากกากาแฟแห้ง 1,200 กรัม โดยสกัดด้วย miscella วนช้า 6 รอบ มีค่าเท่ากับ 495.46 บาทต่อ กิโลกรัม ทั้งนี้ต้นทุนส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียเอกเซนไปกับการหลังการสกัด เท่ากับ 400.26 บาท ต่อ กิโลกรัม หรือคิดเป็น 95% เมื่อเทียบกับต้นทุนแปรงพันในการสกัดทั้งหมด ซึ่งในการพัฒนาต่อยอด หากสามารถสร้างอุปกรณ์แยกเอกเซนตอกค้างในภาคหลังการสกัดจะช่วยให้เอกเซนสูญเสียเป็นศูนย์ หรือมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้สมมติให้ความร้อนที่นำมาเรายาเอกเซนตอกค้างในภาคมาจากการความร้อนเหลือ ทึ้งในขั้นตอนการอุ่นไนล์ miscella หรือความร้อนเหลือทึ้งที่ไม่มีมูลค่าในโรงงาน กระแท้ก็มูลค่าเอกเซน สูญเสียในต้นทุนแปรงพันเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ จะสามารถลดต้นทุนแปรงพันเฉลี่ยในการสกัดลงได้จากเดิม 422.13 บาทต่อน้ำมันกาแฟ 852 กรัม เป็น 21.87 บาทต่อน้ำมันกาแฟ 852 กรัม หรือลดลงจาก 495.84 บาท/กิโลกรัม เป็น 25.67 บาท/กิโลกรัม ซึ่งแนวทางการการปรับปรุงเครื่องสกัดเพื่อแยก เอกเซนออกจากกากาแฟหลังการสกัด อาจปรับปรุงได้หลายลักษณะ ตัวอย่างเช่น การออกแบบถัง สกัดให้สามารถหมุนเหวี่ยงได้ในลักษณะเดียวกับถังปั่นแห้งในเครื่องซักผ้า โดย miscella จะถูกเหวี่ยง ออกจากการด้วยแรงหนีศูนย์กลางให้ไปรวมกับ miscella ส่วนใหญ่จากการสกัดเพื่อเข้าสู่ กระบวนการกรองละเอียดต่อไป แต่วิธีนี้อาจมีข้อจำกัดเพิ่มเติมในการเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อป้องกันการ รั่วซึมของของเหลวและไออกเรียบริเวณเพลาหมุนที่ต้องทนต่อการกัดกร่อนของเอกเซนและไม่ ก่อให้เกิดความร้อนที่สูงจนเกินไป เนื่องจากเอกเซนระเหยง่ายและไวไฟ อุณหภูมิสูงอาจก่อให้เกิดการ ลูกไห์เม็ดได้อีกทั้งไออกเรียบเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากหายใจเข้าไปสะสมเป็นระยะเวลานาน หรืออีก แนวทางเป็นการให้อุณหภูมิกับกากาแฟหลังการสกัดเพื่อให้เอกเซนระเหยกล้ายเป็นไอจากน้ำลดอุณหภูมิ ไอในชุดควบแน่นจะกระตุ้นกล้ามเป็นเอกเซนบริสุทธิ์กลับมาใช้ครั้ง สำหรับตัวนำความร้อนสู่กากา กาแฟอาจเลือกใช้เป็นลมร้อนหมุนวน โดยใส่กากาแฟหลังสกัดในถังปิด บริเวณด้านบนถังมีวาล์สปริงต่อไป ยังชุดควบแน่น และมีท่อสำหรับดูดอากาศเพื่อหมุนวนในถังโดยมีการให้ความร้อนกับท่อเพื่อให้ อากาศที่เหลือผ่านมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิระเหยของเอกเซนจากนั้นปั๊มลมจะอัดอากาศร้อน ปล่อยออกบริเวณด้านล่างถัง ลมร้อนจะแทรกตัวผ่านชั้นกากาแฟและระเหยเอกเซนโดยขึ้นด้านบน เมื่อมี เอกเซนระเหยเพิ่มมากขึ้น ความดันในถังจะสูงขึ้นกระตุ้นชั้นแรงดันวาล์สปริงไปยังชุดควบแน่น กล้ายเป็นเอกเซนบริสุทธิ์ต่อไป หรือใช้น้ำเป็นตัวนำความร้อนโดยนำน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจากถังอุ่นไนล์ miscella ใส่ร่วมกับกากาแฟหลังการสกัดในถังปิดจากนั้นให้ความร้อนถังกระตุ้นของเหลวภายในถังระเหย ไอที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยไอน้ำและไออกเรน และถูกลดอุณหภูมิในชุดควบแน่นกล้ายเป็นของเหลว แยกชั้นอย่างชัดเจนระหว่างน้ำและเอกเซนสามารถแยกน้ำออกได้โดยง่าย ในประเดิมการลดค่า เชื้อเพลิงในกระบวนการระเหยตัวทำละลายเอกเซน หากปรับปรุงแหล่งเชื้อเพลิงจากแก๊สหุงต้มในการ ต้มน้ำร้อนเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีมูลค่าต่ำกว่าประกอบกับปรับปรุงถังน้ำร้อนให้มีการสูญเสียความร้อน ขณะใช้งานต่อไป เช่น การใช้มีฟันหรือน้ำร้อนเหลือทึ้งจากโรงงาน และการหุ้มฉนวนความร้อนหรือ

ออกแบบชุดถังน้ำร้อนและถังอุ่นไสให้เป็นถังเดียวมีการสูญเสียต่ำ อาจทำให้ต้นทุนค่าพลังงานความร้อนลดลงได้ประมาณ 50% จะสามารถต้นทุนแปรผันเฉลี่ยลดต่ำลงเหลือ 13.61 บาท/กิโลกรัม

อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบกรณีนำน้ำมันกาแฟมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไปโอดีเซล น้ำมันกาแฟยังมีต้นทุนการสกัดที่สูงกว่าน้ำมันตั้งต้นจากแหล่งอื่นๆ การนำมาใช้งานให้เกิดความคุ้มค่า ยังต้องทำการวิจัยและพัฒนาลดต้นทุนในการสกัดให้ต่ำลง หรืออีกทางเลือกคือใช้น้ำมันกาแฟในการผลิตสารต่อต้านอนุมูลอิสระในอุตสาหกรรมยา อาหารเสริม ผลิตภัณฑ์เสริมความงาม ซึ่งมีมูลค่าสูงกว่าโดยมีงานวิจัยที่สนับสนุน เช่น Solange และคณะ [54] ศึกษากาสกัด phenolic compounds จาก DSCG พบว่าของเหลวที่สกัดได้มี phenolic compounds ในปริมาณที่สูง (ประมาณ 16 mg gallic acid equivalents.g<sup>-1</sup> DSCG) และมีสาร antioxidant activity ปริมาณสูง (ferric reducing antioxidant power 0.10mM Fe(II).g<sup>-1</sup>) และสรุปว่ามีความเหมาะสมในการใช้งานในอุตสาหกรรม อาหารสุขภาพและยา

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ต้นทุนการสกัดโดยส่วนใหญ่ที่ปริมาณเอกเซนสูญเสียต่ำอยู่ในภาคการแพร่หลาย การสกัด หากมีระบบบรรเทาความร้อนและกลั่นคืนออกจากกากมาใช้ซ้ำได้ จะสามารถลดต้นทุนส่วนใหญ่ลงได้

ในระบบกลั่นระบายน้ำตัวทำละลายโดยใช้ความร้อนจากแก๊สหุงต้ม จำเป็นต้องให้ความร้อนเพิ่มอุณหภูมิน้ำจากอุณหภูมิห้อง ( $30^{\circ}\text{C}$ ) จนถึงอุณหภูมิระหว่างเอกเซนต้องใช้เวลาประมาณครึ่งหนึ่งของระยะเวลาในกระบวนการกลั่นคืนทั้งหมด หากมีการจัดการที่ดี เก็บ miscella ที่มีความเข้มข้นไว้ในปริมาณมากแล้วกลั่นอย่างต่อเนื่องจะช่วยให้ประหยัดเวลาและแก๊สหุงต้มลงได้ และหากเปลี่ยนแหล่งพลังงานจากก๊าซหุงต้มเป็นชีวมวลประเภทอื่นจะสามารถลดต้นทุนในส่วนนี้ลงได้อีกเช่นกัน

## บรรณานุกรม

- [1] Wikipedia Contributors, “Coffee,” *Wikipedia, The Free Encyclopedia.*, 2015. [Online]. Available:  
<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Coffee&oldid=653370198>. [Accessed: 30-Mar-2015].
- [2] D. Marv, “An Overview Of Commodities Trading,” *Investopedia*, 2015. [Online]. Available:  
<http://www.investopedia.com/articles/optioninvestor/09/commodity-trading.asp?layout=orig>.
- [3] International Coffee Organization, “History of the International Coffee Organization,” 2015. [Online]. Available:  
[http://www.ico.org/icohistory\\_e.asp?section=About\\_Us](http://www.ico.org/icohistory_e.asp?section=About_Us). [Accessed: 07-Dec-2015].
- [4] International Coffee Organization, “Annual Review 2013-2014,” 2015. [Online]. Available: <http://dev.ico.org/documents/cy2014-15/annual-review-2013-14-electronic-e.pdf>. [Accessed: 05-Sep-2015].
- [5] กองส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร 1 กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์, “ปฏิทินกาแฟ ปี 2557/58 (มี.ค.58),” 2015. [Online]. Available:  
[http://agri.dit.go.th/web\\_dit\\_sec6/admin/uploadfiles/multi\\_files/กาแฟ มีค%2058.pdf](http://agri.dit.go.th/web_dit_sec6/admin/uploadfiles/multi_files/กาแฟ มีค%2058.pdf). [Accessed: 07-Dec-2015].
- [6] S. I. Mussatto, E. M. S. Machado, S. Martins, and J. a. Teixeira, “Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 4, no. 5, pp. 661–672, Mar. 2011.
- [7] J. P. Bok, H. S. Choi, Y. S. Choi, H. C. Park, and S. J. Kim, “Fast pyrolysis of coffee grounds: Characteristics of product yields and biocrude oil quality,” *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 17–24, Nov. 2012.
- [8] Wikipedia contributors, “History of coffee,” *Wikipedia, The Free Encyclopedia.*, 2015. [Online]. Available:  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History\\_of\\_coffee&oldid=694305887](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_coffee&oldid=694305887)

- [9] “ประวัติกาแฟ,” สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน), 2015. [Online]. Available: <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/coffee/history/index.php>.
- [10] ทองแก้ว เตือนจิต, “ประวัติของการกาแฟในไทย,” สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2011. [Online]. Available: [http://www.lib.ru.ac.th/journal/about\\_coffee.html](http://www.lib.ru.ac.th/journal/about_coffee.html). [Accessed: 07-Dec-2015].
- [11] International Coffee Organization, “World coffee trade (1963 – 2013): A review of the markets, challenges and opportunities facing the sector,” 2014. [Online]. Available: <http://www.ico.org/news/icc-111-5-r1e-world-coffee-outlook.pdf>. [Accessed: 05-Sep-2015].
- [12] “New ICO Study: Coffee Consumption in East and Southeast Asia: 1990-2012,” *International Coffee Organization*, 2014. [Online]. Available: <http://www.ico.org/news/icc-112-4e-consumption-asia.pdf>.
- [13] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, “กาแฟ : ผลพยากรณ์การผลิตปี 2558 (ปีเพาะปลูก2557/58),” วารสารการพยากรณ์ผลผลิตการเกษตร, vol. 29, no. 3, p. 116, 2557.
- [14] เมธี มณีงาม, “ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการบริโภคกาแฟของนักศึกษา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,” มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2556.
- [15] ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, “ธุรกิจร้านกาแฟในประเทศไทย,” รายงานตลาดอาหารในประเทศไทย, 2015. [Online]. Available: <http://fic.nfi.or.th/index.php/trade-a-market/hot-report/th-food-market-report/2054-2015-09-18-03-01-12?Itemid=234>. [Accessed: 07-Dec-2015].
- [16] ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, “ตลาดกาแฟร้อมดื่มในประเทศไทย,” ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร: รายงานตลาดอาหารในประเทศไทย, 2014. [Online]. Available: <http://fic.nfi.or.th/broadcast/TFMR-March-2014-OIE.pdf>. [Accessed: 07-Dec-2015].
- [17] “Production quantities by country : Coffee, green,” *Food and agriculture organization of the United nations statistics division*, 2015. [Online]. Available: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>. [Accessed: 07-Dec-2015].
- [18] C. Perrois, S. R. Strickler, G. Mathieu, M. Lepelley, L. Bedon, S. Michaux, J. Husson, L. Mueller, and I. Privat, “Differential regulation of caffeine metabolism in Coffea arabica (Arabica) and Coffea canephora (Robusta).,” *Planta*, vol. 241, no. 1, pp. 179–91, Jan. 2015.

- [19] C. Swift, "How a Coffee Tree Seed Becomes Liquid Happiness," *Rogers Family Company Coffee & Tea Blog*, 2013. [Online]. Available: <http://www.rogersfamilyco.com/index.php/coffee-tree-seed-becomes-liquid-happiness/>. [Accessed: 07-Dec-2015].
- [20] Rivera Joseph coffeechemistry.com, "Differences: Arabica and Robusta Coffee," 2015. [Online]. Available: [http://www.coffeechemistry.com/agriculture/differences-between-arabica-and-robusta-coffee.html#disqus\\_thread](http://www.coffeechemistry.com/agriculture/differences-between-arabica-and-robusta-coffee.html#disqus_thread). [Accessed: 05-Sep-2015].
- [21] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมวงศ์, "ขั้นตอนการผลิตเมล็ดกาแฟ," *Food Network Solution : Food Wiki*, 2015. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3135/ขั้นตอนการผลิตเมล็ดกาแฟ>.
- [22] "The tree and its surroundings," *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia 2010*, 2015. [Online]. Available: [http://www.cafedecolombia.com/particulares/en/sobre\\_el\\_cafe/el\\_cafe/el\\_arbol\\_y\\_el\\_entorno/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/en/sobre_el_cafe/el_cafe/el_arbol_y_el_entorno/). [Accessed: 07-Dec-2015].
- [23] Wikipedia contributors, "Espresso," *Wikipedia, The Free Encyclopedia.*, 2015. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Espresso&oldid=693688932>. [Accessed: 07-Dec-2015].
- [24] "HOW TO GRIND COFFEE BEANS," *Great Coffee Grinders - The World's Best Coffee Grinders*, 2015. [Online]. Available: <http://greatcoffeegrinders.com/how-to-grind-coffee-beans/>. [Accessed: 07-Dec-2015].
- [25] Wikipedia contributors, "Angelo Moriondo," *Wikipedia, The Free Encyclopedia.*, 2015. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Angelo\\_Moriondo&oldid=679616331](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Angelo_Moriondo&oldid=679616331). [Accessed: 07-Dec-2015].
- [26] P. Nadalet, "The Certified Italian Espresso and Cappuccino," *Istituto Nazionale Espresso Italiano*, 2012. [Online]. Available: [http://www.espressoitaliano.org/files/File/istituzionale\\_inei\\_hq\\_en.pdf](http://www.espressoitaliano.org/files/File/istituzionale_inei_hq_en.pdf). [Accessed: 07-Dec-2015].

- [27] K. Speer and I. Kölling-Speer, “The lipid fraction of the coffee bean,” *Brazilian J. Plant Physiol.*, vol. 18, no. 1, pp. 201–216, Mar. 2006.
- [28] L. F. Ballesteros, J. A. Teixeira, and S. I. Mussatto, “Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, no. 12, pp. 3493–3503, Jun. 2014.
- [29] N. S. Caetano, V. F. M. Silva, A. C. Melo, A. a. Martins, and T. M. Mata, “Spent coffee grounds for biodiesel production and other applications,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 16, no. 7, pp. 1423–1430, May 2014.
- [30] “Nestlé hits target of zero waste at UK factory,” *Nestlé Good Food, Good Life*, 2011. [Online]. Available: <http://www.nestle.com/media/newsandfeatures/nestle-hits-target-of-zero-waste-uk-factory>.
- [31] S. Nopporn, “Briquette fuel made of coffee residue,” Mahidol University. Bangkok (Thailand). Graduate School., 2003.
- [32] L. Limousy, M. Jeguirim, P. Dutournié, N. Kraiem, M. Lajili, and R. Said, “Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets,” *Fuel*, vol. 107, pp. 323–329, May 2013.
- [33] สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ, 1st ed. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2010.
- [34] E. E. Kwon, H. Yi, and Y. J. Jeon, “Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds.,” *Bioresour. Technol.*, vol. 136, pp. 475–80, May 2013.
- [35] M. H. Berhe, A. Asfaw, and N. Asfaw, “Investigation of Waste Coffee Ground as a Potential Raw Material for Biodiesel Production,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 854–860, 2013.
- [36] M. Todaka, W. Kowhakul, H. Masamoto, M. Shigematsu, and S. Onwona-Agyeman, “Thermal decomposition of biodiesel fuels produced from rapeseed, jatropha, and coffee oils with different alcohols,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 113, no. 3, pp. 1355–1361, Mar. 2013.
- [37] D. R. Vardon, B. R. Moser, W. Zheng, K. Witkin, R. L. Evangelista, T. J. Strathmann, K. Rajagopalan, and B. K. Sharma, “Complete Utilization of Spent

- Coffee Grounds To Produce Biodiesel, Bio-Oil, and Biochar,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 1, no. 10, pp. 1286–1294, Oct. 2013.
- [38] ไชยเรืองศรีธนินทร์, การสกัดของแข็ง-ของเหลว. กรุงเทพ: โอดี้นสโตร์, 2549.
- [39] M. Ferrari, F. Ravera, E. De Angelis, F. S. Liverani, and L. Navarini, “Interfacial properties of coffee oils,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 365, no. 1–3, pp. 79–82, Aug. 2010.
- [40] Z. Al-Hamamre, S. Foerster, F. Hartmann, M. Kröger, and M. Kaltschmitt, “Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing,” *Fuel*, vol. 96, pp. 70–76, Jun. 2012.
- [41] M. V. P. Rocha, L. J. B. L. de Matos, L. P. de Lima, P. M. da S. Figueiredo, I. L. Lucena, F. A. N. Fernandes, and L. R. B. Gonçalves, “Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds.,” *Bioresour. Technol.*, vol. 167, pp. 343–8, Sep. 2014.
- [42] N. S. Caetano, V. F. M. Silva, and T. M. Mata, “Valorization of Coffee Grounds for Biodiesel Production,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 26, pp. 267–272, 2012.
- [43] เจริญกุลภิญญา, การแปรรูปอาหารเบื้องต้น, 1st ed. กรุงเทพฯ: สาขาวิชา วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2553.
- [44] นัฐวี ตีรณานนท์, “การศึกษาการนำเอามล็ดเงาจากอุตสาหกรรมการผลิตเจาะกระปองมาใช้ในการผลิตใบโอดีเซล,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2008.
- [45] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, “Filtration / การกรอง,” *Food Network Solution : Food Wiki*, 2015. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0320/filtration-การกรอง>.
- [46] รัตนา จิระรัตนานนท์, กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์, 1st ed. กรุงเทพฯ: ภาควิชา วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.
- [47] Wikipedia contributors, “Sieve,” *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2015. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sieve&oldid=694713882>.
- [48] จัล ทรัพย์เสรี, “DOE Central Composite Design,” *QM for Quality Management*, กรุงเทพฯ, pp. 72–74, 2009.
- [49] S. de F. M. A. M. S. M. B. S. and M. L. T. Sérgio Roberto Montoro, *Design of Experiments - Applications*. InTech, 2013.

- [50] D. Steppan, J. Werner, and B. Yeater, “Essential Regression and Experimental Design for Chemists and Engineers,” 1998. [Online]. Available: <http://www.oocities.com/csteppan/erbook.zip>. [Accessed: 07-Dec-2015].
- [51] คณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, คู่มือปฏิบัติการเคมีทั่วไปและเคมีอินทรีย์ (256106). พิมพ์โดย: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2555.
- [52] Chemical Intelligence, “THE SOLVENTS REPORT,” Austin TX 78756 U.S.A., 2014.
- [53] Bank of Thailand Northern Region Office, “รายงานสถานการณ์ราคาก๊อกดื่มน้ำดื่มในประเทศไทยไตรมาส 2/2558,” 2015. [Online]. Available: [https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib\\_CommodityQuarter/Q2\\_58\\_Ethanol.pdf](https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib_CommodityQuarter/Q2_58_Ethanol.pdf). [Accessed: 02-Sep-2015].
- [54] S. I. Mussatto, L. F. Ballesteros, S. Martins, and J. A. Teixeira, “Extraction of antioxidant phenolic compounds from spent coffee grounds,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 83, pp. 173–179, Nov. 2011.

