



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

พิชัย เอี้ยวเล็ก
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

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยวิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว
 ผู้เขียน นายพิชัย เอี้ยวเล็ก
 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

..... (ดร.กฤษ สมนึก)ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.พγμαาศ เจริญพัฒนานนท์)
กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.สุธีระ ประเสริฐสรรพ)
กรรมการ (รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกูร)
กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร)
กรรมการ (ดร.กฤษ สมนึก)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมเครื่องกล

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ดร.กฤษ สมนึก)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นายพิชัย เอี้ยวเล็ก)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายพิชัย เอี้ยวเล็ก)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยวิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว
ผู้เขียน	นายพิชัย เอี้ยวเล็ก
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟเหลือทิ้งด้วยวิธีการสกัดของแข็งด้วยของเหลว โดยศึกษาตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร คือ อัตราส่วนระหว่างกากกาแฟแห้งต่อตัวทำละลาย และ เวลาในการสกัด ด้วยตัวทำละลาย 4 ประเภท โดยกระบวนการสกัดน้ำมันกาแฟเพื่อหาปริมาณผลได้ (yield) ถูกศึกษาด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) โดยสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ได้จาก RSM ถูกพิสูจน์ด้วยการทดลองจริงที่เงื่อนไขที่เหมาะสม ผลจากการทดลองพบว่า สามารถสกัดน้ำมันจากกากกาแฟได้ปริมาณผลได้สูงสุดจากการทดลอง เท่ากับ 14.68 wt.% (ด้วย hexane) 13.13 wt.% (ด้วย anhydrous ethanol) 11.80 wt.% (ด้วย hydrous ethanol) และ 7.52 wt.% (ด้วย methanol) เครื่องสกัดต้นแบบถูกทดลองด้วยวิธีแบบหมุนวน ซึ่งสามารถสกัดน้ำมันได้ประมาณ 11.83 wt.% ด้วยเงื่อนไขที่ให้ผลได้สูงสุดจากระดับห้องปฏิบัติการที่ตัวทำละลายเฮกเซนต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้งเท่ากับ 22.5 g.g^{-1} เวลา 30.4 นาที ในการศึกษาตัวทำละลายวนซ้ำได้ถูกนำมาทดสอบสกัดน้ำมันซ้ำจากกากกาแฟแห้งชุดใหม่ สำหรับการสกัดซ้ำ 6 รอบ ด้วยตัวทำละลายวนซ้ำ พบว่าประสิทธิภาพและความมีเสถียรภาพของปริมาณผลได้น้ำมันกาแฟในแต่ละรอบแตกต่างกันน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เฮกเซนบริสุทธิ์สกัด สำหรับต้นทุนแปรผันเฉลี่ยในการสกัดน้ำมันกาแฟเท่ากับ 495.46 บาทต่อกิโลกรัม และ 95% ของต้นทุนแปรผันเฉลี่ยเนื่องจากการสูญเสียเฮกเซนไปกับกากไร้น้ำมันหลังจากการสกัด ด้วยเหตุนี้ หากระบบกลั่นคืนเฮกเซนจากกากกาแฟไร้น้ำมันถูกติดตั้งในกระบวนการสกัดนี้ ต้นทุนแปรผันเฉลี่ยของน้ำมันกาแฟจะลดลงเหลือประมาณ 25.67 บาท

Thesis	Extraction of Oil from Spent Coffee Grounds with Solid-Liquid Extraction
Author	Mr.Pichai Eawlex
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	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⁻¹ 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 ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร รศ.ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ รศ.ดร.สุธีระ ประเสริฐสรุรพ์ และ รศ.กำพล ประทีปชัยกูร ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

พิชัย เอี้ยวเล็ก

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 การผลิตและการชงกาแฟ	8
1.2.4.1 การผลิตเมล็ดกาแฟ	8
1.2.4.2 การชงกาแฟด้วยวิธีเอสเพรสโซ	10
1.2.5 ลักษณะกากกาแฟทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี	11
1.2.6 การใช้ประโยชน์กากโดยทั่วไปในปัจจุบัน	13
1.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากกากกาแฟด้านการพัฒนา เป็นเชื้อเพลิง	13
1.2.7.1 เมาไหม้โดยตรง	13
1.2.7.2 เชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากกาแฟ	14
1.2.7.3 ไบโอดีเอทานอลจากกากกาแฟ	15
1.2.7.4 ไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟ	15
1.2.8 การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ	17
1.2.9 เทคโนโลยีเครื่องสกัดของแข็งด้วยของเหลว	19
1.2.9.1 กระบวนการสถานะไม่คงที่	19
1.2.9.1.1 การสัมผัสหลายครั้งด้วยกระแสนวนทาง	20
1.2.9.1.2 การชะแบบอัดกรอง	21
1.2.9.1.3 ถังกวน	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.2.9.2 กระบวนการสถานะคงที่	22
1.2.9.2.1 ถังกวน (ประยุกต์ใช้แบบต่อเนื่อง)	22
1.2.9.2.2 ถังโกรก	22
1.2.9.2.3 ไฮโคลนน้ำ	24
1.2.9.2.4 เครื่องจำแนก	25
1.2.9.2.5 ประเภทเครื่องสกัดเมล็ดพืช	25
1.2.9.2.6 โรโตเซล	25
1.2.9.2.7 เครื่องสกัดแบบเคนเนดี้	26
1.2.9.2.8 เครื่องสกัดแบบโบลล์แมน	27
1.2.10 สรุปการตรวจเอกสาร	28
1.2.10.1 ศักยภาพและแนวทางการวิจัยใช้ประโยชน์กากกาแฟ	28
1.2.10.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการสกัด	29
1.3 วัตถุประสงค์	31
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	31
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	31
2 ทฤษฎี	32
2.1 การสกัดน้ำมัน	32
2.1.1 การเจียว	32
2.1.2 การทึบหรือการอัด	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 สารที่เป็นตัวถูกละลายสถานะของแข็งตัวทำ	33
ละลายสถานะของเหลว	
2.1.3.2 กลไกที่มีอิทธิพลต่อการละลาย	33
2.1.3.2.1 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี	33
2.1.3.2.2 การแพร่	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 การกรองกากกาแฟ	35
2.2.1 ความละเอียด	35
2.2.2 การแยกขนาดด้วยตะแกรง	36
2.2.3 ไมโครฟิลเตรชัน	36
2.3 วิธีการฟื้นฟูผิวตอบสนอง	37
2.3.1 วิธีการออกแบบการทดลอง	37
2.4 การกลั่น	39
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือดของของเหลว	40
2.4.2 การกลั่นอย่างง่าย	41
2.5 การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น	43
3 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	45
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	45
3.1.1 วัสดุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมัน	45
3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบในกากกาแฟและน้ำมันกาแฟ	46
3.3 ขั้นตอนการทดลองแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ	47
3.3.1 การวางแผนการทดลอง	48
3.3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด	49
3.3.3 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์	50
3.3.4 การสกัดซ้ำด้วยตัวทำละลายวนซ้ำ	51
3.4 การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	51
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	55
4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ	55
4.2 ผลการทดสอบเครื่องสกัดน้ำมันกาแฟแบบหมุนวน	61
4.3 ผลการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายวนซ้ำด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	64
4.4 ผลทดสอบตัวอย่างกากกาแฟและน้ำมันสกัดจากกากกาแฟ	67
4.5 การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น	70

สารบัญ (ต่อ)

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

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	อันดับประเทศผู้ผลิตกาแฟ ระหว่างปี 2554-2556	6
1.2	องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟดิบ	8
1.3	ข้อกำหนดตัวแปรควบคุมและน้ำกาแฟสกัดจากการชงกาแฟด้วยวิธีเอสเพรสโซ	11
1.4	คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของกากกาแฟ	13
1.5	คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	15
1.6	การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงอัดเม็ดในหม้อต้ม	15
1.7	คุณสมบัติไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟเปรียบเทียบกับมาตรฐาน	16
1.8	การทดสอบสกัดน้ำมันกาแฟ	18
1.9	คุณสมบัติน้ำมันกาแฟ	19
3.1	ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ	50
4.1	ผลการสกัดน้ำมันกาแฟทดลองด้วยเทคนิค RSM	55
4.2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์และ p -value สมการทำนายความสัมพันธ์	56
4.3	การวิเคราะห์ ANOVA สำหรับสมการทำนายความสัมพันธ์	57
4.4	สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดด้วยตัวทำละลายประเภทต่างๆ	59
4.5	ระยะเวลาในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	66
4.6	คุณสมบัติทางกายภาพของกากกาแฟ กากกาแฟปราศจากน้ำมัน และน้ำมันกาแฟที่สกัดด้วยเฮกเซน	68
4.7	องค์ประกอบกรดไขมัน	69
4.8	คุณสมบัติวัสดุที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบผลการศึกษา	69
4.9	ต้นทุนคงที่การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน ขนาดกากกาแฟแห้ง 1,200 กรัม	71
4.10	ต้นทุนแปรผันของการผลิตน้ำมันกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	72
4.11	คุณสมบัติและราคาของตัวทำละลาย	72

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	ปริมาณการผลิตเมล็ดกาแฟแต่ละภูมิภาค 50 ปีย้อนหลัง	4
1.2	ปริมาณความต้องการใช้งานเมล็ดกาแฟของประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้	5
1.3	(ก) ผลกาแฟพันธุ์อาราบิก้า (ข) เมล็ดกาแฟดิบพันธุ์อาราบิก้า (ค) ผลกาแฟพันธุ์โรบัสต้า (ง) เมล็ดกาแฟดิบพันธุ์โรบัสต้า	7
1.4	พื้นที่เพาะปลูกกาแฟทั่วโลก	7
1.5	องค์ประกอบของผลกาแฟและเมล็ดกาแฟ	10
1.6	(ก) กากกาแฟเหลือทิ้งจากการชงกาแฟ (ข) กากกาแฟอบแห้งก่อนสกัดน้ำมัน (ค) กากกาแฟหลังสกัดน้ำมัน	12
1.7	(ก) ภาพถ่ายกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด SCG (ข) ภาพถ่ายกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด DFSCG	12
1.8	ถังตีฟิวเซอร์ใช้ในการสกัดน้ำตาล	20
1.9	การสัมผัสหลายครั้งแบบกระแสบางทาง	21
1.10	(ก) ลักษณะถังกวนแนวตั้ง (ข) ถังกวนแนวนอน (ค) ถังกวนแบบถังหมุน	22
1.11	ถังโกรก	23
1.12	ชุดถังโกรกออกแบบการทำงานให้เรียงต่อกันเป็นอนุกรม	23
1.13	การใช้ถังโกรกและอุปกรณ์อื่นๆร่วมกัน	24
1.14	ไซโคลอนน้ำ	24
1.15	เครื่องจำแนก	25
1.16	เครื่องโรโตเซล	26
1.17	เครื่องสกัดแบบเคนเนดี้	26

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
1.18	เครื่องสกัดแบบโบลล์แมนแนวตั้ง	27
1.19	เครื่องสกัดแบบโบลล์แมนแนวนอน	27
1.20	แนวทางการวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์กากกาแฟเหลือทิ้งด้านการเป็นพลังงานทดแทน	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 แบบของอุณหภูมิขณะกลั่นแบบธรรมดา	41
2.6	เฟสไดอะแกรมของ vapor-liquid ของของเหลว 2 ชนิดผสมกัน	42
2.7	เครื่องมือการกลั่นอย่างง่าย	43
3.1	ขั้นตอนการทดลองแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ	48
3.2	แผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	53
3.3	ภาพเครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแห้ง ปริมาณกาแฟ 1,200 กรัม	54
4.1	กราฟ contour ของปริมาณน้ำมันสูงสุด (wt.%) ที่ค่าสัดส่วนกากกาแฟต่อตัวทำละลาย และ เวลาในการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายประเภท (ก) hexane (ข) anhydrous ethanol (ค) hydrous ethanol (ง) methanol	59
4.2	สมดุลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	61
4.3	(ก) กากกาแฟ (SCG) (ข) น้ำมันกาแฟ (ค) กากกาแฟแห้ง (DSCG) (ง) กากกาแฟไร้น้ำมัน (DFSCG)	63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	ปริมาณน้ำมันกาแฟผสมใน miscella ต่อรอบการสกัดซ้ำด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน	64
4.5	ประสิทธิภาพการดึงน้ำมันออกจากกากกาแฟชุดใหม่ด้วย miscella ใช้ซ้ำ	65
4.6	ลักษณะสีของ miscella แต่ละรอบการสกัด	65
4.7	ระยะเวลาแต่ละขั้นตอนในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องสกัดหมุนวน	66
4.8	(ก) ภาพถ่ายกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด DSCG (ข) ภาพถ่ายกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด DFSCG	67
4.9	กราฟเวลาและต้นทุนแปรผันในการสกัด	73

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

คำย่อ/ตัวย่อ	ชื่อเต็มภาษาอังกฤษ	ชื่อเต็มภาษาไทย
ANOVA	analysis of variance	การวิเคราะห์ความแปรปรวน
AOCS	American Oil Chemists' Society	องค์การวิชาชีพเกี่ยวกับไขมันและน้ำมัน
AV	acid value	ค่ากรดไขมันอิสระ
AVC	average variable cost	ต้นทุนแปรผันเฉลี่ย
C	carbon	คาร์บอน
CCD	central composite design	การออกแบบส่วนประสมกลาง
DFSCG	defatted spent coffee grounds	กากกาแฟปราศจากน้ำมัน
DOE	design of experiment	การออกแบบการทดลอง
DSCG	dried spent coffee grounds	กากกาแฟแห้ง
F	fluorine	ฟลูออรีน
FC	fixed cost	ต้นทุนคงที่
FFA	free fatty acid	กรดไขมันอิสระ
FFD	full factorial design	การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเต็มรูปแบบ
GCB	green coffee beans	เมล็ดกาแฟดิบ
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	ไมโครฟิวเตรชัน
MM	molecular mass	มวลโมเลกุล
N	nitrogen	ไนโตรเจน

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

คำย่อ/ตัวย่อ	ชื่อเต็มภาษาอังกฤษ	ชื่อเต็มภาษาไทย
O	oxygen	ออกซิเจน
PSD	particle-size distribution	การกระจายของขนาดวัสดุรวม
Q	quantity	ปริมาณ
RCB	roasted coffee bean	เมล็ดกาแฟคั่ว
RSM	response surface methodology	วิธีการพื้นผิวตอบสนอง
S	sulfur	ซัลเฟอร์
SCG	spent coffee grounds	กากกาแฟ
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	กากกาแฟมีความชื้น
wt.%	weight percent	ร้อยละโดยมวล

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

การบริโภคกาแฟ เริ่มได้รับความนิยมตั้งแต่ประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 16 [1] และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ความต้องการเมล็ดกาแฟจำนวนมากในทุกภูมิภาคทำให้ราคาเมล็ดกาแฟและมูลค่าตลาดที่สูงเป็นอันดับต้นๆของสินค้าบริโภคในตลาดโลก [2] ในระยะเวลา 50 ปีที่จึงทำให้ผ่านมาประเทศผู้ผลิตได้ร่วมกันจัดตั้งองค์การกาแฟระหว่างประเทศ (International coffee organization, ICO) [3] เพื่อส่งเสริมการพัฒนาการปลูก ป้องกันการเก็งกำไร และบริหารความเสี่ยงในตลาดเงินทุน ทั้งหมดนี้ส่งเสริมให้ระบบการค้าและการผลิตกาแฟมีมูลค่าทางการค้าและเสถียรภาพที่สูง ประมาณเมล็ดกาแฟสดพร้อมคั่วในตลาดซื้อขายในปี พ.ศ. 2557 ทั่วโลกมีประมาณ 8.71 ล้านตัน [4] และการใช้บริโภคภายในประเทศไทย 7.5 และ 8.0 หมื่นตัน ในปี พ.ศ. 2557 และ พ.ศ. 2558 ตามลำดับ [5] ด้วยปริมาณการบริโภคที่สูง ทำให้กากกาแฟเหลือทิ้งมีปริมาณมาก กลายเป็นขยะอินทรีย์ความชื้นสูงที่สร้างปัญหาในการจัดการ [6] แต่หากมองในทางกลับกันในแง่การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งเพื่อผลิตพลังงาน กากกาแฟจะเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในด้านปริมาณ มีความต่อเนื่องที่ไม่ขึ้นกับฤดูกาลต่างจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ฟางข้าว แขน ข้าวโพด แกลบ และทางใบปาล์ม เป็นต้น

ปัจจุบันมีความพยายามศึกษาใช้ประโยชน์จากกากกาแฟ (spent coffee grounds, SCG) เพื่อเพิ่มมูลค่าในหลายๆลักษณะ แต่ที่สอดคล้องกับความต้องการคือการพัฒนาศักยภาพในด้านเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลมีความต้องการใช้ในประเทศสูงแต่มีการใช้งานน้อยเมื่อเทียบกับความต้องการ ซึ่งหากพิจารณาเพียงองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณคาร์บอน เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงจะให้ค่าความร้อนสูง ซึ่ง SCG มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 67.3% [7] ซึ่งมากกว่าชีวมวลทั่วไปเกือบทุกประเภทที่มีใช้งานในปัจจุบัน หากมีการทำวิจัยที่เป็นระบบเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์กากกาแฟ เพื่อเป็นพลังงานทดแทนในการผลิตไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ก็อาจจะสามารถพัฒนาศักยภาพทางด้านพลังงานทางเลือก เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางความร้อน คุณสมบัติทางพลังงาน และความคุ้มค่าของปริมาณพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้เปลี่ยนสารอินทรีย์กากกาแฟให้ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงแข็งจากกากกาแฟปราศจากน้ำมัน (defatted spent coffee grounds, DFSCG) อีกทั้งกากกาแฟยังเป็นวัตถุดิบที่ไม่ได้นำมา

บริโภค (nonfood) จึงช่วยลดปริมาณการใช้ไขมันปาล์ม ไขมันถั่วเหลือง เพื่อนำมาผลิตไบโอดีเซลได้ในอนาคต

วัตถุประสงค์การศึกษาวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นในเรื่องการสกัดน้ำมันออกจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายซึ่งเป็นกระบวนการขั้นต้นในการนำน้ำมันกาแฟมาผลิตเป็นไบโอดีเซลและกากกาแฟปราศจากน้ำมันไปเผาไหม้โดยตรงหรือนำไปอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนนำไปเป็นเชื้อเพลิง การทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการสกัดตลอดจนออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบในการสกัดน้ำมันกาแฟในระดับชุมชนขนาดเล็ก เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆต่อไป

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 ประวัติความเป็นมาของกาแฟ

ปัจจุบันประวัติศาสตร์ของกาแฟย้อนหลังไปก่อนคริสต์ศตวรรษที่ 16 ยังเป็นเรื่องที่คลุมเครือ [8] ตามเรื่องเล่าจากบรรพบุรุษของชาวเอธิโอเปีย กาแฟ เป็นที่รู้จักของมนุษย์ประมาณช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 6 ปี ค.ศ. 575 โดยกาแฟเป็นพืชพื้นเมืองของเมือง คัฟฟา ปัจจุบันเป็นพื้นที่ของประเทศเอธิโอเปีย ทวีปแอฟริกา บางตำนานเล่าถึงช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 9 เด็กเลี้ยงแกะชื่อ คาลดี เป็นผู้สังเกตเห็นแพะมีอาการกระปรี้กระเปร่าของแพะเมื่อกินผลไม้สีแดงเข้าไป ภายหลังมีการทดสอบจนแน่ใจว่าการกินเมล็ดกาแฟทำให้รู้สึกกระฉับกระเฉง [9] ในอดีตกาแฟไม่ได้นำมากินเป็นเครื่องดื่ม แต่นำเมล็ดกาแฟดิบ (green coffee beans, GCB) มาเคี้ยวเพื่อกระตุ้นระบบประสาทและพัฒนาเป็นการชงกาแฟเพื่อดื่มเหมือนปัจจุบัน การดื่มกาแฟเริ่มแพร่หลายในเอธิโอเปีย และถูกส่งจากทวีปแอฟริกาข้ามทะเลแดงเข้ามาสู่เยเมน หลักฐานเก่าซึ่งเชื่อถือได้ระบุถึงการดื่มกาแฟในวิหารซูฟีในเมืองม็อคคาในเยเมน และจากบันทึกของแพทย์ชาวเยอรมัน เลโอนาร์ด เราวอลฟ์ ซึ่งอธิบายลักษณะสรรพคุณทางยาของการดื่มกาแฟ ในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 16 ปีคริสต์ศักราช 1583 จากนั้นกาแฟได้ถูกนำเข้าไปยังตะวันออกกลาง เริ่มจากเมืองเปอร์เซีย (ปัจจุบันเป็นพื้นที่ของประเทศอิหร่าน) ไปยังประเทศตุรกีและได้รับความนิยมจนเข้าไปในแอฟริกาเหนือ ในขณะที่นั้นอิตาลีเริ่มติดต่อค้าขายระหว่าง เมืองเวนิส ภูมิภาคแอฟริกาเหนือและตะวันออกกลาง ประเทศอิตาลีรับสินค้าจากต่างประเทศเข้ามาขาย กาแฟก็เป็นสินค้าประเภทหนึ่งที่เดินทางเข้ามาถึงเมืองเวนิส หลังจากนั้นไม่นานกาแฟจากเมืองเวนิสก็กระจายไปในหลายพื้นที่ในยุโรป ในยุคของการเดินเรือค้าขาย บริษัทอินเดียตะวันออกของอังกฤษเป็นผู้นำกาแฟเข้ามาถึงอังกฤษและเป็นที่ยอมรับของคนอังกฤษ ต่อมากาแฟได้แพร่กระจายเข้าสู่ประเทศฝรั่งเศส ประเทศออสเตรเลีย ประเทศโปแลนด์ สหรัฐอเมริกา และได้กระจายไปทั่วโลก [1] [10]

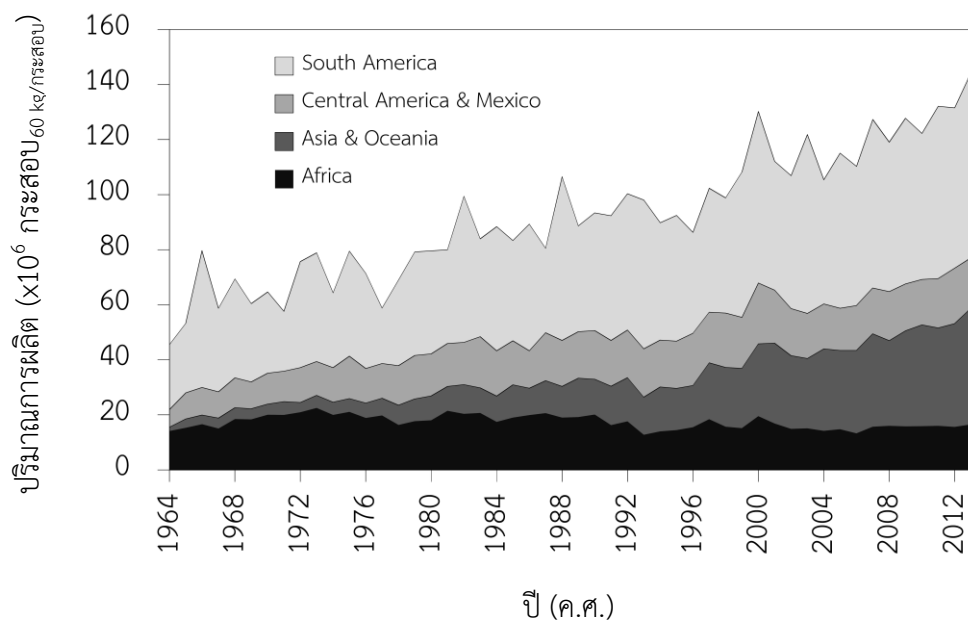
สำหรับในประเทศไทย มีการปลูกกาแฟตั้งแต่สมัยอยุธยา แต่การดื่มกาแฟเริ่มได้รับความนิยมในช่วงรัตนโกสินทร์ โดยเฉพาะในช่วง รัชกาลที่ 3 และรัชกาลที่ 4 มีการปลูกกาแฟในหลายพื้นที่ของเขตกรุงรัตนโกสินทร์ (กรุงเทพมหานครในปัจจุบัน) และเริ่มมีกิจการร้านกาแฟร้านแรกในช่วงสมัยรัชกาลที่ 6 และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นลำดับจนถึงปัจจุบัน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

1.2.2 สถานการณ์การบริโภคกาแฟ

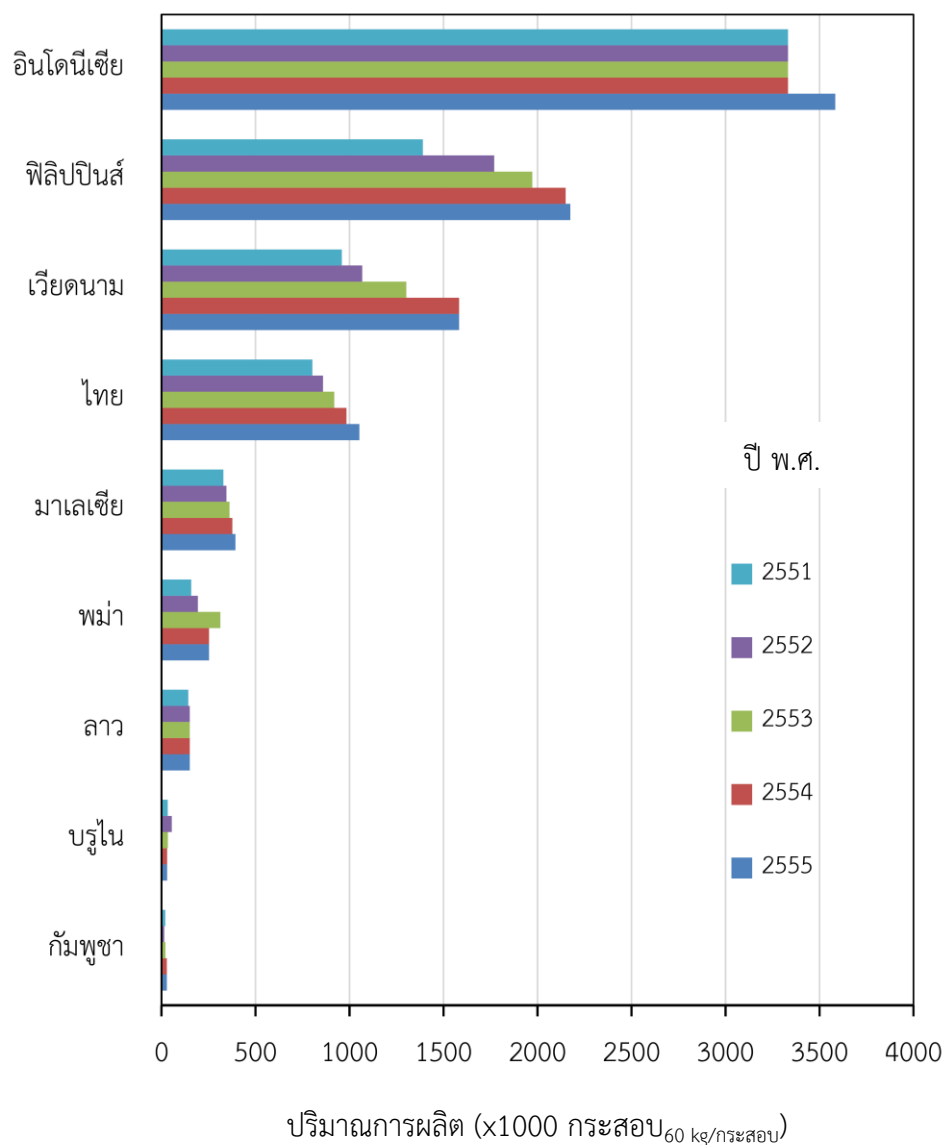
การบริโภคกาแฟได้รับความนิยมในทุกภูมิภาค จากข้อมูลการผลิตเมล็ดกาแฟสู่ตลาดโลกย้อนหลัง 50 ปี [11] แสดงถึงการผลิตที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 ในปี พ.ศ. 2506 มีความร่วมมือระหว่างประเทศผู้ผลิตกาแฟ โดยจัดตั้งองค์การที่มีชื่อว่า ICO ซึ่งได้ดูแลการซื้อขายในตลาดโลก โดยเฉพาะเพื่อป้องกันการกักตุนสินค้าสำหรับเก็งกำไรที่มากเกินไปจนทำให้สินค้ามีราคาแพงเกินจริงและปริมาณเมล็ดกาแฟขาดตลาดหรือล้นตลาด จากข้อมูลของ ICO ในปี พ.ศ. 2556 มีกำลังการผลิตกาแฟทั่วโลกประมาณ 8.71 ล้านตัน [5] สำหรับการผลิตในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.2 [12] โดยประเทศที่มีผลผลิตส่งออกเมล็ดกาแฟดิบมากที่สุดของโลกได้แก่ บราซิล เวียดนาม และ อินโดนีเซีย ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 จากข้อมูลการผลิตเมล็ดกาแฟจะเห็นได้ว่าตลาดกาแฟมีความเสถียรภาพสูงและมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องตามความต้องการบริโภคของประชากรโลก

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

การจากการสำรวจปี 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 และคาดว่าจะสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 10,630 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2560 [16] และสำหรับในปี พ.ศ. 2557 ปริมาณความต้องการเมล็ดกาแฟของประเทศไทย มีประมาณ 7.5 หมื่นตัน [5] กาแฟได้มาจากการชงกาแฟสด และจากกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปเพื่อผลิตน้ำกาแฟและนำไปทำกาแฟผงด้วยกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) จึงมีกาแฟเหลือทิ้งในปริมาณสูงและมีอัตราเพิ่มขึ้นในทุกๆปี



รูปที่ 1.1 ปริมาณการผลิตเมล็ดกาแฟแต่ละภูมิภาค 50 ปีย้อนหลัง [11]



รูปที่ 1.2 ปริมาณความต้องการใช้งานเมล็ดกาแฟของประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [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 พันธุ์อาราบิก้า *Coffea Arabica* L. cv. *Caturra* (Arabica) และ พันธุ์โรบัสต้า *Coffea canephora* var. *robusta* (Robusta) [18] ตามรูปที่ 1.3 [19] โดยความแตกต่างของกาแฟทั้งสองชนิดนี้คือ อาระบิก้าเจริญเติบโตได้ดีในที่สูงอากาศเย็น จึงต้องปลูกในพื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 600–2,200 เมตร มีปริมาณน้ำฝน 1,200-2,200 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิประมาณ 15-24°C มีกลิ่นหอมมากกว่า ความขมน้อยกว่า และมีปริมาณคาเฟอีนน้อยกว่าประมาณสองเท่า เมื่อเทียบกับสายพันธุ์โรบัสต้า ส่วนกาแฟพันธุ์โรบัสต้าสามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ที่มีฝนตกชุก อากาศร้อนชื้น ความสูงจากระดับน้ำทะเล ประมาณ 0-800 เมตร มีปริมาณน้ำฝน 2,200-3,000 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิประมาณ 18-36°C ผู้ผลิตกาแฟมักจะนำกาแฟพันธุ์อาราบิก้ามาผสมกับพันธุ์โรบัสต้าเพื่อเพิ่มความหอม แต่โรบัสต้าจะมีจุดเด่นเรื่องปริมาณคาเฟอีนที่มากกว่าพันธุ์อาราบิก้า [20] แต่ทั้งสองสายพันธุ์สามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้จากทั้งเมล็ดกาแฟดิบ (green coffee bean, GCB) และกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) โดยปริมาณน้ำมันในเมล็ดกาแฟอาราบิก้า จะมีประมาณมากกว่าโรบัสต้า Mussatto และคณะ [6] ทำการศึกษาลักษณะวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปกาแฟ มีการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟพันธุ์อาราบิก้าและโรบัสต้า ไว้ดังแสดงในตารางที่ 1.2



(ก)



(ข)

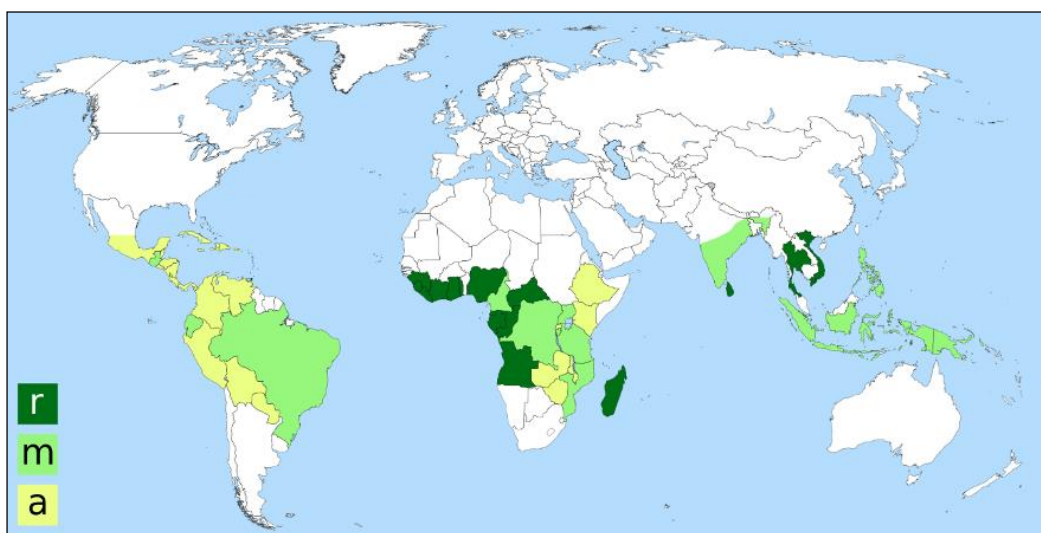


(ค)



(ง)

รูปที่ 1.3 (ก) ผลกาแฟพันธุ์อาราบิก้า (ข) เมล็ดกาแฟดิบพันธุ์อาราบิก้า (ค) ผลกาแฟพันธุ์โรบัสต้า และ (ง) เมล็ดกาแฟดิบพันธุ์โรบัสต้า [19]



รูปที่ 1.4 พื้นที่เพาะปลูกกาแฟทั่วโลก [1]

(r คือ กาแฟพันธุ์โรบัสต้า m คือ กาแฟพันธุ์โรบัสต้าผสมอาราบิก้า และ a คือ กาแฟพันธุ์อาราบิก้า)

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, β (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

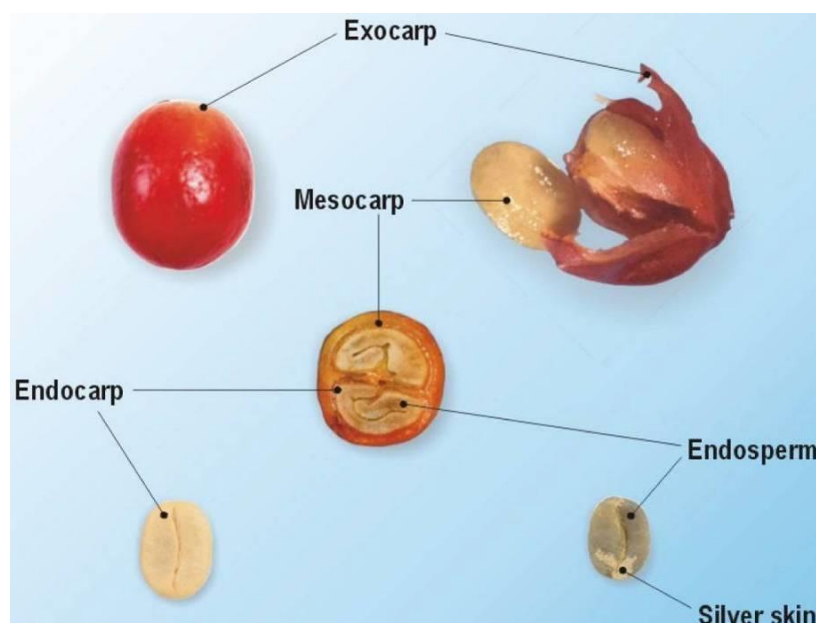
1.2.4 การผลิตและการชงกาแฟ

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 เริ่มต้นจากการคัดเลือกผลกาแฟ แยกเป็นผลที่สุกเกินไป ผลแห้งหรือผลที่ถูกแมลงทำลาย จากนั้นนำผลกาแฟที่

คุณภาพดีไปทำแห้ง (dehydration) โดยการตากแดด (sun drying) บนลานซีเมนต์หรือในถาดแล้ว กลับเป็นระยะๆ เพื่อป้องกันการหมักและสีของผลกาแฟไม่สม่ำเสมอ การตากแห้งจะทำจนกาแฟ เหลือความชื้นไม่เกิน 12% เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของ รา และแบคทีเรีย จากนั้นจึงนำมา กะเทาะเปลือก (hulling) ผลกาแฟที่แห้งจะถูกกะเทาะเปลือกเพื่อเอาส่วนที่เรียกว่า pericarp ออก ซึ่งสามารถใช้มือหรือใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะคล้ายครกกับสาก หรือใช้เครื่องกะเทาะเปลือก โดยเครื่อง กะเทาะเปลือกจะใช้สกรูเป็นองค์ประกอบหลักในการทำให้เปลือกส่วน pericarp 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 กลิ่น และรสชาติเสียไป ขั้นตอนต่อมา การกำจัดเมือก (demucilaging) เมล็ดกาแฟที่ปอกเปลือกนอกออกแล้ว จะมีเมือก (mucilage) ห่อหุ้มเมล็ดอยู่ซึ่งจะต้องกำจัดออกไป ซึ่งมีวิธีการคือ การกำจัดเมือกโดยวิธีการหมักตามธรรมชาติ (natural fermentation) เป็นวิธีการที่ ปฏิบัติดั้งเดิม โดยนำเมล็ดกาแฟที่ปอกเปลือกออกแล้วมาแช่ ในบ่อซีเมนต์ ขนาด มีรูระบายน้ำออก ด้านล่าง ใส่เมล็ดกาแฟประมาณ 3/4 ของบ่อ แล้วใส่น้ำให้ท่วมสูงกว่ากาแฟ แล้วคลุมบ่อด้วยผ้าหรือ พลาสติกปิดปากบ่อซีเมนต์ ทิ้งไว้ 24-48 ชั่วโมง ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่าอากาศหนาวเย็น การหมัก อาจจะใช้เวลา 48-72 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยน้ำทิ้งแล้วนำเมล็ดมาล้างน้ำให้สะอาด นำเมล็ดมาขัดอีก ครั้งในตะกร้าตาถี่ ที่มีปากตะกร้ากว้างกันไม่ลึกมาก เมื่อขัดแล้วเมล็ดกาแฟจะไม่ลื่นแล้วล้างด้วยน้ำ สะอาดอีกครั้งก่อนที่จะนำไปตาก อีกวิธีหนึ่งการกำจัดเมือกโดยใช้ต่าง (lye peeling) โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10% เเทลงในบ่อซีเมนต์ที่ใช้หมักเมล็ดกาแฟ หลังจากเท เมล็ดกาแฟประมาณ 250-300 กิโลกรัม และเกลี่ยให้เสมอกัน จากนั้นใช้ไม้พายกวาดเมล็ดกาแฟเพื่อให้ สารละลายกระจายให้ทั่วทั้งบ่อประมาณ 30-60 นาที หลังจากทิ้งไว้ 20 นาที แล้วตรวจสอบว่าต่าง ย่อยเมือกออกหมด หรือหากยังไม่หมดให้กวาดอีกจนครบ 30 นาที แล้วตรวจสอบอีกครั้ง เมื่อ เมือกออกหมดต้องนำเมล็ดกาแฟไปล้างด้วยน้ำสะอาด 3-4 ครั้งก่อนนำไปผึ่งแดดให้แห้ง วิธีนี้จะใช้ เวลาประมาณไม่เกิน 1 ชั่วโมง (โรบัสตา 1 ชั่วโมง 30 นาที) หลังจากเมล็ดกาแฟผ่านการล้างทำความสะอาดแล้ว นำเมล็ดกาแฟทำแห้ง (dehydration) โดยการตากแดด (sun drying) บนลานซีเมนต์ หรือเทลงบนตาข่ายพลาสติกบนแคร่ไม้ไผ่ เกลี่ยเมล็ดกาแฟกระจายสม่ำเสมอไม่ควรหนาเกิน 4 นิ้ว ควรที่จะทำการเกลี่ยเมล็ดกาแฟวันละ 2-4 ครั้ง จะทำให้เมล็ดแห้งเร็วขึ้น และเวลากลางคืนควรกอง เมล็ดเป็นกองๆ และใช้พลาสติกคลุมเพื่อป้องกันน้ำฝนหรือน้ำค้าง ใช้เวลาดตากประมาณ 7-10 วัน

เมล็ดจะมีความชื้นประมาณ 10-12% แล้วจึงบรรจุเมล็ดกาแฟ (packing) โดยเมล็ดกาแฟที่แห้งแล้วควรเก็บไว้ในรูปของกาแฟกะลา (parchment coffee) เพราะจะสามารถรักษาเนื้อกาแฟและป้องกันการดูดกลับความชื้นกาแฟได้ดี และควรบรรจุในกระสอบป่านใหม่และแห้งสนิท เก็บในโรงเก็บที่มีอากาศถ่ายเท ได้สะดวก ไม่อับชื้น ก่อนทำการคั่วสารกาแฟจะต้องผ่านขั้นตอนการสีกาแฟกะลา (hulling) ซึ่งกาแฟกะลาที่จะนำไปจำหน่ายควรจะทำกรสีเพื่อเอากะลาออกด้วยเครื่องสีกะลาจะได้สารกาแฟที่มีลักษณะผิวสีเขียวอมฟ้า เรียกว่าเมล็ดกาแฟดิบ (green coffee bean, GCB)



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

1.2.4.2 การชงกาแฟด้วยวิธีเอสเพรสโซ

โดยส่วนใหญ่หลังจากเมล็ดกาแฟดิบ (GCB) ผ่านการคั่วแล้ว จะได้เมล็ดกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) เมล็ดกาแฟคั่วจะถูกนำมาแปรรูปเป็นน้ำกาแฟและเข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เพื่อผลิตเป็นกาแฟซองสำเร็จรูปและกาแฟกระป๋อง สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการชงแบบเอสเพรสโซ ซึ่งในกระบวนการชง เมล็ดกาแฟคั่วจะถูกบดให้เป็นผงละเอียดเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของกาแฟ ทำให้น้ำร้อนที่สัมผัสผงกาแฟสามารถละลายสารอินทรีย์ในเนื้อกาแฟได้ดียิ่งขึ้น [23] ขนาดของผงกาแฟจะขึ้นอยู่กับวิธีการชงกาแฟ โดยการชงกาแฟด้วยกระบวนการเอสเพรสโซ ผงกาแฟควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3 มิลลิเมตร และมีขนาดโตขึ้น สำหรับการชงด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การชงกาแฟแบบ 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] วิธีการชงแบบเอสเพรสโซเป็นวิธีการสกัดกาแฟโดยผ่านน้ำที่มีความร้อนอุณหภูมิ $88 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความดันสูง 9 ± 1 bar ลงบนผงกาแฟบดละเอียดที่มีการอัดตัวอย่างสม่ำเสมอ น้ำร้อนแรงดันสูงจะแทรกผ่านชั้นผงกาแฟสกัดทั้งองค์ประกอบที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดยส่วนที่ไม่ละลายน้ำจะแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ แขนวลอย (คอลลอยด์) อยู่ในน้ำกาแฟสกัด ซึ่งคุณสมบัติเช่นนี้ จะไม่สามารถทำได้จากการชงวิธีอื่นๆ วิธีการชงกาแฟและเครื่องชงกาแฟแบบเอสเพรสโซ มีต้นกำเนิดมาจากประเทศอิตาลี โดยนักประดิษฐ์ชื่อ Angelo Moriondo และได้จดสิทธิบัตรไว้ในเมือง Turin ในปี พ.ศ. 2427 [25] และในปี พ.ศ. 2541 ประเทศอิตาลีในฐานะต้นกำเนิดเอสเพรสโซ ได้ออกมาตรฐานการสกัดน้ำกาแฟโดยวิธีเอสเพรสโซ 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 ± 0.5
อุณหภูมิในการสกัด ($^{\circ}\text{C}$)	88 ± 2
อุณหภูมิกาแฟในถ้วย ($^{\circ}\text{C}$)	67 ± 3
แรงดันน้ำร้อน (bar)	9 ± 1
เวลาในการซึมผ่านทั้งหมด (sec)	25 ± 5
ลักษณะน้ำกาแฟสกัด	
ความหนืด ที่ 45°C (mPa.s)	> 1.5
น้ำมันรวม (mg.mL^{-1})	> 2
คาเฟอีน (mg.cup^{-1})	< 100
ปริมาณรวมฟอง (mL)	25.0 ± 2.5

1.2.5 ลักษณะกากกาแฟทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

ส่วนเหลือทิ้งจากการสกัดน้ำกาแฟเพื่อนำไปชงเป็นกาแฟประเภทต่างๆ เรียกว่า กากกาแฟ (spent coffee grounds, SCG) ลักษณะเป็นผงเนื้อละเอียดมีความชื้นสูงเกาะกันเป็นก้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.6 มีน้ำมันอยู่บนผิวประมาณ 7-17 wt.% [27] สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพ กากกาแฟ (spent coffee grounds) กากกาแฟปราศจากน้ำมัน (defatted spent coffee grounds, DFSCG) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.4 ภาพกากกาแฟหลังจากการชงกาแฟ ภาพกากกาแฟก่อน

และหลังการสกัดน้ำมันและลักษณะพื้นผิวก่อนและหลังจากการสกัดน้ำมันแสดงดังรูปที่ 1.6 และรูปที่ 1.7



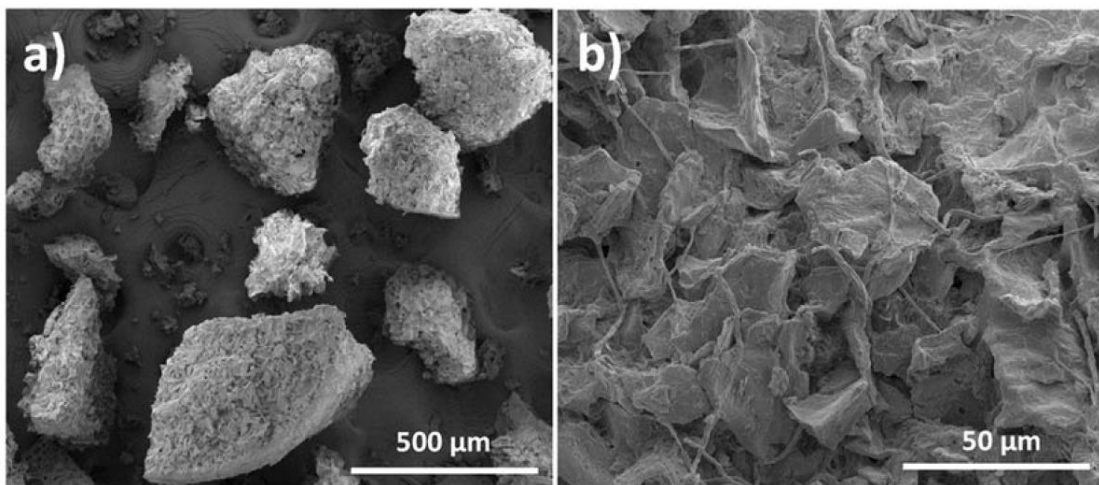
(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 1.6 (ก) กากกาแฟเหลือทิ้งจากการชงกาแฟ

(ข) กากกาแฟอบแห้งก่อนสกัดน้ำมัน และ (ค) กากกาแฟหลังสกัดน้ำมัน



(ก)

(ข)

รูปที่ 1.7 (ก) ภาพถ่ายกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด DSCG

และ (ข) DFSCG [28]

ตารางที่ 1.4 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของกากกาแฟ [29]

Parameter	DSCG			DFSCG
	[29]	[7]	[28]	[29]
Higher heating value (MJ.kg ⁻¹)	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 ⁻¹)	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 การใช้ประโยชน์กากกาแฟในปัจจุบัน

กากกาแฟเหลือทิ้งจากร้านขายกาแฟสดในชุมชนปัจจุบันถูกนำมาใช้แปรรูปเพื่อการใช้ประโยชน์อย่างง่าย การใช้งานอาจมีข้อจำกัดและมีปริมาณการใช้งานน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณกากกาแฟเหลือทิ้ง โดยมีตัวอย่างการใช้งาน เช่น ใช้ทำวัสดุเพาะเห็ด วัสดุทดแทนไม้ กระเบื้องจากกากกาแฟ ใช้เป็นวัสดุผสมในการหมักไข่เค็ม ใช้กากดับกลิ่น ชัดผิว ปอกหน้า ผสมสบู่ แชมพู ครีมนวด ใช้ทำปุ๋ยพืชสด ใช้ไล่แมลงศัตรูพืช กากกาแฟติ่งดูดไล่เดือนเป็นประโยชน์ต่อพืช กลิ่นกาแฟสามารถใช้ไล่แมวได้ และผสมกากกาแฟอบน้ำสุ้นซ์ ช่วยให้ขนเงาและไล่เห็บ เป็นต้น

1.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากกากกาแฟด้านการพัฒนาเป็นเชื้อเพลิง

ปัจจุบันมีกลุ่มนักวิจัยในหลายสาขาศึกษาการนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์ในหลายแนวทาง ซึ่งแบ่งกลุ่มการได้ดังนี้

1.2.7.1 เผาไหม้โดยตรง

กากกาแฟมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่เผาไหม้ให้พลังงานความร้อนสูง ประกอบกับมีปริมาณซัลเฟอร์ที่ต่ำ ปัจจุบันมีการใช้กากกาแฟเผาไหม้โดยตรงในเตาเผาของหม้อไอน้ำในโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูป เนื่องจากมีกากกาแฟเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งง่ายต่อการจัดการ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การกำจัดและช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานในการผลิต [30]

1.2.7.2 เชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากกาแฟ

เชื้อเพลิงอัดแท่ง (briquette) มีลักษณะที่ง่ายต่อการจัดเก็บ การขนส่ง รวมทั้งมีมาตรฐานกำหนดคุณลักษณะที่ชัดเจนง่ายต่อการนำไปใช้งานสำหรับเตาเผามาตรฐาน อีกทั้งกากกาแฟมีคุณสมบัติเหมาะสมเป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในด้านค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณซีเถ้า ดังแสดงในตารางที่ 1.5 จึงมีการศึกษาและทดสอบเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากกาแฟโดย Sudjaitham และคณะ [31] ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากกาแฟโดยใช้เครื่องอัดเย็น และมีตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย 3 ชนิดคือ ผักตบชวาหมักเศษมันสำปะหลัง และแป้งเปียก พร้อมทั้งวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพ ด้านเชื้อเพลิง และศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตโดยใช้สถิติ พบว่าการใช้ตัวประสานจะทำให้ค่าความร้อนลดลง มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง $0.5-0.9 \text{ g.cm}^{-3}$ ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อตัวประสานที่ใช้ลดลง ค่าดัชนีแตกกร่นอยู่ระหว่าง $0.82-0.99$ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของเชื้อเพลิงในการทนต่อแรงกระแทกในการขนส่งได้ และมีค่าสัมประสิทธิ์การใช้งานของความร้อนร้อยละ $13.3-23.4$ ซึ่งใกล้เคียงกับไม้พิน และได้สรุปว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน Limousy และคณะ [32] ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากกากกาแฟเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากซีเถ้าขี้เถ้าและกากกาแฟผสมซีเถ้าขี้เถ้าจากไม้สนในอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นทดสอบการใช้งานใน Boiler ขนาดเล็ก 12 kW พบว่าค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงอัดเม็ดกากกาแฟเพียงอย่างเดียวมีค่ามากกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากไม้สน และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุผสมให้ค่าความร้อนที่สูงที่สุดโดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 19.55 MJ.kg^{-1} 19.23 MJ.kg^{-1} และ 19.63 MJ.kg^{-1} ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซไอเสียได้แสดงในตารางที่ 1.6 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟผสมซีเถ้ามีคุณสมบัติเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากซีเถ้าขี้เถ้าในท้องตลาดและจากค่าความร้อนและความหนาแน่นที่แตกต่างกันของเชื้อเพลิงอัดเม็ดกากกาแฟและซีเถ้า การใช้งานใน boiler อาจต้องการศึกษาปรับแต่งที่เหมาะสมเพิ่มเติม อีกทั้งกรณีกากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันและกากที่เหลือจากการหมักเอทานอลยังคงมีคุณสมบัติในการเป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงซึ่งยังต้องการศึกษาและปรับปรุงต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 1.5 คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด [33]

Property	Content
Higher heating value (MJ.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 (ppm.vol ⁻¹)	11.8	7.9	6.7
Particles (mg.Nm ⁻³)	17.5	14.2	13.9
Higher heating value (MJ.kg ⁻¹)	19.6	19.2	19.6
Boiler combustion efficiencies (%)	86.3	90.8	91.9

1.2.7.3 ไบโอเอทานอลจากกากกาแฟ

Eilhann และคณะ [34] ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลจากกากกาแฟ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของกากกาแฟที่ส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบประเภทน้ำตาล เมื่อผ่านกระบวนการหมักด้วยยีสจะได้เอทิลแอลกอฮอล์ หรือเรียกว่า เอทานอล โดยสรุปว่า กระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ของรา (ยีสต์) จะเกิดขึ้นได้ช้าเนื่องจากไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระที่อยู่ในกากกาแฟขัดขวางการเจริญเติบโต ในกระบวนการหมักจึงนิยมนำกากกาแฟสกัดส่วนที่เป็นน้ำมันออกก่อน ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตไบโอเอทานอลและไบโอดีเซลได้ผลได้เท่ากับ 0.46 g.g⁻¹ และ 97.5 ± 0.5% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไขมันและองค์ประกอบน้ำตาลทั้งหมดที่สกัดได้จากกากกาแฟ