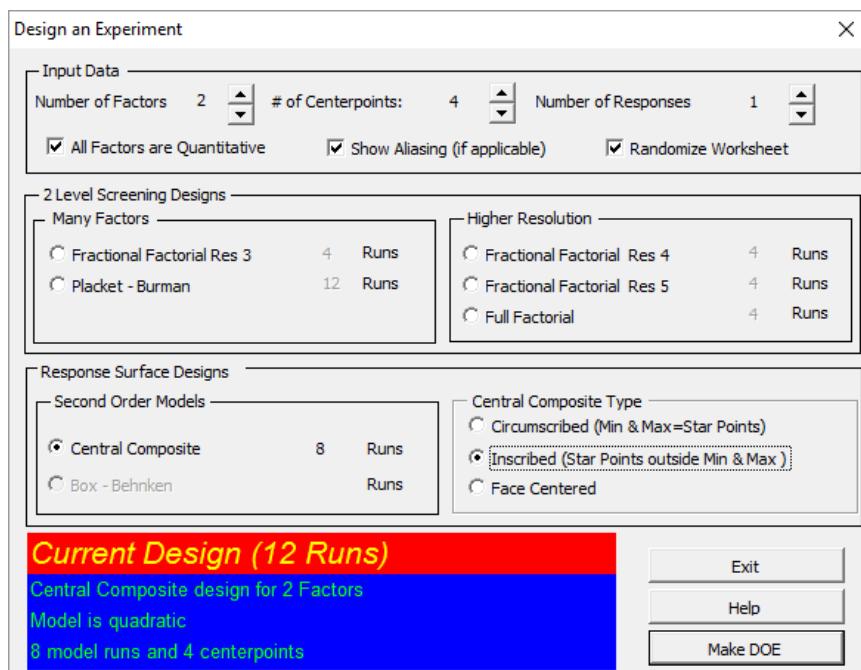
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
(ขั้นตอนการออกแบบแผนกรทดลอง)

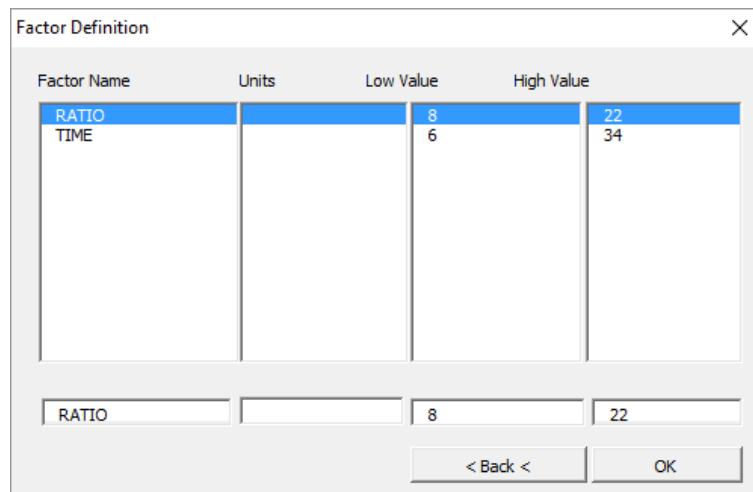
## ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

กำหนดตัวแปรอิสระ ตัวแปรที่ทำการศึกษามี 2 ตัวแปรหลัก คือ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยเวลาการกาแฟ (R) และเวลาในการสกัด (T) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณผลได้ของน้ำมัน (Y)

กำหนดช่วงตัวแปรอิสระการกำหนดช่วงตัวแปรนิความสำคัญมากต่อสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบสนองที่ทำการศึกษา โดยไม่คำริมช่วงกว้างจนไม่สามารถระบุจุดที่ให้สภาวะที่เหมาะสมได้ชัดเจน และต้องสันนิษฐานได้ว่าสภาวะที่ให้ผลได้สูงสุดจะต้องอยู่ในช่วงที่กำหนด โดยทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาค่าขอบดังกล่าว และใช้ค่าขอบกำหนดในโปรแกรม Essential Experimental Design Version 2.216 โดยมีเงื่อนไขในการออกแบบการทดลองใน design an experiment ดังแสดงในรูปที่ ก.1 และใส่ช่วงของตัวแปรอิสระใน factor definition ตามรูปที่ ก.2 ซึ่งผลการออกแบบการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง โดยสามารถperc่าช่วงตัวแปรอิสระได้ดังตารางที่ ข.1



รูปที่ ก.1 ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ



รูปที่ ข.1 การกำหนดช่วงตัวแปรอิสระ

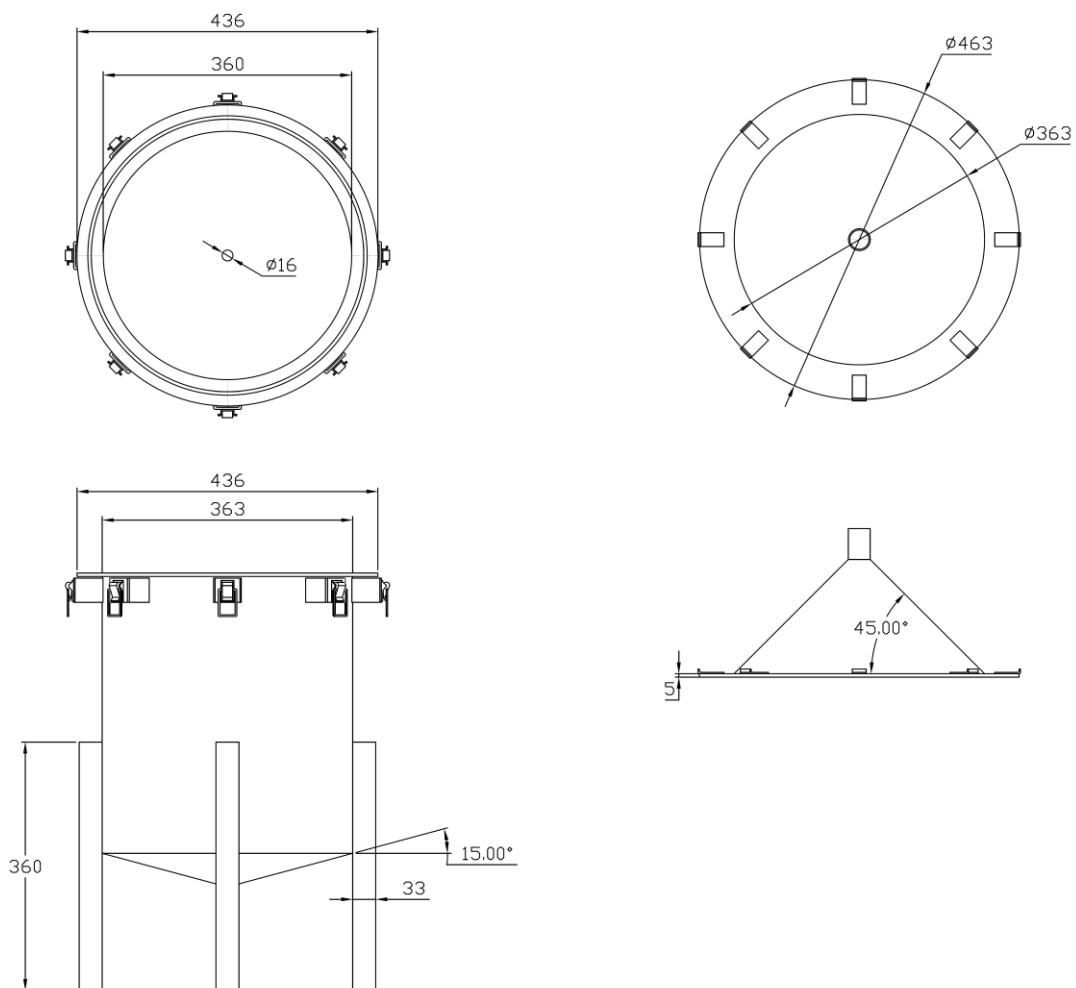
ตารางที่ ก.1 แสดงช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

Run	$R$ (g.g <sup>-1</sup> )	$T$ (min)	Yield of coffee oil, $Y$ (wt.%)			
			Hexane	Anhydrous ethanol	Hydrous ethanol	Methanol
1	22.0	34.0				
2	8.0	34.0				
3	15.0	20.0				
4	22.0	6.0				
5	24.9	20.0				
6	15.0	20.0				
7	8.0	6.0				
8	15.0	39.8				
9	15.0	20.0				
10	5.1	20.0				
11	15.0	0.2				
12	15.0	20.0				

ภาคผนวก ข  
(แบบเครื่องสกัดน้ำมันแบบหมุนวน)

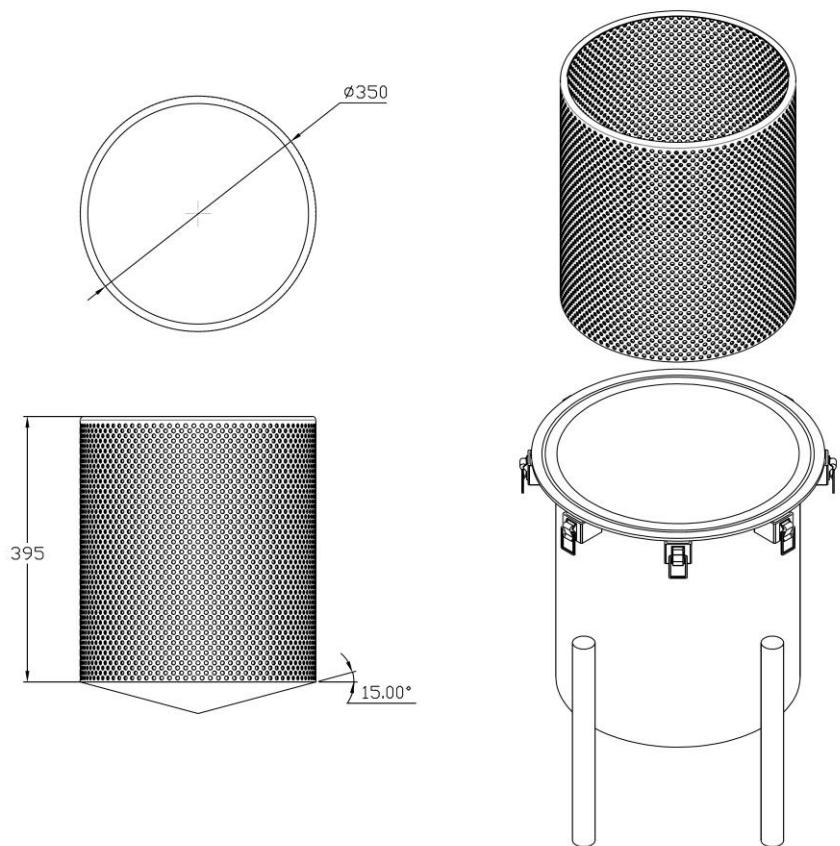
ตารางที่ ข.1 รายการอุปกรณ์เครื่องสกัดน้ำมันกาแฟแบบหมุนวน

ลำดับที่	รายการ	ขนาด/รุ่น	หมายเหตุ
2	ถังหมุนวน	ตามแบบ	รูปที่ ข.1
3	ถังตะแกรงกรอง	ตามแบบ	รูปที่ ข.2
4	ถังเก็บของเหลวสกัด	ตามแบบ	รูปที่ ข.3
5	ถังอุ่นไอลีชั้นใน	ตามแบบ	รูปที่ ข.4
6	ถังน้ำร้อนชั้นนอก	ตามแบบ	รูปที่ ข.5
7	การประกอบถังอุ่นไอลีชั้นในและถังน้ำร้อนชั้นนอก	ตามแบบ	รูปที่ ข.6
8	ชุดกรองละเอียด	ตามแบบ	รูปที่ ข.7
9	ปั๊มหมุนวน	Sanso PMD-611	-
10	ปั๊มสารเคมี	Sanso PMD-311	-
11	ปั๊มน้ำ	Sonic AP 2500	-
12	ถังน้ำพลาสติก	Ø 43 cm สูง 53 cm	-
13	เตา ก๊าซหุงต้ม (เตาหัวเร่ง)	KB5 Hanaya	-
14	ถัง ก๊าซหุงต้ม	15 กก.	-



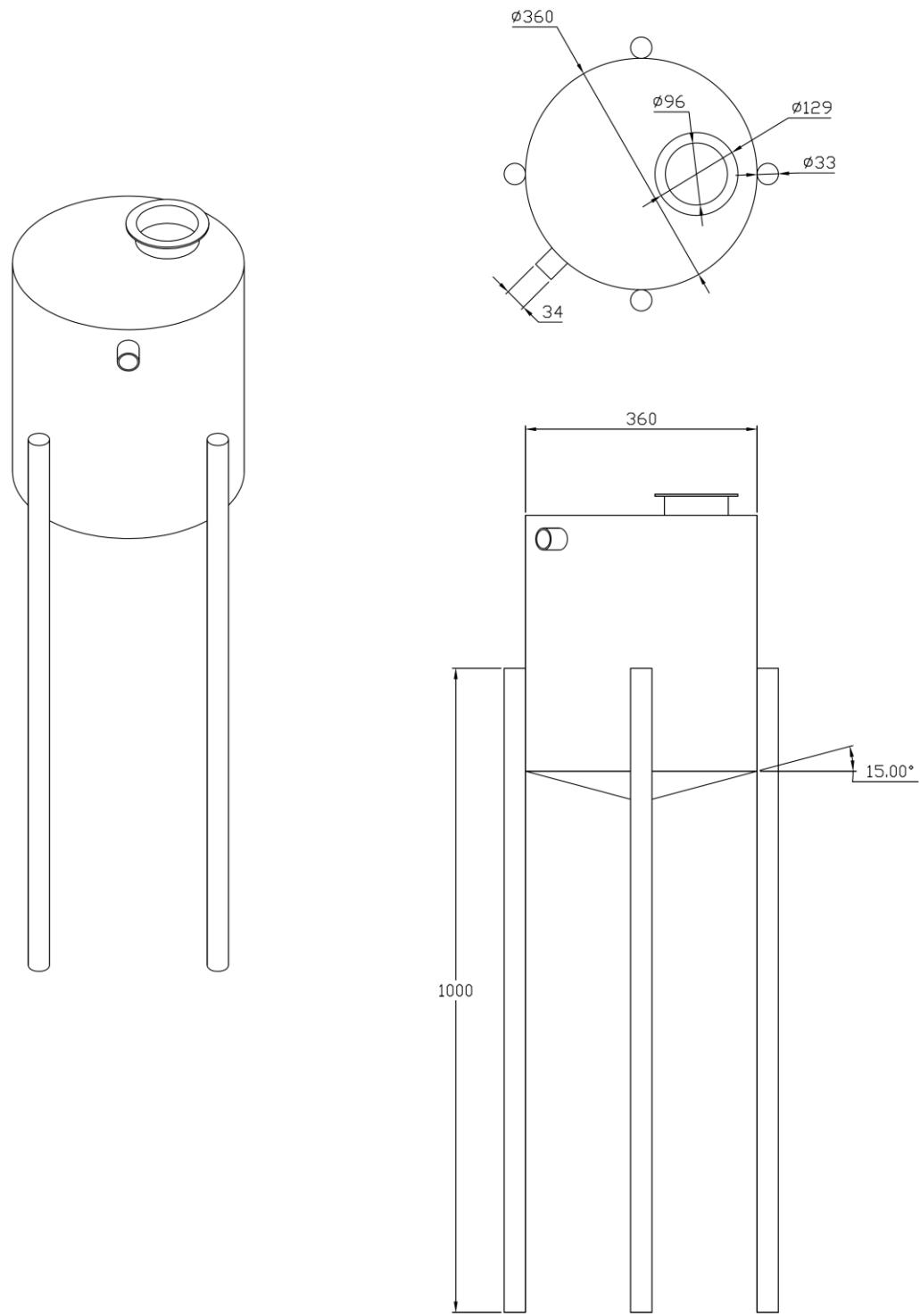
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.1 แบบถังสกัดหมุนวนและฝาถังสกัด



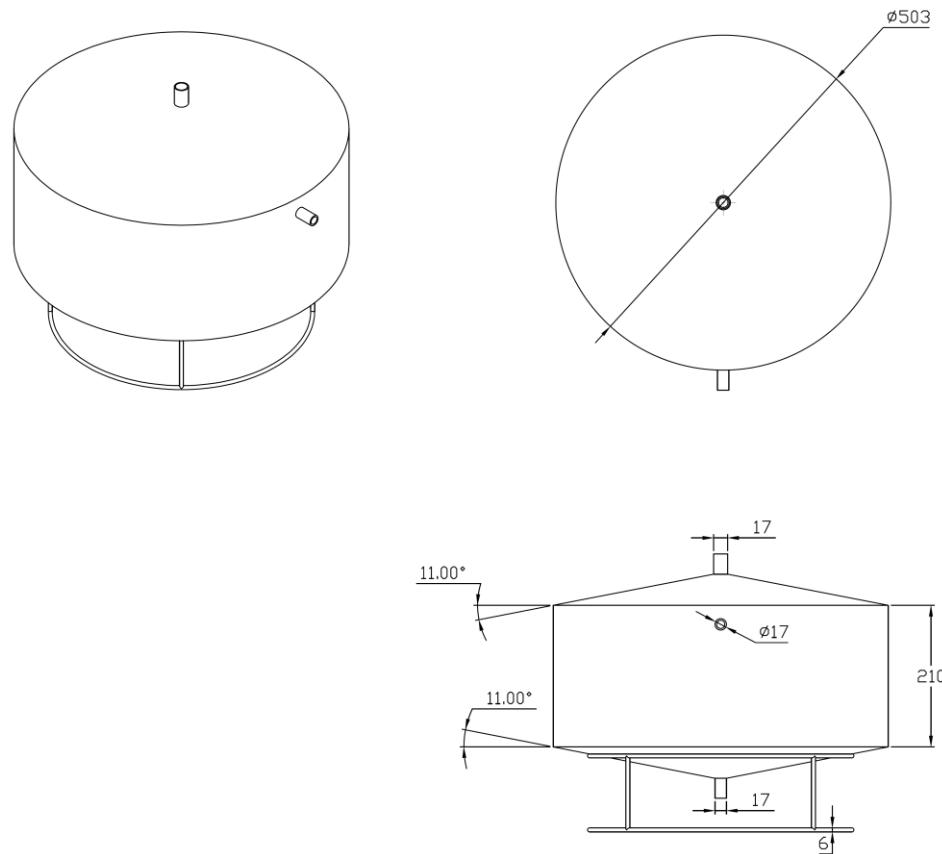
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.2 แบบถังตะแกรงกรอง



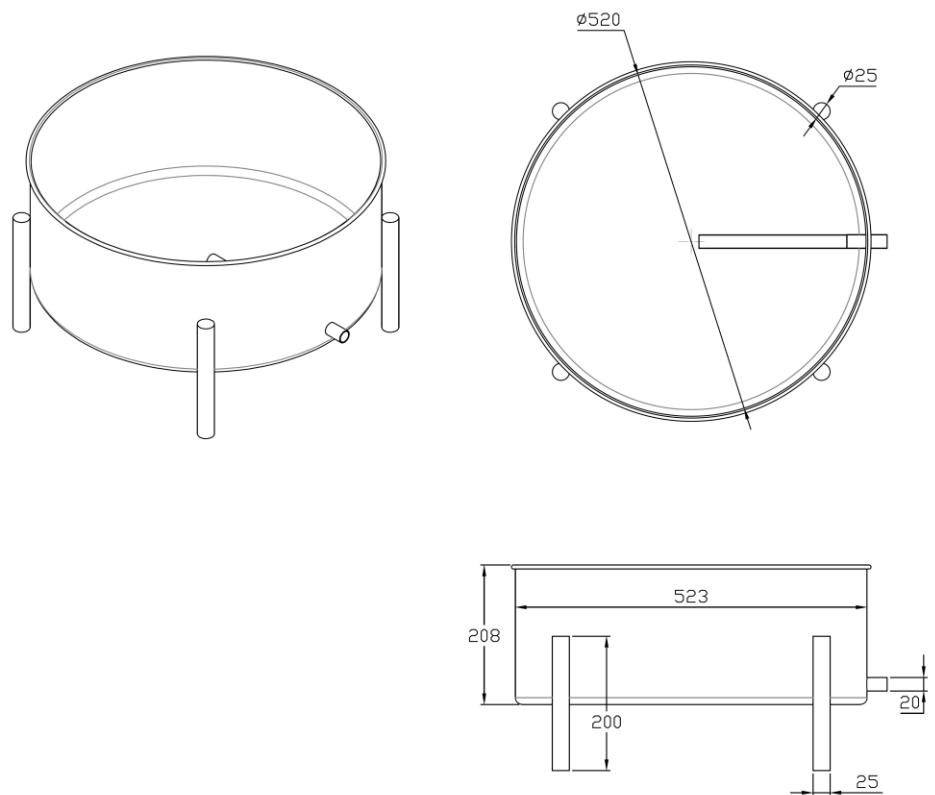
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.3 แบบถังเก็บของเหลวสกัด



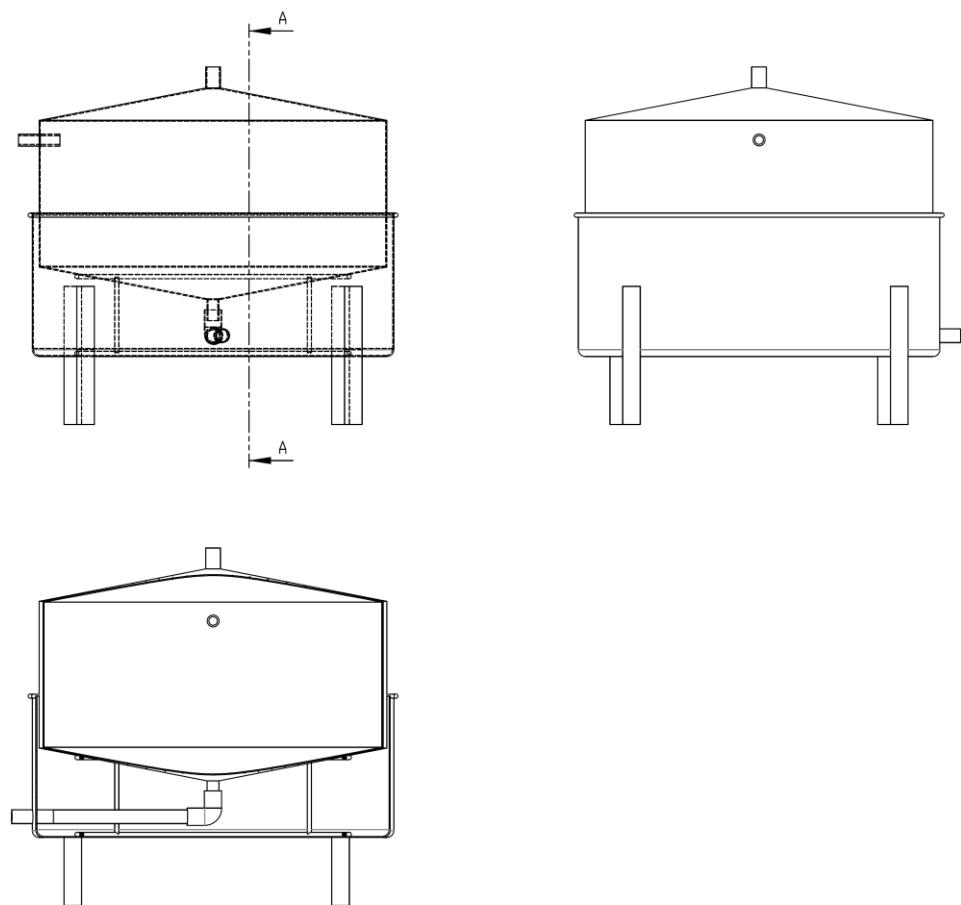
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๔ แบบถังอุ่นไอล์ฟันใน



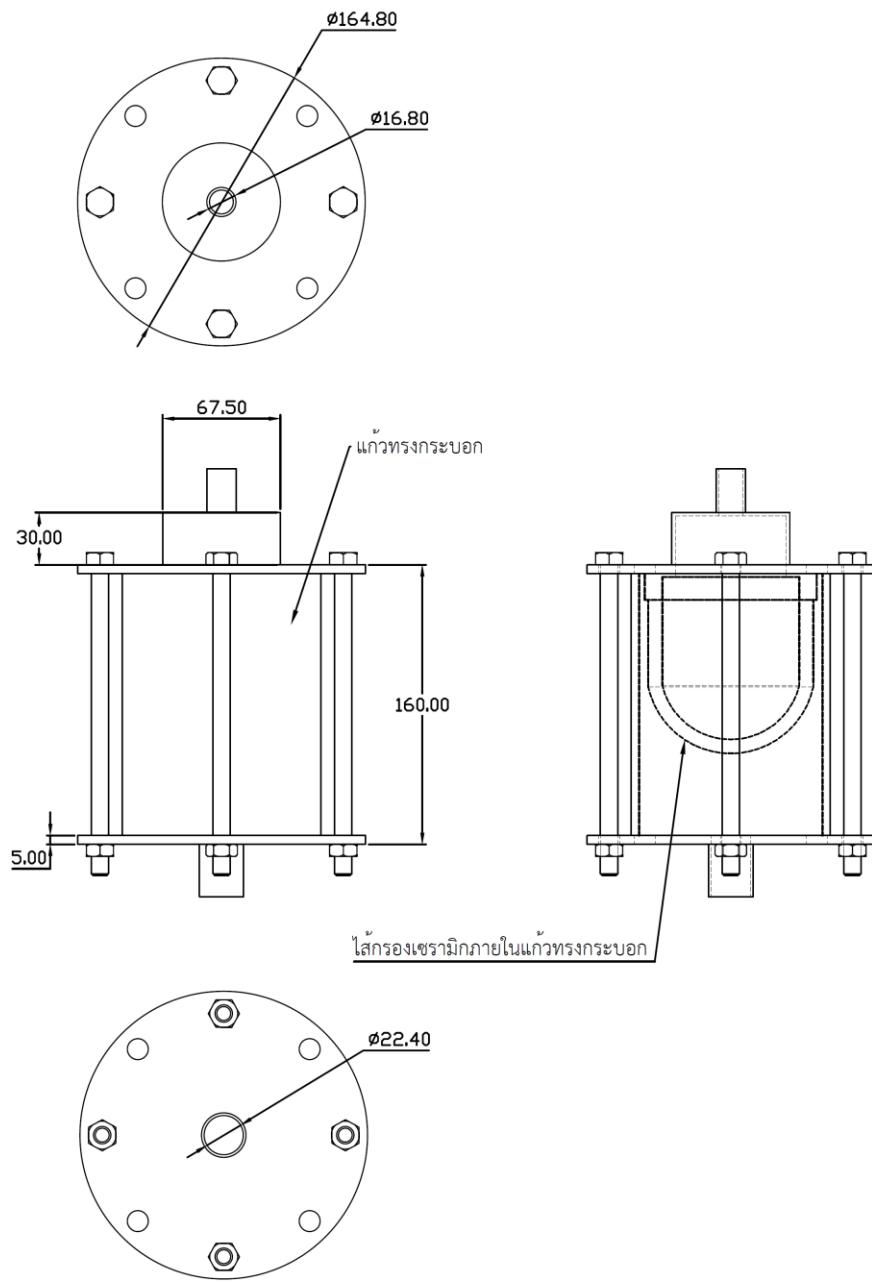
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.5 แบบถังน้ำร้อนขันนอก



(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.6 แบบการประกอบถังอุ่นไส้ชั้นในและถังน้ำร้อนชั้นนอก



(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.7 แบบชุดกรองละเอียด

ภาคผนวก ค  
(การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับการตรวจเอกสาร)

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 1

บทความประชุมวิชาการ

P. Eawlex, K. Somnuk, 2015. Utilization of spent coffee grounds to produce liquid-fuel and solid-fuel. In Proceedings of the 8th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-8), 4-6 November 2015, Pathum Thani, Thailand, pp. 338-341.