1.2.7.4 ไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟ

กากกาแฟที่ผ่านการชงกาแฟหรือผ่านกระบวนการสกัดสารกาแฟด้วยน้ำออกแล้วนั้น ยังคงเหลือองค์ประกอบที่เป็นน้ำมันเหลืออยู่ 7-17 wt.% [27] โดยน้ำมันจากกากกาแฟมีคุณลักษณะดังแสดงในตารางที่ 1.7 ซึ่งมีทีมวิจัยของ Mebrahtu และคณะ [35] ทำการศึกษาการ

ผลิตไบโอดีเซลโดยเริ่มจากการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายและน้ำมันที่สกัดได้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งใช้กรดซัลฟิวริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันและกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันตามลำดับ สามารถเปลี่ยนน้ำมันสกัดจากกากกาแฟให้กลายเป็นไบโอดีเซลที่มีปริมาณผลได้เท่ากับ 73.4 wt.% โดยคุณภาพที่ได้ผ่านมาตรฐานน้ำมันสำหรับใช้ผสมน้ำมันชนิดกลางจากหอกัน (middle distillate fuels) เพื่อผลิตไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D 6751- 09 (B100) Grades S15 and S500 และที่วิจัยของ Caetano และคณะ [29] ศึกษาการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยตัวทำละลาย hexane และ isopropanol ที่อัตราส่วนและความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทดสอบปริมาณน้ำมันที่สามารถสกัดได้ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยใช้แอลกอฮอล์ประเภทเมทานอล และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วรอบกวนผสม 80 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ความบริสุทธิ์ 86% ที่วิจัยของ Todaka และคณะ [36] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟ น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันเรพซิด ด้วย methanol, ethanol, 1-propanol และ 1-butanol โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟที่ใช้ 1-butanol มีคุณสมบัติในด้านเชื้อเพลิงที่ดี มีความเสถียรต่ออุณหภูมิ (thermal stability) และ ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี โดยคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟได้แสดงในตารางที่ 1.7

ตารางที่ 1.7 คุณสมบัติไบโอดีเซลจากน้ำมันกาแฟเปรียบเทียบกับมาตรฐาน

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 (mm ² .s ⁻¹)	-	-	11.2	5.19	3.5-5.0
Density (g.cm ⁻³)	-	-	0.887	-	-
Reaction yield (wt.%)	37.3	60.5	66.5	-	-
Water content (ppm)	2708	-	-	632	< 500
Iodine value (g I ₂ .100.g ⁻¹)	70.0	2.14	-	-	< 120
Acid value (mg KOH.g ⁻¹)	1.9	-	-	0.11	< 0.5
Methyl ester content (wt.%)	86.0	69.3	-	-	> 96.5

1.2.8 การสกัดน้ำมันจากกาแฟ

การสกัด (extraction) คือ กระบวนการแยก (separation) โดยใช้ของเหลวอีกชนิดหนึ่งเป็นตัวทำละลาย ละลายสารที่ต้องการแยกโดยให้ละลายออกมาในตัวทำละลาย สำหรับการสกัดน้ำมันออกจากกาแฟจะจัดอยู่ในประเภท การสกัดของแข็งด้วยของเหลว solid-liquid extraction หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการชะ (leaching) คือ การละลายส่วนประกอบที่ต้องการออกจากของผสมแข็งด้วยตัวทำละลายของเหลว สำหรับกรณีที่ส่วนประกอบที่ต้องการละลายอยู่บนผิวกากของแข็งที่ไม่ละลาย เป็นเพียงกระบวนการล้างออกด้วยตัวทำละลาย (elutriation หรือ elution) [38] การสกัดน้ำมันจากกาแฟ (SCG) กำลังเป็นที่สนใจในศึกษาในหลายประเทศ ปัจจุบันมีความพยายามทดลองใช้ตัวทำละลายต่างๆ ทดสอบความสามารถในการสกัดน้ำมันจาก DSCG ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ Soxhlet extractor ซึ่งสามารถสกัดน้ำมันจากกาแฟได้ โดยใช้ตัวทำละลาย เช่น hexane, isopropanol, pentane และ acetone เป็นต้น ทีมวิจัยของ Ferrari และคณะ [39] ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) ของทั้งเมล็ดกาแฟพันธุ์อาราบิก้าและพันธุ์โรบัสตา โดยใช้สารละลาย pentane ทำการสกัดด้วย Soxhlet extraction เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ตัวอย่างจากกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าให้น้ำมัน 16.5 ± 0.4 wt.% และสายพันธุ์โรบัสตาให้ปริมาณน้ำมัน 9.2 ± 0.1 wt.% เช่นเดียวกับ Al-Hamamre และคณะ [40] ได้ทำการศึกษากการสกัดน้ำมันจาก DSCG จากตัวทำละลายแบบมีขั้ว (polar) และไม่มีขั้ว (non-polar) ด้วย Soxhlet extraction ใช้เวลาสกัด 30 นาที ด้วยตัวทำละลายแบบไม่มีขั้ว (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 ⁻¹)	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

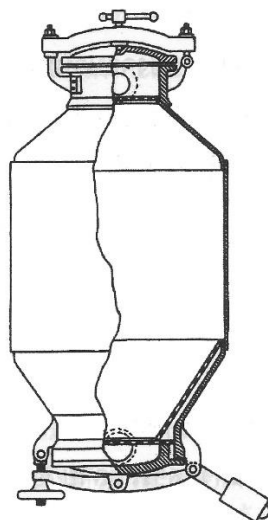
Property	[37]	[36]	[29]
Color	Dark brown	Dark brown	Dark brown
Moisture (%)	-	-	0.118
HHV (MJ.kg ⁻¹)	-	-	40.8
Density at 15°C (kg.m ⁻³)	941	904.2	912
Viscosity 40°C (mm ² .s ⁻¹)	49.64	33.92	39.8
Acid value (mg KOH.g ⁻¹)	11.27	8.0	9.9
Iodine value (g Iodine.g ⁻¹)	-	-	0.476

1.2.9 เทคโนโลยีเครื่องสกัด

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

1.2.9.1 กระบวนการสถานะไม่คงที่ [38]

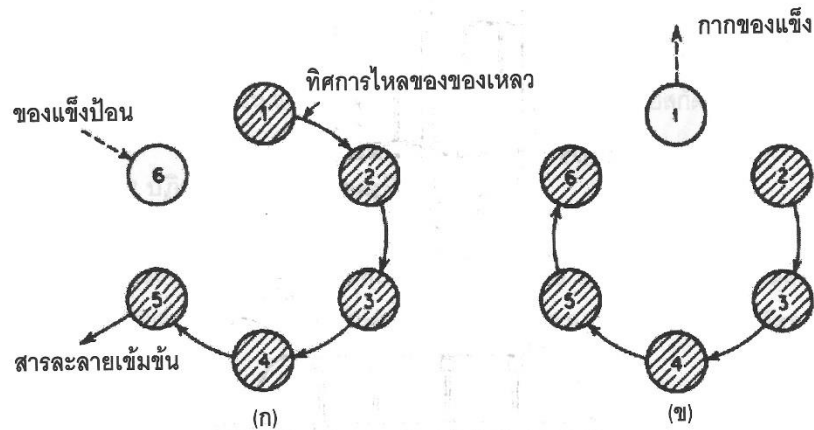
กระบวนการสถานะไม่คงที่ (unsteady-state operation) เป็นกระบวนการในลักษณะที่ของแข็งจำนวนหนึ่ง ถูกชะด้วยของเหลวจำนวนหนึ่งเป็นครั้งๆ (batch operation) หรือในลักษณะที่กึ่งต่อเนื่อง (semi-batch or semi-continuous operation) ซึ่งของแข็งจะถูกชะด้วยของเหลวซึ่งไหลอย่างต่อเนื่อง ของแข็งที่เป็นก้อนใหญ่มักจะถูกสกัดด้วยการแช่ (percolation) ในเครื่องสกัดแบบเบตนิ่ง (fixed bed) ส่วนของแข็งที่เป็นอนุภาคเล็กๆแขวนลอยง่าย มักจะถูกสกัดในเครื่องสกัดที่มีใบกวน (agitator) ลักษณะการชะและลักษณะของเครื่องสกัดในหมวดนี้ได้แก่ ของแข็งที่มีอนุภาคปานกลาง สามารถชะโดยใช้ถังเปิด อาจมีระบบสุบหมุนเวียนของเหลว ซึ่งมีลักษณะหลากหลายขึ้นกับธรรมชาติของสารป้อน การขนส่ง และปริมาณของสารป้อน ขนาดอนุภาคควรใกล้เคียงกัน เมื่อแช่ของแข็งในสารละลายเวลานานพอจะนำสารละลายสกัดออกทางก้นถัง หรือหากทำแบบกึ่งต่อเนื่องจะผ่านของเหลวเข้าและออกจากกันอย่างต่อเนื่อง การแช่อาจทำในถังปิดเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายหรือเพื่อต้องการเพิ่มความดันเพื่อช่วยในการสกัด ถังปิดมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ดิฟฟิวเซอร์ (diffuser) ตามรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 ถังคิฟิวเซอร์ใช้ในการสกัดน้ำตาล [38]

1.2.9.1.1 การสัมผัสหลายครั้งด้วยกระแสสวนทาง [38]

การชะหรือล้างของแข็งจำนวนหนึ่งด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ในถังแช่หลายๆครั้งในลักษณะที่เรียกว่า กระแสไหลข้าม (cross-current) สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นต่ำ หากเปลี่ยนกระบวนการเป็นแบบการสัมผัสหลายครั้งด้วยกระแสสวนทาง (counter-current multiple contact) ประสิทธิภาพการสกัดจะดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.9 แต่เพื่อหลีกเลี่ยงการถ่ายของแข็งจากถังหนึ่งสู่อีกถังหนึ่งอาจออกแบบให้เป็นระบบต่อเนื่องซึ่งถ่ายเฉพาะของเหลวจากถังหมายเลขต่ำสู่ถังหมายเลขสูงขึ้น เมื่อของแข็งในถังหมายเลขต่ำสุดถูกชะนานพอก็จะถ่ายทิ้ง บรรจุของแข็งใหม่แทน ทำเป็นวงจรแบบนี้ต่อไปเรื่อยๆ ถังอาจเรียงในลักษณะวงกลมหรือเป็นแถวอนุกรม เรียกว่า แบตเตอรี่การสกัด (extraction battery) และมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ระบบแชงก์ (Shank system) เพื่อเป็นเกียรติแก่ เจม แชงก์ (Jame Shanks) ชาวอังกฤษผู้ริเริ่มใช้ระบบดังกล่าวครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1841 ในการชะโซเดียมคาร์บอเนต



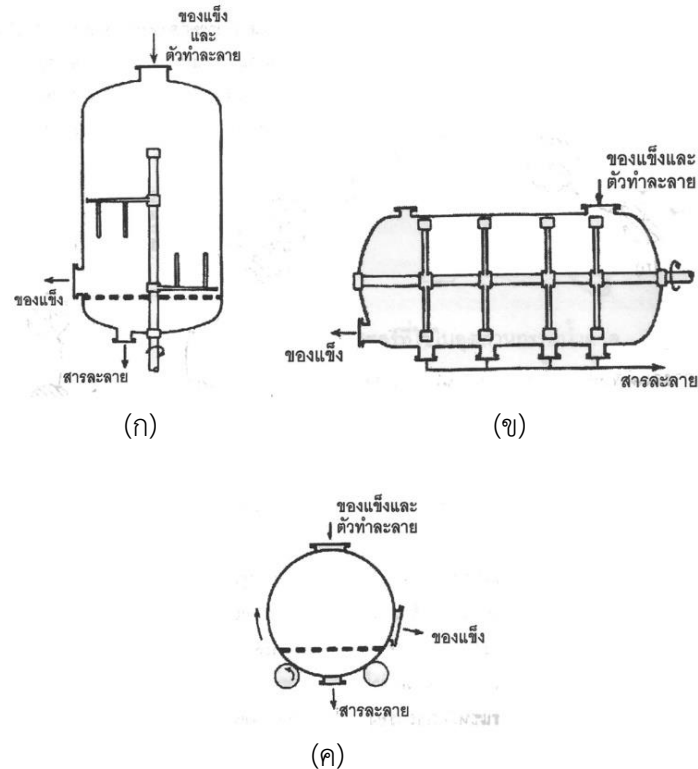
รูปที่ 1.9 การสัมผัสหลายครั้งแบบกระแสวนทาง [38]

1.2.9.1.2 การชะแบบอัดกรอง [38]

การชะแบบอัดกรอง (filter-press leaching) เป็นวิธีการกรองในกรณีของแข็งมีขนาดอนุภาคเล็กมากเกินกว่าจะใช้ถังแช่ อาจใช้วิธีชะโดยสูบของเหลวผ่านชั้นของแข็งในเครื่องกรองแบบอัดกรอง นิยมใช้กับการล้างสารละลายออกจากตะกอน

1.2.9.1.3 ถังกวน [38]

ถังกวน (agitator vessel) ถูกออกแบบเพื่อแก้ไขข้อเสียของการแช่หรือการกรอง คือ การชะเกิดช้าและมักเกิดช่องในเบตของแข็ง ทำให้ของเหลวไหลผ่านอนุภาคได้ไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กจึงมีการประยุกต์ใช้การกวนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว การกวนอาจใช้ใบกวนหรืออาจอาศัยหลักพลวัตของไหล เมื่อต้องการแยกของแข็งออกจากการชะจะทำโดยหยุดกวน ทิ้งของแข็งให้ตกตะกอน แล้วจึงรินหรือสูบของเหลวออกดังแสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ลักษณะถังกวนแบบต่างๆ [38]

(ก) ถังกวนแนวตั้ง (ข) ถังกวนแนวนอน (ค) ถังกวนแบบถังหมุน

1.2.9.2 กระบวนการสถานะคงที่ [38]

กระบวนการสถานะคงที่ (steady-state operation) เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องโดยทั้งของแข็งและตัวทำละลายและสารละลายสกัดไหลต่อเนื่องตามทิศทางต่างกันตามการออกแบบ จากถังหนึ่งไปสู่อีกถังหนึ่ง ลักษณะการชะและเครื่องสกัดที่จัดอยู่ในประเภทนี้ ได้แก่

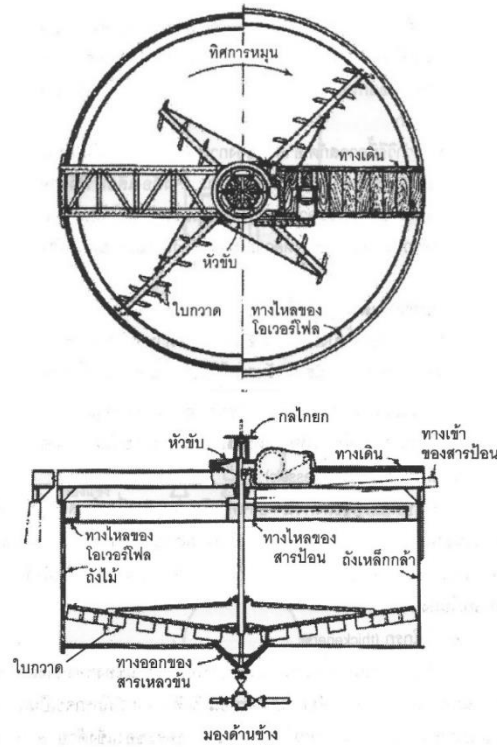
1.2.9.2.1 ถังกวน (ประยุกต์ใช้แบบต่อเนื่อง) [38]

ถังกวน (agitated vessels) สามารถประยุกต์ใช้แบบต่อเนื่องโดยป้อนทั้งของแข็งและของเหลวเข้าสู่ถังกวนและดึงสารแขวนลอยและสารละลายสกัดออกจากถังอย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการนี้ระบบจะอยู่ในสถานะคงที่ได้ต่อเนื่องเมื่อไม่มีของแข็งสะสมในถังกวน

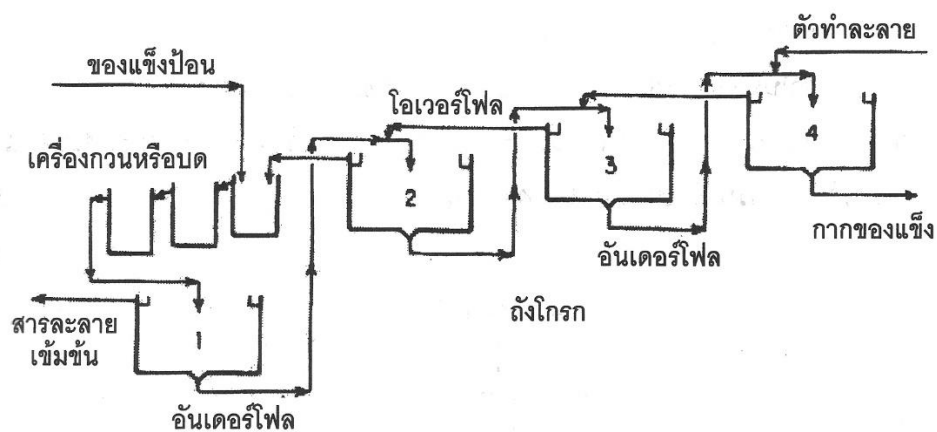
1.2.9.2.2 ถังโกรก [38]

ถังโกรก (thickeners) ตามรูปที่ 1.11 ได้ออกแบบเพื่อเพิ่มอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวของสารแขวนลอยเจือจางโดยอาศัยการตกตะกอน สิ่งที่ได้จากถังโกรกจะเป็นกากตะกอนและสารละลายใส ในบางกรณีอาจใช้ถังโกรกเรียงต่อกันเป็นอนุกรมตามรูปที่ 1.12

และในบางกรณีอาจใช้หลายอุปกรณ์ร่วมกับถังโกรกตามรูปที่ 1.13 เช่น สารละลายจากการชะในถัง กวนหรือเครื่องบดต่อเข้าถังโกรกเพื่อการล้างของแข็งอย่างต่อเนื่อง

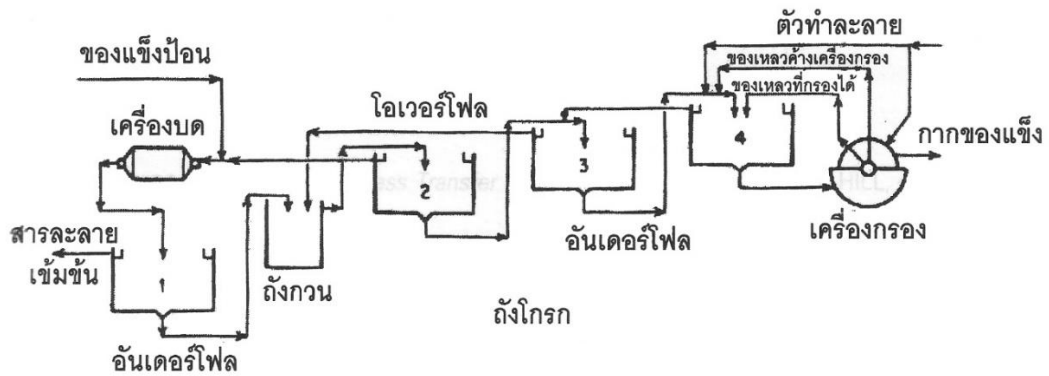


รูปที่ 1.11 ถังโกรก [38]



รูปที่ 1.12 ชุดถังโกรกออกแบบการทำงานให้เรียงต่อกันเป็นอนุกรม [38]

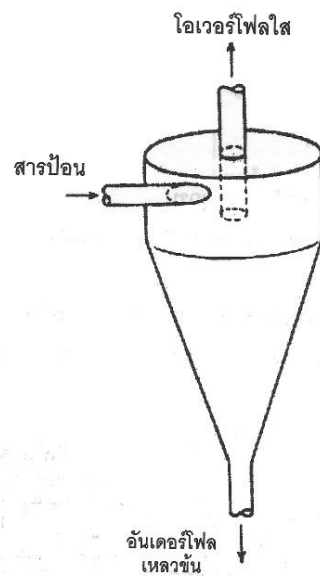
ในบางกรณี อาจมีการใช้อุปกรณ์ต่างๆร่วมกัน เช่น สารละลายจากการชะในถังกวนหรือเครื่องบด อาจถูกป้อนเข้าสู่ถังโกรกอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1.13 การใช้ถังโกรกและอุปกรณ์อื่นๆร่วมกัน [38]

1.2.9.2.3 ไฮโคลนน้ำ [38]

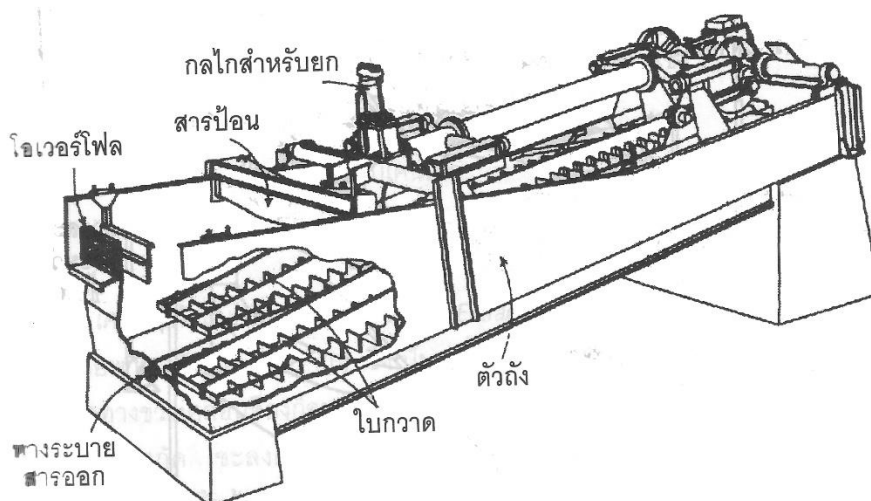
จุดประสงค์หลักของไฮโคลนน้ำ (hydro cyclones) เพื่อแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว โดยของผสมปั่นไหลวนในไฮโคลนจากนั้นของแข็งจะตกลงด้านล่างเนื่องจากน้ำหนักและของเหลวไหลล้นออกด้านบนตามรูปที่ 1.14



รูปที่ 1.14 ไฮโคลนน้ำ [38]

1.2.9.2.4 เครื่องจำแนก [38]

เครื่องจำแนก (classifiers) ออกแบบให้มีพื้นเอียง มีใบกวาดเพื่อกวาดของแข็งบนพื้นเอียงจากล่างขึ้นบนสวนทางกับของเหลวที่ไหลจากพื้นเอียงจากด้านบนลงสู่ด้านล่างตามรูปที่ 1.15



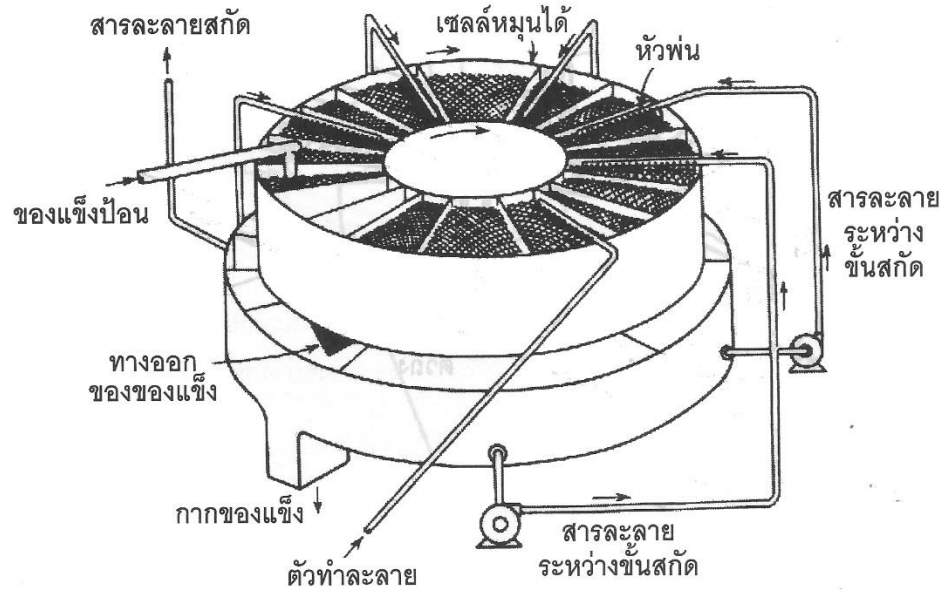
รูปที่ 1.15 เครื่องจำแนก [38]

1.2.9.2.5 ประเภทเครื่องสกัดเมล็ดพืช [38]

เมล็ดพืชที่มีน้ำมันอยู่มากนิยมสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ การเตรียมเมล็ดพืชก่อนการสกัดอาจกระเทาะเปลือก การผ่านความร้อน หรือการบดหีบเอาน้ำมันออกไปรอบหนึ่งก่อน มักใช้ตัวทำละลายได้แก่ เฮกเซนหรือปิโตรเลียมแนปธา ซึ่งเป็นส่วนที่กลั่นได้ใกล้เคียงกับเฮกเซนแต่จะไม่นิยมใช้พวกตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีน เพราะอาจจะเจือปนกับกากของแข็งหลังการสกัดและเป็นพิษ ไม่สามารถใช้ประโยชน์เป็นอาหารสัตว์ต่อได้ กระบวนการสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืชนี้จะเรียกสารละลายสกัด (ของผสมระหว่างตัวทำละลายและน้ำมัน) ว่า มิสเซลล่า (miscella) และเรียกกากของแข็งว่า มาร์ก ดังนี้

1.2.9.2.6 โรโตเซล [38]

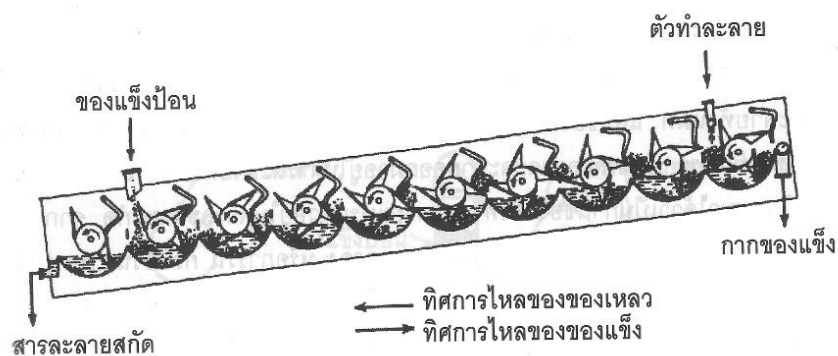
โรโตเซล (Rotocel) เป็นเครื่องมือที่ดัดแปลงมาจากระบบแซงค์ โดยแบ่งถังชะเป็นห้องๆ และถังหมุนไปพร้อมๆกับการปั่นตัวทำละลายด้านบนหนึ่งตำแหน่ง ของแข็งป้อนอีกหนึ่งตำแหน่ง และมีการสูบละลายสกัดระหว่างกระบวนการปั่นบริเวณด้านบนในตำแหน่งห้องอื่นๆ เมื่อหมุนครบรอบกากของแข็งจะถูกปล่อยออกทางด้านล่างตามรูปที่ 1.16