(IR032)



## การใช้ประโยชน์จากกาแฟเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง

Utilization of Spent Coffee Grounds to Produce Liquid-Fuel and Solid-Fuel

IR032

พิชัย เอียวเล็ก<sup>1\*</sup> และฤทธิ สุมนึก<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

<sup>1,2</sup>Email : pichai.eawlex@gmail.com, <sup>2</sup>Email : krit.s@psu.ac.th

### บทคัดย่อ

การศึกษาเบื้องต้นของการใช้ประโยชน์จากกาแฟเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานในรูปของเหลวและของแข็ง ซึ่งทั่วโลกมีปริมาณการผลิตเมล็ดกาแฟสดๆ ประมาณ 8.2 ล้าน噸ปี เมื่อจานวนนี้มีการบริโภคกาแฟในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้เกิดเศษกาแฟเหลือที่มีจานวนมาก หลังจากผ่านกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป และแบบการซักกาแฟ กาแฟจะถูกนำไปขายเป็นขยะอินทรีย์ความชื้นสูง บางส่วนของขยะนี้นิยมใช้ทำฟาร์กิช มีทอนและส่งออกต่อสู่ประเทศอื่นได้ น้ำวิธีหดหายคนได้มีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากการผลิตกาแฟเป็นพลังงานทดแทน โดยกาแฟเหลือที่มีค่าความร้อนสูงประมาณ  $19.3 \text{ MJ/kg}$  ซึ่งพลังงานเชื้อมวลจะบันทึกน้ำมันดิบ เป็นเชื้อเพลิงแข็ง แต่และพบว่าในกาแฟเพื่อปริมาณน้ำหนักประมาณ 7-17 wt.% ตั้งแต่นั้นน้ำมันกาแฟที่มีสารกรามาในตัวเริ่นต้นติดต่อกันเป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น ในไนต์โซล และสเตโรอลได้จากการกระบวนการผลิตน้ำมันดิบ กาแฟเริ่มน้ำมันสารกรามาใช้เป็นแหล่งพลังงานที่มีค่าความร้อนสูงประมาณ  $19.3 \text{ MJ/kg}$  ซึ่งพลังงานเชื้อมวลจะบันทึกน้ำมันดิบ เป็นเชื้อเพลิงแข็ง อีกด้วย นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง ในการผลิตใบโอดีเซล เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันแพะดี เนื่องจากน้ำมันกาแฟไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มน้ำมันดิบในภาค

คำสำคัญ: กาแฟ, น้ำมันกาแฟ, เชื้อเพลิงเหลว, เชื้อเพลิงแข็ง

### Abstract

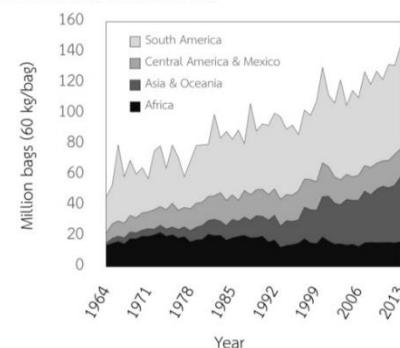
The utilization of spent coffee grounds (SCG) was discussed to produce the liquid- and solid-fuel. Based on close to 8.2 million tonnes of green coffee beans (GCB) produced globally each year. The SCG is the waste after brewing to produce an instant coffee and a fresh roasted coffee. After brewing, the high moisture content of organic wastes, SCG will be dumped. Therefore, the SCG decomposes partly to methane, and contributing more to climate change, which are the partial cause of global warming. Many researchers have studied on the utilization of SCG as the renewable energy. The  $19.3 \text{ MJ/kg}$  higher heating value (HHV) of SCG can be detected, which is the high level of biomass energy, and can be directly converted to solid fuel. The oil of 7 to 17 wt.% were found in SCG, therefore, it can be used as the feedstock to produce the biodiesel (for liquid-fuel). The by-product after oil extraction process, the defatted spent coffee grounds (DFSCG) can be used as the biomass resource to produce the pellets (for solid-fuel). In addition to the use of oil from SCG will lessen competition with food resources

(crude palm oil, coconut oil, and rapeseed oil) for biodiesel production.

**Keywords:** spent coffee grounds, coffee oil, liquid-fuel, solid-fuel

### 1. บทนำ

การบริโภคกาแฟเริ่มเข้าสู่ประมาณศตวรรษที่ 16 และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นลดลงตามอายุของชาติเติบโตที่เพิ่มขึ้นทั่วโลกต่อระยะเวลา 50 ปี ผ่านมา ตั้งแต่เดิมในรูปที่ 1 [1] จากข้อมูลองค์กรกาแฟระหว่างประเทศ (International Coffee Organization, ICO) ระหว่างปี พ.ศ. 2556-2557 มีปริมาณกาแฟทั้งหมดในตลาดโลกประมาณ 8.2 ล้านตัน [2] สำหรับประเทศไทยการบริโภคกาแฟเริ่มแพร่หลายในกรุงรัตนโกสินทร์ สมัยรัชกาลที่ 4 และมีความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จากข้อมูลกระทรวงพาณิชย์ ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีความต้องการใช้เมล็ดกาแฟ 75,000 ตัน มีความสามารถปลูกได้ 37,366 ตัน (มีผลผลิตเป็นอันดับที่ 19 ของโลก) ส่วนที่เหลืออ้างอิงที่มาหาน้ำเข้าจากเว็บด้านบนและอินเตอร์เน็ต [3] จากความนิยมบริโภคและความต้องการเมืองติดกาแฟที่เพิ่มมากขึ้น สร้างกาแฟเหลือทิ้งจำนวนมากเริ่มขึ้นในประเทศไทย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเศษกาแฟที่มาจากกาแฟที่มีคุณสมบัติด้านการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อมวล ที่ในรูปแบบของแข็งและของเหลว เนื่องจากการกาแฟมีองค์ประกอบคล้ายสังเคราะห์ ร้อนเที่ยง และมีน้ำในกาแฟประมาณ 7-17 wt.% [4] บทความอับบันจึงได้รวมการศึกษาในหัวข้อนี้ในการวิจัยต้านการนำกาแฟไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน





รูปที่ 1 ปริมาณการผลิตเม็ดกาแฟ [1]

## 2. ลักษณะการกาแฟ

ประเภทกาแฟที่นิยมปลูกมีเพียง 2 สายพันธุ์สูงสุดคือ “ไดเก้ พันธุ์อุร่า ราชบิกา (*Coffea arabica* L.) และ พันธุ์โรบัสต้า (*Coffea canephora*, var. Robusta) โดยความแตกต่างของกาแฟทั้งสองชนิดคือ สายพันธุ์อุร่า ราชบิกาเจริญเติบโตได้ดีในที่อากาศเย็นจึงต้องปลูกในพื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 600–2,200 เมตร ปริมาณน้ำฝน 1,200–2,200 มิลลิเมตร/ปี แต่อยู่หมู่บ้านป่าไม้ 15–24 °C มีกึ่งช่วงลมมากกว่า ความชื้น น้อยกว่า และมีปริมาณเรือนยอดกว่าสายพันธุ์โรบัสต้าสูงกว่า ส่วนกาแฟพันธุ์โรบัสต้าสามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ที่มีเมืองเดือด เช่น ราชาศ้วลีชั้น ความสูงจากระดับน้ำทะเล ประมาณ 0–800 เมตร ปริมาณน้ำฝน 2,200–3,000 มิลลิเมตร/ปี อุณหภูมิป่าไม้ 18–36 °C ผู้ผลิตกาแฟจะนำใบกาแฟพันธุ์อุร่าบีบามากสุดก่อนนำไปเผา ระหว่างนี้จะมีความหอม [5] ทั้งสองสายพันธุ์ถูกนำมาสักดัดน้ำมันกานพลิฯ ให้จากทั้มเล็กกาแฟสด (green coffee bean, GCB) และกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) โดยปริมาณน้ำมันในเม็ดกาแฟจะมีผลต่อรสชาติ จะมีประมาณมากกว่าโรบัสต้า [4] ในขั้นตอนการเล็กกาแฟ หลังจากเม็ดกาแฟสด (GCB) ผ่านการคั่วแล้ว จะได้เม็ดกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) เม็ดกาแฟทั้งสองถูกนำมาย่อยสลายเป็นน้ำกาแฟและเหล็กซุ่มกระบวนการทำแห้งแบบพ่นไอน้ำ (spray drying) เพื่อผลิตเป็นเม็ดกาแฟสำเร็จรูป และลดความชื้นเพื่อให้ใช้ในการประกอบอาหารได้โดยนิยมใช้เครื่องซึ่งสามารถแบ่งแบบอบสเปรย์ ศึกษาผ่านน้ำร้อนอุณหภูมิ 88±2 °C และความดันทั้งสี่ 9±1 bar ลงบนผิวของเม็ดกาแฟไปใช้งาน ภายใต้เครื่องมีเศษเหลือที่ศึกษาการ (*spent coffee grounds, SCG*) โดยมีองค์ประกอบของเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 [6]

### 3. การใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน

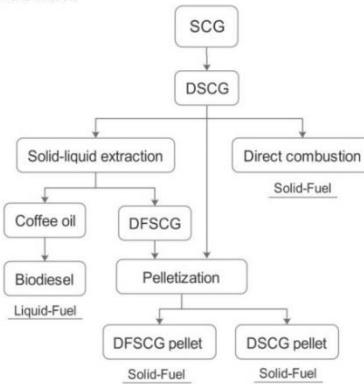
จากคุณสมบัติให้หัวเรื่องความนิยมสูงกว่าชีวมวลชนดื่นอื่นๆ และ  
เบริมานฟลีก้า (ash) ต่ำประมาณห้าเมืองคะประกอบของน้ำนมและนมอยู่ในกา  
กาเพา ทำให้มีโอกาสในการที่พัฒนาการเกษตรให้ไปเป็นผลลัพธ์งานทางการเลี้เร้อที่  
แบบข้อเรืองเชิงและเชือกเพลิงหลวง ซึ่งได้แสดงแผนทั้งการนำภารกภาระ  
มาใช้ประโยชน์ด้านน้ำแล้วงาน ตามรูปที่ 2

ตารางที่ 1 คณสมบัติของ SCG และ DFSCG [6]

Characterization	SCG	DFSCG
Higher heating value (MJ/kg)	19.3	19.0
Moisture (wt.%)	65.7	9.4
Total carbon (wt.%)	67.3	12
Total nitrogen (wt.%)	2.2	2.0
Protein (wt.%)	13.7	12.3
Ash (wt.%)	2.2	1.7
Cellulose (wt.%)	13.8	15.3
Klason lignin (wt.%)	31.9	30.9
Soluble lignin (wt.%)	1.7	1.6
Total lignin (wt.%)	33.6	32.5

### 3.1 การเผาไหม้โดยตรง

เหลือทั้งจากโรงโนในประเทศบริจิดอยู่ให้ความร้อนกับห้องต้มน้ำด้วยการเผาแก๊สไฟฟ้า ภาคภาคใช้ช่างได้เพื่อเปลี่ยนเปลี่ยนมวลน้ำบินที่นี่ และหากการกำจัดความชื้นออกจากการก่อสร้างจะทำให้ประสิทธิภาพของห้องต้มน้ำไม่เข้มข้น



รูปที่ 2 แผนผังการใช้ประโยชน์จากการกาแฟเป็นเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง

### 3.2 เชือเพลิงอัดเม็ดจาก SCG และ DFSCG

เพื่อจ้างจากเชื้อเพลิงดัมเมล (pellet fuel) มีลักษณะที่ร่ายรื่นต่อการจัดเก็บ การขนส่ง รวมทั้งมีมาตรฐานดำเนินคดีกัญชงที่ต้องเดินร่ายรื่นต่อการนำไปใช้งานสำหรับเวลาเผาไหม้ครั้งหนึ่ง อีกทั้งจากการแพร่มีคุณสมบัติเหมาะสมเป็นวัสดุดูบิดอัดเชือกเหลวอัดเม็ด ดังแสดงในตารางที่ 2 [8,9] จึงมีการศึกษาและทดสอบเชื้อเพลิงอัดเพื่อทางการกากาไฟโดย Limousy และคณะ [10] ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงร่องรอยเมื่อต้องอัดเม็ดที่ต้องเดินร่ายรื่นต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเบรียบเทินหันก้นที่เชือกเหลวอัดเม็ดจากน้ำที่เลือยไม่สัก และจากการผลิตเชื้อเพลิงเบรียบเทินหันก้นที่เชือกเหลวอัดเม็ดจากน้ำที่เลือยไม่สัก และจากการผลิตเชื้อเพลิงเบรียบเทินหันก้นในอัตราส่วนที่กำหนด จานวนทดสอบการใช้งานในหม้อน้ำขนาด 12 kW พบว่า เชื้อเพลิงจึงอัดเม็ดจากน้ำที่เลือยไม่สัก และ การกากาไฟฟัสมันที่เลือยไม่สัก มีค่าความร้อนเท่ากับ 19.55, 19.23 และ 19.63 MJ/kg ตามลำดับ ในขณะที่กําระร่องน่องออกไซด์ (CO) และปริมาณเมมฟ์ในกําราໄใจเสียจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากการกากาไฟฟัสมีค่ามากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งกล่าวได้ว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากการกากาไฟฟัสมันที่เลือย มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดัมเมลจากน้ำที่เลือยที่ไป แต่จากความร้อนและความหนาแน่นที่แตกต่างกันของกากาไฟฟัสมันและเชื้อเพลิงที่กําราให้การผลิตเชือกเหลวอัดเม็ดและการใช้งานในหม้อน้ำอาจต้องศึกษาปรับแก้อัตราการป้อนเชือกเหลวอัดของกากาไฟฟัสมันและปรับเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีประสิทธิภาพ ถือว่ารูปแบบกากาไฟฟัสมันที่ดีของการผลักดันน้ำมันด้วยคุณสมบัติในการเป็นวัสดุดูบิดในกระบวนการผลิตเชือกเหลว ซึ่งควรมีการศึกษาในไปประยุกต์ใช้เป็นเชือกเหลวอัดเม็ด เชือกเหลวจากความร้อนของ DFSCC ที่ยังมีค่าที่สูง ถึงแม้ว่าจะถูกหลักดันน้ำมันออกไปแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด [8,9]

คุณสมบัติ	SCG	DFSCG
ค่าความร้อน (HHV) ไม่ควรต่ำกว่า 12.55 MJ/kg	19.3	16
คาร์บอนดักชั่ว (fixed carbon) ไม่ควรต่ำกว่า 15 wt.%	19.83	12
อําต์ (ash) ไม่ควรสูงกว่า 20 wt.%	2.2	1.65



การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ  
รุปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8  
The 8<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference

กําเนดซัลฟูร (total sulfur) ไม่ควรเกิน 2 wt.%	0	14
ไม่มีสารออกไซด์เชื่อม (oxidizer)	n/a	n/a
ไม่มีสารทึบไว้ให้กับการระเบิดเม็ดถูกทำให้ร้อน	n/a	n/a
ไม่มีสารทึบกรองที่เป็น strong oxidizing agent	n/a	n/a

ตารางที่ 3 การทดสอบใช้งานเชื่อเพื่อจัดอันดับในหม้อต้ม [10]

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงในช่วงการเผาไหม้ [10]			
คุณสมบัติ	SCG	Pine sawdust	Blend 50:50
CO (ppm/vol)	11.8	7.9	6.7
Particles (mg/Nm <sup>3</sup> )	17.5	14.2	13.9
HHV (MJ/kg)	19.6	19.2	19.6
Boiler combustion efficiencies (%)	86.3	90.8	91.9

### 3.3 การสกัดน้ำมันและผลิตในโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟ

### 3.3 การสกัดน้ำมัน

การกรองด้วยน้ำมันจากการแยกแพะเจลจัดอยู่ในประเภทการกรองด้วยวิธีของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid extraction) หรือเรียกว่าขูดหินที่นำส่วนของสารที่ต้องการออกจากของผสมเจลที่ตัววัสดุทำลายของเหลว สำหรับกรณีที่ส่วนประกอบที่ต้องการจะถูกแยกตัวออกด้วยวัสดุที่ต้องการทำลาย [11] เมล็ดกาแฟที่ถูกตีบดินก็มีค่าต่อการรีไซเคิลน้ำมันน้ำมันและเปรียบเท่า 7.17 wt.% [4] การกรองด้วยน้ำมันจากการแยก (SCG) คาดว่าเส้นที่สนใจในศึกษาในบริบทประเทศไทย ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาและทดสอบความสามารถในการกรองด้วยน้ำมันจาก SCG ในระดับต่ำของปฏิบัติการ โดยใช้วัสดุทำลายทาง化ของแพะ เช่น hexane, isopropanol, pentane และ acetone เป็นต้น ที่มีวิจัยของ Ferrari และคณะ [12] ได้ศึกษาการกรองด้วยน้ำมันจากเมล็ดกาแฟที่ต้ม (roasted coffee bean, RCB) ของน้ำมันพืชและการพัฒนาอุปกรณ์เบ้าและพันธุ์ไวน์บัตตา โดยใช้สารละลาย pentane ทำการกรองด้วยวิธี Soxhlet extraction เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า กานาเฟลาม พันธุ์อุรากะบินและสารพันธุ์ไวน์บัตตาให้น้ำมัน  $16.5 \pm 0.4$  wt.% และ  $9.2 \pm 0.1$  wt.% ตามลำดับ Al-Hamamre และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาการกรองด้วยน้ำมันจาก SCG ขาวตัววัสดุทำลายแบบมีขั้ว (polar) และไม่มีขั้ว (non-polar) ด้วย Soxhlet extraction ใช้เวลากรอง 30 นาที ตัวอย่างที่ทำ ลดลงเป็นไปได้ (pentane, hexane, toluene และ chloroform) ได้ปริมาณน้ำมัน  $15.18$ ,  $15.28$ ,  $14.32$  และ  $8.60$  wt.% ตามลำดับ และตัววัสดุทำลายแบบมีขั้ว (acetone, isopropanol และ ethanol) ได้ปริมาณน้ำมัน  $12.92$ ,  $10.68$  และ  $9.18$  wt.% ตามลำดับ และมีผลวิธีเรื่องนี้ที่ได้ศึกษาการกรองด้วยน้ำมันจากการแยกแพะเจลได้สรุปเรื่องของการกรองด้วยน้ำมันด้วยวิธีอื่นๆ ได้แก่ ดังแสดงในตารางที่ 4 [13-15] ในขณะที่ Thawomprasert และคณะ [16] ทดสอบการกรองด้วยวัสดุหินผึ้งผสมโดยใช้ตัววัสดุทำลายเช่น อุดสหกรรม บางวัวอุดร้าวสารเดียวเมืองของการแยกแพะโดยใช้โซฟเซน  $1:15$  g/g สามารถกรองด้วยน้ำมันได้สูงสุด  $14.0$  wt.% และ Eawlex และ Somnuk [17] ศึกษาผลกระทบที่เหมาะสมในการกรองด้วยสารสกัดตัวอ่อนส่วนโดยรวมของการแยกแพะกับโซฟเซนและเจลาในกระบวนการกรองด้วยเทคนิค response surface methodology (RSM) พบว่าอุดร้าวสารส่วนของการแยกแพะโดยใช้โซฟเซน  $1:22.5$  g/g เวลา  $30.4$  นาที สามารถกรองด้วยน้ำมันได้สูงสุด  $14.75$  wt.% ทั้งนี้ Vardon และคณะ [18], Caetano และคณะ [6], Todaka และคณะ [19] ศึกษาสมบัติน้ำมันจากการกรองด้วยน้ำมันเจลาในลักษณะใกล้เคียงดั้วยิ่งโซฟเซนโดยใช้ Soxhlet extraction โดยใช้โซฟเซนเป็นตัววัสดุทำลาย ขณะที่ Abdullah และคณะ [20] ศึกษาใช้โซฟเซนและคลีนสีลิงยังต่อคราวโซฟเซนในการกรองด้วยคุณสมบัติน้ำมันสักดี ให้แสดงตัวในตารางที่ 5

### 3.3.2 การผลิตใบໂວດີເຈລ

จากการทดลองที่บ่มริมาณไดรคลีสิไซโรต์ Caetano และคณะ [6] ศึกษาการสกัดน้ำมันจากการผลิตด้วยตัวทำละลาย hexane และ isopropanol ที่อัตราส่วนและความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทดสอบปริมาณน้ำมันที่สามารถถอดได้ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการผลิตในใบติดเชลล์แบบสองขั้นตอนโดยใช้เอนกอกอโลร์ประบบทามานาออก และใช้ไฟเติบไนเตรตอกรอท์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาน้ำมันหูหมุน 60°C ความเร็วของการผสม 80 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถผลิตใบติดเชลล์ได้ความบริสุทธิ์ 86% Todaka และคณะ [7] ศึกษาการผลิตใบติดเชลล์จากน้ำมันแกแฟ น้ำมันบุญ่า และ น้ำมันเพลทต์ methyl alcohol, ethanol, 1-propanol และ 1-butanol โดยใช้ไฟเติบไนเตรตอกรอที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าใบติดเชลล์จากน้ำมันการแพทย์ที่ใช้ 1-butanol มีคุณสมบัติในด้านเชื้อเพลิงดีที่สุด, มีความเสถียรต่ออุณหภูมิ (thermal stability) และ ทนต่อการกัดปูริกิริยา ออกซิเดชันได้ โดยยุบสมบัติของใบติดเชลล์จากน้ำมันการแพทย์ได้แสดงในตารางที่ 6

#### 4. บทสรุป

การบริโภคกาแฟมีแนวโน้มได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องในอนาคต ด้วยคุณภาพของผู้ผลิตและความต้องการของตลาด จึงทำให้มีการพัฒนา จำนวนมากเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลลัพธ์สำหรับการใช้กาแฟเพื่อ ผลิตพังงาทนาทางเลือก ประกอบกับกาแฟมีปริมาณคาร์บอนคริสตัลสูง (fixed carbon) ส่งผลให้กาแฟมีความอ่อนสูง (heating value) สำหรับน้ำมัน สดที่จากการเผาไหม้จะสามารถปล่อย出ไนโตรเจนร่วงไห้ในไส้เดือนได้ แม้จะมีการนำเข้ามาเป็นไนโตรเจนได้แล้วจะสามารถนำกลับไปที่เหลืออีกทั้งผ่านการ สดักน้ำมันแล้วปรับปรุงเป็นเชื้อเพลิงชีวิตได้ การดำเนินการด้านวัฒนา และ รวมรวมมาในวิถีชีวิตทั้งนี้ และเทคโนโลยีที่มีความสำคัญต่อการบริโภคและด้าน พังงาทนาของกาแฟที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงเหลวจากชาชากาแฟเพื่อสืบทอดต่อไป ซึ่งสามารถริจับรับปรุง ประยุกต์ใช้ประโยชน์และการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกที่อาจจะมีศักยภาพได้ ในอนาคต