รูปที่ 1.16 เครื่องโรโตเซล [38]

1.2.9.2.7 เครื่องสกัดแบบเคนเนดี [38]

เครื่องสกัดแบบเคนเนดี (Kennedy extractor) เป็นเครื่องสกัดที่มีการสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลวเป็นชั้นๆ โดยของแข็งจะถูกพาจากชั้นหนึ่งไปสู่อีกชั้นหนึ่งด้วยใบกวาดเจาะรู ขณะที่ป้อนตัวทำละลายสกัดให้ไหลสวนทางกันตามรูปที่ 1.17

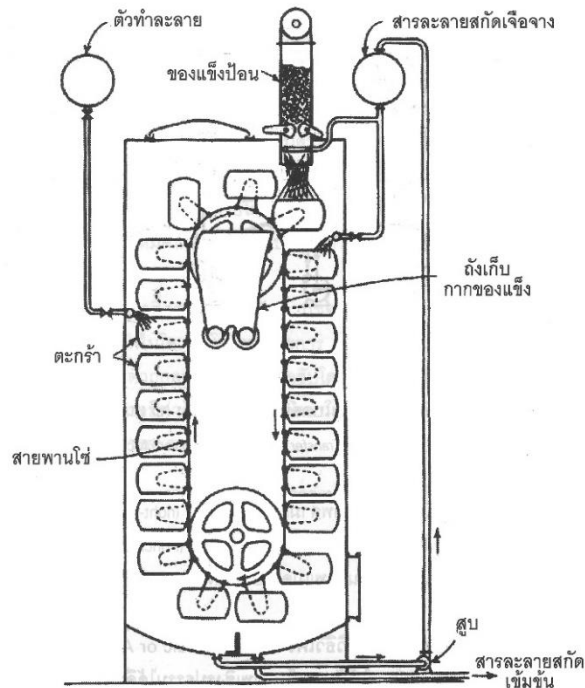


รูปที่ 1.17 เครื่องสกัดแบบเคนเนดี [38]

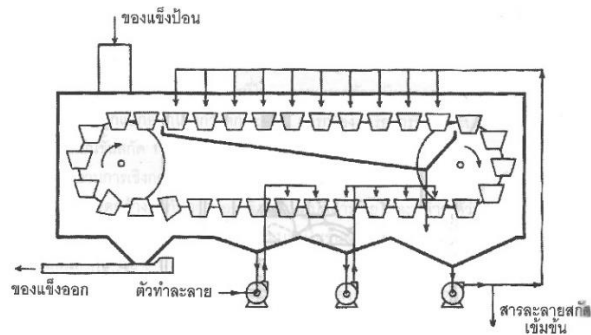
1.2.9.2.8 เครื่องสกัดแบบโบลล์แมน [38]

เครื่องสกัดแบบโบลล์แมน (Bollman extractor) เป็นชุดตะกร้าเจาะรูต่ออนุกรมกันบนสายพาน ซึ่งอาจถือว่าเป็นเครื่องโบลล์แมนแนวตั้งตามรูปที่ 1.18 โดยขณะที่

ตะกร้าทางขวาเคลื่อนที่ลงก็จะถูกชะด้วยสารละลายสกัดเจือจางที่ถูกสูบมาจากก้นถังสกัด ชะลงผ่านตะกร้าบรรจุของแข็งและสะสมที่ก้นถังด้านขวาเป็นสารละลายสกัดเข้มข้น ส่วนตะกร้าทางด้านซ้ายจะถูกชะด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แบบกระแสนวนทาง ได้สารละลายสกัดเจือจางสะสมที่ก้นถังด้านซ้าย เครื่องสกัดแบบนี้ออกแบบให้อยู่ในแนวนอนได้ด้วยเช่นกันตามรูปที่ 1.19



รูปที่ 1.18 เครื่องสกัดแบบโบลล์แมนแนวตั้ง [38]

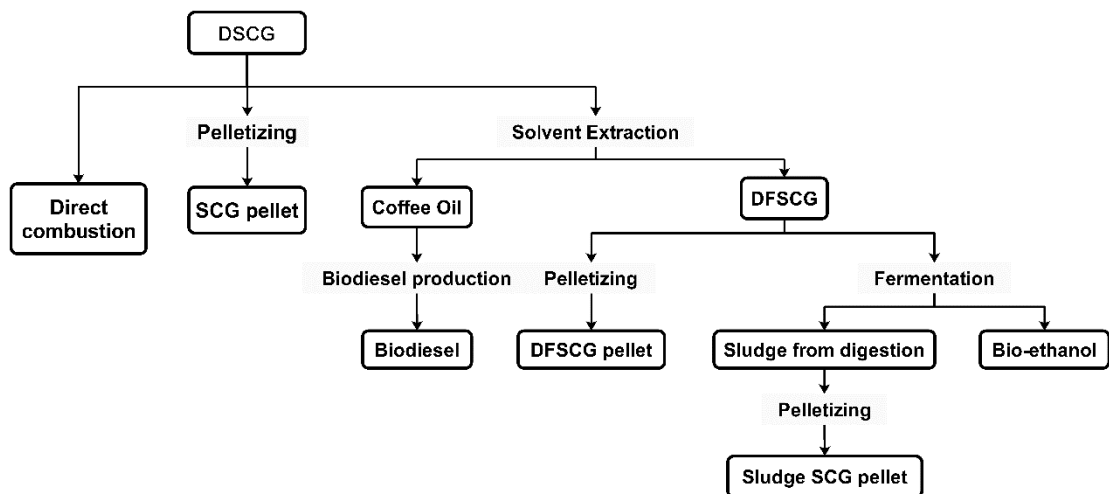


รูปที่ 1.19 เครื่องสกัดแบบโบลล์แมนแนวนอน [38]

1.2.10 สรุปการตรวจเอกสาร

1.2.10.1 ศักยภาพและแนวทางการวิจัยใช้ประโยชน์กากกาแฟ

จากการตรวจสอบเอกสารสามารถสรุปได้ว่า การบริโภคกาแฟได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลายาวนาน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในทุกปีและยังได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องในอนาคต การคั่วกาแฟมีมูลค่าสูง มีองค์ระหว่างประเทศดูแลความเสี่ยงตลาดกาแฟโดยเฉพาะ ส่งผลให้การใช้เมล็ดกาแฟและกากกาแฟเหลือทิ้งในแต่ละพื้นที่ที่มีความมั่นคงทั้งปริมาณและความต่อเนื่องในขณะที่กากกาแฟมีศักยภาพในการปรับปรุงใช้งานในหลายลักษณะโดยเฉพาะมีคุณสมบัติด้านพลังงานตามรูปที่ 1.20 การวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานของกากกาแฟ จำเป็นต้องแยกน้ำมันออกจากกากกาแฟด้วยวิธีสกัดตัวทำละลาย เนื่องจากทั้งตัวน้ำมันและกากกาแฟปราศจากน้ำมันมีมูลค่า เช่น ในการผลิตเอทานอลโดยการหมักกากกาแฟด้วยจุลินทรีย์ องค์ประกอบไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระจะยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ การสกัดน้ำมันออกช่วยให้เกิดการหมักในกากปราศจากน้ำมันได้ดีขึ้นและน้ำมันที่ได้สามารถนำไปผลิตไบโอดีเซลได้ ฉะนั้นการศึกษาระบวนการสกัดอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ต้องการหลังการสกัดมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากยิ่งขึ้น



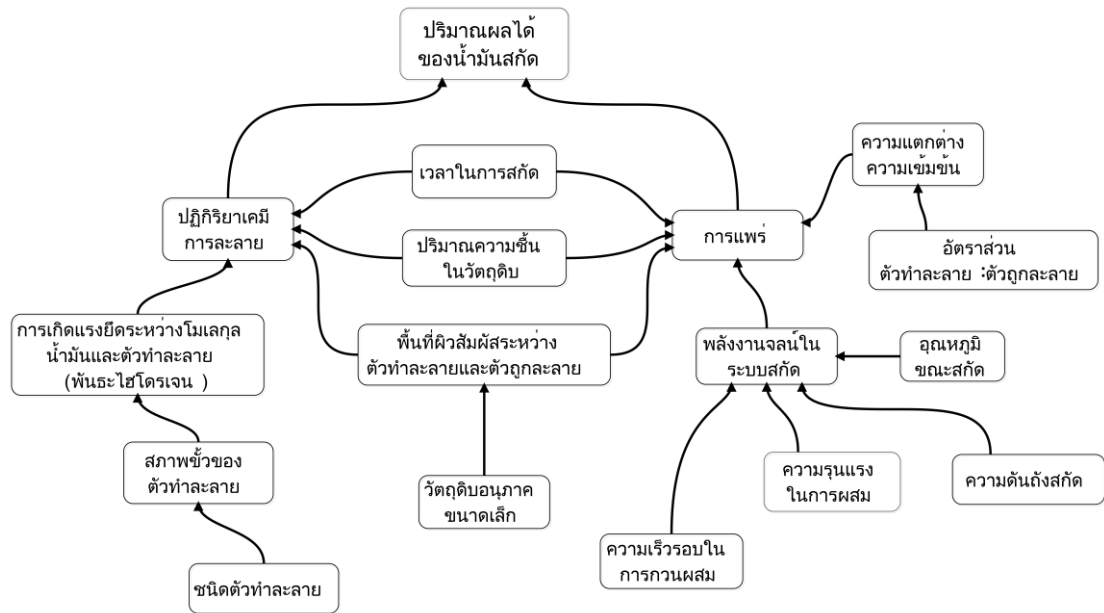
รูปที่ 1.20 แนวทางการวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์กากกาแฟเหลือทิ้งด้านการเป็นพลังงานทดแทน

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

และ DFSCG คือ defatted spent coffee grounds)

1.2.10.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการสกัด

จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีพื้นฐานการสกัดในปัจจุบัน สรุปปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันสกัดด้วยวิธี solid-liquid extraction จากกากกาแฟได้ 2 ปัจจัยหลัก คือ อันดับแรกเป็นปัจจัยทางกายภาพของกากกาแฟ ได้แก่ ขนาดอนุภาคกากกาแฟ ความชื้นและสายพันธุ์กาแฟ ขนาดวัตถุบดที่เล็กลงช่วยเพิ่มผิวสัมผัสและโอกาสสัมผัสระหว่างกากกาแฟและตัวทำละลาย ทำให้ละลายน้ำมันออกมาได้มากขึ้นได้มากขึ้น ในขณะที่ความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟกลับลดลง และปริมาณน้ำมันที่สะสมอยู่ในกากจะมีประมาณ 15-20 wt.% ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสถานที่ปลูก อันดับที่สองคือ สภาวะส่งเสริมการละลายน้ำมันจากกากกาแฟยังตัวทำละลาย สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเด็น ซึ่งประเด็นที่ 1 คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมีในการละลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำมันกาแฟและตัวทำละลายโดยตัวทำละลายประเภทที่ไม่มีสภาพขั้วหรือมีสภาพขั้วต่ำ สามารถละลายน้ำมันกาแฟได้ดีกว่า พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของน้ำมันและโมเลกุลของตัวทำละลายเป็นพันธะไฮโดรเจน และตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลแบบโซ่ตรง เช่น เฮกเซน สามารถใช้สกัดน้ำมันกาแฟได้ดีกว่าตัวทำละลายชนิดอื่นๆ และประเด็นที่ 2 คือ ความสามารถในการแพร่ของน้ำมันสู่ตัวทำละลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสองภูมิภาค โดยอนุภาคจะแพร่จากจุดที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายต่อกากกาแฟจะช่วยให้การละลายน้ำมันจากกากกาแฟมีปริมาณเพิ่มขึ้น และ ระดับพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัด เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มความดัน การเพิ่มความรุนแรงในการกวนผสม ปัจจัยดังกล่าวจะช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ในระบบและเพิ่มความสามารถในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟสู่ตัวทำละลายทั้งสิ้น สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันไว้ในรูปที่ 1.21 สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการทดสอบตัวแปรในการสกัด ประเมินและตัดบางตัวแปรที่มีความสำคัญหรือมีความคุ้มค่าน้อย ตลอดจนออกแบบและสร้างเครื่องสกัดต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริง รวมถึงวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิต เพื่อสามารถนำไปใช้งานในระดับชุมชน หรือเป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบสกัดในอุตสาหกรรมกาแฟขนาดใหญ่หรืออุตสาหกรรมที่มีลักษณะวัตถุดิบคล้ายคลึงกันต่อไป



รูปที่ 1.21 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลได้ของน้ำมันสกัด

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟเหลือทิ้งด้วยวิธีสกัดแบบของแข็ง-ของเหลวแบบกะ
- 1.3.2 เพื่อสร้างเครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟเหลือทิ้ง

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้จากการสกัดน้ำมันกาแฟ เช่น ประเภทของตัวทำละลาย อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง และ เวลาสกัดน้ำมัน
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างระบบสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายที่สามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้ครั้งละ 150 มิลลิลิตร
- 1.4.3 ระบบสกัดน้ำมันจากกากกาแฟสามารถกลั่นเพื่อแยกตัวทำละลายกลับคืนได้
- 1.4.4 ศึกษาผลได้ผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถทราบค่าพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์รวมทั้งหมด ต่อวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์
- 1.5.2 สามารถนำข้อมูลจากงานวิจัยเรื่องสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันและหลักการออกแบบเครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟปรับใช้กับกากกาแฟที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปกาแฟของโรงงานขนาดใหญ่ ซึ่งมีกากกาแฟในปริมาณมากได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การสกัดน้ำมัน

การสกัด (extraction) คือ การแยกสารที่ต้องการออกจากของผสม สำหรับการสกัดน้ำมันพืชและไขมันสัตว์โดยเฉพาะแล้ว จะมีกระบวนการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ดังนี้

2.1.1 การเจียว

การเจียว (rendering) เป็นการให้ความร้อนกับวัตถุดิบจนทำให้โปรตีนในผนังเซลล์ไขมันแข็งเสียรูปจนไม่สามารถกักเก็บน้ำมันไว้ได้ การเจียวมี 3 วิธีคือ การเจียวแห้ง (dry rendering) โดยการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวที่ความดันบรรยากาศ การเจียวเปียก (wet rendering) โดยใช้ทั้งความร้อนและน้ำ เช่น การสกัดน้ำมันออกจากผลปาล์ม และการเจียวย่อย (digestive rendering) คล้ายการเจียวเปียก แต่มีการใช้สารเคมีหรือเอนไซม์ประกอบด้วย [43] [44]

2.1.2 การหีบหรือการอัด

การหีบ (pressing) หรือการอัด (expelling) โดยเครื่องบีบอัดทางกลใช้กับวัตถุดิบที่มีค่าความชื้นต่ำกว่า 10 wt.% และจะต้องมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในเนื้อมากกว่า 25 wt.% หลังจากบีบอัดต้องทิ้งน้ำมันให้สิ่งสกปรกตกตะกอนแล้วแยกน้ำมันออก เช่น การหีบน้ำมันปาล์มจากผลปาล์ม ผลมะกอก และ มะพร้าว [43] [44]

2.1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) คือ กระบวนการแยก (separation) โดยใช้ของเหลวอีกชนิดหนึ่งเป็นตัวทำละลาย ละลายสารที่ต้องการแยกโดยให้ละลายออกมาในตัวทำละลาย วิธีนี้จะใช้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 25% เช่น ถั่วเหลือง เมล็ดฝ้าย เมล็ดงุ่น เป็นต้น โดยตัวทำละลายที่ใช้จะต้องสามารถทำละลายน้ำมันในเนื้อวัตถุดิบได้ ปัจจุบันนิยมใช้เฮกเซนและโทลูอีน [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 โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย liquid-liquid extraction หรือ partitioning ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมยาและเทคโนโลยีชีวภาพ [38]

2.1.3.1.2 สารที่เป็นตัวถูกละลายสถานะของแข็งตัวทำละลายสถานะของเหลว

ในกรณีสารที่เป็นตัวถูกละลายอยู่สถานะของแข็งและตัวทำละลายอยู่ในสถานะของเหลว (solid-liquid extraction) เช่น การสกัดเกลือจากก้อนหินโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย การสกัดสารกาแฟจากผงกาแฟคั่วบดในการผลิต soluble coffee การสกัดน้ำมันที่สามารถรับประทานได้จากเมล็ดพืชด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ การสกัดสารโปรตีนจากถั่วเหลือง ในกระบวนการผลิต isolated soybean protein เป็นต้น ซึ่งวิธีสกัดแบบ solid-liquid extraction อาจรู้จักกันในชื่อ leaching หรือ elution กลไกที่มีผลต่อการสกัดขึ้นกับความสามารถในการแทรกซึมของตัวทำละลายเข้าไปในของแข็งที่ต้องการสกัด ความสามารถละลายได้ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสกัด การแพร่ของสารที่ต้องการละลายจากเนื้อของแข็งออกสู่ผิวตัวทำละลายภายนอกโดยขึ้นกับความแตกต่างของความหนาแน่นรวม และการกวนผสม

2.1.3.2 กลไกที่มีอิทธิพลต่อการละลาย

ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยโมเลกุลของสารละลายสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลดึงโมเลกุลตัวถูกละลายออกมากลายเป็นสารประกอบใหม่ที่ยึดกันด้วยแรงดึงดูดหลวมๆซึ่งอาจเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วในตัวทำละลายมีสภาพขั้วหรือเกิดจากแรงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจน แต่มีค่าน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในโมเลกุลมาก อีกประการคือ อัตราการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อย โดยอัตราการแพร่จะเกิดมากขึ้นเมื่อมีการกวนผสม

2.1.3.2.1 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

กรณีการเกิดพันธะโคเวเลนต์ (เกิดจากอะตอมจำนวน 2 อะตอมใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน) หากอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเคลื่อนที่อยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 อะตอม นั้นแสดงถึงแรงดึงดูดจากอะตอมทั้ง 2 มีค่าเท่ากัน และแรงดึงอิเล็กตรอนของธาตุนี้เรียกว่า อิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนประจุในนิวเคลียส และระยะระหว่างเวเลนซ์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียส ธาตุที่มีจำนวนประจุในนิวเคลียสมาก แต่มีระยะระหว่างเวเลนซ์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสห่างกันน้อย จะมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงกว่าธาตุที่มีจำนวนประจุในนิวเคลียสน้อย แต่มีระยะระหว่างเวเลนซ์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสห่างกันมาก และถ้าพันธะโคเวเลนต์เกิดจากอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีเท่ากัน ระยะห่างจากแต่ละอะตอมถึงอิเล็กตรอนคู่ร่วม

พันธะเท่ากัน โมเลกุลมีความสมมาตร เรียกพันธะโคเวเลนต์ลักษณะนี้ว่า พันธะโคเวเลนต์ไม่มีขั้ว และหากพันธะโคเวเลนต์เกิดจากอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกัน อะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีมากกว่า จะดึงอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเข้ามาใกล้ตัวมันเอง อะตอมนี้จะแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นลบ และอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีน้อยกว่าจะถูกดึงอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะไป อะตอมนี้จะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวก เราเรียกพันธะโคเวเลนต์ชนิดนี้ว่า พันธะโคเวเลนต์มีขั้ว สร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโคเวเลนต์ในโมเลกุลที่ใกล้เคียงกัน

สารทุกชนิดมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ สถานะของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ และประเภทของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโคเวเลนต์ แบ่งได้ดังนี้ คือ แรงลอนดอน (London force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงอ่อนๆ เกิดขึ้นในสารทั่วไป และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุลของสาร แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole force) คือ แรงดึงดูดทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแรงกระทำระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบของโมเลกุลที่มี พันธะโคเวเลนต์มีขั้ว และท้ายสุด พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond, H-bond) คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากไฮโดรเจนอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์ กับอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงๆและมีขนาดเล็ก ได้แก่ fluorine (F), oxygen (O) และ nitrogen (N) แล้วเกิดพันธะโคเวเลนต์มีขั้วชนิดมีสภาพขั้วแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นนี้อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะจะถูกดึงเข้ามาใกล้อะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง มากกว่าทางด้านอะตอมของไฮโดรเจนมาก และอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ยังมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว จึงเกิดดึงดูดกันระหว่างอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวกับอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมีอำนาจไฟฟ้าบวกสูงของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน ทั้งนี้โมเลกุลกลุ่มสารโคเวเลนต์ที่มีขั้ว จะสามารถยึดเหนี่ยวกันได้ดีด้วยแรงลอนดอนกับแรงดึงดูดระหว่างขั้ว และเรียกแรง 2 แรงรวมกันว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ ส่วนโมเลกุลไม่มีสภาพขั้วดังเช่นน้ำมันก๊าดและเฮกเซนในการทดสอบจะสร้างแรงยึดเหนี่ยวจากพันธะไฮโดรเจนได้ดีกว่า

2.1.3.2.2 การแพร่

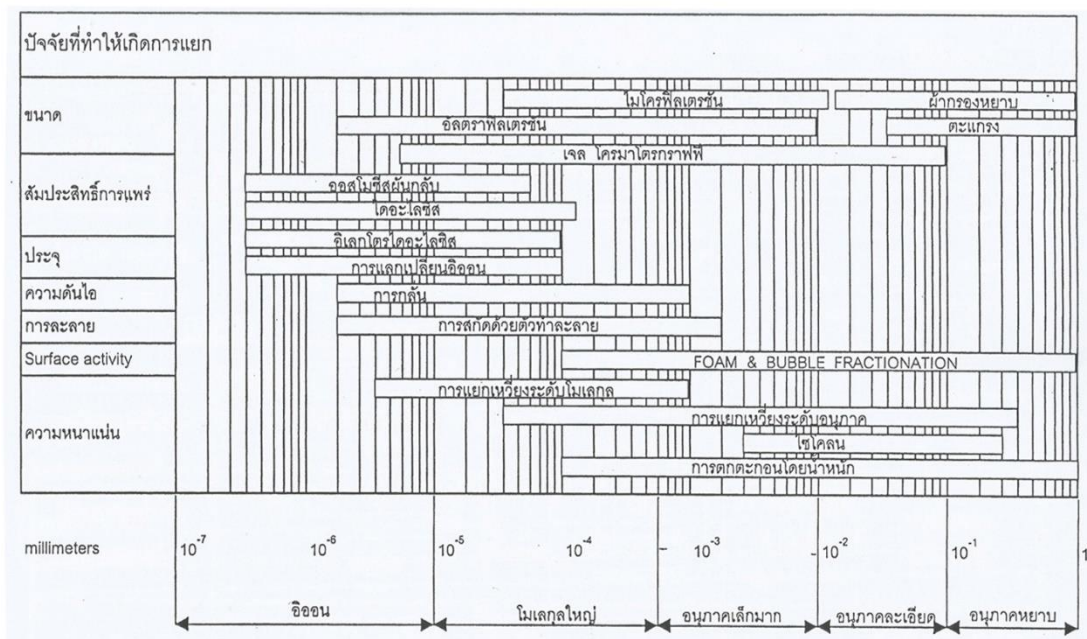
การแพร่ (diffusion) คือการเคลื่อนที่ของอนุภาคสารจากบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นของสารต่ำ โดยอาศัยพลังงานจลน์ของสารเอง กล่าวคือสารตัวถูกละลายจะแพร่ไปยังพื้นที่ของสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า สำหรับกรณีการสกัดแบบ solid-liquid extraction การกวนผสมช่วยเพิ่มโอกาสให้ตัวทำละลายแทรกผ่านและสัมผัสกับตัวถูกละลายได้ดีขึ้น และสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด การเพิ่มความดัน หรือการกวนผสมช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ให้อนุภาคของกากกาแฟและอนุภาคของน้ำมันในกากกาแฟ และอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ความหนืดต่ำลง ทั้งหมดนี้ช่วยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการแพร่ดียิ่งขึ้น

2.2 การกรองกากกาแฟ

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

2.2.1 ความละเอียด

ความละเอียด (fineness) เป็นสมบัติหนึ่งที่ใช้สำหรับวัสดุที่มีลักษณะเป็นผง หรือก้อนขนาดเล็ก โดยความละเอียดถูกจำแนกและเปรียบเทียบขนาดตามลักษณะวิธีการทดสอบ ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทก็จะมีวิธีในการทดสอบ เปรียบเทียบ และวัดค่าความละเอียดแตกต่างกัน การกำหนดขนาดความละเอียดไม่สามารถกำหนดเป็นแบบเฉพาะเจาะจงได้ เนื่องจากอนุภาคของวัสดุโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอนุภาคหลายๆขนาด ส่วนมากนิยมใช้การร่อนด้วยตระแกรง (sieve analysis) เพื่อกำหนดขนาด เป็นช่วงของความละเอียด หรือ การกระจายความละเอียด (particle size distribution) ขนาดของอนุภาค ที่แบ่งตามการกระจายความละเอียด สามารถแบ่งออกเป็น 3 พวกใหญ่ ๆ คือ อนุภาคขนาดใหญ่กว่าขนาดคอลลอยด์ (non-colloidal size) คือ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 0.2 ไมโครเมตร อนุภาคขนาดคอลลอยด์ (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) เป็นการแยกขนาดของอนุภาค โดยให้วัสดุลอดผ่านรูเปิด (opening) ที่มีการควบคุมด้วยขนาดของตะแกรงลวด รูเปิดของตะแกรงที่เล็กที่สุดที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมีขนาดรูเปิดสม่ำเสมอประมาณ 37 ไมโครเมตร และด้วยเทคโนโลยี monolithic electrodepositon ในปัจจุบันสามารถทำตะแกรงโลหะที่มีรูเปิดเล็กเท่ากับ 2 ไมโครเมตร โดยขนาดความละเอียดของตะแกรงจะระบุด้วยความถี่ของตะแกรง (mesh size) การแยกด้วยตะแกรง นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย การทำงานไม่ซับซ้อน และราคาถูก [47]

2.2.3 ไมโครฟิลเตรชัน

กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration, MF) [46] เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ ในการแยกสารละลายที่มีตัวถูกละลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ อิมัลชัน หรือสารแขวนลอย โดยความดันที่ใช้ในการบ่อนสารละลายอยู่ในช่วง 1-5 ความดันบรรยากาศ เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน มีขนาดรูพรุนระหว่าง 0.1-10 ไมโครเมตร ตัวถูกละลายที่ใช้แยกด้วยวิธีนี้มีขนาดเทียบเท่ากับน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300,000 ขึ้นไป หนึ่งในวัสดุเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันที่ได้รับความนิยมคือ วัสดุเซรามิก เนื่องจากเซรามิกเป็นสารพันระแข็งแรง มีจุดเด่นที่สำคัญ คือ ทนอุณหภูมิสูง สามารถใช้งานกับสารละลายที่มีอุณหภูมิสูง ใช้ได้กับอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการฆ่าเชื้อด้วย