ตารางที่ 4 การขอส่วนสกัดน้ำมันกาแฟ

Extraction method	Time (min)	Type of solvent	Solvent to SCG (mL/g)	Yield (wt.%)	Ref.
Ultrasound	45	hexane	4.0:1	12	[14]
Soxhlet	30	pentane	4.2:1	15.18	[13]
Soxhlet	30	hexane	4.2:1	15.28	[13]
Soxhlet	30	toluene	4.2:1	14.32	[13]
Soxhlet	40	chloroform	4.2:1	11.15	[13]
Soxhlet	30	acetone	4.2:1	12.92	[13]
Soxhlet	50	isopropanol	4.2:1	10.92	[13]
Soxhlet	40	ethanol	4.2:1	11.9	[13]
Soxhlet	180	50:50 (hexiso)	20:01	21.5	[15]
Soxhlet	408	isopropanol	20:01	21	[15]
Soxhlet	150	80:20 (hexiso)	20:01	19.5	[15]
Soxhlet	570	n-octane	20:01	26	[15]
Soxhlet	n/a	hexane	20:01	16	[15]
Soxhlet	n/a	ethanol	20:01	16	[15]
Soxhlet	n/a	60:40 (hexiso)	20:01	17	[15]
Soxhlet	n/a	70:30 (hexiso)	20:01	21	[15]
Soxhlet	n/a	heptane	20:01	18	[15]

ตารางที่ 5 คุณสมบัติน้ำมันกานา

คุณสมบัติ	[15]	[18]	[6]
Color	Dark brown	Dark brown	Dark brown

Moisture (%)	-	-	0.118
HHV (MJ/kg)	-	-	40.8
Density at 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	941	904.2	912
Viscosity 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	49.64	33.92	39.8
Acid value (mg KOH/g)	11.27	8.0	9.9
Iodine value (g iodine/g)	-	-	0.476

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงจากน้ำมันกาแฟในรูปแบบที่ยังไม่ร้อน

คุณสมบัติ	[6]	[15]	[18]	EN 14214
Color	brown	brown	brown	
Appearance	Liquid	Liquid	Liquid	
Reaction yield (wt.%)	37.3	60.5	-	
Water content (ppm)	2708	-	632 < 500	
Iodine value (g I <sub>2</sub> /100 g)	70.0	2.14	-	< 120
Acid value (mg KOH/g)	1.9	-	0.11	< 0.5
Methyl ester content (wt.%)	86.0	69.3	-	> 96.5

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] International Coffee Organization, "World coffee trade (1963 – 2013): A review of the markets, challenges and opportunities facing the sector," 2014. [Online]. Available: <http://www.ico.org/news/icc-111-5-r1e-world-coffee-outlook.pdf>. [Accessed: 05-Sep-2015].
- [2] International Coffee Organization, "Annual Review 2013-2014," 2015. [Online]. Available: <http://dev.ico.org/documents/cy2014-15/annual-review-2013-14-electronic-e.pdf>. [Accessed: 05-Sep-2015].
- [3] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, "กาแฟ สุปภาระการผลิต การตลาด และราคาในประเทศไทย," 2014. [Online]. Available: [http://www.oae.go.th/ewt\\_news.php?nid=17878&filename=index](http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=17878&filename=index). [Accessed: 05-Sep-2015].
- [4] K. Speer and I. Költing-Speer, "The lipid fraction of the coffee bean," *Braz. J. Plant Physiol.*, vol. 18, no. 1, pp. 201–216, 2006.
- [5] Rivera Joseph coffeechemistry.com, "Differences: Arabica and Robusta Coffee," 2015. [Online]. Available: [http://www.coffeechemistry.com/agriculture/differences-between-arabica-and-robusta-coffee.html#disqus\\_thread](http://www.coffeechemistry.com/agriculture/differences-between-arabica-and-robusta-coffee.html#disqus_thread). [Accessed: 05-Sep-2015].
- [6] N. Caetano, V. Silva, A. Melo, A. Martins and T. Mata, "Spent coffee grounds for biodiesel production and other applications," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 16, no. 7, pp. 1423–1430, 2014.
- [7] M. Silva, S. Nebra, M. Machado Silva and C. Sanchez, "The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry," *Biomass Bioenergy*, vol. 14, no. 5–6, pp. 457–467, 1998.
- [8] กรมโรงงานอุตสาหกรรม, คู่มือแนวราบและเกณฑ์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงประปาเป็นเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงทดแทน กรุงเทพ: 2013.
- [9] J. Bok, H. Choi, Y. Choi, H. Park and S. Kim, "Fast pyrolysis of coffee grounds: Characteristics of product yields and biocrude oil quality," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 17–24, 2012.
- [10] L. Limousy, M. Jeguirim, P. Dutourne, N. Kraiem, M. Lajili and R. Said, "Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets," *Fuel*, vol. 107, pp. 323–329, May. 2013.
- [11] ใช่เรื่องรี ธรรมนิทร์, การสักดิ์ขอบแม่ซึ่ง-ช่องเหลว. กรุงเทพ: โอดิยันส์ไทร์, 2549.
- [12] M. Ferrari, F. Ravera, E. De Angelis, F. Liverani and L. Navarini, "Interfacial properties of coffee oils," *Colloid Surf. A*, vol. 365, no. 1–3, pp. 79–82, 2010.
- [13] Z. Al-Hamamre, S. Foerster, F. Hartmann, M. Kriger and M. Kaltschmitt, "Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing," *Fuel*, vol. 96, pp. 70–76, Jun. 2012.
- [14] M. Rocha, L. de Matos, L. Lima, P. Figueiredo, I. Lucena, F. Fernandes and L. Gonçalves, "Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds," *Bioresour. Technol.*, vol. 167, pp. 343–348, Sep. 2014.
- [15] N. Caetano, V. Silva, and T. M. Mata, "Valorization of coffee grounds for biodiesel production," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 26, pp. 267–272, May. 2012.
- [16] J. Thawornprasert, T. Suwanwipakorn, P. Eawlex and K. Somnuk, "A study of extraction process from spent coffee grounds with solvent and extraction time," In *Proc. of the 16th Thai Society of Agricultural Engineer Nat. Conf.*, Bangkok, Thailand, 2015, pp. 390–392.
- [17] P. Eawlex and K. Somnuk, "Optimization of solid-to-solvent ratio and time for oil extraction process from spent coffee grounds using response surface methodology," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 16, pp. 7049–7052, 2015.
- [18] D. Vardon, B. Moser, W. Zheng, K. Witkin, R. Evangelista, T. Strathmann, K. Rajagopalan and B. Sharma, "Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 1, no. 10, pp. 1286–1294, 2013.
- [19] M. Todaka, W. Kowhakul, H. Masamoto, M. Shigematsu and S. Onwona-Ayegman, "Thermal decomposition of biodiesel fuels produced from rapeseed, jatropha, and coffee oils with different alcohols," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 113, no. 3, pp. 1355–1361, 2013.
- [20] M. Abdullah and A. Bulent Koc, "Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication," *Renew. Energ.*, vol. 50, pp. 965–970, Feb. 2013.



ที่เข้ารับผู้เชิญ  
นายพิชัย เยี้ยนเล็ก นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชา  
วิศวกรรมเคมีจุฬาลงกรณ์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสหศาสตร์

ที่เข้ารับผู้เชิญ  
ดร.กฤษ สมนึก อาจารย์  
ภาควิชาเคมีจุฬาลงกรณ์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสหศาสตร์



ภาคผนวก ง

(การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับการทดลองเบื้องต้น)

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 2

บทความวิจัย

P. Eawlex and K. Somnuk, “Optimization of Solid-to-Solvent Ratio and Time for Oil Extraction Process from Spent Coffee Grounds Using Response Surface Methodology,” ARPN J. Eng. Appl. Sci., vol. 10, no. 16, 2015.



## OPTIMIZATION OF SOLID-TO-SOLVENT RATIO AND TIME FOR OIL EXTRACTION PROCESS FROM SPENT COFFEE GROUNDS USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

E. Pichai and S. Krit

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand  
E-Mail: [pichai.eawlex@gmail.com](mailto:pichai.eawlex@gmail.com)

### ABSTRACT

In this study, the optimization of two parameters: solid-to-solvent ratio and extraction time of the oil extraction process from the dried spent coffee grounds (DSCG) after brewing coffee were investigated by using the response surface methodology (RSM). The results showed that the 14.75 wt.% of calculated yield of coffee oil from the predicted model was obtained, when the optimal condition: the 1:22.5 g/g of mass ratio of DSCG-to-hexane and 30.4 min of extraction time under the 30 °C of room temperature was used. The model was verified by the experiment, the 14.68 wt.% experimental yield of coffee oil was achieved after passing the extraction process under the optimal condition. Moreover, the composition of coffee oil after eliminate the residual hexane were analyzed by the thin layer chromatograph with flame ionization detection (TLC/FID). The 81.156 wt.% triglyceride, 5.926 wt.% diglyceride, 11.428 wt.% monoglyceride, 1.078 wt.% ester, and 0.412 wt.% free fatty acid were found.

**Keywords:** spent coffee grounds, coffee oil, optimization, response surface methodology.

### INTRODUCTION

The coffee grounds are consumed in coffee shop, homes, bars and restaurants, large factories of instant coffee (Wikipedia Contributors 2015). Consequently, the coffee beverage is consumed worldwide. In Thailand, the coffee beans were used to produce the instant coffee, roasted and ground coffee, and canned coffee (Pongsiri 2013). Therefore, the increasing domestic consumption of coffee bean is affected on the amount of coffee grounds increased as well. Many organic residues, spent coffee grounds (SCG), after brewing coffee of both instant coffee and roasted coffee processes were dumped to the garbage, where the other organic waste may be decomposed to methane, and thus encourage to climatic change (Mussatto *et al.* 2011), (Hansen *et al.* 2006). The SCG can be extracted the coffee oil using solvent extraction method. Thus, the SCG have the potential feedstock to produce the biodiesel from the coffee oil. The SCG containing the 7-17 wt.% oils content, depending on coffee varieties (Speer & Kölling-speer 2006). Moreover, the yield of coffee oil from SCG depends on the various parameters: moisture content, particle size, amount of solvent, type of solvent, extraction method, and extraction time (Al-Hamamre *et al.* 2012), (Caetano *et al.* 2012). Table I shows the various conditions of coffee oil extraction from SCG. The hexane solvent extraction is most commonly used for extracting the coffee oil by Soxhlet extractor. Moreover, the 12-16% oil yield from SCG was achieved in the extraction process, when Soxhlet and ultrasound extractions were used. Certainly, the ratio of solvent-to-SCG has a high significance of oil yield; however, the researchers have not yet studied the variation of this parameter. For instance, Al-Hamamre *et al.* studied the oil extraction from the dried spent coffee grounds (DSCG) as a renewable source for biodiesel production, the 60 g dried sample and 250 ml solvent (or the ratio of solvent-to-SCG is equal to 1:4.2 g/mL), were fixed at the different time spans to determine

the yield. Caetano *et al.* studied the effect of different solvents on the coffee oil yield by using Soxhlet extractor with the condition: 2.5 to 9.5 h of extraction time, the 10 g of DSCG and 200 mL of solvent were fixed. Therefore, the optimal condition of coffee oil extraction should be studied to reduce the extraction costs, such as type of solvent, ratio of DSCG-to-solvent, and extraction time. This present study was undertaken to evaluate and optimize the highest yield of coffee oil for the solvent extraction process from DSCG, when the two parameters: ratios of DSCG-to-hexane and extraction time were studied by using the response surface methodology (RSM).

### MATERIALS AND METHODS

#### Materials

In the Espresso coffee shops, many organic residues, spent coffee grounds (SCG) from brewing coffee were dumped to the garbage, as shown in Figure-1. The SCG were obtained from local coffee shop in Prince of Songkla University (PSU), which Arabica coffee grounds were used to brew the Espresso. An approximately 66% of moisture content in the SCG were measured by the drying oven method at 105 °C and 24 h (Abdullah & Bulent Koc 2013). The SCG must be dried to eliminate the moisture content before introduced into the extraction process. Moreover, the SCG drying process will prevent the spoilage and microbial growth (Abdullah & Bulent Koc 2013). The commercial grade of hexane solvent was used to extract the coffee oil from the dried spent coffee grounds (DSCG). All chemicals were analytical grade to analysis the compositions of coffee oil by the thin layer chromatograph with flame ionization detection (TLC/FID).



**Figure 1.** (a) spent coffee grounds, (b) oil-free spent coffee grounds, and (c) coffee oil.

## Methods

### Extraction Procedures

After complete the SCG drying process, the 10 g of DSCG and the required mass ratios of DSCG-to-hexane were loaded into the 250 mL flask for weighing by the Mettler-Toledo digital analytical balance. All experiments, the solvent extraction were operated in the batch process. The mass ratios of DSCG-to-hexane were varied under the experimental design matrixes. The magnetic bar was instantaneously put into the flask to mix the DSCG with hexane. In the coffee oil extraction process, the flask was placed on the digital magnetic stir plate to mix the DSCG with solvent by the magnetic stirrer at 30 °C of room temperature, and immediately start the timer to monitor the extraction time. After complete extraction oil, the oil-free spent coffee grounds (OFSCG) will rapidly fall to the bottom of the flask, and the solutions of hexane-to-coffee oil are on the top layer. The suspensions of OFSCG in the solutions were filtered by the filter paper (W. & R. Balston Ltd. Genuine Whatman No. 1) to separate the OFSCG and solutions. In the hexane distillation process, the solutions of hexane-to-coffee oils were stilled by the simple distillation process to remove the most hexane. In the final process, the coffee oil from the distillation process will be heated by the electrical oven at 104 °C for 6 h, to remove

the residual hexane, which might also be left in the coffee oil (Abdullah & Bulent Koc 2013).

### Analysis Method

Two independent parameters: mass ratios of DSCG-to-hexane and extraction time, were studied to optimize the coffee oil yield from DSCG. The yield of coffee oil was determined with equation (1). The TLC/FID (model: IATROSCAN MK-65; Mishubishi Kagaku Latron Inc.; Tokyo, Japan) was used to analyze the percentage of tri-, di-, mono-glycerides, ester, and free fatty acid (FFA) in the coffee oils.

### Experimental Design

The experimental design of the solid-liquid extraction process was aimed to optimize the effects of the ratios of DSCG-to-hexane ( $R$ ), and extraction time ( $T$ ) on the coffee oil yield by the response surface methodology (RSM) approach. Twelve experiments were designed for 5-coded-level (-1.414, -1, 0, +1, +1.414) followed by the coded level, as shown in Table-2.

$$Y = (W_0 / W_d) \times 100 \quad (1)$$

Where  $Y$  is the coffee oil yield,  $W_0$  (g) is weight of extracted oil and  $W_d$  (g) is weight of DSCG.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Experimental Results

Table-3 is the experimental design matrixes of 2-independent-variable: DSCG-to-hexane (g/g), extraction time (min), and 1-dependent-variable: coffee oil yield (wt.%) of the solid-liquid extraction process by solvent.

### Response Surface Model and Statistical Analysis

The coefficient values and statistical analysis of response surface model were analyzed by using the multiple regression equation to fit a second-order polynomial model, as shown in Table-4.

**Table-1.** Conditions of coffee oil extraction from SCG.

Time (min)	Type of solvent	Yield (wt.%)	DSCG-to-solvent (g/mL)	Extraction method	References
45	hexane	12.00	1:4	Ultrasound	(Rocha <i>et al.</i> 2014)
30	pentane	15.18	1:4.2	Soxhlet	(Al-Hamamre <i>et al.</i> 2012)
30	hexane	15.28	1:4.2	Soxhlet	(Al-Hamamre <i>et al.</i> 2012)
30	toluene	14.32	1:4.2	Soxhlet	(Al-Hamamre <i>et al.</i> 2012)
40	chloroform	11.15	1:4.2	Soxhlet	(Al-Hamamre <i>et al.</i> 2012)
30	acetone	12.92	1:4.2	Soxhlet	(Al-Hamamre <i>et al.</i> 2012)
50	isopropanol	10.92	1:4.2	Soxhlet	(Al-Hamamre <i>et al.</i> 2012)
40	ethanol	11.90	1:4.2	Soxhlet	(Al-Hamamre <i>et al.</i> 2012)
180	50:50 (hexane: 2-propanol)	21.50	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)
408	isopropanol	21.00	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)
150	80:20 (hexane:2-propanol)	19.50	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)
570	n-octane	26.00	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)
N/A	hexane	16.00	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)
N/A	ethanol	16.00	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)
N/A	60:40 (hexane:2-propanol)	17.00	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)
N/A	70:30 (hexane:2-propanol)	21.00	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)
N/A	heptane	18.00	1:20	Soxhlet	(Caetano <i>et al.</i> 2012)

N/A: the extraction time was varied in the range between 150 and 570 min

**Table-2.** Coded level of independent variables.

Independent variable	Coded level			
	-1.414	-1	0	+1
R : Ratios of DSCG-to-hexane (g/g)	1:5.1	1:8	1:15	1:22
T : Extraction time (min)	0.2	6	20	34
				1:24.9
				39.8

In Table-4, the positive sign of coefficient values of each parameter mean the coffee oil yield has increased. In contrast, the negative sign of coefficient values mean the decreasing of oil yield. All analysis of results were conducted with "Excel" solver from Microsoft Excel add-in tool to solve the optimization of equation (2). It was found that the predicted model of the relationship between the coffee oil yield and two independent variables were classified under the polynomial equation. The model of the two responses is expressed in equation (2) to obtain the highest yield of coffee oil from the solid-liquid extraction process. This model was tested for its ability to describe the experimental results and to prove for statistical significance by the *t*-test at the confidence level of 95%.

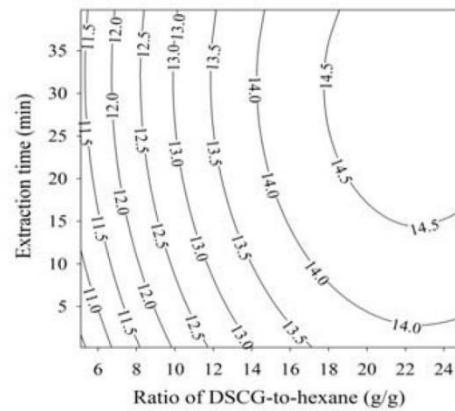
$$Y = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 R + \beta_3 T^2 + \beta_4 TR + \beta_5 R^2 \quad (2)$$

where *Y*: coffee oil yield, *R*: ratio of DSCG-to-hexane, *T*: extraction time, and  $\beta$ : coefficient value.

Figure-2 shows the contour plot of the relationship between the extraction time and the mass ratio of DSCG-to-hexane on the coffee oil yield under the 30 °C room temperature. To investigate the optimal condition for the highest coffee oil yield, therefore, the Excel solver was used to solve the equation 2. The results showed that the 14.75 wt.% calculated yield of coffee oil was achieved, when the optimal condition: the 1:22.5 g/g of mass ratio of DSCG-to-hexane and 30.4 min of extraction time at the 30 °C was used. The yield of calculated coffee oil under the optimal condition can be proved by the experiment. The results from the experiment showed that the 14.68 wt.% actual experimental yield of coffee oil can be extracted from DSCG under the optimal condition, which the experimental yield are close to the calculated coffee oil yield. Moreover, the compositions of coffee oil after eliminate the residual hexane were analyzed by TLC/FID, 81.156 wt.% TG, 5.926 wt.% DG, 11.428 wt.% MG, 1.078 wt.% ester, and 0.412 wt.% FFA were found. The major problem of biodiesel production from vegetable oil is the FFA, which the FFA is transesterification reaction was used. As the results, the ester conversion was reduced by the saponification reaction (Somnuk *et al.* 2013). However, the coffee oil has the FFA content lower than 0.5 wt%. Consequently, the coffee oil will be produced the biodiesel by using a base-catalyzed direct transesterification reaction.

## CONCLUSIONS

The aim of this study was to optimize the highest yield of coffee oil for the solvent extraction process from SCG after brewing coffee as a potential alternative raw material for biodiesel from coffee oil. In the part of oil extraction process, the results of this research demonstrates that the 14.68 wt.% actual experimental yield of coffee oil can be extracted from dried spent coffee grounds (DSCG) under the optimal condition: the 1:22.5 g/g of mass ratio of DSCG-to-hexane and 30.4 min of extraction time under the 30 °C of room temperature. Increasing of mass ratio of DSCG-to-hexane will enhances the diffusion of solid and solvent, and improves the transport of the solvent while mixture flow through the pores and surface area of DSCG in the oil extraction process. Therefore, the organic residues, the SCG have the potential raw material to use for biodiesel production from the coffee oil and to use for combustion energy from OFSCG.



**Figure-2.** Contour plot of extraction time and mass ratio of DSCG-to-hexane on the yield of coffee oil under the room temperature of 30 °C.

**Table-3.** Experimental design matrix.

Run	Ratio of DSCG-to-hexane, $R$ (g/g)	Extraction time, $T$ (min)	Yield of coffee oil, $Y$ (wt.%)
1	1: 22.0	34.0	14.5700
2	1: 8.0	34.0	12.6580
3	1: 15.0	20.0	14.0237
4	1: 22.0	6.0	14.4017
5	1: 24.9	20.0	14.6323
6	1: 15.0	20.0	14.0283
7	1: 8.0	6.0	12.4070
8	1: 15.0	39.8	14.1125
9	1: 15.0	20.0	13.9887
10	1: 5.1	20.0	10.7623
11	1: 15.0	0.2	12.6600
12	1: 15.0	20.0	13.9773

**Table-4.** Coefficient values of response surface model.

Coefficient	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
Value	8.130	0.06448	0.500	-0.00098	-0.00021	-0.01096
p-value	0.000263	0.231	0.00453	0.296	0.926	0.01861

( $R^2 = 0.927$ , and  $R^2_{\text{adjusted}} = 0.866$ )

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Prince of Songkla University for providing research funds.

#### REFERENCES

- [1] Abdullah M. AND Bulent Koc A. 2013. Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication. Renewable Energy, Vol. 50, pp.965–970.
- [2] Al-Hamamre Z. *et al.* 2012. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. Fuel, Vol. 96, No. 10, pp.70–76.
- [3] Caetano N.S., Silva V.F.M. and Mata T.M. 2012. Valorization of Coffee Grounds for Biodiesel Production. Chemical Engineering Transactions, Vol. 26, pp.267–272.
- [4] Hansen T.L. *et al.* 2006. Methane production during storage of anaerobically digested municipal organic waste. Journal of environmental quality, Vol. 35, No. 3, pp.830–6.
- [5] Mussatto S.I. *et al.* 2011. Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. Food and Bioprocess Technology, Vol. 4, No. 5, pp.661–672.
- [6] Pongsiri K. 2013. Market Feasibility for New Brand Coffee House: The Case Study of Thailand. International Journal of Social, Education, Economics and Management Engineering, Vol. 7, No. 8, pp.1142–1145.
- [7] Rocha, M.V.P. *et al.* 2014. Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. Bioresource technology, Vol. 167, pp.343–8.
- [8] Somnuk K., Smithmaitrie P. and Prateepchaikul G. 2013. Two-stage continuous process of methyl ester from high free fatty acid mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity of ultrasound. Energy Conversion and Management, Vol. 75, pp.302–310.
- [9] Speer K. and Kölling-speer I. 2006. The lipid fraction of the coffee bean. Brazilian Journal of Plant Physiology, Vol. 18, (1965), pp.201–216.
- [10] Wikipedia Contributors. 2015. Coffee. Wikipedia, The Free Encyclopedia., p.653370198. Available at: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Coffee&oldid=653370198> [Accessed March 30, 2015].



ภาคผนวก จ

(การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับการหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมัน  
แบบกะและด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน)

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 3

Somnuk. K, Eawlex. P. Espresso coffee oil extraction from spent coffee grounds:  
Laboratory-scale optimization and prototype-scale extraction via circulation process  
(ส่วนจะ under review)

1 Espresso coffee oil extraction from spent coffee grounds: Laboratory-scale optimization  
2 and prototype-scale extraction via circulation process

3

4 Krit Somnuk\* and Pichai Eawlex

5 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla  
6 University, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 90112

7 \*Corresponding author: krit.s@psu.ac.th

8

9 **ABSTRACT**

10 Optimization of two parameters in espresso coffee oil extraction: extraction time and mass  
11 ratio of DSCG-to-solvent were conducted on dried spent coffee grounds (DSCG) employing  
12 four solvents. Extracted yields were investigated using response surface methodology (RSM).  
13 Predicted models were verified by actual experiments. Experimental yields of 14.6822 wt.%  
14 (using hexane), 13.1260 wt.% (using anhydrous ethanol), 11.7980 wt.% (using hydrous  
15 ethanol), and 7.5198 wt.% (using methanol), were achieved. Prototype extraction was tested  
16 using circulation process. Approx. 11.83 wt.% oil yield of prototype extraction can be  
17 extracted from DSCG under optimal condition: 30.4 min extraction time, and 22.5 g.g<sup>-1</sup> mass  
18 ratio of DSCG-to-hexane from laboratory-scale results.

19

20 **KEYWORDS:** coffee oil; spent coffee grounds; prototype scale; solvent extraction;  
21 circulation.

22

23

24

25

26

27   **ABBREVIATIONS**

28

29   DFSCG      defatted spent coffee grounds

30   DG          diglyceride

31   DSCG      dried spent coffee grounds

32   FAME      fatty acid methyl ester

33   FFA          free fatty acid

34   HHV          higher heating value

35   ICP          instant coffee powder

36   KOH          potassium hydroxide

37   MG          monoglyceride

38   RM          repeated miscella

39   RSM          response surface methodology

40   SCG          spent coffee grounds

41   SEM          scanning electron microscopy

42   TG          triglyceride

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54     **I. INTRODUCTION**

55

56       Organic residues from brewed coffee, so-called spent coffee grounds (SCG), have an oil  
57       content of approx. 10 to 15 wt.%, depending on coffee varieties<sup>1</sup> and have promising  
58       feedstock amount to produce biodiesel.<sup>2-4</sup> Approx. 8 million tonnes of coffee produced  
59       globally each year, roughly 1.3 billion liters of biodiesel from coffee oil could be added to the  
60       world fuel supply.<sup>1,5</sup> SCG is the residue obtained after brewing and requires good waste  
61       management plan. Nestlé, the world's first instant coffee in 1938, used the NESCAFÉ name.  
62       The company was established in Switzerland and founded a large-scale production line of  
63       coffee extraction and spray drying of coffee beans.<sup>6</sup> SCG from brewed coffee process was  
64       used as a renewable fuel resource.<sup>7</sup> In the preparation of instant coffee powder (ICP) with hot  
65       water or steam, almost half of the world coffee consumption was processed for instant  
66       coffee.<sup>8</sup> After coffee extraction with hot water, solid waste of the SCG amounted to 2 kg per  
67       each 1 kg of ICP.<sup>9</sup> Generally, SCG from the coffee industry was used as a renewable energy  
68       resource, and this waste was collected by specialized agencies and sold for various purposes  
69       (e.g., composting, gardening, bioenergy production, mushroom growing).<sup>5</sup> After brewing,  
70       SCG from both the instant coffee and roasted coffee will be dumped, and the organic waste  
71       decomposes partly to methane, contributing more to climatic changes.<sup>8</sup> In Thailand, coffee  
72       beans have been used to produce instant coffee, roasted coffee, ground coffee, and canned  
73       coffee.<sup>10</sup> Increasing domestic consumption leads to an increase in SCG as well.<sup>5,11</sup> The SCG  
74       contains 10-15 wt.% oil content, depending on coffee varieties.<sup>1,12</sup> In the coffee oil extraction  
75       from SCG, hexane solvent extraction is most commonly used to extract oil by a Soxhlet  
76       extractor. Al-Hamamre *et al.*<sup>3</sup> studied oil extraction from dried spent coffee grounds (DSCG)  
77       for biodiesel production; 60 g DSCG and 250 ml solvent were kept constant at different time  
78       spans to determine the yield. Caetano *et al.*<sup>4</sup> studied the effect of different solvents on coffee

79 oil yield using Soxhlet extractor for 2.5 to 9.5 h. Results showed that 21.5 wt.% of oil was  
80 obtained after 3 h extraction time with mixed solvent (hexane:isopropanol, 50:50 by volume),  
81 while the use of isopropanol solvent alone resulted in 21.0 wt.% of oil within 6.8 h. The use  
82 of pure isopropanol also incurs a higher operating cost than the use of mixed solvent.

83 To the best of our knowledge, no research has directly focused on the optimization of  
84 coffee oil extraction from DSCG using four solvents: hexane, anhydrous ethanol, hydrous  
85 ethanol, and methanol in this study. Moreover, prototype-scale was tested using solvent-  
86 circulated extraction instead of batch-type modes. The objective of this study was thus to  
87 demonstrate the optimization of coffee oil yields from each solvent type using response  
88 surface methodology (RSM). Two parameters: extraction time and mass ratio of DSCG-to-  
89 solvent were conducted. The use of oil from SCG will lessen competition with food resources  
90 for biodiesel production such as soybean oil, rapeseed oil, coconut oil, and crude palm  
91 oil.<sup>13,14</sup>

92

## 93 II. MATERIALS AND METHODS

94

### 95 A. Materials

96

97 As shown in Fig. 1, the organic residues: spent coffee grounds (SCG), dried spent coffee  
98 grounds (DSCG), and defatted spent coffee ground (DFSCG), are normally just garbage. The  
99 SCG of Arabica form the espresso brewing was used in this study. Its moisture content is  
100 approx. 66%. SCG should be dried before extraction of its oil; high moisture content causes  
101 spoilage due to decomposition.<sup>15</sup> Freshly brewed SCG should thus go through a drying  
102 process to inhibit microbial growths. The DSCG was used as the raw material for solvent  
103 extraction process. Purities of commercial grade solvents were: 29.7 wt.% hexane, 99.9

104 vol.% ethanol (anhydrous ethanol), 95 vol.% ethanol (hydrous ethanol), and 99.9 wt.%  
105 methanol. Table I shows the physical and chemical compositions of DSCG and DFSCG, the  
106 property and price of the four solvents are shown in Table II.

107

108 **B. Methods**

109

110 ***1. Laboratory scale of oil extraction from spent coffee grounds with the four solvents***

111

112 In all experiments, solvent extractions were batch processed at a laboratory scale. In the  
113 extraction, 10 g of DSCG was loaded into a 250 mL flask resting on a digital analytical  
114 balance (AL204 Mettler-Toledo, Switzerland). The required mass ratio of DSCG-to-solvent  
115 were then dosed into the flask and wrapped with an aluminum foil to prevent solvent  
116 evaporation. The DSCG and solvent were constantly mixed using a 500-rpm magnetic bar at  
117 room temperature (approx. 30 °C). The solvent flows over the surfaces of DSCG and seeps  
118 through the pores during a designated extraction time. Subsequently, each mixture was  
119 filtered through a filter paper (W. & R. Balston Ltd. Genuine Whatman No. 1) to separate the  
120 defatted spent coffee grounds (DFSCG) and the miscella (the solution of coffee oil dissolved  
121 in the solvent). The solvent was then separated from coffee oil by simple distillation process.  
122 To ensure that no residual solvent remains, the oil is further heated at 104°C for 6 h.<sup>19</sup> Details  
123 of the experimental design for coffee oil extraction are described in Section II.B.3. These  
124 procedures were repeated for each of the four solvents.

125

126

127

128

129    **2. Analysis methods**

130

131       Physical and chemical compositions of DSCG and DFSCG: carbon (C), hydrogen (H),  
132       nitrogen (N), sulfur (S), and oxygen (O) were analyzed using CHNS-O analyzer (CE  
133       Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy). The average particle size  
134       distribution was estimated using laser particle size analyzer (LS 230, Coulter, USA). The  
135       percentages of nutritional compositions: ash (using AOAC 942.05, gravimetric method),  
136       protein (using AOAC 984.13, Kjeldahl method), and crude fiber (using ANKOM<sup>200</sup> Fiber  
137       Analyzers) were evaluated. The total sugar was tested using the Lane-Eynon general  
138       volumetric method (AOAC 931.07). In the analytical methods of extracted oil, oil yield was  
139       calculated using Eq. (1).<sup>20</sup> The fatty acid profiles were analyzed using a gas chromatograph-  
140       flame ionization detector (GC 6890, Hewlett Packard, USA). The higher heating value  
141       (HHV) of the products: DSCG, DFSCG, oil, was measured using a calorific method (IKA ®  
142       Calorimeter System C5000 control, Germany). A thin layer chromatograph with flame  
143       ionization detection (TLC/FID, IATROSCAN MK-65, Mishubishi Kagahu Latron Inc.;  
144       Japan) was used to analyze the purity of ester, triglyceride (TG), diglyceride (DG),  
145       monoglyceride (MG), and free fatty acid (FFA) in the oil. The acid value (AV) of the oil was  
146       analyzed using American Oil Chemists' Society Official Method Cd 3a-63,<sup>21</sup> and was  
147       calculated using Eq. (2).<sup>22</sup>

148

$$149 \quad Y = (W_o / W_d) \times 100 \quad (1)$$

150

151       where  $Y$  (wt.%) is the coffee oil yield;  $W_o$  (g) is the weight of extracted oil; and  $W_d$  (g) is the  
152       weight of DSCG.

153

154      Acid value =  $\frac{(mL \text{ of titrant}) \times (N \text{ of titrant}) \times 56.1}{\text{weight of sample in grams}}$       (2)

155

156      where  $N$  is the normality of KOH.

157

158      **3. Experimental design for oil extraction**

159

160      Response surface methodology (RSM), with 5-level and 2-factor central composite  
 161      design (CCD), was used to optimize the coffee oil extraction. Multiple regression analysis  
 162      was employed to derive a second-order polynomial equation to predict the coffee oil yield  
 163      ( $Y$ ). A general second-order polynomial equation is expressed, as shown in Eq. (3).<sup>23</sup> The two  
 164      independent variables: mass ratio of DSCG-to-solvent ( $R$ ) and extraction time ( $T$ ), were  
 165      studied first in the batch mode. Table III shows the five-code-level of varying ranges of  
 166      independent variables, which are coded as -1.414, -1, 0, +1, and +1.414. The coded  
 167      independent variables were repeated for the four solvents: hexane, anhydrous ethanol,  
 168      hydrous ethanol, and methanol.

169

170      
$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1} \sum_{j=i+1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$
      (3)

171

172      where  $Y$  is the response (coffee oil yield);  $x_i$  and  $x_j$  are the uncoded independent variables  
 173      (mass ratio of DSCG-to-solvent and extraction time);  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$ , and  $\beta_{ij}$  are the intercept,  
 174      linear, quadratic, and interaction constant coefficients, respectively;  $k$  is the number of  
 175      variables; and  $\varepsilon$  is the error.

176

177

178   **III. RESULTS AND DISCUSSIONS**

179

180   **A. Experimental results**

181

182       Fig. 1 shows the products: freshly brewed spent coffee grounds (SCG), dried spent  
183       coffee grounds (DSCG), defatted spent coffee grounds (DFSCG), in the process. The  
184       physical characteristic of DSCG is a very fine dark-brown powder. After oil extraction, the  
185       color of DFSCG changed to pale brown. According to Table I, 21.43 wt.% and 20.44 wt.% of  
186       crude fiber were evaluated in the DSCG and DFSCG, respectively. The protein content in  
187       DSCG was 14.39 wt.% and was 14.80 wt.% in DFSCG; the protein in the latter is a little  
188       higher because the residual oil in DSCG was removed, therefore, the protein nutrition for  
189       animal feed will increase after oil extraction. The products of before- and after-oil-extraction:  
190       DSCG and DFSCG had been traded as nutritional products for animal feed.<sup>24</sup> In the  
191       consideration of the use of waste coffee grounds as a biomass energy resource and solid-fuel,  
192       the remaining fuel energy density of wastes was studied. Approx. 23.1 MJ.kg<sup>-1</sup> of HHV from  
193       DSCG, and 20.4 from DFSCG, were derived. The HHV slightly reduced by approx. 11.65 %  
194       after the oil in DSCG was extracted. The ash from SCG burning is a good ingredient for  
195       fertilizers; its composition has high levels of calcium, phosphorous, and magnesium.<sup>25</sup> The  
196       HHV of both DSCG and DFSCG are similar to coal and are higher than wood and other  
197       softwood biomass, (approx. 19 MJ.kg<sup>-1</sup> HHV).<sup>26</sup> The ash contents of 1.59 wt.% (after DSCG  
198       burning) and 1.86 wt.% (after DFSCG burning) were noted. These contents of ash are lower  
199       than ashes from burning of woody biomasses such as tea waste, wood bark, wheat straw,  
200       tobacco stalk, tobacco leaf, and olive husk.<sup>26</sup> The experimental design matrix and the  
201       laboratory scale results using the four solvents: hexane, anhydrous ethanol, hydrous ethanol,  
202       and methanol in this study are shown in Table IV.

203

204 **B. Predicted model and statistical analysis**

205

206 Regression analyses were performed to fit the response models with the results of twelve  
207 experiments using a multiple regression analysis in *Microsoft Excel add-in tool*, and are  
208 detailed in Table IV. The results showed that the relationship between the coffee oil yield ( $Y$ )  
209 and the two independent variables: mass ratio of DSCG-to-solvent ( $R$ ), and extraction time  
210 ( $T$ ) were best obtained in a quadratic model for all the four solvents; expressed in Eq. (4). The  
211 goodness of fit of this predicted model is defined by the coefficient of determination ( $R^2$ ), the  
212 adjusted coefficient of determination ( $R^2_{\text{adjusted}}$ ), the probability of error value ( $p$ -value), and  
213 the coefficient values of the model, as listed in Table V. The  $p$ -value to test statistical  
214 significance of each term in the quadratic model was obtained. The smallest  $p$ -value of each  
215 term for the four solvents indicates the highest significant contribution. The lowest  $p$ -values  
216 of 0.00452, 0.02232, and 0.05888 occurred in the term  $\beta_2R$ , when hexane, anhydrous ethanol,  
217 and methanol, were used, respectively. Consequently, the mass ratio of DSCG-to-solvent is  
218 significantly higher than the extraction time for these three solvents, whereas for hydrous  
219 ethanol the lowest  $p$ -value of 0.00121 occurred in the term  $\beta_1T$ . The analysis of variance  
220 (ANOVA) of predicted model for the four solvents was shown in Table VI.

221

$$222 \quad Y = \beta_0 + \beta_1T + \beta_2R + \beta_3T^2 + \beta_4TR + \beta_5R^2 \quad (4)$$

223

224 where  $Y$  is the coffee oil yield;  $R$  is the mass ratio of DSCG-to-solvent;  $T$  is the extraction  
225 time; and  $\beta$  is the coefficient value.

226

227

228 **C. Contour plots**

229

230 Figs. 2(a), 2(b), 2(c), and 2(d) show the relationship between the dependent and  
231 independent variables, which are presented using contour plots when hexane, anhydrous  
232 ethanol, hydrous ethanol, and methanol, were used, respectively.

233

234 **D. Optimization and verification of coffee oil yield in laboratory-scale extraction**

235

236 As mentioned in Section III.C, the 2-D contour plots (Fig. 2) were also plotted for oil  
237 yield from the extraction process. Optimum conditions of the oil yield were evaluated using  
238 Excel solver in *Microsoft Excel add-in tool*, and are shown in Table VII. The optimum  
239 conditions for the four solvents obtained from the model were employed to verify the model  
240 yield results with the actual experiment yield results. The oil yield results from the actual  
241 experiment were 14.6822 %, 13.1260 %, 11.7980 %, and 7.5198 % when hexane, anhydrous  
242 ethanol, hydrous ethanol, and methanol were used.

243

244 **E. Consideration of solvent type for extraction of coffee oil**

245

246 The highest oil yield from the extraction process is the prime consideration of selection  
247 among the four solvents. The maximum oil yield of 14.6822 wt.% was achieved when using  
248 hexane under optimal condition: 30.4 min of extraction time, and 22.5 g.g<sup>-1</sup> of mass ratio of  
249 DSCG-to-solvent. The next highest oil yield of 13.1260 wt.% was obtained when anhydrous  
250 ethanol was used. If the highest yield is the only interest then ethanol, either anhydrous or  
251 hydrous, is a reasonable choice because their prices are approximately one-third of hexane  
252 price, as shown in Table II. When environmental effects are considered, anhydrous- and

253 hydrous-ethanol are favorable. Ethanol is organic and hence more environmentally friendly  
254 than the toxic solvents as hexane and methanol, and it is mainly derived from crops  
255 fermentation process. In Thailand, ethanol is mostly produced from cassavas and molasses  
256 and it does not need to be imported. When residual water in ethanol is removed by molecular  
257 sieve to improve its purity an incremental cost is incurred.<sup>27</sup> The cost of anhydrous ethanol  
258 production is higher than hydrous ethanol, however, the oil yields from the former (13.1260  
259 wt.% yield) and the latter (11.7980 wt.%) are not much different. Anhydrous ethanol thus is  
260 not as cost-effective as hydrous ethanol in this context.

261 In the consideration of oil quality, free fatty acid (FFA) in oil is used as an index to  
262 determine the quality of extracted oil. Unfortunately, more than 1 wt.% of FFA content in  
263 the extracted oil was measured when either ethanol was used, as shown in Table VII. When  
264 high FFA oil is transesterified to produce biodiesel, the yield and purity of ester will be  
265 reduced by a saponification reaction.<sup>28,29</sup> The high FFA coffee oil, when ethanol is used,  
266 should thus be reduced to less than 1 wt.% with an acid-catalyzed esterification, followed by  
267 a base-catalyzed transesterification. This process will increase the operating time, chemical  
268 cost, and wages. In this regards, lower than 1 wt.% FFA coffee oil was extracted from DSCG  
269 when hexane was used. In summary, hexane should be chosen in terms of highest yield and  
270 higher quality of extracted oil. The use of solvent hexane in a prototype scale extraction using  
271 a circulation process is described in Section III.F.1.

272

273

274

275

276

277

278    **F. Oil extraction from SCG using prototype scale**

279

280    ***I. Methods of oil extraction from SCG using prototype scale***

281

282       Fig. 3 features the schematic diagram at prototype scale for coffee oil extraction  
283       employing circulation process. The optimal condition of hexane from laboratory-scale results  
284       was applied to prototype extraction. Approx. 1200 g DSCG was put into a stainless steel  
285       sieve (approx. 45 L, equipped with #500 sieve with sieve size of 25 microns), which was  
286       installed inside a cylindrical extraction tank 360 mm in diameter and 450 mm in height. The  
287       lid of the tank was closed and locked. The fresh hexane from a solvent tank was then sprayed  
288       onto the DSCG. The pump was turned on to circulate the hexane in the tank, and the timer  
289       immediately initiated. Hexane was kept circulating through the sieve until completion of oil  
290       extraction (30.4 min, as obtained from lab-scale optimization results.) The miscella was then  
291       sucked from the bottom of the extraction tank into the distillation tank. Most DFSCG was  
292       already filtered through the stainless steel sieve, and smaller particles suspended in the  
293       miscella were further filtered through a 10-micron ceramic membrane. The clearer yellow  
294       miscella was pumped into the distillation tank, which sits on a hot water tank, to separate the  
295       solvent from the coffee oil by simple distillation method. In the solvent recovery process,  
296       hexane vapor from the distillation process will be condensed using a water-cooled shell and  
297       tube heat exchanger.

298

299    ***2. Results of oil extraction from DSCG using prototype scale***

300

301       From lab-scale results, approx. 11.83 wt.% coffee oil yield can be extracted from DSCG  
302       under the optimal condition: 30.4 min extraction time, and  $22.5 \text{ g.g}^{-1}$  mass ratio of DSCG-to-

303 hexane. Table VIII shows the compositions of fatty acid profile in the extracted coffee oil  
304 with hexane. To investigate an alternative to the use of fresh hexane for each new extraction,  
305 the authors have examined the effect of miscella reuse, coined here a repeated miscella (RM),  
306 in the multiple extraction procedure. RM (the solution of accumulated coffee oil dissolved in  
307 the miscella) was repeatedly used to extract oil from subsequent batches of fresh DSCG. Up  
308 to six RM cycles were investigated. In Fig. 3, RM was drained from the bottom of the  
309 extraction tank, DSCG was dumped, and fresh DSCG was then loaded. Coffee oil in the new  
310 batch of DSCG was extracted with this RM. The concentration of oil in the RM thus  
311 increases after each oil extraction. Fig. 4 shows the color intensity of the RM, increasing with  
312 each cycle of extraction, meaning that the concentration of oil in the RM has incrementally  
313 increased. The concentrated oil in the RM was finally separated using simple distillation. The  
314 coffee oil per gram of miscella, in wt.%, in the first cycle through to the sixth were: 0.5491,  
315 0.9947, 1.5097, 1.9784, 2.4587, and 2.9320. Obviously, viscosity of the RM also  
316 incrementally increased and impeded filtering, but is still tolerable throughout. The effort to  
317 reuse the RM has been proved worthwhile; less hexane is needed and the energy to extract  
318 the oil is reduced.

319

### 320 ***3. Material balance of prototype-scale of coffee oil extraction***

321

322 Fig. 5 shows the material balance of the coffee oil extraction using circulation  
323 process. The final products after distillation process are: coffee oil yield of 142 g (11.83  
324 wt.%) and recovered hexane of 25656 g (Approx. 95 wt.% hexane can be recovered  
325 when compared with the 27000 g of initial hexane content.)

326

327

328    **4. Scanning Electron Microscopy images**

329

330    Fig. 6 shows the Scanning Electron Microscopy (SEM) images of DSCG and DFSCG.  
331    DFSCG appears to have smoother surface than DSCG, as shown in Fig. 6b. Oil drops seemed  
332    as if they were extracted from the inside of the DFSCG pores, these oils are taken toward the  
333    exterior of the DFSCG particles under solvent extraction.

334

335    **IV. CONCLUSIONS**

336

337    Oil extracted from SCG can be used as a promising feedstock for renewable energy  
338    resources. SCG as liquid- and solid-fuel can be used as a raw material for biodiesel  
339    production and as a biomass source. In our laboratory-scale oil extraction, experimental  
340    yields using hexane, anhydrous ethanol, hydrous ethanol and methanol were: 14.6822 wt.%,  
341    13.1260 wt.% , 11.7980 wt.%, and 7.5198 wt.%, respectively. The best-performed hexane  
342    solvent was selected to extract 1200 g DSCG in a prototype-scale extraction employing a  
343    circulation process. An oil yield of 11.83 wt.% was extracted under optimal condition: 30.4  
344    min extraction time and 22.5 g.g<sup>-1</sup> mass ratio of DSCG-to-hexane. The repeated miscella  
345    (RM) can be reused to extract the oil in the fresh DSCG of subsequent batches extraction.  
346    Therefore, hexane content and energy consumption decreased when RM was used in the  
347    prototype-scale extraction using circulation process.

348

349    **ACKNOWLEDGMENTS**

350

351    This work was supported by the government budget of Prince of Songkla University,  
352    Grant No. ENG570896S.

353    **REFERENCES**

354

355    <sup>1</sup>R. W. Jenkins, N. E. Stageman, C. M. Fortune, and C. J. Chuck, Energy Fuels. **28**, 1166–  
356        1174 (2014).

357    <sup>2</sup>D. R. Vardon, B. R. Moser, W. Zheng, K. Witkin, R. L. Evangelista, T. J. Strathmann, K.  
358        Rajagopalan, and B. K. Sharma, ACS. Sustain. Chem. Eng. **1**, 1286–1294 (2013).