อุณหภูมิสูง ทนต่อตัวกลางที่เป็นสารเคมี ทนต่อสภาพ กรด-ด่าง สามารถใช้ตัวทำละลายทำความ สะอาดได้หลายชนิด ทนต่อการถูกทำลายด้วยจุลินทรีย์ มีความทนทางกลสูง และอายุการใช้งานนาน 3-5 ปี แต่ยังมีข้อจำกัดที่ราคาแพงเมื่อเทียบกับวัสดุโพลีเมอร์ประมาณ 10 เท่า และแข็งแต่เปราะไม่ ทนแรงกระแทก [46]

2.3 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) เป็นวิธีการทาง คณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองจากตัวแปรต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างรูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผล นั้น ตัวอย่างเช่น กำหนดตัวแปรอิสระ X_1 และ X_2 ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม Y สามารถสร้าง ความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.1) มักใช้ฟังก์ชันแบบโพลีโนเมียล (polynomial) ลำดับหนึ่ง (first-order) หรือลำดับสอง (second-order) แสดงผลการตอบสนองและมีลักษณะภาพ 3 มิติของ ผลตอบสนองโครงสร้างพื้นผิวดังรูปที่ 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 ε คือ ค่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการสังเกตค่า Y

2.3.1 วิธีการออกแบบการทดลอง

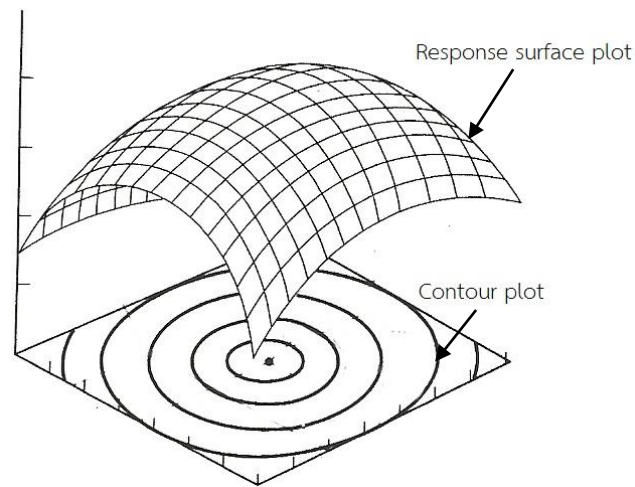
การออกแบบการทดลอง (design of experiment, DOE) ในหลายลักษณะ อาจ ต้องศึกษากระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic relationship) เช่น ในกรณีผลของ กระบวนการที่ประกอบด้วยหลายตัวแปร การเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง ผลตอบสนอง โดยรวมอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเส้นตรง แต่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง การออกแบบการทดสอบให้ ครอบคลุมทุกตัวแปรสามารถใช้เทคนิค full factorial design (FFD) ในการออกแบบ ซึ่งนิยามกำหนด แบบ $3^k factorial$ ซึ่งการศึกษาผลที่เกิดจากตัวแปรร่วม 3 ตัวแปร 4 ตัวแปร 5 ตัวแปร มีจำนวนการ ทดลองเท่ากับ 3^3 3^4 3^5 หรือ 27 การทดลอง 81 การทดลอง และ 243 การทดลอง เป็นต้น ซึ่ง โดยทั่วไปการทดลองจำนวนมากไม่เหมาะสมในงานอุตสาหกรรม หรืองานที่ต้องใช้เวลา ทรัพยากร และต้นทุน ในการทดลอง จึงมีการพัฒนาการออกแบบ central composite design (CCD) จาก พื้นฐานแบบ FFD ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

การทดลองแบบส่วนประสมกลาง 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 เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดย model ที่ได้จะยังคงมีทั้ง main effect, interaction และ quadratic terms โดยใช้ทรัพยากรไม่มากเกินไป โดยตัวอย่าง CCD ที่ศึกษาตัวแปร 3 ตัว ในการออกแบบ DOE จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ factorial points คือการนำ 2-level จาก FFD มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง ถัดมากำหนด axial points เป็นการปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่กำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นคงที่อยู่ที่ค่ากลาง (หรือค่า coded level เท่ากับ 0) และ center points เป็นการปรับค่าของตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง (หรือค่า coded level เท่ากับ 0) [48]

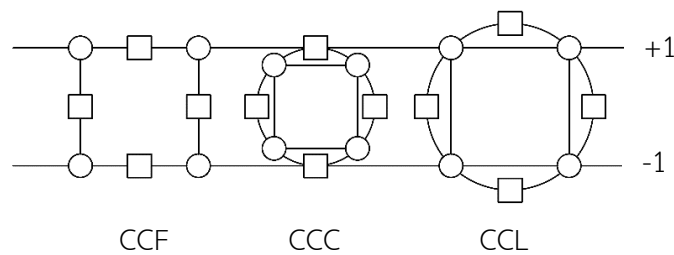
เมื่อพิจารณา factorial points และ axial points สามารถกำหนดรูปแบบการพิจารณาได้ดังนี้ (ตามรูปที่ 2.3) แบบที่ 1 คือ face centered เป็นการกำหนดให้จุดการทดลองบน axial points อยู่บนขอบที่เกิดจาก factorial points รอบ center points การพิจารณาในแต่ละตัวแปรจะเท่ากับ 3 ระดับ สามารถลดจำนวนการทดลองลงได้เนื่องจากมีจุดการทดลองที่ใช้ร่วมกัน แบบที่ 2 คือ inscribed เป็นการพิจารณาการทดลองห่างจากค่ากลางเท่ากันทั้งหมด ซึ่งต้องแน่ใจว่าการทดลองที่ให้ผลได้สูงสุดต้องอยู่ในช่วงแกน axial points ที่กำหนดนี้ การพิจารณาในแต่ละตัวแปรจะเท่ากับ 5 ระดับ และ แบบที่ 3 คือ circumscribed ลักษณะคล้ายแบบ inscribed ซึ่งต้องแน่ใจว่าการทดลองที่ให้ผลได้สูงสุดต้องอยู่ ระหว่าง factorial points -1 ถึง +1 ทุกตัวแปร การพิจารณาในแต่ละตัวแปรจะเท่ากับ 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 $(0,0)$ เมื่อพิจารณาแต่ละแกนการทดลองจะได้ 5 ระดับคือ $(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$ ตามลำดับ ทั้งนี้ alpha (α) คือ ค่าระยะจาก axial point ไปยัง center point สามารถหาที่เหมาะสมจากสมการที่ (2.2)

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

โดยที่ α คือ จุดบนแกน k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ



รูปที่ 2.2 ลักษณะกราฟพื้นผิวตอบสนอง
ที่มา ดัดแปลงจาก [49]

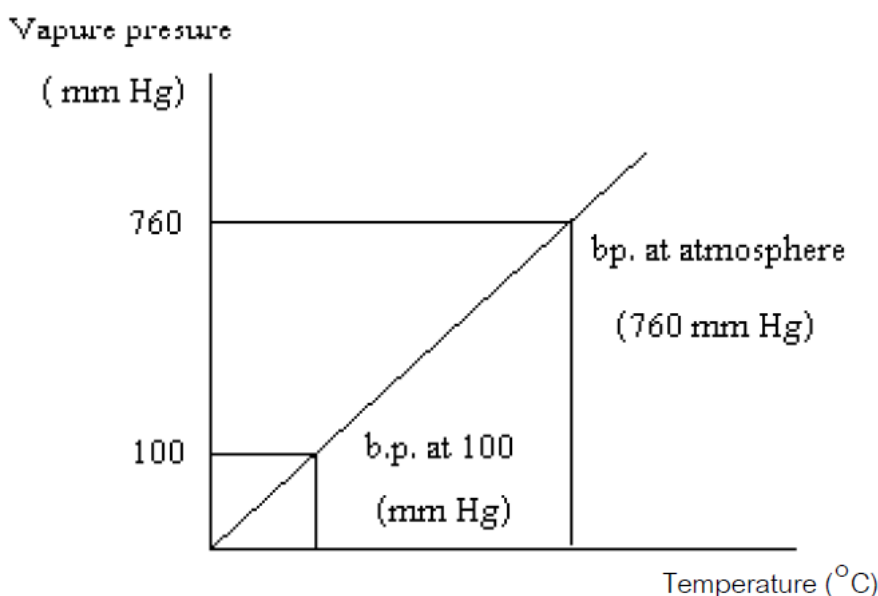


รูปที่ 2.3 การออกแบบการทดลอง central composite design
ที่มา ดัดแปลงจาก [50]

2.4 การกลั่น

การกลั่น เป็นวิธีการทำสารให้บริสุทธิ์ ซึ่งอาศัยความแตกต่างของความดันไอของสารในของผสม เมื่อของเหลวได้รับพลังงานความร้อนจะสั่นสะเทือนโมเลกุลและทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกระทั่งกลายเป็นไอ เมื่อความดันไอของเหลว เท่ากับความดันบรรยากาศเหนือของเหลว นั้นพอดี ของเหลวจะเดือด จุดเดือดของของเหลวใดๆ จึงเป็นอุณหภูมิที่ของเหลวและไออยู่ในสภาวะสมดุล โดยปกติการวัดจุดเดือดจะวัดเมื่อของเหลวมีความดันไอเท่ากับ 1 บรรยากาศ หรือ 760 ทอร์ (1 torr = 1 mm Hg) จุดเดือดนี้จะเรียกว่าจุดเดือดปกติ (ซึ่งถ้าทำการทดลองหาจุดเดือดของสารในที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศปกติ จุดเดือดของสารก็จะต่ำลงด้วย) รูปที่ 2.4 จากสถานะไอ

ของสารผสม เมื่ออุณหภูมิลดลง ของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะกลั่นแยกตัวออกมาก่อน ซึ่งโดยปกติแล้วของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะเดือดกลายเป็นไอก่อน แล้วแยกไอนั้นควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวไหลลงในภาชนะอีกใบหนึ่ง ซึ่งการแยกในลักษณะนี้จะได้สารที่มีความบริสุทธิ์สูงหากจุดเดือดของสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันมาก (แตกต่างกันเกิน 100°C) การเก็บของเหลวก็จะเก็บไว้ตามแต่ละจุดเดือดของของเหลวแต่ละตัวในของผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การกลั่นอย่างง่ายเพื่อดึงสารทำละลายออกจากของผสมระหว่างตัวทำละลายและน้ำมันกาแฟ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ [51]



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของสารกับความดันบรรยากาศ [51]

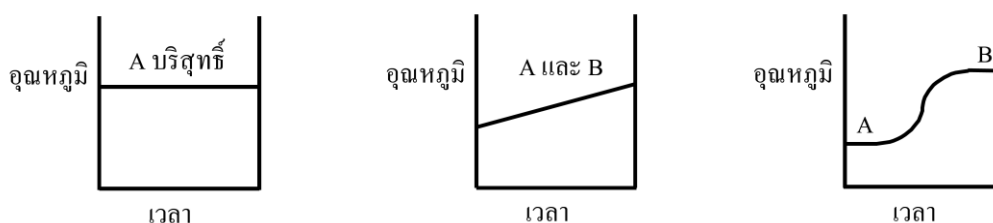
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือดของของเหลว

จุดเดือดของของเหลวบริสุทธิ์ใดๆ มีค่าคงที่เฉพาะตัวที่ความดันค่าหนึ่ง โดยปัจจัยที่ทำให้สารมีจุดเดือดปกติต่างกันคือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (intermolecular force) ซึ่งมีผลมาจากค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ของธาตุองค์ประกอบ น้ำหนักโมเลกุล (molecular mass, MM) ขนาดและรูปร่างของโมเลกุล (size and shape) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแบ่งตามลักษณะการเกิดแรงได้หลายชนิด ได้แก่ แรงลอนดอน (London force or dispersion force) แรงเหนี่ยวนำ (debye force or dipole-induce dipole force) แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole force) ทั้ง 3 ชนิดรวมเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) และสุดท้ายคือ แรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ซึ่งแรงแต่ละชนิดมีขนาดต่างกันและส่งผลโดยรวมให้จุดเดือดของสารต่างกัน เช่น สารมีขั้วมีจุดเดือดสูงกว่าสารไม่มีขั้วเพราะมีแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าสูง กลุ่มสารไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) จัดอยู่ในประเภทไม่มีขั้วมีแรงดึงดูดแบบแรงลอนดอนเพียงอย่างเดียวจะมี

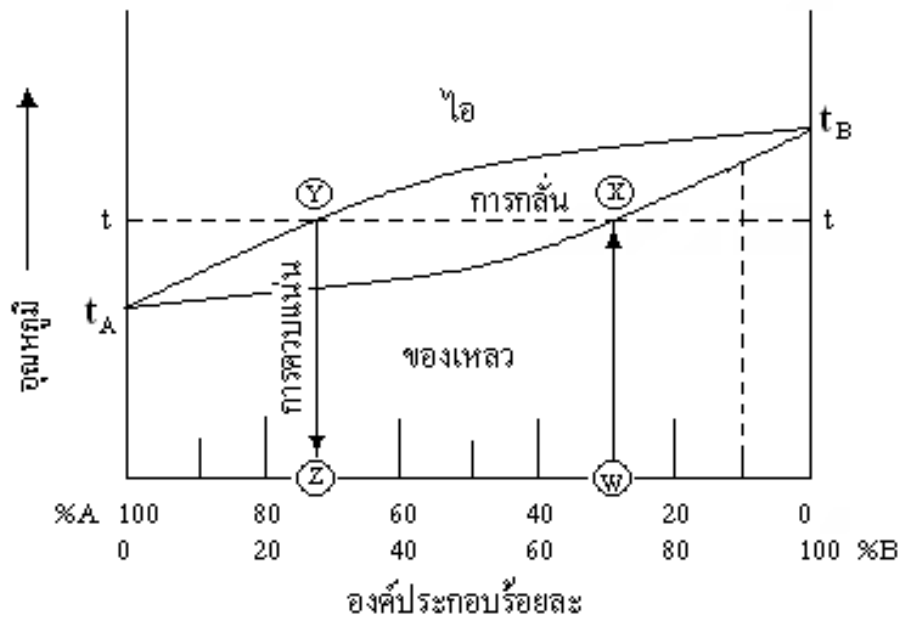
จุดเดือดต่ำโดยที่โมเลกุลขนาดเล็กกว่า (มีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่า) จะมีจุดเดือดที่ต่ำกว่า และกรณีกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid, HF) ที่อะตอมมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงกว่าน้ำ (H_2O) แต่กลับมีจุดเดือดที่ต่ำกว่า เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนเกิด 1 พันธะต่อโมเลกุล ในขณะที่น้ำเกิด 2 พันธะต่อโมเลกุลซึ่งโดยรวมทำให้เกิดแรงยึดที่สูงกว่า เป็นต้น

2.4.2 การกลั่นอย่างง่าย

การกลั่นอย่างง่าย [51] เป็นการกลั่นภายใต้ความดันปกติ (1 บรรยากาศ) โดยเมื่อกลั่นของเหลวบริสุทธิ์ ไอของของเหลวจะผ่านไปยังตัวควบแน่นกลายเป็นของเหลว อุณหภูมิระหว่างการกลั่นของเหลวบริสุทธิ์จะคงที่ตลอดเวลา (รูปที่ 2.5 ซ้าย) เมื่อกลั่นของเหลวผสมที่มีจุดเดือดต่างกันไม่มากนัก อุณหภูมิมีไม่คงที่ แต่เพิ่มขึ้นตลอดการกลั่นเนื่องจากองค์ประกอบของไอที่กลั่นสัดส่วนของสาร A และ B มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการกลั่น (รูปที่ 2.5 กลาง) เมื่อกลั่นของเหลวผสมสองชนิดที่มีจุดเดือดต่างกันมาก (รูปที่ 2.5 ขวา) อุณหภูมิจะคงที่ที่จุดเดือดของของเหลวทั้งสอง การแยกจะเกิดขึ้น เมื่อกลั่นของเหลวผสม องค์ประกอบของไอที่สมดุลกับสารละลายที่ร้อนจะแสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นแผนผังวัฏภาคแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไอของของเหลวของระบบสองส่วนประกอบย่อย (A + B) โดย t_A และ t_B คือจุดเดือดของสาร A และ สาร B ตามลำดับ

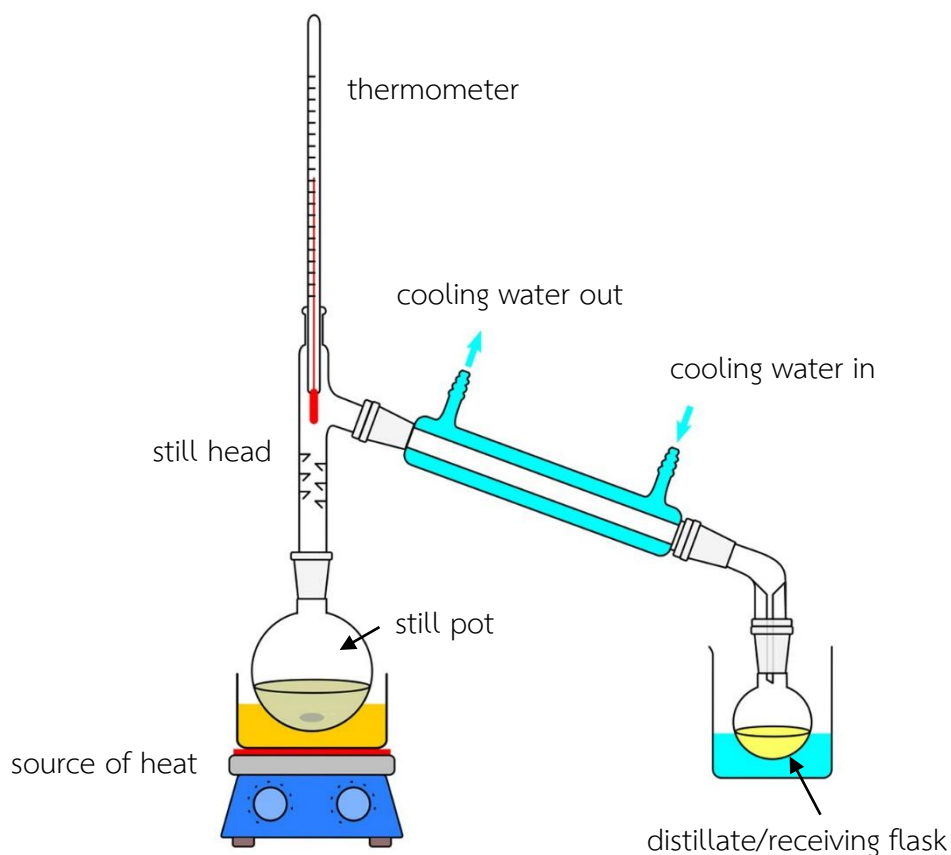


รูปที่ 2.5 พฤติกรรม 3 แบบของอุณหภูมิขณะกลั่นแบบธรรมดา [51]



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

จากรูปที่ 2.6 ของเหลวที่มีองค์ประกอบ W (30% A, 70 % B) ถูกให้ความร้อนจนเริ่มระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ t ที่จุด X และจะกลายเป็นไอทั้งหมดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อลดอุณหภูมิลง ไอจะเริ่มกลั่นตัวโดยสาร B ที่จุดเดือดสูงกว่า จะกลั่นตัวในอัตราที่มากกว่าจนกระทั่งถึงจุด Y ที่อุณหภูมิ t เดียวกัน สารประกอบจะมีองค์ประกอบ Z (70% A และ 30% B) ด้วยเหตุนี้ สารละลายบางประเภทจึงไม่สามารถแยกสารผสมได้อย่างสมบูรณ์โดยการกลั่นแบบธรรมดา แต่ต้องใช้การกลั่นแบบลำดับส่วนเพื่อแยกสารให้มีความบริสุทธิ์ตามต้องการ อย่างไรก็ตามการแยกของเหลวโดยวิธีกลั่นแบบธรรมดาให้ได้สารค่อนข้างบริสุทธิ์สามารถทำได้ 2 กรณี กรณีแรกเมื่อจุดเดือดของสาร A และ B แตกต่างกันอย่างมาก (ประมาณ 100°C) กรณีที่สองเมื่อสาร A มีสาร B ปนอยู่เล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 10) และได้แสดงเครื่องมือกลั่นอย่างง่ายไว้ในรูปที่ 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 ค่าก่อสร้างโรงงาน อีกประเภทคือ ต้นทุนแปรผัน (variable cost, VC) เป็นต้นทุนที่แปรผันตามปริมาณจำนวนการผลิต และไม่มีค่าใช้จ่ายหากไม่ผลิต เช่น ค่าแรงงาน ค่าไฟฟ้า ค่าสารเคมีสูญเสียในการผลิต เป็นต้น ทั้งสองประเภทรวมกันเรียกว่าต้นทุนรวม (total cost, TC) แสดงตามสมการที่ (2.3) สำหรับต้นทุนน้ำมันสกัดจากกากกาแฟต่อหน่วยการผลิต (quantity, Q) หลังจากการลงทุน พิจารณาจากต้นทุนแปรผันเฉลี่ย (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 โดยในส่วนแรกเป็นการทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันกาแฟในระดับห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสู่การออกแบบเครื่องสกัดน้ำมันและศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมัน

3.1.1.1 วัตถุดิบ

กากกาแฟสายพันธุ์อาระบิก้าหลังจากการชงด้วยวิธีเอสเพรสโซ

3.1.1.2 สารเคมีใช้ในกระบวนการสกัด

3.1.1.2.1 เฮกเซนเกรดเชิงทางการค้า (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 ไอโซโพรพานอล

3.1.1.3.3 ฟีนอล์ฟทาลิน

3.1.1.4 อุปกรณ์ในการสกัดน้ำมัน

3.1.1.4.1 ขวดรูปชมพู่

3.1.1.4.2 กรวยแก้ว

3.1.1.4.3 ปีกเกอร์

3.1.1.4.4 เตาให้ความร้อนแบบมีเครื่องกวนด้วยแม่เหล็ก

3.1.1.4.5 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ความละเอียด 11 μm 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

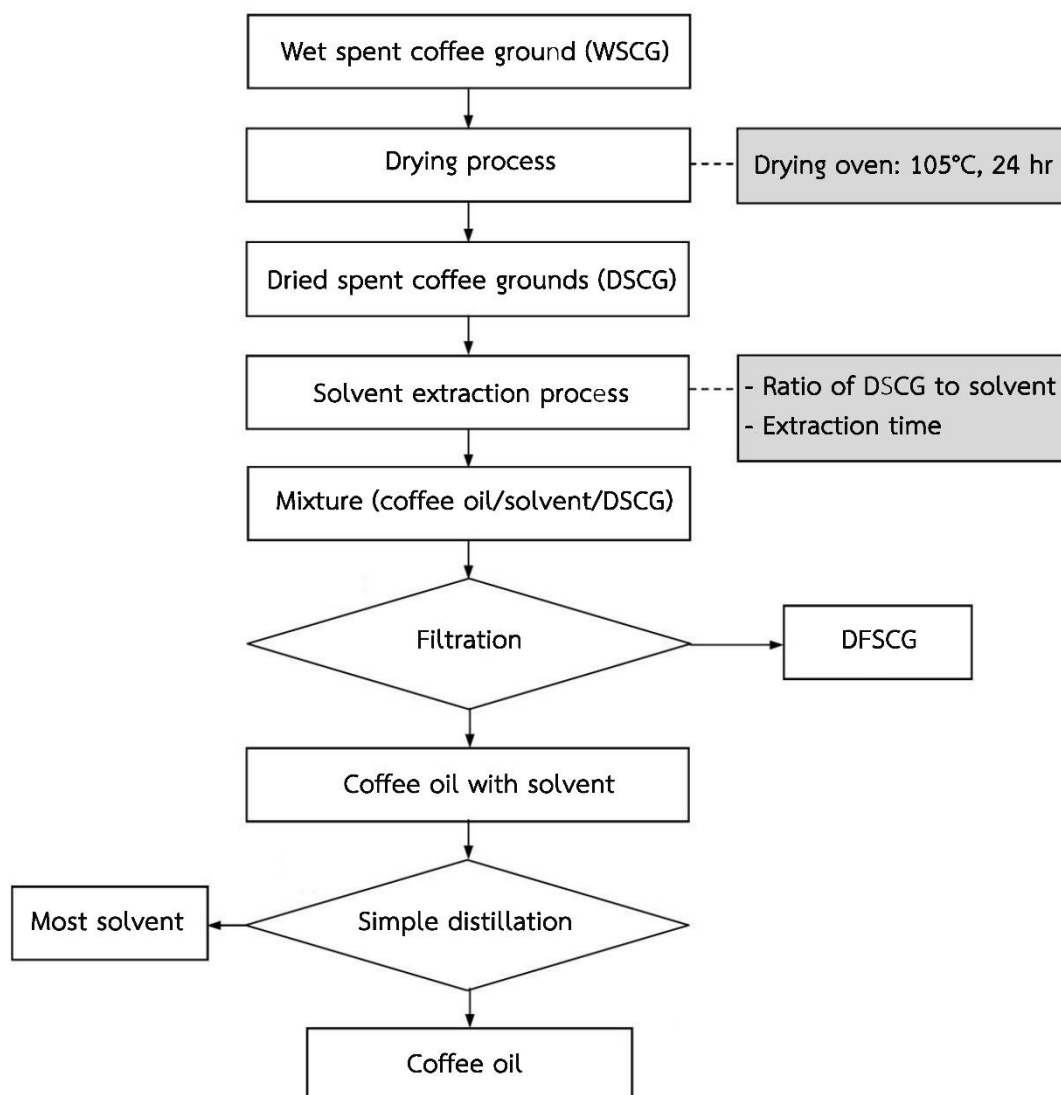
3.1.1.4.8 แผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบในกากกาแฟและน้ำมันกาแฟ

การหาค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) โดยใช้เทคนิค calorific method ในการตรวจสอบด้วยเครื่อง IKA ® Calorimeter System C5000 control, Germany การหาปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (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 โปรตีน ในอาหาร วิเคราะห์ โดยวิธี 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 ขั้นตอนแรกนำกากกาแฟเหลือทิ้งหลังการสกัดน้ำกาแฟออกไปใช้งานด้วยวิธีเอสเพรสโซ่จากในร้านจำหน่ายกาแฟสดมากำจัดความชื้นด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้กากกาแฟแห้งเพื่อเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสกัดด้วยตัวทำละลายเริ่มจากนำกากกาแฟแห้ง 10 กรัม และตัวทำละลายปริมาณตามสัดส่วนที่ออกแบบ (กรัม) ใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 600 มล. ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) แล้วปิดภาชนะด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันการระเหย จากนั้นกวนผสมกากกาแฟและตัวทำละลายภายในด้วยเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็ก (magnetic stirrer) โดยใช้เวลาและความเร็วรอบที่กำหนดภายใต้อุณหภูมิห้องเมื่อเสร็จสิ้นการกวนผสมแล้ว แยกกากกาแฟปราศจากน้ำมันออกจากของผสมด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เก็บลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. ของเหลวใสที่ผ่านกระดาษกรองคือตัวทำละลายปนน้ำมันกาแฟ (miscella) เข้าสู่กระบวนการสุดท้ายคือแยกตัวทำละลายออกจากน้ำมันด้วยการกลั่นอย่างง่าย ของเหลวส่วนที่เหลือในขวดรูปชมพู่ภายหลังการกลั่น คือน้ำมันกาแฟบริสุทธิ์ ซึ่งนำหนักน้ำมันกาแฟด้วยเครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่งและบันทึกค่า ทั้งนี้หากสนใจจากกระบวนการกลั่นคืนสามารถนำมาใช้เป็นตัวทำละลายซ้ำภายหลังได้อีกสำหรับการสกัดครั้งถัดไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ

3.3.1 การวางแผนการทดลอง

จากการตรวจสอบเอกสาร สามารถตั้งสมมติฐานถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสกัด ได้แก่ ประเภทตัวทำละลาย อัตราส่วนผสมระหว่างตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้งในการสกัด เวลาในการสกัด ความรุนแรงในการกวนผสม อุณหภูมิ และความดันในการสกัด โดยในการสกัดแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน มีผลทำให้ปริมาณผลได้น้ำมันที่แตกต่างกันซึ่งปัจจัยในกระบวนการสกัดสามารถนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้ในระดับชุมชนหรือระดับอุตสาหกรรมตามความเหมาะสมของต้นทุนและความต้องการของแต่ละระดับที่แตกต่างกัน

สำหรับการทดสอบปัจจัยอุณหภูมิ และความดัน ออกแบบการสกัดตามหัวข้อ 3.3 ขั้นตอนการทดลองแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเพิ่มอุปกรณ์อ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิในขั้นตอนการสกัด โดยควบคุมการสกัดที่อุณหภูมิ 40-60°C และสกัดในขวดรูปชมพู่ปิดสนิทด้วยจุกยาง เปรียบเทียบกับอุณหภูมิบรรยากาศ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ตัวทำละลายในกระบวนการสกัดระเหยกลายเป็นไอ เกิดแรงดันไออัดแน่นในชุดทดลอง เมื่อเปิดจุกยางเพื่อเตรียมเทของผสมผ่านกระดาษกรอง จะเกิดไอระเหยของเฮกเซนจำนวนมากพุ่งออกมาจากขวด เมื่อกรองเสร็จแล้วเสร็จจะเหลือ miscella และน้ำมันกาแฟหลังการอุ่นแยกในปริมาณน้อยกว่าการสกัดลักษณะเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหากพิจารณาการออกแบบเครื่องสกัดและวิธีการทำงานเพื่อป้องกันการสูญเสียจากการระเหย อาจมีความซับซ้อนใช้งานยากและมีราคาสูง ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิต้องใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายแก่ระบบสกัด อีกทั้งการออกแบบชุดสกัดที่สามารถทนอุณหภูมิและแรงดันสูงให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน จำเป็นต้องออกแบบให้ถึงความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ทุกชิ้นต้องกันรั่วซึมของก๊าซและทนต่อแรงดัน มีอุปกรณ์ระบายแรงดันหากเกิดแรงดันส่วนเกิน ซึ่งทำให้เครื่องสกัดมีราคาโดยรวมสูง อีกทั้งไอสารเคมีขณะใช้งานเครื่องเป็นก๊าซไวไฟและเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้ความปลอดภัยในการใช้งานลดลง ซึ่งเหตุผลข้างต้นทำให้ละปัจจัยอุณหภูมิและความดันในการพัฒนาเครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

3.3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด

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

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

โดยที่ Y คือ ปริมาณผลได้น้ำมันกาแฟ R คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง 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 มวลกากกาแฟแห้ง (g)

การออกแบบแผนการทดลองแบบ CCD กรณีมี 2 ตัวแปรอิสระ การออกแบบประกอบด้วย 5 ระดับปัจจัย คือ (-1.414, -1, 0, +1, +1.414) และจุดศูนย์กลางจะกระทำซ้ำ 4 การทดลอง โดยใช้โปรแกรม essential experimental design 2.216 and essential regression 2.220 จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง ทั้งนี้จากการทดสอบสกัดเบื้องต้นสามารถกำหนดค่าขอบเขตการทดสอบได้ โดยกำหนดให้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง ตั้งแต่ 5.1 ถึง 24.9 ($g \cdot g^{-1}$) และ ระยะเวลาในการสกัดตั้งแต่ 0.2 ถึง 39.8 นาที ซึ่งสามารถแสดงแผนการทดลองที่สถานะต่างๆตามช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

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

นอกจากนั้นกรณีใช้ตัวทำละลายต่างชนิดกันให้ความสามารถในการสกัดน้ำมันต่างกัน ดังนั้นสถานะที่เหมาะสมที่ขึ้นกับตัวแปรอิสระทั้ง 2 จึงอาจมีความแตกต่างกัน และสำหรับการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดเพื่อเปรียบเทียบตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ เฮกเซน (hexane) เอทานอลปราศจากน้ำ (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)

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

โดยที่ y คือ ผลตอบสนอง k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ $\beta_0, \beta_i, \beta_j$ และ β_{ij} คือ ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์พจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง ตัวแปรกำลังสอง และ ตัวแปรร่วม ตามลำดับ β_0

3.3.4 การสกัดซ้ำด้วยตัวทำละลายวนซ้ำ

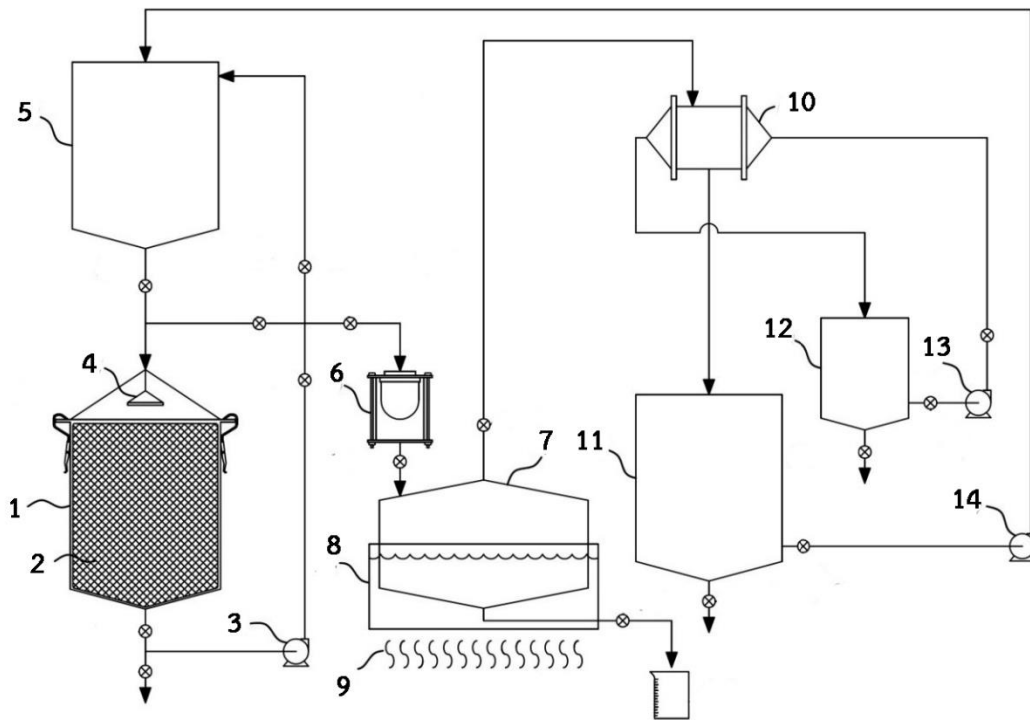
หากพิจารณาถึงพลังงานในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ การใช้พลังงานอุ่นแยกตัวทำละลายออกจากร้าน้ำมันต้องใช้พลังงานมากส่งผลต่อต้นทุนที่มากขึ้นเช่นกัน การใช้ตัวทำละลายปนน้ำมัน (miscella) ทำการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟชุดใหม่ซ้ำจนกระทั่ง miscella สกัดน้ำมันออกจากกากกาแฟจนอิ่มตัว แล้วทำการอุ่นแยกในครั้งเดียวจึงเป็นแนวทางที่จำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อช่วยลดต้นทุนในการสกัดโดยรวม จึงออกแบบการทดลองเริ่มจากเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดในห้องปฏิบัติการจากหัวข้อที่ 3.3.3 โดยขั้นตอนการทดลองเก็บ miscella ไว้ไม่ทำการอุ่นไล่ภายหลังสกัดน้ำมันกาแฟเสร็จแล้วของแต่ละรอบสกัด จากนั้นนำ miscella ที่ได้จากรอบก่อนหน้าทำการสกัดซ้ำโดยใช้กากกาแฟชุดใหม่ในรอบถัดไปโดยควบคุมปริมาณกากกาแฟต่อ miscella ให้ได้ตามสัดส่วนที่กำหนด แล้วแบ่ง miscella ในแต่ละรอบใส่ขวดรูปชมพู่ปริมาณ 100 กรัม จากนั้นอุ่นไล่เฮกเซนและหาปริมาณน้ำมันสะสมใน miscella ของแต่ละรอบการสกัดซ้ำด้วยตัวทำละลายในระดับห้องปฏิบัติการ

3.4 การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

ได้แสดงแผนภาพกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยระบบหมุนวนตามรูปที่ 3.2 โดยขั้นตอนในการสกัดน้ำมันกาแฟ เริ่มจากเตรียมกากกาแฟแห้งใส่ในถังตะแกรงกรอง (หมายเลข 2) ซึ่งอยู่ภายในถังหมุนวน (หมายเลข 1) โดยมีความละเอียด 25 ไมโครเมตร จึงทำให้กากส่วนใหญ่ยังอยู่ในตะแกรงดังกล่าว เปิดเครื่องสกัดน้ำมันโดยตัวทำละลายจะถูกปั๊มจากถังเก็บตัวทำละลายบริสุทธิ์ (หมายเลข 11) ไปในถังเก็บ miscella (หมายเลข 5) ตามอัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้งจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองระดับห้องปฏิบัติการด้วยปั๊มสารเคมี (หมายเลข 14) จากนั้นปล่อยตัวทำละลายบริสุทธิ์ลงไปผสมกับกากกาแฟในถังหมุนวน ปรับทิศทางวาล์วบังคับให้ตัวทำละลายไหลออกทางด้านล่างลงสู่ถังหมุนวนโดยปล่อยออกบริเวณส่วนบนถังด้วยหัวพ่นฝอย (หมายเลข 4) และเปิดปั๊มหมุนวน (หมายเลข 3) ทำการสกัดน้ำมันกาแฟตามเวลาที่กำหนด จากนั้นปิดปั๊ม ปรับทิศทางวาล์ว และใช้ปั๊มตัวเดิม (ปั๊มหมุนวน) สูบ miscella จากถังถังหมุนวนไปสู่ถังเก็บ

miscella (หมายเลข 5) เพื่อเตรียมใช้สกัดซ้ำในรอบต่อไป เปลี่ยนกากกาแฟชุดใหม่โดยเปิดฝาดังหมนวนและยกถังตะแกรง (หมายเลข 2) พร้อมกากชุดเก่าออก ใส่ตะแกรงและกากกาแฟชุดใหม่และเริ่มกระบวนการสกัดเช่นเดิมอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนกระทั่งมีน้ำมันกาแฟละลายอยู่ใน miscella มากพอและในรอบสุดท้ายปรับทิศทางวาล์วเพื่อสูบล miscella จากด้านล่างถึงหมนวนเข้าสู่ชุดกรองละเอียด (หมายเลข 6) ซึ่งมีความละเอียด 10 ไมโครเมตร และผ่านไปเก็บไว้ในถังอุ่นไล่ชั้นใน (หมายเลข 7) การอุ่นไล่ตัวทำละลายจะใช้ความร้อนจากเตาแก๊สหุงต้ม (หมายเลข 9) ผ่านมายังถังน้ำร้อนชั้นนอกของถังอุ่นไล่ (หมายเลข 8) ซึ่งบรรจุน้ำไว้จากนั้นน้ำร้อนถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ miscella ภายในถังอุ่นไล่ (หมายเลข 7) ในต่อไป เมื่อตัวทำละลายที่อยู่ใน miscella ได้รับความร้อนก็จะระเหยและควบแน่นในชุดกลั่นคืนตัวทำละลาย (หมายเลข 10) ตกลงสู่ถังเก็บตัวทำละลายบริสุทธิ์ (หมายเลข 11) และส่วนที่เหลือในถังอุ่นไล่คือน้ำมันกาแฟบริสุทธิ์ถ่ายออกด้วยวาล์วก้นถัง สำหรับระบบระบายความร้อน น้ำจะถูกสูบจากถังน้ำระบายความร้อน (หมายเลข 12) ด้วยปั้มน้ำ (หมายเลข 13) เข้าสู่ชุดกลั่นคืนตัวทำละลาย (หมายเลข 10) และไหลกลับมายังถังน้ำระบายความร้อน (หมายเลข 12) โดยกระบวนการทั้งหมดนี้สามารถใช้กับตัวทำละลายอื่นๆได้ เช่น เอทานอล และ เมทานอล เป็นต้น

เครื่องสกัดน้ำมันแบบหมนวนที่ได้จัดสร้างทำจากวัสดุสแตนเลส ขนาดฐานเครื่อง ความกว้าง ความยาว และ ความสูง เท่ากับ 1.2 เมตร 1.5 เมตร และ 1.65 เมตรตามลำดับ ประกอบด้วยระบบสกัดแบบหมนวน ระบบสกัดซ้ำ ระบบกรอง และระบบกลั่นคืนตัวทำละลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ขนาดถังสกัดมีขนาดความจุ 40 ลิตร ออกแบบให้สอดคล้องกับผลการศึกษาตามเงื่อนไขที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันในห้องปฏิบัติการ โดยเครื่องสกัดที่เป็นแบบหมนวนนี้ สามารถสกัดน้ำมันได้ 142 กรัม (153.51 มิลลิลิตร) จากกากกาแฟ 1,200 กรัม สามารถเพิ่มกากกาแฟแห้งได้มากกว่าปริมาณดังกล่าวแต่ต้องลดปริมาณตัวทำละลาย เนื่องจากระบบสกัดน้ำมันแบบหมนวนมีความจุ 40 ลิตร แต่การลดปริมาณตัวทำละลายอาจจะทำให้ปริมาณผลได้ของน้ำมันลดลงได้และได้เขียนแบบเครื่องสกัดน้ำมันแบบหมนวนในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.2 แผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน
 (1 คือ ถังสกัดหมุนวน 2 คือ ถังตะแกรงกรองสแตนเลสขนาดความละเอียด 25 ไมโครเมตร 3 คือ
 ปั๊มหมุนวน 4 คือ หัวพ่นฝอย 5 คือ ถังเก็บ miscella 6 คือ ชุดกรองละเอียดขนาดความละเอียด
 10 ไมโครเมตร 7 คือ ถังอุ่นไล่ชั้นใน 8 คือ ถังน้ำร้อนชั้นนอก 9 คือ แหล่งความร้อนอุ่นไล่ตัวทำ
 ละลาย 10 คือ ชุดกลั่นคืนตัวทำละลาย 11 คือ ถังเก็บตัวทำละลายบริสุทธิ์ 12 คือ ถังน้ำระบาย
 ความร้อน 13 คือ ปั๊มน้ำ และ 14 คือ ปั๊มสารเคมี)



รูปที่ 3.3 ภาพเครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแห้ง ปริมาณกาแฟ 1,200 กรัม
 (1 คือ ถังสกัดหมูนวน 2 คือ ป้อนหมูนวน 3 คือ ถังตะแกรงสเตนเลสขนาดความละเอียด 25 ไมโครเมตร 4 คือ ถังเก็บ miscella 5 คือ ชุดกรองละเอียดขนาดความละเอียด 10 ไมโครเมตร 6 คือ ถังอุ่นไล่ชั้นใน 7 คือ ถังน้ำร้อนชั้นนอก 8 คือ ชุดกลั่นคืนตัวทำละลาย 9 คือ ถังเก็บตัวทำละลายบริสุทธิ์ 10 คือ ตู้ควบคุม และ 11 คือ ป้อนสารเคมี)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

ผลการศึกษาปริมาณผลได้น้ำมันกาแฟที่สามารถสกัดได้เมื่อแปรค่าอัตราส่วนตัวทำละลาย ต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง และ เวลาในการสกัด เปรียบเทียบตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ เฮกเซน (hexane) เอทานอลปราศจากน้ำ (anhydrous ethanol) เอทานอล (hydrous ethanol) และ เมทานอล (methanol) ภายใต้การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการสกัดน้ำมันกาแฟทดลองด้วยเทคนิค RSM

ลำดับ	อัตราส่วนตัวทำละลาย ต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง (g.g ⁻¹)	เวลาในการสกัด (min)	ปริมาณผลได้น้ำมันกาแฟ (wt.%)			
			Hexane	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

จากผลการทดลองข้างต้น นำไปวิเคราะห์ ด้วยวิธี RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดและหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง (ปริมาณผลได้น้ำมันสูงสุด) ต่อตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง และ เวลาใน

การสกัด) หลังผ่านกระบวนการ RSM สามารถสร้างสมการทำนายความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ (4.1) และสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละพจน์ (β_0 ถึง β_5) และ p -value ของตัวทำละลาย 4 ชนิด ได้แสดงในตารางที่ 4.2 และ ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวน analysis of variance (ANOVA) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

$$Y = \beta_0 + \beta_1T + \beta_2R + \beta_3T^2 + \beta_4TR + \beta_5R^2 \quad (4.1)$$

โดยที่ Y คือ ปริมาณน้ำมันกาแฟที่สามารถสกัดได้ (wt.%) R คือ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง ($g.g^{-1}$) T คือ เวลาในการสกัด (นาที) และ β_0 ถึง β_5 คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมการทำนายความสัมพันธ์

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
β_0	8.130	0.000262	6.207	0.00307	-0.04543	0.972	0.853	0.707
β_1	0.06449	0.231	0.131	0.06835	0.327	0.00121	-0.000235	0.998
β_2	0.500	0.00452	0.423	0.02232	0.716	0.00173	0.538	0.05888
β_3	-0.000981	0.295	-0.00222	0.07796	-0.00245	0.05072	-0.00102	0.578
β_4	-0.000211	0.926	0.000778	0.778	-0.00993	0.00801	0.00170	0.713
β_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_{adjusted}	0.866		0.822		0.910		0.668	

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ ANOVA สำหรับสมการทำนายความสัมพัทธ์

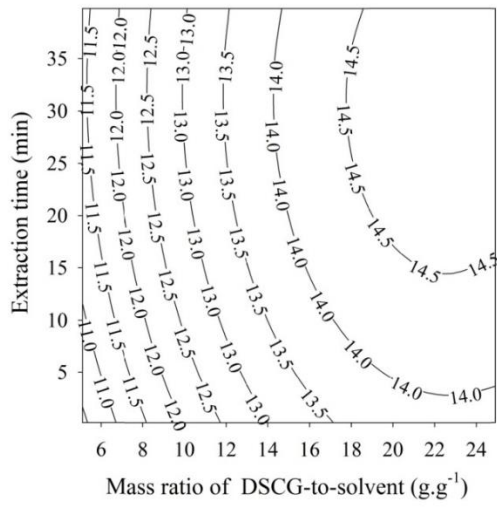
Source	SS	MS	F_0	F_{signif}	DOF
<i>For hexane</i>					
Regression	13.66	2.731	15.18	0.00237	5
Residual	1.079	0.180	-	-	6
LOF Error	1.077	0.359	559.8274	0.000128	3
Pure Error	0.00192	0.000642	-	-	3
Total	14.74	-	-	-	11
<i>For anhydrous ethanol</i>					
Regression	14.95	2.990	11.14	0.00538	5
Residual	1.610	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

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

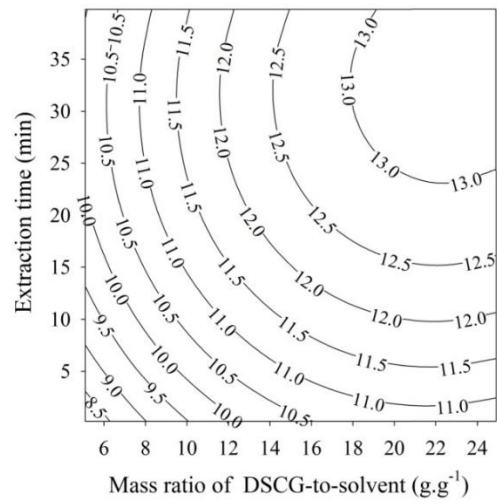
กรณีที่มีจำนวนตัวแปรต้นในการพิจารณาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหากพิจารณาทั้งค่า R^2 และ R^2_{adjusted} จากผลการทดลองด้วยตัวทำละลายทั้ง 4 ประเภทซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าสมการทำนายความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับพฤติกรรมการสกัดจริงในชุดทดลอง ส่วนค่า probability value (p -value) ในพจน์สัมประสิทธิ์ $\beta_0 - \beta_5$ แสดงถึงระดับนัยสำคัญในแต่ละพจน์ และกรณีที่กำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% พจน์ที่มีค่า p -value มากกว่า 0.05 จะถือว่าไม่มีนัยสำคัญต่อสมการโดยรวม ซึ่งหากพิจารณาจากตารางที่ 4.2 ทั้ง 4 สมการจาก 4 ประเภทตัวทำละลายสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง มีผลต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดมากที่สุด ในขณะที่ตัวแปรเวลาที่มีผลต่อการสกัดน้อยกระทั่งอาจกล่าวได้ว่าพจน์ที่มีตัวแปรเวลามีนัยสำคัญต่อสมการที่ระดับความเชื่อมั่นต่ำกว่า 95% สามารถละเว้นการพิจารณาปัจจัยเวลาการสกัดได้ แต่เพื่อง่ายการเปรียบเทียบการสกัดด้วยตัวทำละลาย 4 ชนิด จึงไม่ได้ทำการตัดพจน์ตัวแปรเวลาในการสกัด แต่ยืนยันความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันจากการคำนวณด้วยสมการทำนายความสัมพันธ์กับชุดการทดลองจริงที่เงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมสูงสุดในการสกัดซึ่งพบว่าปริมาณน้ำมันที่สกัดได้มีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 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 เวลาในการสกัดไว้ดังแสดงรูปที่ 4.1 ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายสามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้ปริมาณสูงที่สุดตามสภาวะที่เหมาะสมสำหรับตัวทำละลายแต่ละประเภทและน้ำมันที่ได้มีคุณภาพดี มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) สูง และมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ต่ำเหมาะกับการปรับปรุงคุณภาพเป็นไบโอดีเซลได้ ในขณะที่ตัวทำละลายอื่นๆจัดอยู่ในกลุ่มแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นตัวทำละลายประเภทโมเลกุลทั้งมีและไม่มีขั้ว สภาพขั้วอาจดึงโมเลกุลอื่นๆที่มีขั้วออกมาจากกาแฟด้วยเช่นกัน ทำให้สภาพกรดโดยรวมสูงขึ้นต่างจากเฮกเซนที่ไม่มีสภาพขั้วจึงสามารถดึงได้เพียงน้ำมันที่ไม่มีสภาพขั้วออกมาเพียงอย่างเดียว เฮกเซนจึงถูกเลือกใช้เป็นตัวทำละลายในเครื่องสกัดและใช้ข้อมูลสภาวะการสกัดที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องสกัด นอกจากนี้กราฟ contour ของปริมาณน้ำมันสูงสุดยังสามารถใช้ประโยชน์ในการทำนายปริมาณน้ำมันที่สกัดได้เบื้องต้นจากเครื่องสกัดที่เงื่อนไขต่างๆตามความต้องการของผู้ใช้งานเพื่อการควบคุมต้นทุนหรือเวลาในการสกัด

ตารางที่ 4.4 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดด้วยตัวทำละลายประเภทต่างๆ

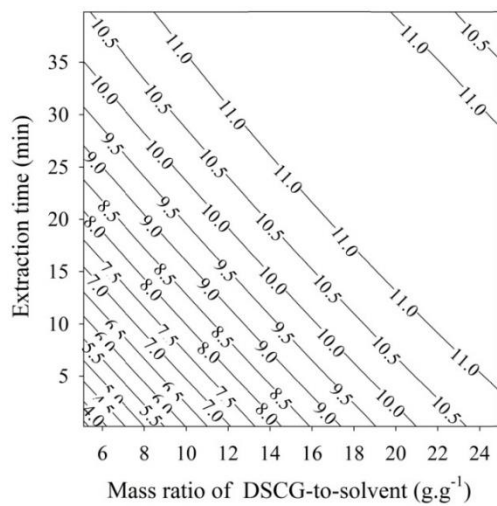
รายการ	ประเภทตัวทำละลาย			
	Hexane	Anhydrous ethanol	Hydrous ethanol	Methanol
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวล	22.5	22.8	20.3	23.8
กากกาแฟแห้ง (g.g ⁻¹)				
เวลาในการสกัด (min)	30.4	33.5	25.5	19.6
ปริมาณผลได้ของน้ำมัน (wt.%)				
จากสมการทำนายความสัมพันธ์	14.7517	13.2410	11.4224	7.2366
จากผลการทดลองจริง	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



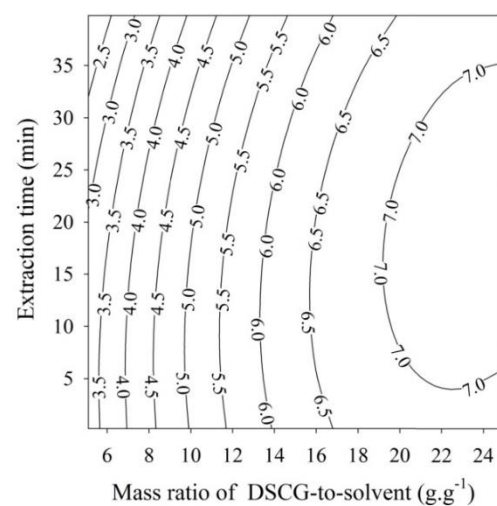
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