359    <sup>3</sup>Z. Al-Hamamre, S. Foerster, F. Hartmann, M. Kröger, and M. Kaltschmitt, Fuel **96**, 70–76  
360        (2012).

361    <sup>4</sup>N. S. Caetano, V. F. M. Silva, and T. M. Mata, Chem. Eng. Trans. **26**, 267–272 (2012).

362    <sup>5</sup>R. Campos-Vega, G. Loarca-Piña, H. Vergara-Castañeda, and B. D. Oomah, Trends Food  
363        Sci Technol. **45**, 24–36 (2015).

364    <sup>6</sup>Nestlé, see <http://www.nestle.com/media/newsandfeatures/nescafe-75-years>.

365    <sup>7</sup>Nestlé, see <http://www.nestle.com/csv/case-studies/allcasestudies/recycling-coffee-grounds-fuel>.

367    <sup>8</sup>S. I. Mussatto, E. M. S. Machado, S. Martins, and J. A. Teixeira, Food. Bioprocess. Technol.  
368        **4**, 661–672 (2011).

369    <sup>9</sup>R. A.Pfluger, Solid wastes: origin, collection, processing, and disposal (Wiley Interscience  
370        Publishers, Toronto, 1975).

371    <sup>10</sup>K. Pongsiri, Int. J. Soc. Behav. Educ. Econ. Manage. **7**, 1142–1145 (2013).

372    <sup>11</sup>T. L. Hansen, S. G. Sommer, S. Gabriel, and T. H. Christensen, J. Environ. Qual. **35**, 830–  
373        836 (2006).

374    <sup>12</sup>K. Speer, and I. Kölling-Speer, Brazilian. J. Plant. Physiol. **18**, 201–216 (2006).

375    <sup>13</sup>X. Li, V. Strezov, and T. Kan, J. Anal. Appl. Pyrolysis. **110**, 79–87 (2014).

376    <sup>14</sup>N. S. Caetano, V. F. M. Silva, A. C. Melo, A. A. Martins, and T. M. Mata, Clean. Technol.  
377        Environ. Policy. **16**, 1423–1430 (2014).

- <sup>378</sup> <sup>15</sup>M. V. P. Rocha, L. J. B. L. de Matos, L. P. D. Lima, P. M. D. S. Figueiredo, I. L. Lucena,  
379 F. A. N. Fernandes, and L. R. B. Gonçalves, *Bioresour. Technol.* **167**, 343–348 (2014).

<sup>380</sup> <sup>16</sup>Chemical Intelligence, see <http://chemicalintelligence.com/public/S040714.pdf>.

<sup>381</sup> <sup>17</sup>Bank of Thailand, see  
382 [https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib\\_CommodityQuater/Q2\\_58\\_Ethanol.pdf](https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib_CommodityQuater/Q2_58_Ethanol.pdf).

<sup>384</sup> <sup>18</sup>Methanol Market Services Asia, see <http://chemicalintelligence.com/public/S040714.pdf>.

<sup>385</sup> <sup>19</sup>M. Abdullah, and A. B. Koc, *Renew. Energy* **50**, 965–970 (2013).

<sup>386</sup> <sup>20</sup>S. Obruca, S. Petrik, P. Benesova, Z. Svoboda, L. Eremka, and I. Marova, *Appl. Microbiol.  
387 Biotechnol.* **98**, 5883–5890 (2014).

<sup>388</sup> <sup>21</sup>AOCS, Official test method Cd 3a–63 for acid value. *Am. Oil. Chem. Soc. Champaign.  
389 (1998).*

<sup>390</sup> <sup>22</sup>K. Somnuk, S. Niseng, and G. Prateepchaikul, *Energy. Convers. Manag.* **80**, 374–381  
391 (2014).

<sup>392</sup> <sup>23</sup>M. Ranic, M. Nikolic, M. Pavlovic, A. Buntic, A. Siler-Marinkovic, and S. Dimitrijevic-  
393 Brankovic, *J. Clean. Prod.* **80**, 69–79 (2014).

<sup>394</sup> <sup>24</sup>G. M. Bouafou, A. Konan, V. Zannou-Tchoko, and S. Kati-Coulibally, *Electron. J. Biol.* **7**,  
395 74–80 (2011).

<sup>396</sup> <sup>25</sup>M. A. Silva, S. A. Nebra, M. J. M. Silva, and C. G. Sanchez, *Biomass Bioenergy* **14**, 457–  
397 467 (1998).

<sup>398</sup> <sup>26</sup>A. Demirbaş, *Fuel* **76**, 431–434 (1997).

<sup>399</sup> <sup>27</sup>C. Wei-Cheng, S. Chung-The, L. Yu-Cheng, C. Wei-Jen, H. Wen-Luh, C. Shih-Hsien, and  
400 C. Wei-Che, *Appl. Energ.* **135**, 483–489 (2014).

<sup>401</sup> <sup>28</sup>K. Somnuk, P. Smithmaitrie, and G. Prateepchaikul, *Energy. Convers. Manag.* **68**, 193–199  
402 (2013).

- 403      <sup>29</sup>A. Abbaszaadeh, B. Ghobadian, M. R. Omidkhah, G. Najafi, Energy. Convers. Manag. **63**,  
404                  138–148 (2012).
- 405
- 406
- 407
- 408
- 409
- 410
- 411
- 412
- 413
- 414
- 415
- 416
- 417
- 418
- 419
- 420
- 421
- 422
- 423
- 424
- 425
- 426
- 427

428 TABLE I. Physical and chemical compositions of DSCG and DFSCG.

Property	DSCG	DFSCG
Average particle size ( $\mu\text{m}$ )	237.2	216.2
Higher heating value, HHV ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	23074.3	20386.0
Element (wt.%)		
Carbon	52.95	48.34
Hydrogen	6.76	6.17
Nitrogen	2.10	2.39
Sulfur	0.12	0.09
Oxygen	38.07	43.01
Ash (wt.%)	1.59	1.86
Protein (wt.%)	14.39	14.80
Crude fiber (wt.%)	21.43	20.44
Total sugar (wt.%)	14.09	12.93

429

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440 TABLE II. Property and price of the four solvents used.

Property	Hexane	Anhydrous ethanol	Hydrous ethanol	Methanol
Purity (%), min.)	29.7 (wt.%)	99.9 (vol.%)	95 (vol.%)	99.9 (wt.%)
Density @30°C (kg.L <sup>-1</sup> )	0.664	0.784	0.800	0.782
Boiling point (°C)	62.40	78.50	78.15	64.70
Price (USD.kg <sup>-1</sup> )	1.54 <sup>16</sup>	0.46 <sup>17</sup>	0.41 <sup>17</sup>	0.37 <sup>18</sup>

441

442

443

444

445

446

447

448

449

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459 TABLE III. Coding of independent variables.

Independent variable	Coded independent variable				
	-1.414	-1	0	+1	+1.414
<i>R</i> : Mass ratio of DSCG-to-solvent (g.g <sup>-1</sup> )	5.1	8	15	22	24.9
<i>T</i> : Extraction time (min)	0.2	6	20	34	39.8

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480 TABLE IV. Experimental design matrix and results for spent coffee grounds extraction.

Run	$R$ (g.g <sup>-1</sup> )	$T$ (min)	Yield of coffee oil, $Y$ (wt.%)			
			Hexane	Anhydrous	Hydrous	Methanol
			ethanol	ethanol		
1	22.0	34.0	14.5700	12.9880	11.1277	8.1410
2	8.0	34.0	12.6580	11.3193	10.8025	4.4457
3	15.0	20.0	14.0237	12.3297	11.2660	6.4753
4	22.0	6.0	14.4017	11.8473	11.1230	7.0665
5	24.9	20.0	14.6323	12.8570	11.2040	6.5310
6	15.0	20.0	14.0283	12.3700	10.2660	6.3433
7	8.0	6.0	12.4070	10.4837	6.9047	4.0377
8	15.0	39.8	14.1125	12.6163	11.2660	4.3570
9	15.0	20.0	13.9887	12.2723	10.7830	6.2563
10	5.1	20.0	10.7623	9.3073	7.4247	2.9250
11	15.0	0.2	12.6600	9.7380	7.6667	6.6507
12	15.0	20.0	13.9773	12.2740	10.5970	6.1607

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490 TABLE V. Coefficient value and *p*-value for the predicted model.

	Hexane		Anhydrous ethanol		Hydrous ethanol		Methanol	
	C value	<i>p</i> -value	C value	<i>p</i> -value	C value	<i>p</i> -value	C value	<i>p</i> -value
$\beta_0$	8.130	0.000262	6.207	0.00307	-0.04543	0.972	0.853	0.707
$\beta_1$	0.06449	0.231	0.131	0.06835	0.327	0.00121	-0.000235	0.998
$\beta_2$	0.500	0.00452	0.423	0.02232	0.716	0.00173	0.538	0.05888
$\beta_3$	-0.000981	0.295	-0.00222	0.07796	-0.00245	0.05072	-0.00102	0.578
$\beta_4$	-0.000211	0.926	0.000778	0.778	-0.00993	0.00801	0.00170	0.713
$\beta_5$	-0.01095	0.01856	-0.00984	0.05667	-0.01137	0.03030	-0.01202	0.135
$R^2$	0.927		0.903		0.951		0.819	
$R^2_{\text{adjusted}}$	0.866		0.822		0.910		0.668	

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

502

503

504

505

506 TABLE VI. ANOVA of predicted model.

Source	SS	MS	$F_0$	$F_{signif}$	DOF
<i>For hexane</i>					
Regression	13.66	2.731	15.18	0.00237	5
Residual	1.079	0.180			6
LOF Error	1.077	0.359	559.8274	0.000128	3
Pure Error	0.00192	0.000642			3
Total	14.74				11
<i>For anhydrous ethanol</i>					
Regression	14.95	2.990	11.14	0.00538	5
Residual	1.610	0.268			6
LOF Error	1.603	0.534	239.5678	0.000454	3
Pure Error	0.00669	0.00223			3
Total	16.56				11
<i>For hydrous ethanol</i>					
Regression	29.02	5.803	23.26	0.000733	5
Residual	1.497	0.250			6
LOF Error	0.974	0.325	1.8623	0.311	3
Pure Error	0.523	0.174			3
Total	30.51				11
<i>For methanol</i>					
Regression	20.24	4.048	5.424	0.03136	5
Residual	4.477	0.746			6
LOF Error	4.424	1.475	82.4973	0.00222	3
Pure Error	0.05362	0.01787			3

Total	24.72	11
507		
508		
509		
510		
511		
512		
513		
514		
515		
516		
517		
518		
519		
520		
521		
522		
523		
524		
525		
526		
527		
528		
529		
530		

531 TABLE VII. Optimal conditions and coffee oil composition of the four solvents.

Parameter and composition	Hexane	Anhydrous ethanol	Hydrous ethanol	Methanol
Extraction time (min)	30.4	33.5	25.5	19.6
Mass ratio of DSCG-to-solvent (g·g <sup>-1</sup> )	22.5	22.8	20.3	23.8
Predicted oil yield	14.7517	13.2410	11.4224	7.2366
Verified oil yield	14.6822	13.1260	11.7980	7.5198
Free fatty acid (wt.%)	0.412	1.406	1.296	0.872
Triglyceride (wt.%)	81.156	9.562	9.487	8.044
Diglyceride (wt.%)	5.926	0.618	0.816	0.751
Monoglyceride (wt.%)	11.428	85.183	84.894	90.148
Ester (wt.%)	1.078	3.230	3.507	0.185

532

533

534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544

545 TABLE VIII. Composition of fatty acid profile in the extracted coffee oil for using hexane.

Common name	Fatty acid	Content (wt.%)
Caprylic acid	C8:0	0.01
Nonanoic acid	C9:0	0.00
Capric acid	C10:0	0.01
Lauric acid	C12:0	0.02
Myristic acid	C14:0	0.09
Pentadecanoic acid	C15:0	0.00
Palmitic acid	C16:0	34.44
Palmitoleic acid	C16:1	0.04
Stearic acid	C18:0	0.00
Oleic acid	C18:1	7.74
Linoleic acid	C18:2	43.12
Alpha linolenic acid	C18:3	1.18
Arachidic acid	C20:0	2.83
Paullinic acid	C20:1	0.27
Behenic acid	C22:0	0.59
Erucic acid	C22:1	0.19
Lignoceric acid	C24:0	0.29
Nervonic acid	C24:1	0.01

546

547

548

549

550

551 TABLE IX. Characterization of coffee oil extraction employing hexane.

Property	Coffee oil
Mean molecular weight (g.mol <sup>-1</sup> )	636.3
Free fatty acid (wt.%)	0.412
Triglyceride (wt.%)	81.156
Diglyceride (wt.%)	5.926
Monoglyceride (wt.%)	11.428
Ester (wt.%)	1.078
Higher heating value, HHV (kJ.kg <sup>-1</sup> )	38377.3

552

553

554

555

556

557

558

559

560

561

562

563

564

565

566

567

568

569

570

571

572

573

574

575

576

577



578

(a)

(b)

(c)

579

FIG. 1. Products in the process (a) freshly brewed spent coffee grounds, SCG, (b) dried spent

580 coffee grounds, DSCG, (c) defatted spent coffee grounds, DFSCG, after oil extraction.

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

593

594

595

596

597

598

599

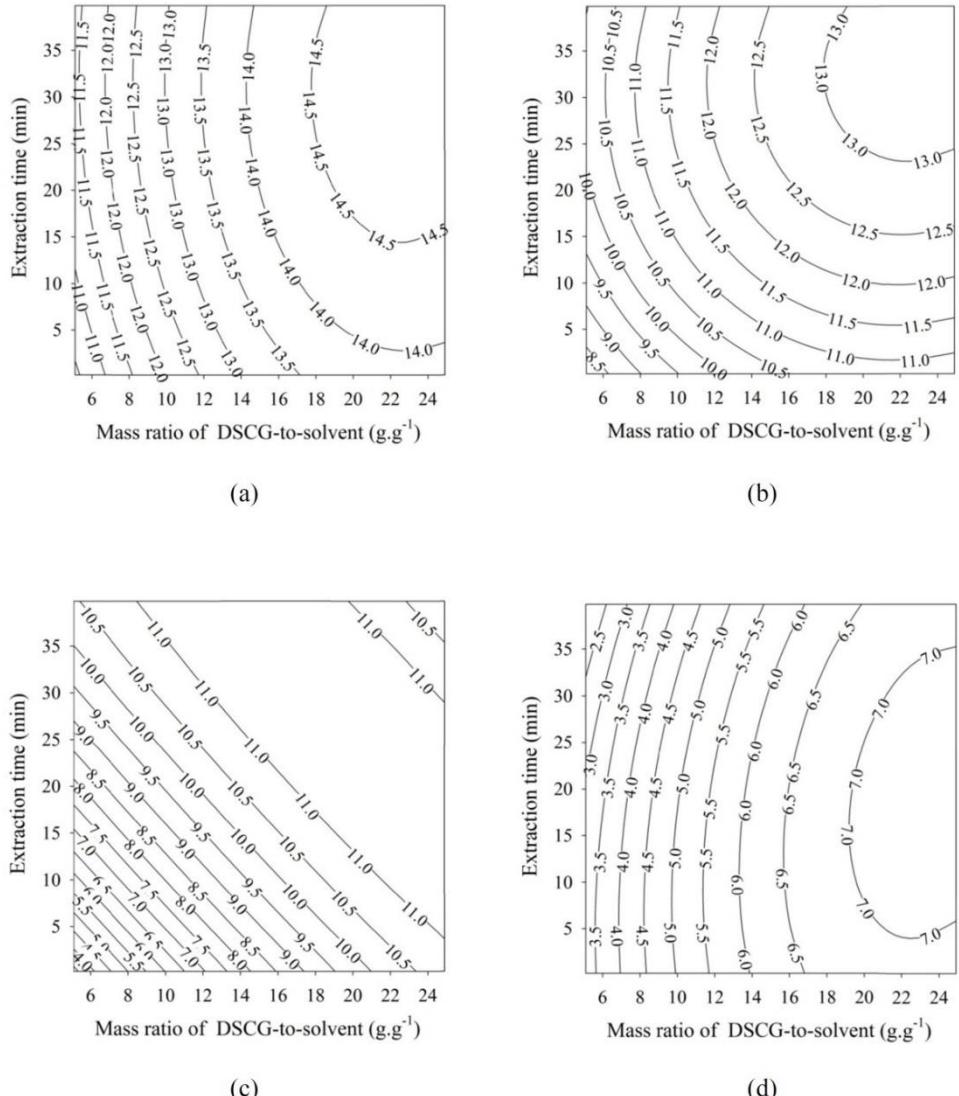


FIG. 2. Contour plots of mass ratio of DSCG-to-solvent and extraction time on the coffee oil yield at 30 °C (a: hexane, b: anhydrous ethanol, c: hydrous ethanol, and d: methanol).

30

600

601

602

603

604

605

606

607

608

609

610

611

612

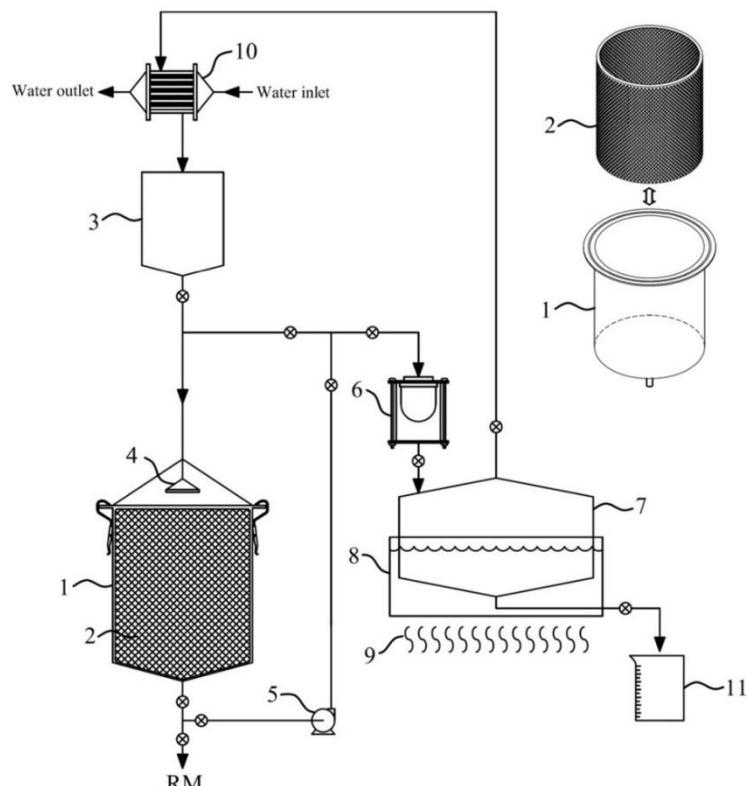


FIG. 3. Schematic diagram of prototype-scale coffee oil extraction

(1: extraction tank, 2: stainless steel sieve, 3: solvent tank, 4: spray head, 5: circulating pump, 6: ceramic membrane filter, 7: distillation tank, 8: hot water tank, 9: heat source, 10: shell and tube heat exchanger, and 11: coffee oil beaker).

613

614

615

616

617

618

619

620

621

622

623



624

FIG. 4. Color intensity of miscella after coffee oil extraction after each cycle of extraction.

625

626

627

628

629

630

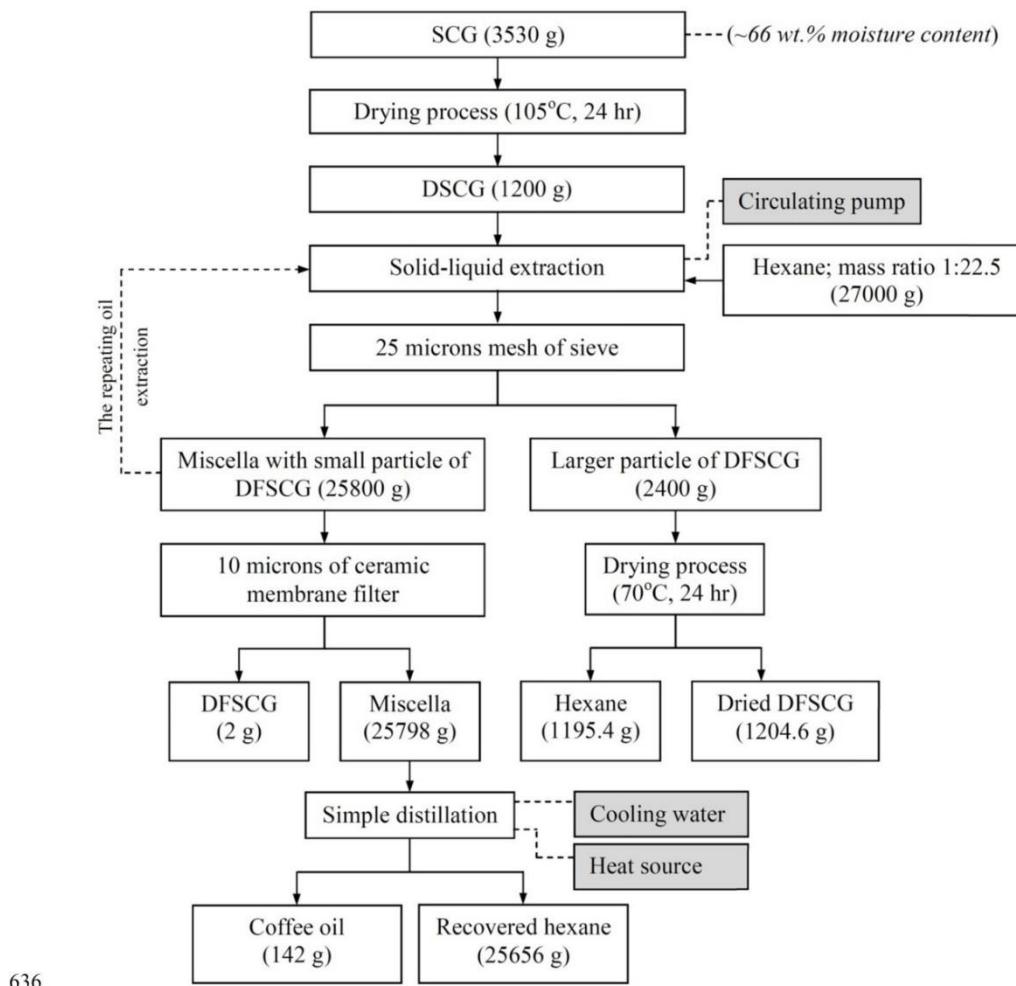
631

632

633

634

635



636

637

638

639

640

641

FIG. 5. Material balance of coffee oil extraction.

642

643

644

645

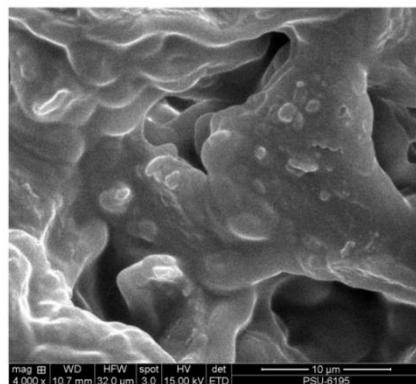
646

647

648

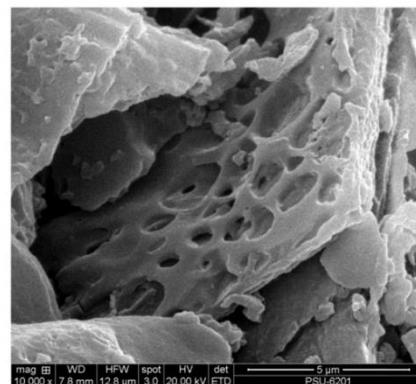
649

650



651

(a)



(b)

652

FIG. 6. Scanning Electron Microscopy images of DSCG (a) and DFSCG (b).

ภาคผนวก ฉ  
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านสิ่งประดิษฐ์<sup>\*</sup>

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 4

กฤษ สมนึก และ พิชัย เอี่ยวน์, เครื่องสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปันตัวทำ  
ละลายวนช้าหลายรอบ, อนุสิทธิบัตร เลขที่ xxx (สถานะ กำลังขอเลขที่คำขอผ่านทางศูนย์ทรัพย์สิน  
ทางปัญญา อว.ม.อ.)

หน้า 1 ของจำนวน 7 หน้า

### รายละเอียดการประดิษฐ์

#### ข้อที่๑แสดงถึงการประดิษฐ์

เครื่องสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปันตัวทำละลายวนช้าหลายรอบ  
สาขาวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- 5 วิศวกรรมศาสตร์ในส่วนที่เกี่ยวกับกระบวนการสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปันตัวทำละลายวนช้าหลายรอบ

#### ภูมิหลังของศิลปะหรือวิชาการที่เกี่ยวข้อง

การบริโภคกาแฟ เริ่มได้รับความนิยมประมาณศตวรรษที่ 16 และได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดหลายศตวรรษที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ความต้องการในตลาดที่สูงขึ้น ซึ่ง

- 10 ผลตอบแทนจากการขายเมล็ดกาแฟมูลค่าสูงมากขึ้นเข่นกัน ทำให้มีการปลูกกาแฟและผลิตเมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประเทศผู้ผลิตร่วมกันจัดตั้งองค์กรเพื่อส่งเสริมการพัฒนาการปลูกและบริหารความเสี่ยงในตลาดค้ากาแฟ ทั้งหมดนี้ส่งเสริมให้ระบบการค้าและการผลิตกาแฟมีมูลค่าทางการค้าและเสถียรภาพที่สูงประมาณเมล็ดกาแฟสดพร้อมคั่วในตลาดซื้อขายในปี พ.ศ. 2557 ห้าโลกลมีค่าเท่ากับ 8.71 ล้านตัน และการใช้บริโภคภายในประเทศไทย 7.5 หมื่นตัน บริมาณการบริโภคที่สูง สร้างกาแฟเหลือทิ้งเป็นปริมาณที่สูง
- 15 เช่นกัน กลยุทธ์อินทรีย์ความชื้นสูงที่สร้างปัญหาในการจัดเก็บและการกำจัด แต่หากมองกลับกันในแง่การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้ง กาแฟจะเป็นวัตถุที่มีศักยภาพในด้านปริมาณ ความต่อเนื่องที่ไม่เข้มกับภูมิภาคต่างจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิด

ปัจจุบันมีความพยายามศึกษาใช้ประโยชน์จากกาแฟ (spent coffee grounds, SCG) เพื่อเพิ่มน้ำมูลค่าในหลาย ๆ ลักษณะ แต่ที่สอดคล้องกับความต้องการคือการพัฒนาศักยภาพในด้านเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลมีความต้องการใช้ในประเทศสูงและมีการใช้งานน้อยเมื่อเทียบกับความต้องการ ซึ่งหากพิจารณาเพียงองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณคาร์บอน เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบcarbonสูงจะให้ค่าความร้อนสูง ซึ่งกาแฟมีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 61.13% ซึ่งมากกว่าชีวมวลเกือบทุกประเภทที่มีใช้งานในปัจจุบัน

- 20 การสกัดน้ำมันจากพืชน้ำมันมีหลากหลายประเภท เช่น การเจียว (rendering) การทึบหรือการอัด (pressing or expelling) และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) ในการประดิษฐ์นี้ได้ใช้การสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเนื่องจากกาแฟมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก การสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม ซึ่งในกระบวนการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย มีกระบวนการสกัดแบบของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid extraction) เครื่องสกัดด้วยตัวทำละลาย มีหลายประเภทได้แก่ ถังแข็ง (percolation tank), เครื่องสัมผัสหลายครั้งด้วยกระแสสวนทาง (counter-current multiple contact), เครื่องซับแบบอัดกรอง (filter-press leaching), ถังวน (agitator vessel), ถังໂගຣ (thickeners), ไฮโคลน น้ำ (hydro cyclones) และ เครื่องจำแนก (classifiers)

- 25 30 35 มีผู้ประดิษฐ์ได้นำเครื่องสกัดน้ำมันจากพืชด้วยตัวทำละลาย เช่น สิทธิบัตรไทย เลขที่ประกาศ 136567 ได้เปิดเผยชุดอุปกรณ์สกัดกรดอนาคตดิจิทัลเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในรูปแคลเซียมอนาคตเดท ซึ่งทำงานได้ทั้งแบบคงและแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วย ส่วนหลัก 3 ส่วน คือ เครื่องสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (cashew nut shell liquid, CNSL) สำหรับสกัดแยกน้ำมันออกจาก CNSL ด้วยตัวทำ

หน้า 2 ของจำนวน 7 หน้า

ละลาย เครื่องทำปฏิกิริยากรด-ด่าง สำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันจาก CNSL กับสารละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อแยกกรดอนาคตติดกับสารประกอบอื่นที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันจาก CNSL และ เครื่องแยกแคลเซียมอนาคตสำหรับแยกตะกอนแคลเซียมอนาคตติดกับสารละลาย เป็นชุด อุปกรณ์ที่สามารถใช้ได้กับการผลิตกรดอนาคตติดในระดับอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตปริมาณมาก

- 5 สิทธิบัตรไทย เลขที่ 2014 ได้เปิดเผยกระบวนการสกัดน้ำมันและสารที่ละลายในน้ำมันจากพืชโดยใช้ตัว ทำละลายภายในได้ความดันในสภาวะอุณหภูมิท้องหรือต่ำกว่า โดยใช้ตัวทำละลาย ไฮโดรฟลูอโอลาร์บอน (hydro-fluorocarbons) และ/หรือ ไฮโดรคลอร์ฟลูอโอลาร์บอน (hydro-chlorofluorocarbons) และ/ หรือ คลอร์ฟลูอโอลาร์บอน (chlorofluorocarbons) และ/หรือ อัลเคน (alkanes) และ/หรือ ไซโคลอัลเคน (cyclo- alkanes) และ/หรือ ไฮโดรคาร์บอนอีเธอร์ (hydrocarbon ethers) ทั้งที่เป็นสารเดียว และ/ 10 หรือสารประกอบเหล่านี้ผสมอยู่ ทำการสกัดภายในได้ความดันในช่วง 0 ถึง 10 บาร์ ในสภาวะอุณหภูมิท้องหรือ ต่ำกว่าอุณหภูมิท้องช่วง -20 ถึง 45 องศาเซลเซียส มีขั้นตอนที่สำคัญประกอบด้วย การผสม การแยก การอัด และการควบแน่น

- 15 สิทธิบัตรไทย เลขที่ประกาศ 543 ได้เปิดเผยการสกัดน้ำมันจากวัสดุเมล็ดพืชที่ให้น้ำมันได้มาก โดยการ นำเมล็ดพืชนั้นมาป่นให้เป็นผงละเอียดมีความ ชั้นประมาณ 10-25% แล้วนำไปตัวทำละลายที่เป็นน้ำมันและ สกัด น้ำมันจากของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในตัวทำละลายด้วยตัวทำละลายที่มากขึ้น ในที่สุดแยกตัวทำละลายที่ มีน้ำมัน ออกจากการสกัดที่ไม่ละลายและเอาน้ำมันกลับคืนออกมายกตัวทำละลายที่มีน้ำมันอยู่ด้วยน้ำ มิผู้ ประดิษฐ์ได้เปิดเผยการรักษาเสถียรภาพของน้ำมันกาแฟดิบ (crude coffee oil) ซึ่งอาจจะมาได้มาจาก กระบวนการที่บ่มเมล็ดกาแฟคั่ว ในสิทธิบัตร US4156031 (stabilization of purified coffee oil) ด้วยวิธีการ ต่าง ๆ เช่น การกำจัดกรด การแยกสาร การกลั่นภายในสูญญากาศ โดยน้ำมันกาแฟบริสุทธิ์ที่ได้รับการรักษา 20 ของเหลวจากสารกาแฟซึ่งมีสารต้านอนุมูลอิสระสามารถช่วยเพิ่มความมีเสถียรภาพของน้ำมันกาแฟบริสุทธิ์

#### ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

- การประดิษฐ์นี้เป็นการประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวนด้วย น้ำมันป่นตัวทำละลายวนช้าๆ หลายรอบ มีลักษณะส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ชุดตะแกรงกรองกาแฟ (7) ซึ่ง 25 วางอยู่ในถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) โดยใช้ปั๊มหมุนวน (10) ปั๊มตัวทำละลายผ่านหัวสเปรย์ตัวทำละลาย (2) และ ตัวทำละลายจะให้ผ่านกาแฟเพื่อท่วงอยู่ในชุดตะแกรงกรองกาแฟ (7) ซึ่งมีความละเอียด 26 ไมครอน เนื่องจากกาแฟมีลักษณะเป็นผงละเอียด ถ้าหากกาแฟถูกหลุดออกจากชุดตะแกรงกรองกาแฟ (7) มาก เกินไปจะทำให้ปั๊มหมุนวน (10) เกิดการอุดตันได้ และเพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลายออกจากถังสกัด น้ำมันกาแฟ (1) จึงใช้อุปกรณ์ล็อก (11) ล็อกฝาถังสกัด
- 30 ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้คือ กระบวนการสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันป่น ตัวทำละลายวนช้าๆ หลายรอบ สกัดน้ำมันได้จากการกาแฟโดยใช้น้ำมันป่นตัวทำละลาย (miscella) ด้วย กระบวนการหมุนวนตัวทำละลาย สิ่งประดิษฐ์นี้สามารถใช้ miscella วนช้าเพื่อนำมาใช้สกัดน้ำมันจากกาแฟ ใหม่ได้จำนวนหลายครั้งแล้ว ทำให้ความเข้มข้นของน้ำมันกาแฟใน miscella เพิ่มมากขึ้น จึงช่วย ประหยัดพลังงานในขั้นตอนกลั่นแยกตัวทำละลายกับน้ำมันกาแฟในกรณีใช้ตัวทำละลายสกัดน้ำมันหนึ่งรอบ

หน้า 3 ของจำนวน 7 หน้า

แล้วนำไปกลั่นตัวทำละลายกลับคืนทันที ใช้เวลาสักดีประมาณ 5-10 นาที ได้น้ำมันกาแฟ 5-14 % โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดของกาแฟ ชนิดของตัวทำละลาย และขนาดอนุภาคของกาแฟ เป็นต้น

การประดิษฐ์นี้มีความแตกต่างจากที่ได้กล่าวมาคือ กระบวนการสักดันน้ำมันจากการกาแฟแบบหมุนวน และการนำ miscella จากการสักดันน้ำมันครั้งที่ 1 วนซ้ำเพื่อนำมาใช้สักดันน้ำมันจากการกาแฟใหม่ได้จำนวน

- 5 5 หลายรอบแล้ว ทำให้ความเข้มข้นของน้ำมันกาแฟใน miscella เพิ่มมากขึ้น จึงช่วยประหยัดพลังงานในขั้นตอนกลั่นแยกตัวทำละลายกับน้ำมันกาแฟในกรณีใช้ตัวทำละลายสักดันน้ำมันหนึ่งรอบแล้วนำไปกลั่นตัวทำละลายกลับคืนทันที โดยสรุปการประดิษฐ์นี้ได้ใช้ระบบการสักดันน้ำมันแบบตัวทำละลายหมุนวน ซึ่งตัวทำละลายจะไหลวนผ่านจากการกาแฟสดที่เหลือที่หลังจากผ่านกระบวนการซกราฟฟ์ ซึ่งมีคล้ายคลึงกับวิธีการซกราฟฟ์ด้วยถุงผ้า คือ นำกาแฟผงหรือกาแฟสำเร็จรูปใส่ลงในถุงผ้า แล้วใช้น้ำร้อนผ่านผงกาแฟในถุงผ้าจะได้ 10 น้ำกาแฟที่กล่องมาด้านล่างของถุงกาแฟ แต่ในกระบวนการสักดันน้ำมันกาแฟต้องใช้ตัวทำละลายเพื่อสักดันน้ำมันออกมากจากการกาแฟ ปัญหานี้ของกาแฟสดคือ มีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยเฉลี่ย 237.2 ไมครอน ภายนอกจะมีความลึกดีดพื้นกระบวนการน้ำมันตัวทำละลายเพื่อใช้สำหรับชงกาแฟสด การที่จะนำถุงผ้าชงกาแฟมาใช้ในกระบวนการสักดันน้ำมันจากการกาแฟจึงมีความละเอียดของการกรองไม่เพียงพอ ดังนั้น ชุดตะแกรงกรองกาแฟ (7) จะต้องมีความละเอียดเล็กกว่า 26 ไมครอน เพื่อไม่ทำให้กาแฟส่วนใหญ่หลุดลอดออกจากกระบวนการสักดันน้ำมันกาแฟ
- 15 15 หลุดลอดออกไปจากการกระบวนการสักดันน้ำมันกาแฟ

#### คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

รูปที่ 1 แสดงวิธีการดำเนินการสักดันน้ำมันกาแฟจากการกาแฟ

รูปที่ 2 แสดงกระบวนการสักดันน้ำมันจากการกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปันตัวทำละลายวนช้าๆ รอบ

รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบแยกชิ้นของถังสักดันน้ำมันกาแฟ

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยมวลของการกาแฟกับตัวทำละลาย (กรณีใช้เอกเซนเป็นตัวทำละลาย) ที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของน้ำมันจากการกาแฟ (yield of coffee oil)

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการใช้น้ำมันปันตัวทำละลาย (miscella) มาใช้สักดันน้ำมันจากการกาแฟวนช้าๆ ส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของน้ำมันกาแฟใน miscella

#### การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

ตามการประดิษฐ์นี้ได้เสนอเครื่องสักดันน้ำมันจากการกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปันตัวทำละลายวนช้าๆ หลายรอบ

- 30 ก่อนนำกาแฟสดเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบของการกระบวนการสักดันน้ำมัน หลังจากการกาแฟสดผ่านกระบวนการซกราฟฟ์มาแล้วนั้นจะต้องนำกาแฟมาอบหรือตากแดดเพื่อลดความชื้น ซึ่งได้แสดงแผนผังกระบวนการสักดันน้ำมันกาแฟจากการกาแฟสดได้ดำเนินการตามแผนการดำเนินการ ตามรูปที่ 1 ในการประดิษฐ์นี้มีความมุ่งหมาย ดังแสดงในรูปที่ 2 คือ กระบวนการสักดันน้ำมันจากการกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปันตัวทำละลาย (miscella) วนช้าๆ หลายรอบ

- 35 นำกาแฟแห้งแล้วใส่ลงในชุดตะแกรงกรองกาแฟ (7) ซึ่งวางอยู่ในถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) ทำการปิดฝาถังสักดันน้ำมันกาแฟด้วยอุปกรณ์ล็อค (11) เพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลาย ซึ่งได้แสดงส่วนประกอบ

## หน้า 4 ของจำนวน 7 หน้า

แยกชิ้นของถังสักดันน้ำมันจากกาแฟ ตามรูปที่ 2 หลังจากนั้นเตรียมตัวทำลาย เช่น เอกเซน เอทานอล หรือ เมทานอล ใส่ลงในถังเก็บตัวทำลายและถังเก็บน้ำมันสักดันตัวทำลาย (miscella) (3) เมื่อเริ่มกระบวนการสักดันน้ำมันกาแฟ ปิดวาล์วทั้งหมด แล้วจึงเปิดวาล์ว (31) ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่งท่อต่อเชื่อมระหว่าง ถังเก็บตัวทำลายและถังเก็บน้ำมันสักดันตัวทำลาย (3) กับหัวสเปรย์ตัวทำลาย (2) ตัวทำลายจะ 5 ให้ลงมาที่ถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) โดยจะไปผสมกับกาแฟที่อยู่ในชุดตะแกรงรองกาแฟ (7) หลังจาก ปล่อยตัวทำลายลงมาที่ถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) จนหมดแล้ว ปิดวาล์วทั้งหมด แล้วจึงเปิดวาล์ว (8) (26) และ (23) ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งท่อต่อเชื่อมในระบบสักดันแบบหมุนวน แล้วเปิดปั๊มตัวทำลายหมุนวน (10) เพื่อให้ตัวทำลายเหลววนเพื่อสักดันน้ำมันภายในถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) ดังนั้นในกระบวนการนี้ตัวทำลายจะ 10 ให้หมุนวนผ่านกาแฟเพื่อสักดันน้ำมันภายในถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) ดังนั้นในกระบวนการนี้ตัวทำลายจะ ให้หมุนวนผ่านกาแฟประมาณ 5-10 นาที ก็ จะได้น้ำมันกาแฟประมาณ 5-14 %โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดของกาแฟ ชนิดของตัวทำลาย และ ขนาดอนุภาคของกาแฟ เป็นต้น และได้แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยมวลของ กาแฟกับตัวทำลาย (กรณีใช้เอกเซนเป็นตัวทำลาย) ที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของน้ำมันจากกาแฟ (yield of coffee oil) ในรูปที่ 4 ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสักดันน้ำมันกาแฟ ทำการปิดปั๊ม (10) และ ปิดวาล์วทั้งหมด แล้วจึงทำการเปิดวาล์ว (26) และ (24) เปิดปั๊มตัวทำลาย (10) เพื่อปั๊มน้ำมันปนตัวทำ 15 ลาย (miscella) จากถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) ไปที่ถังเก็บตัวทำลาย (3) ดังนั้น เพื่อใช้ miscella สักดันน้ำมันจากกาแฟช้าในกระบวนการสักดิรังต่อไป โดยไม่จำเป็นต้องนำ miscella ไปกลั่นแยกตัวทำลาย เนื่องจากผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่าการใช้ miscella เพื่อสักดันน้ำมันจากกาแฟช้า โดยทำการเปลี่ยน กาแฟใหม่เข้ามาในตะแกรงรองกาแฟ (7) ก็ยังมีประสิทธิภาพในการสักดันน้ำมันได้ปริมาณน้ำมัน ใกล้เคียงเคียงกับตัวทำลายบริสุทธิ์ ซึ่งสังเกตได้จากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการใช้ 20 miscella มาสักดันช้าเทียบกับปริมาณน้ำมันจากกาแฟที่ได้ (yield) ตามรูปที่ 5 ในขั้นตอนการใช้ miscella เพื่อสักดันน้ำมันช้า เริ่มกระบวนการสักดันตัวทำลาย (miscella) วนช้าๆ หารอบ หลังจาก เปลี่ยนกาแฟใหม่เข้ามาในถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) โดยขั้นตอนการเปลี่ยนกาแฟเมื่อถังนี้ плодอุปกรณ์ ล็อกฝาลัง (11) แล้วเปิดฝาออก นำชุดตะแกรงรองกาแฟ (7) ออกจากถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) แล้วจึงนำ กาแฟใหม่ใส่เข้าไปในตะแกรงรองกาแฟ (7) อันใหม่ แล้วจึงวางตะแกรงกรอง (7) ลงไปในถังสักดันน้ำมัน (1) หลังจากนั้นจึงทำเหมือนขั้นตอนการสักดันน้ำมันดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น แต่ใช้ miscella ในถังเก็บ 25 ตัวทำลาย (3) แทนตัวทำลายบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถใช้ miscella สักดันน้ำมันจากกาแฟใหม่ได้เรื่อยๆ จนกว่าประสิทธิภาพการสักดันจะลดลง หรือ miscella หลังจากผ่านกระบวนการสักดันตามจำนวนรอบสักดันน้ำมัน มีความสามารถสักดันน้ำมันจากกาแฟได้ปริมาณลดลง หรืออาจจะพิจารณาจากคุณภาพจาก ราคาน้ำมัน ของสารเคมี ราคาน้ำมันของกระบวนการแยกตัวทำลายออกจากน้ำมันกาแฟ เนื่องจากต้นทุนของ 30 กระบวนการสักดันตัวทำลาย จะต้องสูญเสียมากที่กระบวนการแยกตัวทำลาย ดังนั้นถ้าสามารถนำ miscella มาใช้สักดันน้ำมันได้จำนวนหนาแน่น ความเข้มข้นของน้ำมันกาแฟใน miscella จะเพิ่ม มากขึ้น ดังนั้นในขั้นตอนการแยกตัวทำลายออกจากน้ำมันกาแฟเดียวการกลั่นแบบธรรมดា (simple distillation) ก็จะใช้พลังงานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ miscella ที่ปริมาณเท่ากันแต่มีปริมาณน้ำมัน ใน miscella น้อยกว่า ในขั้นตอนการกรองกลั่นตัวทำลาย เริ่มจากปิดวาล์วทั้งหมด แล้วเปิดวาล์ว (8) (26) 35 (25) (12) ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งท่อต่อเชื่อมระหว่างถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) กับเครื่องกรองละเอียดกาแฟ