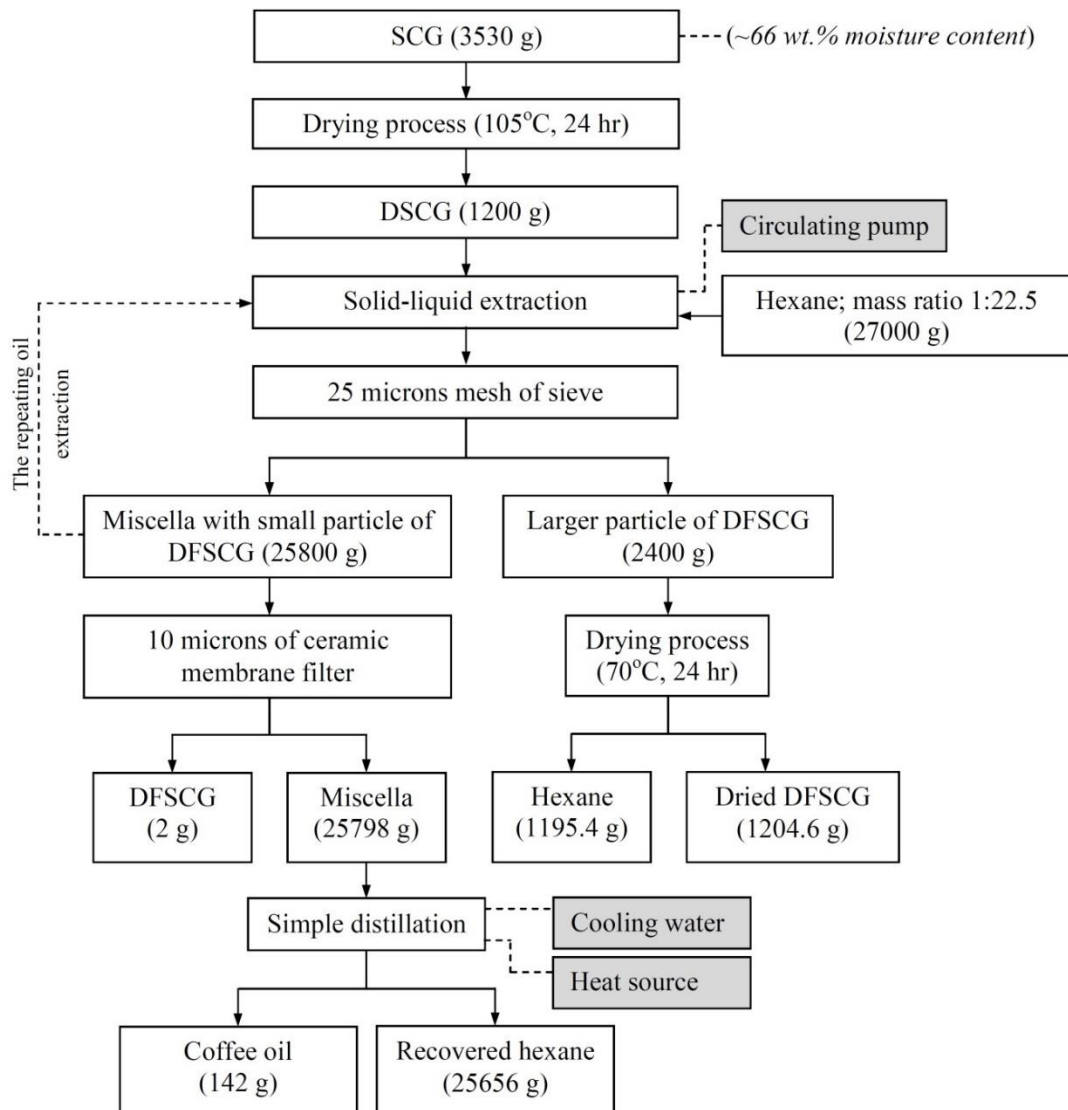
รูปที่ 4.1 กราฟ contour ของปริมาณผลได้น้ำมัน (wt.%) ที่อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง และ เวลาในการสกัดเมื่อใช้ตัวทำละลายประเภท (ก) hexane (ข) anhydrous ethanol (ค) hydrous ethanol และ (ง) methanol

4.2 ผลการทดสอบเครื่องสกัดน้ำมันกาแฟแบบหมุนวน

ในการเลือกตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด นอกจากสมรรถนะที่สามารถสกัดน้ำมันได้สูงสุดแล้ว (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง และ เวลาในการสกัด) ปัจจัยที่ต้องพิจารณา รวมคือ ความสามารถในการสกัดน้ำมันด้วย miscella วนซ้ำ ราคาตัวทำละลาย ความปลอดภัยในการใช้งาน ความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และอีกปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้น้ำมันกาแฟเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการปรุงคุณภาพเป็นไบโอดีเซลคือค่ากรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) ซึ่งหากมีค่ามากกว่า 1 wt.% แล้ว การเปลี่ยนองค์ประกอบไตรกลีเซอไรด์เป็นเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่ง จะทำให้เกิดปฏิกิริยา saponification ได้ของเสียกลายเป็นสบู่ ทำให้ปริมาณเอสเทอร์ที่ต้องการลดลง ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไปในน้ำมันกรดสูง จำเป็นต้องลดกรดไขมันอิสระลงก่อนด้วยกระบวนการเอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อลดกรดไขมันอิสระก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันซึ่งเป็นการเพิ่มกระบวนการและต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล

สำหรับกรณีน้ำมันสกัดจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดน้ำมันกาแฟแบบหมุนวน ตัวทำละลายเฮกเซนถูกเลือกใช้เนื่องจากสามารถสกัดน้ำมันได้สูงสุดเมื่อเทียบกับตัวทำละลายชนิดอื่นๆ ประกอบกับน้ำมันที่สกัดมีค่ากรดไขมันอิสระต่ำ รวมทั้ง เฮกเซน มีจุดเดือดต่ำกว่าตัวทำละลายประเภทอื่นๆ ทำให้การใช้พลังงานในการกลั่นคืนตัวทำละลายต่ำกว่า

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องสกัดน้ำมันโดยใช้กากกาแฟเริ่มต้นประมาณ 1,200 กรัม ผสมกับเฮกเซนในอัตราส่วน 1:22.5 หรือเท่ากับ 27,000 กรัม สามารถผลิตน้ำมันกาแฟเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ เท่ากับ 142 กรัม หรือคิดเป็น 11.83 wt.% เมื่อเทียบกับน้ำหนักกากกาแฟแห้งเริ่มต้น และสามารถกลั่นกลับคืนเฮกเซนได้ปริมาณ 25,656 กรัม โดยส่วนที่เหลือสูญเสียไปกับกากกาแฟหลังการสกัด และเมื่อนำกากเข้าอบเพื่อคำนวณน้ำหนักเฮกเซนที่อยู่ในกาก พบว่ามีค่าเท่ากับ 1,195.4 กรัม หรือคิดเป็น 4.97 wt.% เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเฮกเซนเริ่มต้นการสกัด และสำหรับการทำสมดุลมวล กระบวนการสกัดสามารถแสดงได้โดยรูปที่ 4.2 และได้แสดงภาพ กากกาแฟเหลือทิ้ง กากกาแฟอบแห้งก่อนการสกัด กากกาแฟไร้น้ำมันหลังการสกัด และผลิตภัณฑ์น้ำมันกาแฟจากเครื่องสกัดไว้ในรูปที่ 4.3 ทั้งนี้หากพิจารณาวัตถุดิบก่อนสกัด 1,200 กรัม ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันกาแฟ 142 กรัม กากกาแฟไร้น้ำมันทั้งที่ตกค้างในไส้กรองละเอียดและกากส่วนใหญ่ในตะแกรงกรองที่ผ่านการอบแล้วเท่ากับ 1,206.6 กรัม แสดงให้ทราบว่ายังคงมีเฮกเซนหลงเหลืออยู่ในกากกาแฟไร้น้ำมันอีกประมาณ 148.6 กรัม ที่ไม่สามารถแยกออกจากกากด้วยวิธีการอบด้วยอุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 สมดุลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน (SCG คือ spent coffee grounds, DSCG คือ dried spent coffee grounds และ DFSCG คือ defatted spent coffee grounds)



(ก)



(ข)



(ค)

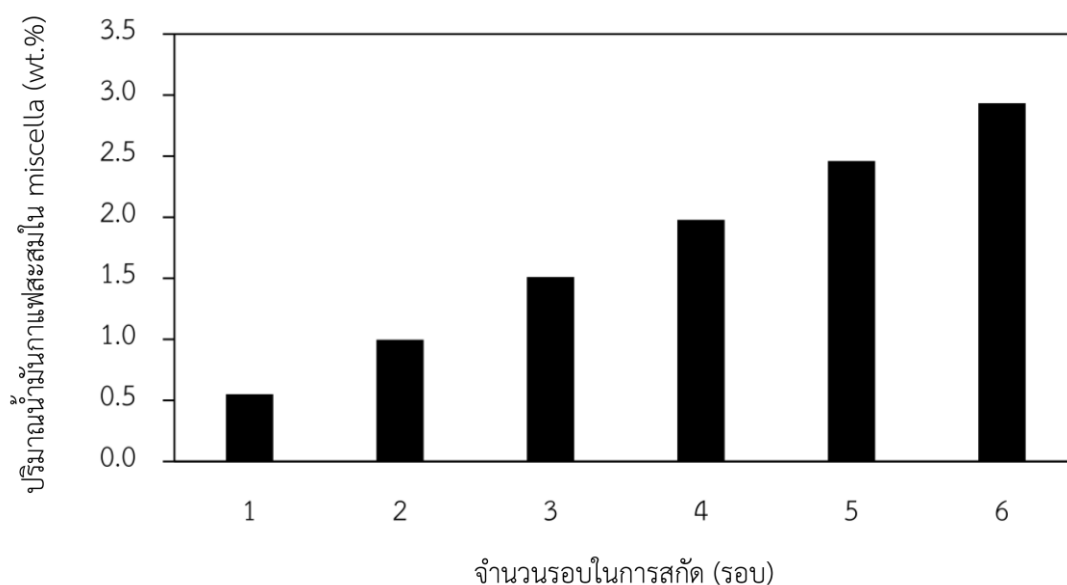


(ง)

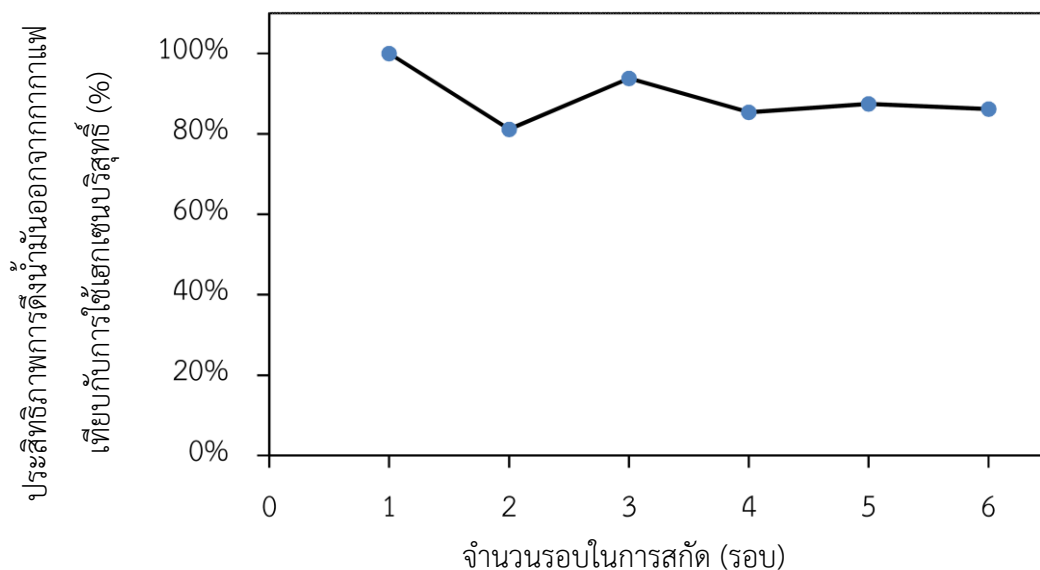
รูปที่ 4.3 กาแฟและน้ำมันกาแฟ (ก) กาแฟ SCG (ข) น้ำมันกาแฟ (ค) กาแฟแห้ง (DSCG)
(ง) กาแฟโร้มน้ำมัน (DFSCG)

4.3 ผลการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายวนซ้ำด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

ประสิทธิภาพในการสกัดของตัวทำละลายหรือประสิทธิภาพในการละลายน้ำมันจากกากกาแฟมาสู่ตัวทำละลาย แสดงได้ด้วยค่าความเข้มข้นของน้ำมันใน miscella วัดค่าจากน้ำหนักของน้ำมันสะสมต่อน้ำหนัก miscella ในแต่ละรอบการสกัด ผลการสกัดซ้ำแสดงในรูปที่ 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 และหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันออกจากกากกาแฟชุดใหม่ โดยเทียบจากปริมาณน้ำมันเฉพาะส่วนที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการสกัด ระหว่างการใช้ miscella ซ้ำของรอบสกัดก่อนหน้าเพื่อสกัดในรอบที่ 2 ถึง 5 กับการใช้เฮกเซนบริสุทธิ์ (กำหนดให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันด้วยเฮกเซนใหม่เท่ากับ 100%) พบว่าประสิทธิภาพการสกัดด้วย miscella วนซ้ำในทุกรอบยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 หากสังเกตลักษณะทางกายภาพของ miscella แต่ละรอบการสกัดจะมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากสีของน้ำมันกาแฟที่ละลายอยู่ใน miscella เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ miscella มีความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นกัน การกรองละเอียดในชุดกรองเซรามิกอาจต้องเวลาหรือความดันในการกรองมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อต้นทุนพลังงานในการผลิตเพิ่มขึ้น



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



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการดึงน้ำมันออกจากกากกาแฟชุดใหม่ โดยเทียบจากปริมาณน้ำมันเฉพาะส่วนที่เพิ่มขึ้นแต่ละรอบการสกัด ระหว่างการใช้ miscella เดิมในรอบการสกัดที่ 2 ถึง 5 กับการใช้เฮกเซนบริสุทธิ์ในรอบการสกัดที่ 1

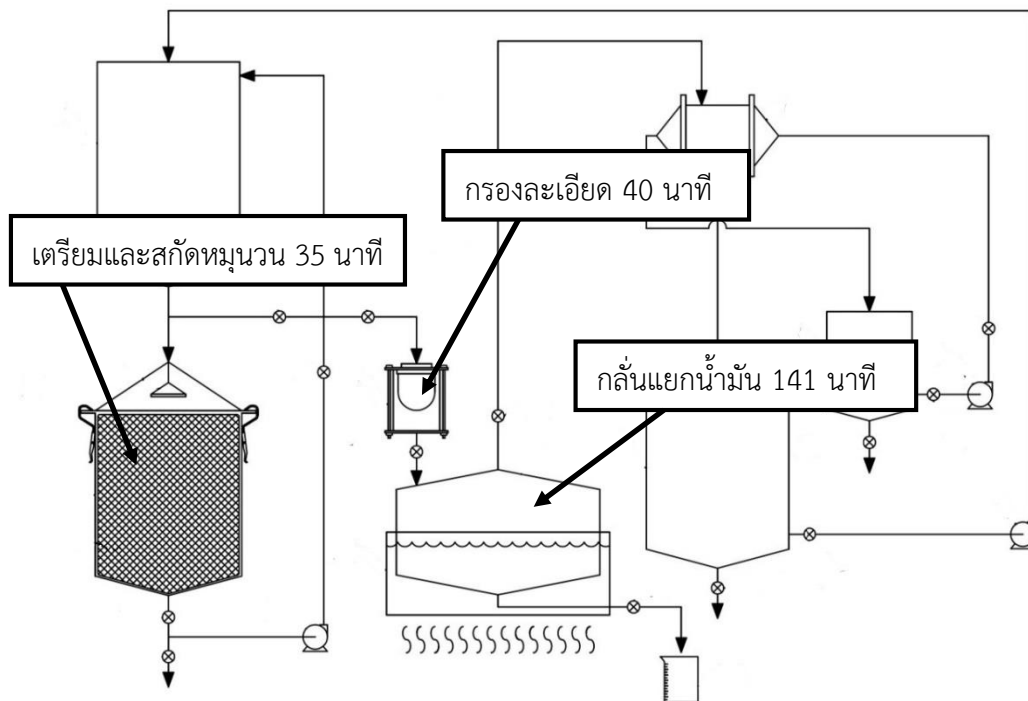


รูปที่ 4.6 ลักษณะสีของ miscella แต่ละรอบการสกัด

ระยะเวลาการสกัดน้ำมันเริ่มตั้งแต่เตรียมกากกาแฟแห้งและตัวทำละลายลงในถังสกัดจนกระทั่งได้น้ำมันกาแฟในขั้นตอนสุดท้ายต่อ 1 รอบการสกัดรวม 216 นาทีต่อการสกัดน้ำมัน 142 กรัม และหากใช้การสกัดวนซ้ำ 6 รอบ จะใช้เวลา รวม 391 นาที จะได้น้ำมันกาแฟ 852 กรัม ดังนั้นการสกัด 6 รอบ ด้วย miscella ของรอบก่อนหน้า แล้วทำการอุ่นไล่และกลั่นเฮกเซนกลับคืน จะสามารถลดเวลาลงได้ 70% รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และแผนผังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

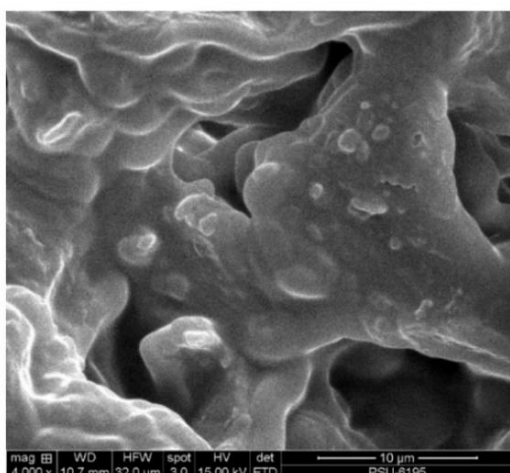
ขั้นตอนที่	กระบวนการ	ระยะเวลา (นาที)	
		1 รอบ	6 รอบ
1	เตรียม/เปลี่ยน วัสดุดิบและสกัดหมุนวน (นาที)	35	210
2	กรอง miscella ด้วยไส้กรองเซรามิก (นาที)	40	40
3	กลั่นแยกน้ำมันกาแฟ (นาที)	141	141
รวมระยะเวลา (นาที)		216	391



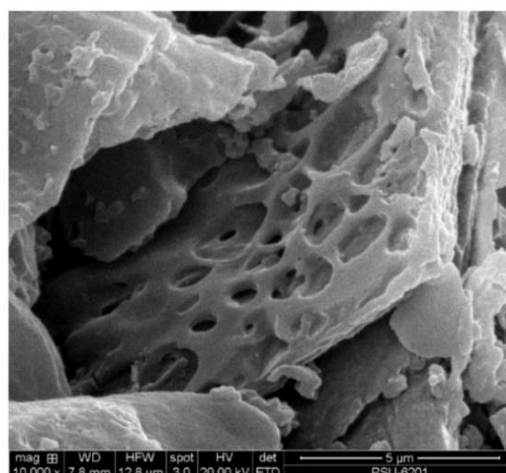
รูปที่ 4.7 ระยะเวลาแต่ละขั้นตอนในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

4.4 ผลทดสอบตัวอย่างกากกาแฟและน้ำมันน้ำมันสกัดจากกากกาแฟ

ได้นำตัวอย่างจากการทดลองวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดตามรูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวหลังสกัดจะมีลักษณะเป็นรูพรุนและมีความขรุขระของพื้นผิวอย่างเห็นได้ชัด แสดงถึงองค์ประกอบส่วนหนึ่งถูกชะออกจากผิวหน้าด้วยตัวทำละลาย คาดว่าองค์ประกอบดังกล่าว คือ น้ำมันซึ่งแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนและพื้นผิวของกากกาแฟโดยตัวทำละลายสามารถสกัดออกมาและละลายเป็นเนื้อเดียวกันปนอยู่ใน miscella และ น้ำมันกาแฟจะถูกแยกหลังจากการกลั่นแยกตัวทำละลายเสร็จสิ้น สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบโมเลกุลน้ำมันกาแฟ ชนิดกรดไขมัน และคุณสมบัติด้านการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (ก) DSCG และ (ข) DFSCG

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกายภาพของกากกาแฟ กากกาแฟปราศจากน้ำมัน และน้ำมันกาแฟที่สกัดด้วยเฮกเซน

Property	DSCG	DFSCG	Coffee oil
Water content (wt.%)	65	-	-
Mean particle size (μm)	237.2	216.2	-
HHV (MJ.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 (kg.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 คุณสมบัติวัสดุที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบผลการศึกษา

Property	DSCG	DFSCG	Standard [33]
Higher heating value (MJ.kg ⁻¹)	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 ในหนึ่งรอบการสกัดใช้กากกาแฟแห้งเริ่มต้นประมาณ 1,200 กรัม ผสมกับเฮกเซนในอัตราส่วน 1:22.5 หรือเท่ากับ 27,000 กรัม สามารถผลิตน้ำมันกาแฟเมื่อสิ้นสุดกระบวนการได้เท่ากับ 142 กรัม สำหรับการพิจารณาต้นทุนคงที่รวม (total fixed cost) ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ต้นทุนในการสร้างเครื่องสกัดน้ำมันประกอบด้วยค่าผลิตถึงสกัด ป้อนสารเคมี รวมถึงระบบท่อ และต้นทุนสารเคมีในระบบก่อนเริ่มต้นสกัด ได้แก่ เฮกเซน มีมูลค่ารวมทั้งสิ้น 54,158 บาท โดยมีรายการดังแสดงในตารางที่ 4.9 ในการใช้งานจริงทำการสกัดวนซ้ำกากกาแฟชุดใหม่กับ miscella เดิมอย่างน้อย 6 รอบ เพื่อประหยัดเวลาและต้นทุนในกระบวนการกรองละเอียดและการกลั่นแยกตัวทำละลาย ซึ่งต้นทุนแปรผันรวม (total variable cost) คิดรวมในรอบที่ 6 ได้ปริมาณน้ำมันกาแฟประมาณ 852 กรัม โดยมีต้นทุนแปรผันรวม 422.13 บาท ดังแสดงในตารางที่ 4.10 หรือการสกัดมีต้นทุนแปรผันเฉลี่ย (average variable cost) เท่ากับ 0.4954 บาทต่อน้ำมันกาแฟ 1 กรัม หรือ คิดเป็น 495.46 บาทต่อกิโลกรัม ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4.10 โดยข้อมูลประเภทและราคาตัวทำละลายที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 ทั้งนี้การคำนวณยังไม่นำค่าใช้จ่ายในการรวบรวมวัตถุดิบและค่าแรงงานในการผลิตโดยต้นทุนแปรผันเฉลี่ยต่อหน่วยการผลิตน้ำมันกาแฟส่วนใหญ่ เป็นค่าสารเคมีที่สูญเสียอยู่ในกากหลังการสกัด ลำดับถัดมาคือค่าใช้จ่ายในการกลั่นแยก น้ำมันกาแฟออกจากเฮกเซน

ตารางที่ 4.9 ต้นทุนคงที่การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวนขนาดกากกาแฟแห้ง 1,200 กรัม

รายการ	ราคา (บาท)
เครื่องสกัดน้ำมัน	
ถังสกัดและระบบท่อ	28,000
ถังกรองสแตนเลสความละเอียด 25 ไมโครเมตร	13,000
ปั๊มหมุนวน	4,240
ปั๊มสารเคมี	4,300
ปั๊มน้ำ	260
ไส้กรองละเอียด ขนาดความละเอียด 10 ไมโครเมตร	200
เตาแก๊สครัวเรือน	450
ถังแก๊สหุงต้มขนาด 15 กิโลกรัม	2,200
สารเคมี	
เฮกเซนหมุนวนในระบบ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อ	1,507
หนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง เท่ากับ 22.5 g.g^{-1}	
น้ำประปา	0.85
รวมทั้งสิ้น	54,158

ตารางที่ 4.10 ต้นทุนแปรผันของการผลิตน้ำมันกาแฟด้วยเครื่องสกัดแบบหมุนวน

ต้นทุนแปรผัน	จำนวนรอบในการสกัด	
	1 รอบ	6 รอบ
เฮกเซนสูญเสีย (บาท)	66.71	400.26
ค่าไฟฟ้า บีมหมุนวน (บาท)	0.07	0.42
แก๊สหุงต้มให้ความร้อน (บาท)	20.54	20.54
ค่าไฟฟ้า บีมกรอง (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 การสกัดด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แล้วกลั่นตัวทำละลายกลับคืนต่อรอบ และ 6 รอบ คือ ในการสกัดรอบที่ 1 ใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ และ ในรอบที่ 2-6 ใช้ miscella ของการสกัดรอบก่อนหน้า แล้วกลั่นตัวทำละลายกลับคืนในการสกัดรอบสุดท้าย

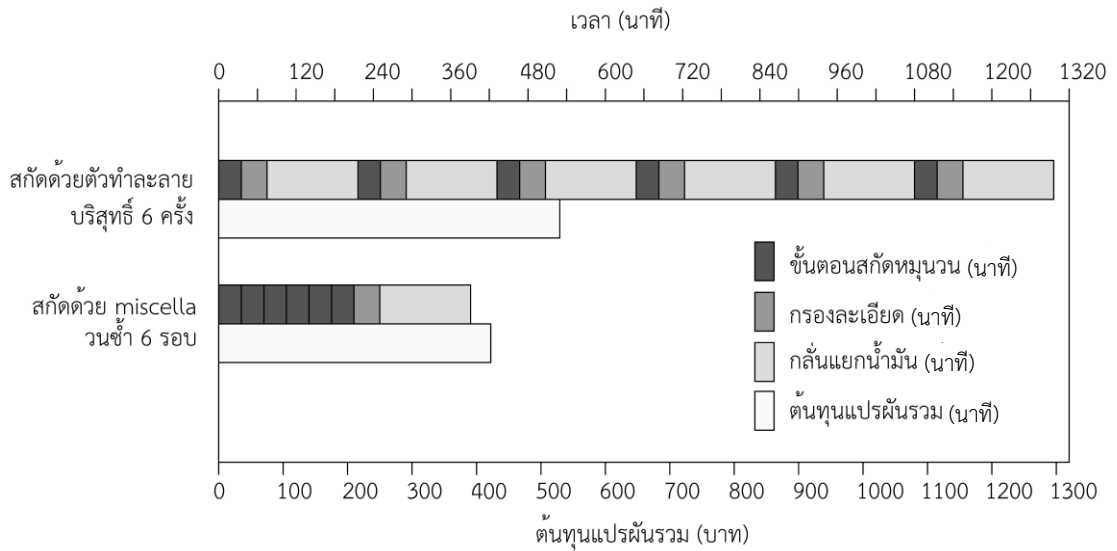
ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติและราคาของตัวทำละลาย

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 ⁻¹)	0.664	0.784	0.800	0.782
Boiling point (°C)	62.40	78.50	78.15	64.70
Price (USD.kg ⁻¹)	1.54 [52]	0.46 [53]	0.41 [53]	0.37 [52]
(Bath.kg ⁻¹)	55.80	16.67	14.86	13.40

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

การสกัดวนซ้ำกากกาแฟชุดใหม่กับ miscella เดิมนอกจากจะช่วยลดต้นทุนแล้ว ยังช่วยลดเวลาในการทำงานลงได้โดยได้เปรียบเทียบกับต้นทุนแปรผันและเวลา กรณีการสกัดกากกาแฟแบบปกติด้วยเฮกเซนบริสุทธิ์เพียงครั้งเดียวและกลั่นคืนแยกเฮกเซนทุกครั้งหลังสกัด กับกรณีใช้ miscella จาก การสกัดรอบก่อนหน้า สกัดซ้ำกับกากกาแฟชุดใหม่ โดยเปรียบเทียบที่ 6 รอบการสกัด การสกัดแบบ กลั่นคืนเฮกเซนทุกครั้งใช้เวลาารวม 1,296 นาที ในขณะที่การใช้ miscella สกัดซ้ำและกลั่นคืนเพียง