## หน้า 5 ของจำนวน 7 หน้า

- (5) แล้วจึงเปิดปี๊มตัวทำละลาย (10) เพื่อปี๊ม miscella จากถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) ไปที่เครื่องกรองละเอียดกาแฟ (5) ดังนั้น miscella จะไหลผ่านท่อเชื่อมไปที่เครื่องกรองละเอียดกาแฟ (5) เพื่อแยกกาแฟที่ปนมากับ miscella ดังนั้น miscella หลังจากผ่านขั้นตอนการกรองละเอียดจะไม่มีอนุภาคกาแฟปนมาด้วย และ miscella จะไหลลงสู่ถังอุ่นไอล์ตัวทำละลาย (29) เมื่อปี๊ม miscella จากถังสักดันน้ำมันกาแฟ (1) จน 5 หมดแล้ว ต้องตรวจสอบว่าในเครื่องกรองละเอียดกาแฟ (5) ยังมี miscella อยู่หรือไม่ ถ้ายังมี miscella เหลืออยู่ทำการปิดวาล์วทั้งหมด และเปิดวาล์ว (30) และ (12) ใช้ลมจากถังอัดอากาศ (4) เพื่ออัดอากาศเข้าสู่เครื่องกรองละเอียดกาแฟ (5) ผ่านท่อต่อที่เชื่อมระหว่างถังอัดอากาศ (4) กับเครื่องกรองละเอียดกาแฟ (5) หลังจากใช้ลมราย miscella ออกจากการกรองละเอียดกาแฟ (5) แล้วนั้น จะไม่มี miscella เหลือในเครื่องกรองละเอียด (5) ทำการปิดวาล์วทั้งหมด หลังจากนั้นต้มน้ำที่อยู่ในหม้อต้มน้ำ (13) ด้วยแหล่ง 10 ความร้อน (16) แหล่งความร้อนได้มาจากการเผาไหม้ เช่น ก๊าซหุงตุ๋น ถ่าน และ ยิตเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำภายในหม้อต้มน้ำ (13) โดยอุณหภูมิของน้ำจะถูกถ่ายเทให้กับหม้อต้มน้ำ (13) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของ miscella ซึ่งอยู่ในถังอุ่นไอล์ตัวทำละลาย (29) จะทำให้ตัวทำละลายถึงจุดเดือด โดยใช้หลักการ 15 การแยกสารละลายที่ตัวถูกละลายเป็นสารที่รับขยาย และตัวถูกละลายมีจุดเดือดสูงกว่าตัวทำละลายมาก ในกระบวนการกรองอุ่นไอล์ตัวทำละลาย ตัวทำละลายจะเปลี่ยนสถานะกล้ายเป็นไอเข้าสู่ห้องท่อต่อที่เชื่อมระหว่างถังอุ่นไอล์ตัว 20 ทำละลาย (29) กับเครื่องควบแน่นตัวทำละลาย (6) โดยเครื่องควบแน่นจะทำหน้าที่เปลี่ยนสถานะของตัวทำละลายจากไอเป็นของเหลว ด้วยการใช้น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าให้ส่วนทางกับทิศทางการไหลของไอตัวทำละลายเหมือนกับเครื่องแยกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไป วิธีการควบแน่นตัวทำละลาย คือ ปิดวาล์วทั้งหมด และเปิดวาล์ว (21) ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่งท่อต่อที่เชื่อมระหว่างถังเก็บน้ำหล่อเย็น (18) กับบีบ้มหมุนวนน้ำหล่อเย็น (19) น้ำหล่อเย็นจะถูกปี๊มจากถังเก็บน้ำหล่อเย็น (18) ด้วยปี๊มหมุนวนน้ำหล่อเย็น (19) เพื่อส่งไปที่เครื่อง 25 ควบแน่นตัวทำละลาย (6) และในวนกลับมาที่ถังเก็บน้ำหล่อเย็น (18) ตัวทำละลายของเหลวจากเครื่องควบแน่นตัวทำละลาย (6) จะไหลผ่านท่อต่อที่เชื่อมระหว่างเครื่องควบแน่นตัวทำละลาย (6) กับถังเก็บตัวทำละลายหลังจากการกรองลั่น (17) เพื่อนำไปใช้ต่อในกระบวนการกรอง โดยทำการปิดวาล์วทั้งหมด และเปิดวาล์วที่ท่อเชื่อม (22) เพื่อปี๊มตัวทำละลายด้วยปี๊มตัวทำละลาย (27) เข้าสู่ถังเก็บตัวทำละลาย (3) หลังจากกระบวนการแยกตัวทำละลายออกจาก miscella เสร็จสิ้นแล้ว จะเหลือน้ำมันกาแฟในถังอุ่นไอล์ตัวทำละลาย (29) โดยสามารถนำน้ำมันกาแฟออกมายังโดยการเปิดวาล์ว (14) ที่ติดตั้งในตำแหน่งท่อต่อที่เชื่อมระหว่างถังอุ่นไอล์ตัวทำละลาย (29) กับภาชนะรับน้ำมันกาแฟ (28) ในการนี้ที่มีความจำเป็นต้องการล้างเครื่องสักดันน้ำมันจาก 30 กาแฟสามารถล้างด้วยน้ำแล้วปล่อยให้น้ำไหลผ่านวาล์วที่ตำแหน่งด้านล่างของถัง โดยปิดวาล์วทั้งหมด และเปิดวาล์ว (8) และ (9) และในส่วนของการเก็บตัวทำละลายจากถังเก็บตัวทำละลายหลังจากการกรองลั่น (17) ไว้ในภาชนะอื่นๆ โดยไม่จำเป็นต้องปี๊มน้ำไปเก็บไว้ที่ถังเก็บตัวทำละลาย (3) ก็สามารถทำได้ด้วย การปิดวาล์วทั้งหมด และเปิดวาล์ว (15) เพื่อถ่ายตัวทำละลายเก็บไว้ที่ภาชนะอื่นๆ ในส่วนของถังเก็บน้ำหล่อเย็น (18) ได้ติดตั้งวาล์ว่ายน้ำหล่อเย็น (20) เพื่อถ่ายน้ำหล่อเย็นทิ้งเมื่อต้องการทำความสะอาดถังเก็บน้ำหล่อเย็น (20)

วิธีการในการประดิษฐ์ติดที่สุด

35 ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

หน้า 6 ของจำนวน 7 หน้า

#### **ข้อถือสิทธิ**

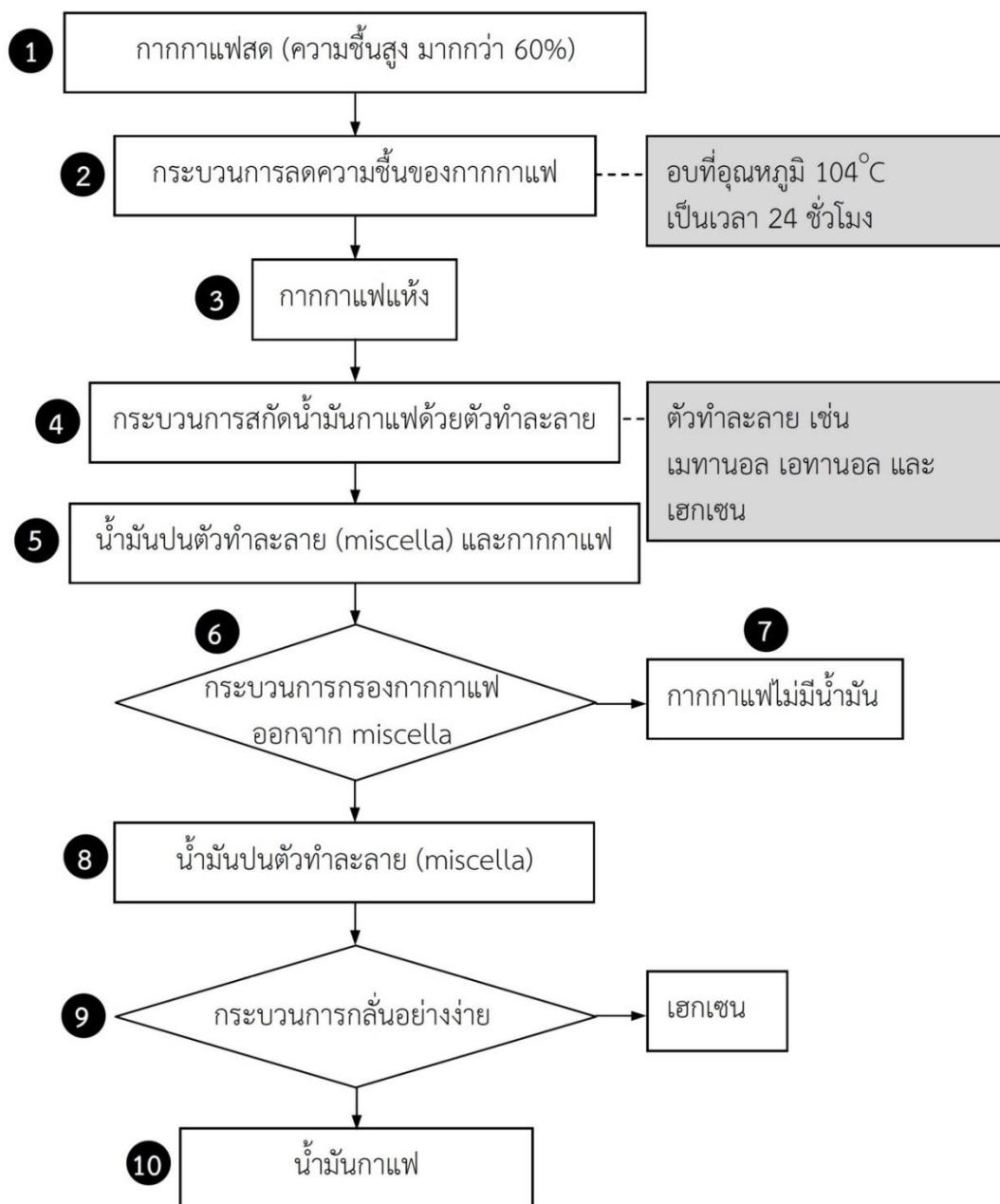
- 5 1. กระบวนการสกัดน้ำมันจากการกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันป่นตัวทำละลายวนช้าหอยรอบประ glob ด้วย ชุดสกัดน้ำมันจากการกาแฟแบบหมุนวน คือ ชุดตัวแรกกรองจากการกาแฟ (7) ซึ่งวางอยู่ในถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) ทำหน้าที่กรองจากการกาแฟให้หลุดลอดออกจากถังสกัดน้ำมัน (1) ให้น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้มีหมุนวน (10) เกิดการอุดตัน ปั๊มหมุนวน (10) สามารถปั๊มตัวทำละลายผ่านหัวสเปรย์ตัวทำละลาย (2) และตัวทำละลายจะไหหล่อผ่านจากการกาแฟที่วางอยู่ในชุดตัวแรกกรองจากการกาแฟ (7) และเพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลายออกจากถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) จึงใช้อุปกรณ์ล็อก (11) ล็อกฝาถังสกัดโดยมีลักษณะพิเศษ คือ
  - 10 1. กระบวนการสกัดน้ำมันจากการกาแฟแบบหมุนวน สามารถใช้ตัวทำละลายวนช้าหอยรอบ
  2. กระบวนการสกัดน้ำมันจากการกาแฟแบบหมุนวน สามารถถันตัวทำละลายกลับคืนได้

หน้า 7 ของจำนวน 7 หน้า

บทสรุปการประดิษฐ์

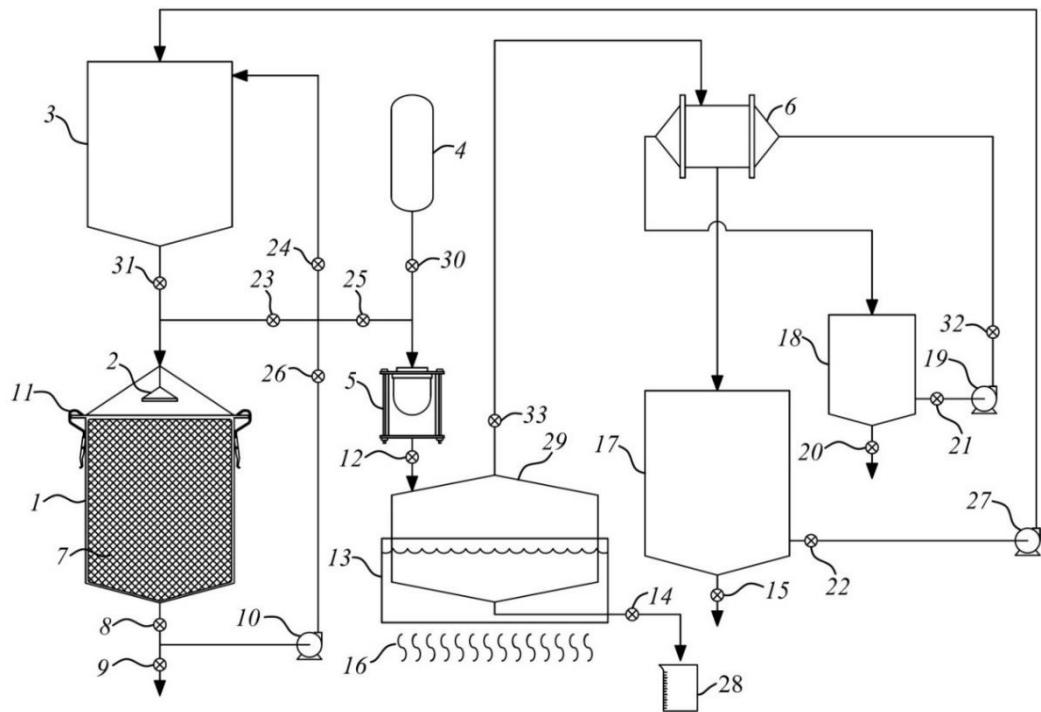
กระบวนการสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปนตัวทำละลายวนชี้หอยลายรอบประกอบด้วย ชุดสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวน คือ ชุดตะแกรงกรองกาแฟ (7) ซึ่งวางอยู่ในถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) ทำหน้าที่กรองกาแฟให้หลุดลอดออกจากถังสกัดน้ำมัน (1) ให้น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้ปั๊มหมุนวน (10) เกิดการอุดตัน ปั๊มหมุนวน (10) สามารถปั๊มตัวทำละลายผ่านหัวสเปรย์ตัวทำละลาย (2) และตัวทำละลายจะไหลผ่านกาแฟที่วางอยู่ในชุดตะแกรงกรองกาแฟ (7) และเพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลายออกจากถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) จึงใช้อุปกรณ์ล็อก (11) ล็อกฝาถังสกัด

หน้า 1 ของจำนวน 5 หน้า



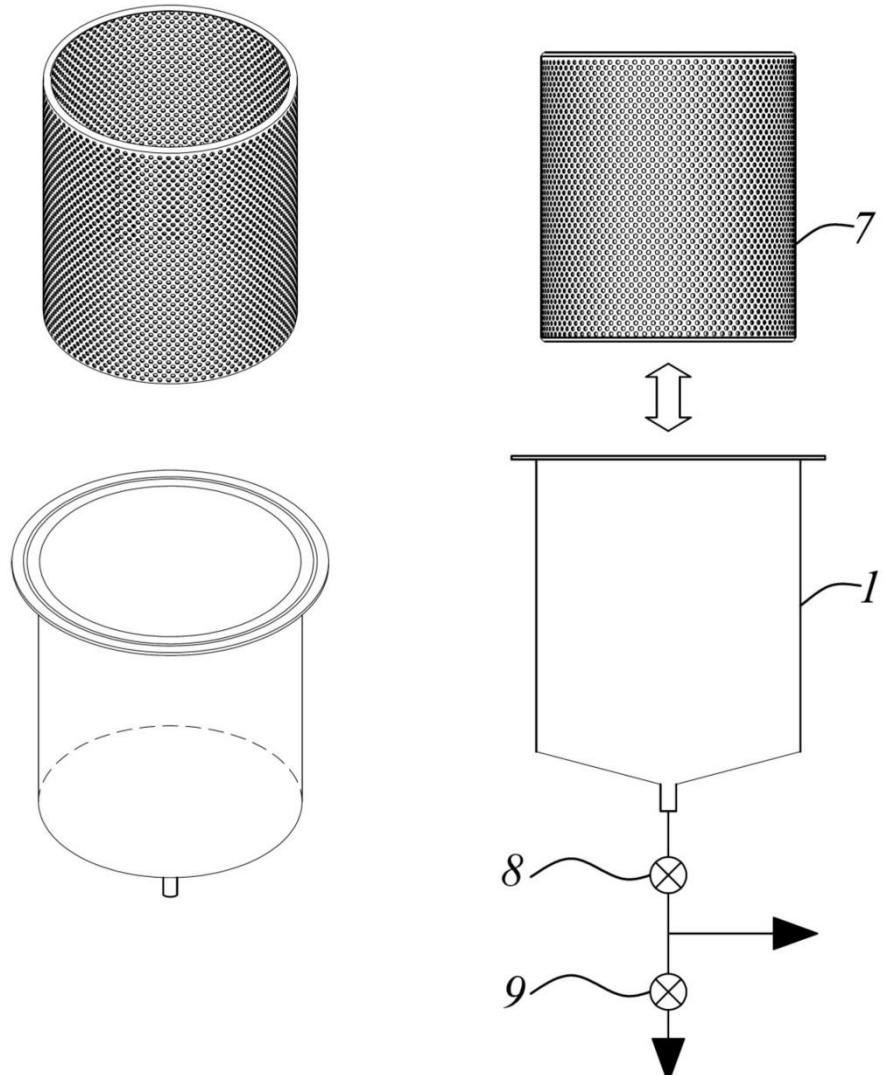
รูปที่ 1

หน้า 2 ของจำนวน 5 หน้า



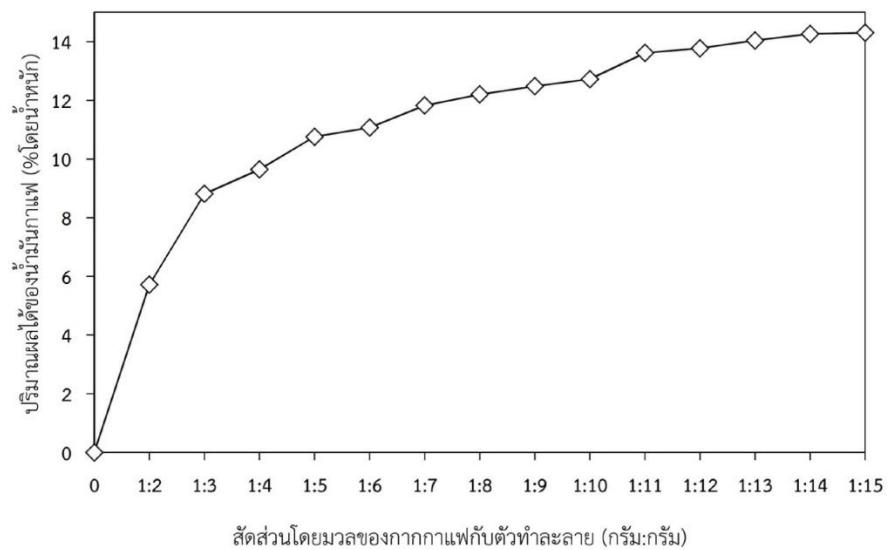
รูปที่ 2

หน้า 3 ของจำนวน 5 หน้า



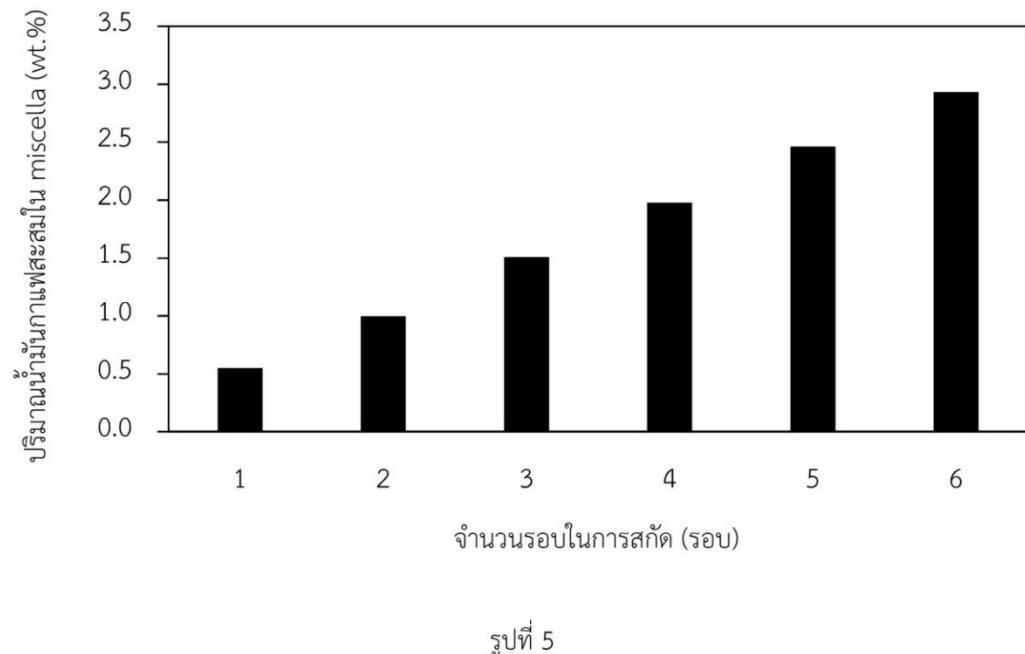
รูปที่ 3

หน้า 4 ของจำนวน 5 หน้า



รูปที่ 4

หน้า 5 ของจำนวน 5 หน้า



รูปที่ 5

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 5

ได้รับคัดเลือกให้เข้าร่วมประกวดสิ่งประดิษฐ์ของโครงการค่ายนักประดิษฐ์รุ่นใหม่ ประจำปี 2559

**ด่วนที่สุด**  
ที่ วช ๐๐๐๔/๘๗๑๕



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
๑๙๖ พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๐

๑๒ พฤศจิกายน ๒๕๕๘

เรื่อง ขอเชิญนำผลงานสิ่งประดิษฐ์ที่เสนอขอรับรางวัลในโครงการ “รางวัลนักคิดสิ่งประดิษฐ์รุ่นใหม่” ประจำปี ๒๕๕๘ เข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการเพื่อพิจารณาตัดสินในงาน “วันนักประดิษฐ์” ประจำปี ๒๕๕๙

เรียน ดร.กฤษ สมนึก

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบตอบรับยืนยันการนำเสนอผลงานประดิษฐ์คิดค้นเข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการในงาน “วันนักประดิษฐ์” ประจำปี ๒๕๕๙

ตามที่ ท่านได้เสนอผลงานประดิษฐ์คิดค้น เรื่อง “เครื่องสกัดน้ำมันจากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปนตัวทำลายวนช้าหลาຍรอบ” เพื่อขอรับรางวัลโครงการ “รางวัลนักคิดสิ่งประดิษฐ์รุ่นใหม่” ประจำปี ๒๕๕๘ จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) นั้น

ในการนี้ วช. ได้ทำการพิจารณาคัดเลือกในรอบแรก และตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นแล้วเห็นว่า ผลงานสิ่งประดิษฐ์ของท่านเป็นประโยชน์และมีคุณภาพ วช. จึงขอเชิญท่านนำเสนอผลงานสิ่งประดิษฐ์เรื่องดังกล่าว เข้าร่วมจัดแสดงในงาน “วันนักประดิษฐ์” ประจำปี ๒๕๕๘ ระหว่างวันที่ ๒ – ๖ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๙ ณ Event Hall 102 -103 ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค กรุงเทพฯ เพื่อให้คณะกรรมการฯ ได้ชูมรสานิช พิจารณาตัดสิน และมอบรางวัลต่อไป โดยมีกำหนดการ ดังนี้

**วันที่ ๑ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๙**

เวลา ๑๒.๐๐ น. – ๑๖.๐๐ น. - ผู้ประดิษฐ์นำผลงานประดิษฐ์คิดค้นไปติดตั้ง ณ Event Hall 102 -103 ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค กรุงเทพฯ

**วันที่ ๒ – ๕ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๙**

เวลา ๑๐.๐๐ น. – ๑๕.๐๐ น. - ผู้ประดิษฐ์ประจำคุหะของตนเพื่ออธิบายและสาธิตผลงานต่อผู้เข้าชม นิทรรศการและกรรมการฯ

**วันที่ ๖ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๙**

เวลา ๑๓.๐๐ น. – ๑๕.๐๐ น. - ผู้ประดิษฐ์เข้าร่วมพิธีปิด และมอบรางวัล ณ เวทีกิจกรรมกลาง

ทั้งนี้ วช. ขอความอนุเคราะห์ยืนยันการนำเสนอผลงานประดิษฐ์ฯ เข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการโดยสามารถดาวน์โหลดตอบรับยืนยันฯ ได้ที่ <http://rrm.nrct.go.th> และ [www.inventorday.nrct.go.th](http://www.inventorday.nrct.go.th) และส่งแบบตอบรับยืนยันฯ ได้ทาง E-mail : [Goodidea.nrct@hotmail.com](mailto:Goodidea.nrct@hotmail.com) ภายในวันสุดท้ายของการนำเสนอผลงานประดิษฐ์ฯ คิดค้นเข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการนี้ วช. ขอความกรุณาเบิกจ่ายค่าที่พักในการเดินทางเข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการ ในครั้งนี้จากหน่วยงานต้นสังกัด

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(นางสาวสุนันยา อีรุณณ์เลิศ)

รองเลขานุการคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

รักษาการแทน เลขาธิการคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

กองประเมินผลและจัดการความรู้การวิจัย

โทร. ๐ ๒๕๑๑ ๒๔๔๕ ต่อ ๒๒๗, ๕๓๐ โทรสาร ๐ ๒๕๗๙ ๒๒๘๘

ผู้ประสานงาน : นางสาวอนิดา พิณศรี E-mail : [Goodidea.nrct@hotmail.com](mailto:Goodidea.nrct@hotmail.com)



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายพิชัย เอี่ยวเล็ก  
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120023  
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

พิชัย เอี่ยวเล็ก และ กฤช สมนึก “การใช้ประโยชน์จากการแยกเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง  
 เหลวและเชื้อเพลิงแข็ง” การสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้ง  
 ที่ 8

4-6 พฤษภาคม 2558 ปทุมธานี ประเทศไทย หน้า 338-341 (IR032)

P. Eawlex and K. Somnuk, “Optimization of Solid-to-Solvent Ratio and Time  
 for Oil Extraction Process from Spent Coffee Grounds Using Response Surface  
 Methodology,” *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 16, 2015.