ครั้งเดียวใช้เวลา 391 นาที ซึ่งคิดเป็น 30% จากการสกัดแบบเดิม โดยรายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟเวลาและต้นทุนแปรผันในการสกัดกรณีใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์สกัดแล้วกลั่นคืน 6 ครั้ง และ การสกัดซ้ำด้วย miscella จากการสกัดรอบก่อนหน้า

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ผลการทดสอบชนิดของตัวทำละลายและสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยวิธี solid-liquid extraction รวมถึงการสร้างเครื่องสกัดน้ำมันและทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟในระดับห้องปฏิบัติการ สามารถหาได้ด้วยวิธี response surface methodology (RSM) จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี central composite design CCD มีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร คือ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง และ เวลาในการสกัด โดยมีผลได้น้ำมันสูงสุดเท่ากับ 14.68 wt.% 13.13 wt.% 11.80 wt.% และ 7.52 wt.% เมื่อสกัดที่เงื่อนไขตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง (R) และ เวลาในการสกัด (T) คือ 22.5 g.g⁻¹ เวลา 30.4 นาที (ด้วย hexane) 22.8 g.g⁻¹ เวลา 33.5 นาที (ด้วย anhydrous ethanol) 20.3 g.g⁻¹ เวลา 25.5 นาที (ด้วย hydrous ethanol) และ 23.8 g.g⁻¹ เวลา 19.6 นาที (ด้วย methanol) และพิจารณาเลือกใช้ข้อมูลกรณีเฮกเซนเป็นตัวทำละลายในการออกแบบและทดสอบเครื่องสกัด เนื่องจากเฮกเซนให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงสุดรวมทั้งน้ำมันที่ได้มีคาร์ดไขมันอิสระเท่ากับ 0.412 wt.% ต่ำกว่าน้ำมันจากการสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดอื่นๆ สามารถใช้เป็นน้ำมันตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันภายในขั้นตอนเดียวซึ่งช่วยลดต้นทุนสารเคมีในการผลิตไบโอดีเซล

เครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนถูกออกแบบตามสภาวะที่เหมาะสมจากการสกัดโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายในระดับห้องปฏิบัติการ เครื่องสกัดสามารถสกัดกากกาแฟแห้งได้ครั้งละ 1,200 กรัม ผลิตน้ำมันกาแฟได้ประมาณ 142 กรัม ต่อหนึ่งรอบการสกัด ที่อัตราส่วนเฮกเซนต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้งเท่ากับ 22.5 g.g⁻¹ เวลาในการสกัด 30.4 นาที ตัวเครื่องประกอบด้วยถังสกัดแบบหมุนวน ระบบใช้ miscella สกัดซ้ำ ระบบกรองกากกาแฟตกค้างใน miscella ความละเอียดต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร และระบบกลั่นคืนสารละลายในกระบวนการแยกน้ำมันออกจากตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามยังคงมีเฮกเซนสูญเสียตกค้างอยู่ในกากกาแฟไร้น้ำมันหลังการสกัดประมาณ 1,195.4 กรัม หรือคิดเป็น 4.43 wt.% เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเฮกเซนเริ่มต้นการสกัด

ต้นทุนในการผลิตเครื่องสกัดแบ่งเป็นต้นทุนคงที่ (เงินลงทุนค่าเครื่องและค่าสารเคมีเริ่มต้น) ประมาณ 54,158 บาท และมีต้นทุนแปรผันเฉลี่ยในการสกัดตามเงื่อนไขการสกัดน้ำมัน คือ

อัตราส่วนตัวทำละลายต่อหนึ่งหน่วยมวลกากกาแฟแห้ง 22.5 g.g^{-1} และ เวลาในการสกัด 30.4 นาที จากกากกาแฟแห้ง 1,200 กรัม โดยสกัดด้วย miscella วนซ้ำ 6 รอบ มีค่าเท่ากับ 495.46 บาทต่อ กิโลกรัม ทั้งนี้ต้นทุนส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียเฮกเซนไปกับกากหลังการสกัด เท่ากับ 400.26 บาท ต่อกิโลกรัม หรือคิดเป็น 95% เมื่อเทียบกับต้นทุนแปรผันในการสกัดทั้งหมด ซึ่งในการพัฒนาต่อยอด หากสามารถสร้างอุปกรณ์แยกเฮกเซนตกค้างในกากหลังการสกัดกระทั่งทำให้เฮกเซนสูญเสียเป็นศูนย์ หรือมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้สมมติให้ความร้อนที่นำมาระเหยเฮกเซนตกค้างในกากมาจากความร้อนเหลือทิ้งในขั้นตอนการอุ่นไล่ miscella หรือความร้อนเหลือทิ้งที่ไม่มีมูลค่าในโรงงาน กระทั่งมูลค่าเฮกเซน สูญเสียในต้นทุนแปรผันเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ จะสามารถลดต้นทุนแปรผันเฉลี่ยในการสกัดลงได้จากเดิม 422.13 บาทต่อน้ำมันกาแฟ 852 กรัม เป็น 21.87 บาทต่อน้ำมันกาแฟ 852 กรัม หรือลดลงจาก 495.84 บาท/กิโลกรัม เป็น 25.67 บาท/กิโลกรัม ซึ่งแนวทางการการปรับปรุงเครื่องสกัดเพื่อแยก เฮกเซนออกจากกากกาแฟหลังการสกัด อาจปรับปรุงได้หลายลักษณะ ตัวอย่างเช่น การออกแบบถัง สกัดให้สามารถหมุนเหวี่ยงได้ในลักษณะเดียวกับถังปั่นแห้งในเครื่องซักผ้า โดย miscella จะถูกเหวี่ยง ออกจากกากด้วยแรงหนีศูนย์กลางไหลไปรวมกับ miscella ส่วนใหญ่จากการสกัดเพื่อเข้าสู่ กระบวนการกรองละเอียดต่อไป แต่วิธีนี้อาจมีข้อจำกัดเพิ่มเติมในการเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อป้องกันการ รั่วซึมของของเหลวและไอระเหยบริเวณเพลาหมุนที่ต้องทนต่อการกัดกร่อนของเฮกเซนและไม่ ก่อให้เกิดความร้อนที่สูงจนเกินไป เนื่องจากเฮกเซนระเหยง่ายและไวไฟ อุณหภูมิสูงอาจก่อให้เกิดการ ลุกไหม้ได้อีกทั้งไอระเหยเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากหายใจเข้าไปสะสมเป็นระยะเวลานาน หรืออีก แนวทางเป็นการให้อุณหภูมิกับกากหลังการสกัดเพื่อให้เฮกเซนระเหยกลายเป็นไอน้ำจากนั้นลดอุณหภูมิ ใไอในชุดควบแน่นกระทั่งกลายเป็นเฮกเซนบริสุทธิ์กลับมาใช้อีกครั้ง สำหรับตัวนำความร้อนสู่กาก กาแฟอาจเลือกใช้เป็นลมร้อนหมุนวน โดยใส่กากหลังสกัดในถังปิด บริเวณด้านบนถึงมีวาล์วสปริงต่อไป ยังชุดควบแน่น และมีท่อสำหรับดูดอากาศเพื่อหมุนวนในถังโดยมีการให้ความร้อนกับท่อเพื่อให้ อากาศที่ไหลผ่านมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิระเหยของเฮกเซนจากนั้นปั๊มลมจะอัดอากาศร้อน ปลดปล่อยออกบริเวณด้านล่างถัง ลมร้อนจะแทรกตัวผ่านชั้นกากและระเหยเฮกเซนลอยขึ้นด้านบน เมื่อมี เฮกเซนระเหยเพิ่มมากขึ้น ความดันในถังจะสูงขึ้นกระทั่งขณะแรงดันวาล์วสปริงไปยังชุดควบแน่น กลายเป็นเฮกเซนบริสุทธิ์ต่อไป หรือใช้น้ำเป็นตัวนำความร้อนโดยนำน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจากถังอุ่นไล่ miscella ใส่รวมกับกากหลังการสกัดในถังปิดจากนั้นให้ความร้อนถังกระทั่งของเหลวภายในถังระเหย ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยไอน้ำและไอเฮกเซน และถูกลดอุณหภูมิในชุดควบแน่นกลายเป็นของเหลว แยกขึ้นอย่างชัดเจนระหว่างน้ำและเฮกเซนสามารถแยกน้ำออกได้โดยง่าย ในประเด็นการลดค่า เชื้อเพลิงในกระบวนการระเหยตัวทำละลายเฮกเซน หากปรับปรุงแหล่งเชื้อเพลิงจากแก๊สสูงต้มในการ ต้มน้ำร้อนเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีมูลค่าต่ำกว่าประกอบกับปรับปรุงถึงน้ำร้อนให้มีการสูญเสียความร้อน ขณะใช้งานต่ำลง เช่น การใช้ไม้ฟืนหรือน้ำร้อนเหลือทิ้งจากโรงงาน และการหุ้มฉนวนความร้อนหรือ

ออกแบบชุดถังน้ำร้อนและถังอุ่นไอน้ำให้เป็นถังเดียวมีการสูญเสียต่ำ อาจทำให้ต้นทุนค่าพลังงานความร้อนลดลงได้ประมาณ 50% จะสามารถต้นทุนแปรผันเฉลี่ยลดต่ำลงเหลือ 13.61 บาท/กิโลกรัม

อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบกรณีนำน้ำมันกาแฟมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล น้ำมันกาแฟยังมีต้นทุนการสกัดที่สูงกว่าน้ำมันตั้งต้นจากแหล่งอื่นๆ การนำมาใช้งานให้เกิดความคุ้มค่ายังต้องทำการวิจัยและพัฒนาลดต้นทุนในการสกัดให้ต่ำลง หรืออีกทางเลือกคือใช้น้ำมันกาแฟในการผลิตสารต่อต้านอนุมูลอิสระในอุตสาหกรรมยา อาหารเสริม ผลิตภัณฑ์เสริมความงาม ซึ่งมีมูลค่าสูงกว่าโดยมีงานวิจัยที่สนับสนุน เช่น Solange และคณะ [54] ศึกษาการสกัด antioxidant phenolic compounds จาก DSCG พบว่าของเหลวที่สกัดได้มี phenolic compounds ในปริมาณที่สูง (ประมาณ 16 mg gallic acid equivalents.g⁻¹ DSCG) และมีสาร antioxidant activity ปริมาณสูง (ferric reducing antioxidant power 0.10mM Fe(II).g⁻¹) และสรุปว่ามีความเหมาะสมในการใช้งานในอุตสาหกรรม อาหารสุขภาพและยา

5.2 ข้อเสนอแนะ

ต้นทุนการสกัดโดยส่วนใหญ่อยู่ที่ปริมาณเฮกเซนสูญเสียตกค้างอยู่ในกากกาแฟหลังการสกัด หากมีระบบระเหยเฮกเซนและกลั่นคืนออกจากกากมาใช้ซ้ำได้ จะสามารถลดต้นทุนส่วนใหญ่ลงได้

ในระบบกลั่นระเหยตัวทำละลายโดยใช้ความร้อนจากแก๊สหุงต้ม จำเป็นต้องให้ความร้อนเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง (30°C) จนถึงอุณหภูมิระเหยของเฮกเซนต้องใช้เวลาประมาณครึ่งหนึ่งของระยะเวลาในกระบวนการกลั่นคืนทั้งหมด หากมีการจัดการที่ดี เก็บ miscella ที่มีความเข้มข้นไว้ในปริมาณมากแล้วกลั่นอย่างต่อเนื่องจะช่วยให้ประหยัดเวลาและแก๊สหุงต้มลงได้ และหากเปลี่ยนแหล่งพลังงานจากแก๊สหุงต้มเป็นชีวมวลประเภทอื่นจะสามารถลดต้นทุนในส่วนนี้ลงได้อีกเช่นกัน

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. [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/กาแฟมีค%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

- [9] “ประวัติกาแฟ,” สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน), 2015. [Online]. Available: <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/coffee/history/index.php>.
- [10] ทองแก้ว เตือนจิต, “ประวัติของกาแฟในไทย,” สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2011. [Online]. Available: 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] ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, “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] ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, “ตลาดกาแฟพร้อมดื่มในประเทศไทย,” ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร: 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. [Accessed: 05-Sep-2015].
- [21] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, "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/. [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. [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. [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] ไชยเรืองศรีธรมินทร์, การสกัดของแข็ง-ของเหลว. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 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] เจริญกุลอภิญา, การแปรรูปอาหารเบื้องต้น, 1st ed. กรุงเทพฯ: สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2553.
- [44] นัฐวี ตีรณานนท์, “การศึกษานำเอาเมล็ดกาแฟจากอุตสาหกรรมการผลิตกาแฟกระป๋องมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล,” 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: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี 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] จรัล ทรัพย์เสวี, “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). พิษณุโลก: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2555.
- [52] Chemical Intelligence, “THE SOLVENTS REPORT,” Austin TX 78756 U.S.A., 2014.
- [53] Bank of Thailand Northern Region Office, “รายงานสถานการณ์ราคาเอทานอลของไทย ไตรมาส 2/2558,” 2015. [Online]. Available: 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.

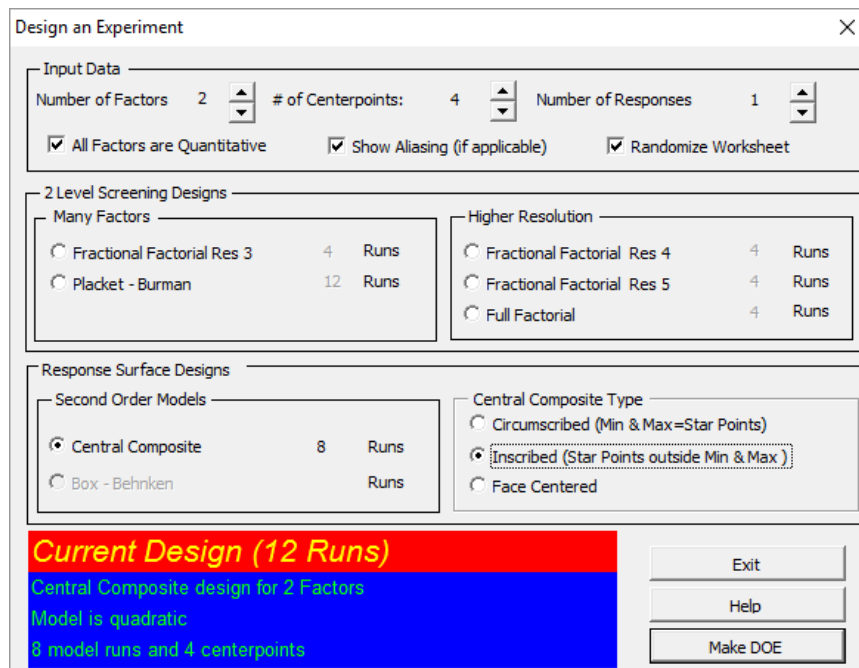
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
(ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลอง)

ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

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

กำหนดช่วงตัวแปรอิสระการกำหนดช่วงตัวแปรมีความสำคัญมากต่อสถานะที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบสนองที่ทำการศึกษา โดยไม่ควรมีช่วงกว้างจนไม่สามารถระบุจุดที่ให้สถานะที่เหมาะสมได้ชัดเจน และต้องสันนิษฐานได้ว่าสถานะที่ให้ผลได้สูงสุดจะต้องอยู่ในช่วงที่กำหนด โดยทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาค่าขอบดังกล่าว และใช้ค่าขอบกำหนดในโปรแกรม Essential Experimental Design Version 2.216 โดยมีเงื่อนไขในการออกแบบการทดลองใน design an experiment ดังแสดงในรูปที่ ก.1 และใส่ช่วงของตัวแปรอิสระใน factor definition ตามรูปที่ ก.2 ซึ่งผลการออกแบบการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง โดยสามารถแปรค่าช่วงตัวแปรอิสระได้ดังตารางที่ ข.1



รูปที่ ก.1 ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

Factor Name	Units	Low Value	High Value
RATIO		8	22
TIME		6	34

RATIO		8	22
-------	--	---	----

รูปที่ ข.1 การกำหนดช่วงตัวแปรอิสระ

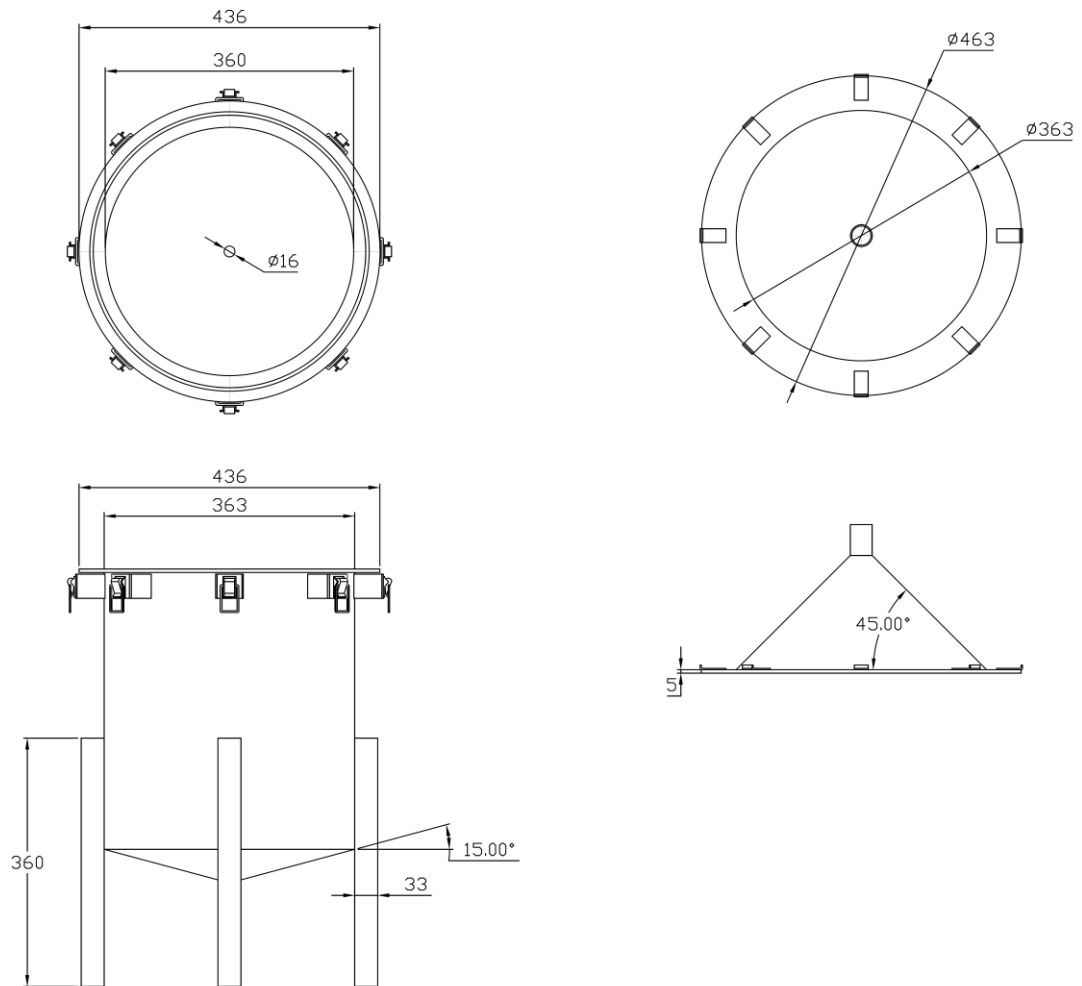
ตารางที่ ก.1 แสดงช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

Run	R (g.g ⁻¹)	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)

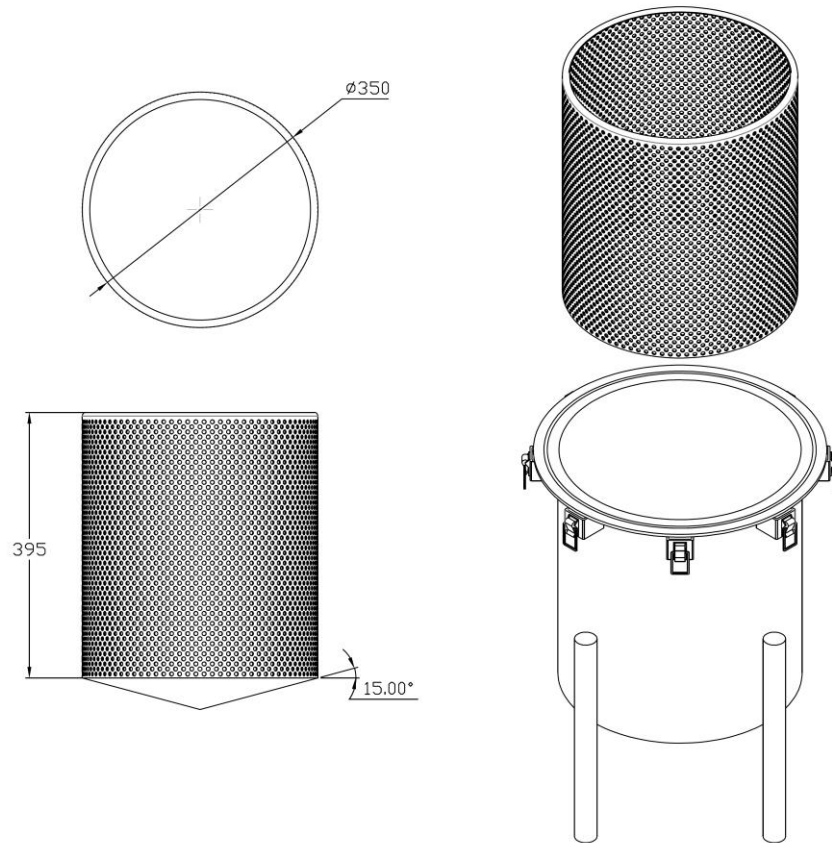
ตารางที่ ข.1 รายการอุปกรณ์เครื่องสกัดน้ำมันกาแฟแบบหมุนวน

ลำดับที่	รายการ	ขนาด/รุ่น	หมายเหตุ
2	ถังหมุนวน	ตามแบบ	รูปที่ ข.1
3	ถังตะแกรงกรอง	ตามแบบ	รูปที่ ข.2
4	ถังเก็บของเหลวสกัด	ตามแบบ	รูปที่ ข.3
5	ถังอุ่นไล่ชั้นใน	ตามแบบ	รูปที่ ข.4
6	ถังน้ำร้อนชั้นนอก	ตามแบบ	รูปที่ ข.5
7	การประกอบถังอุ่นไล่ชั้นในและถังน้ำร้อนชั้นนอก	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	Ø 43 cm สูง 53 cm	-	
13	เตาก๊าซหุงต้ม (เตาหัวแรง)	KB5 Hanaya	-
14	ถังก๊าซหุงต้ม	15 กก.	-



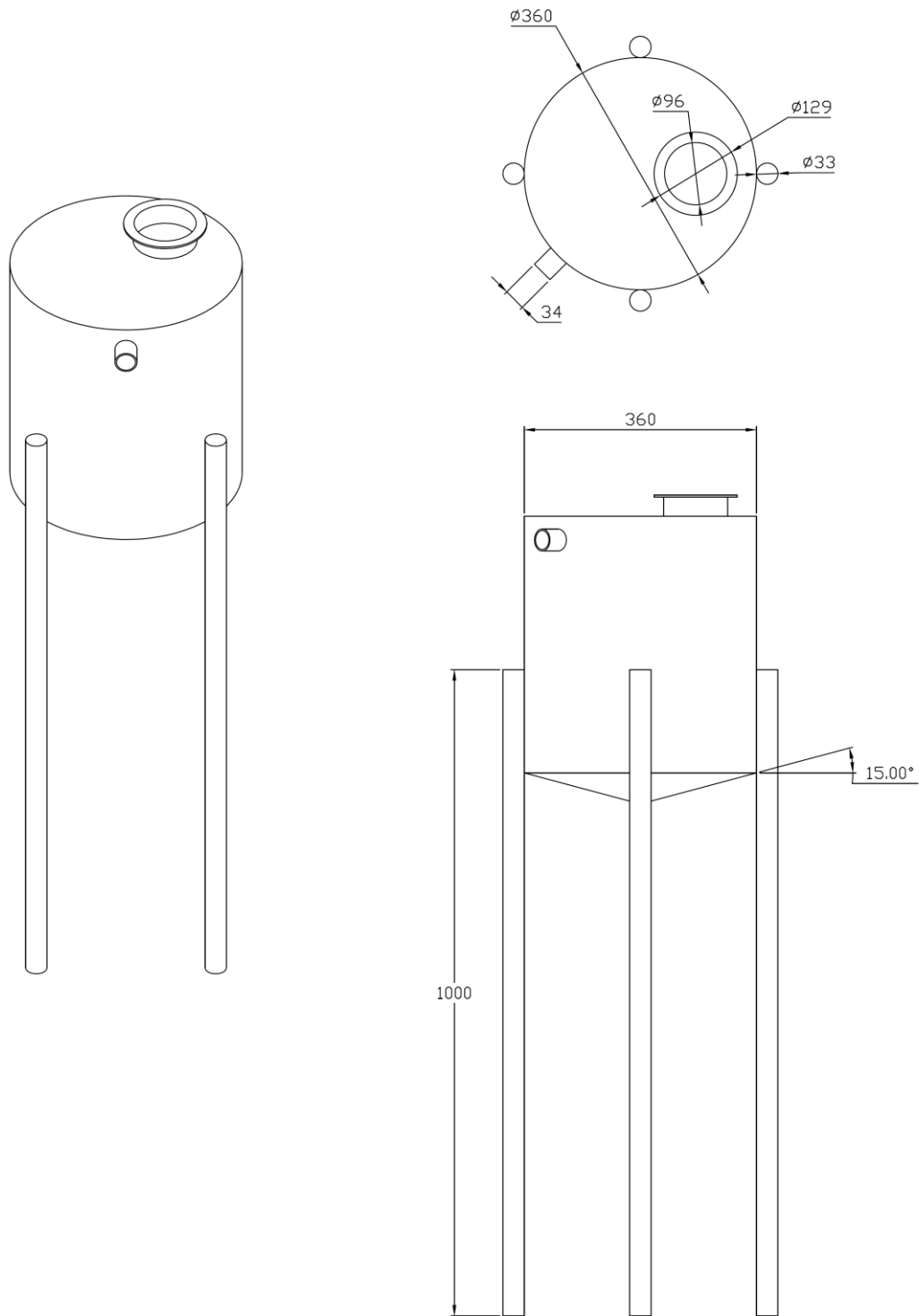
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.1 แบบถังสกัดหมุนวนและฝาถังสกัด



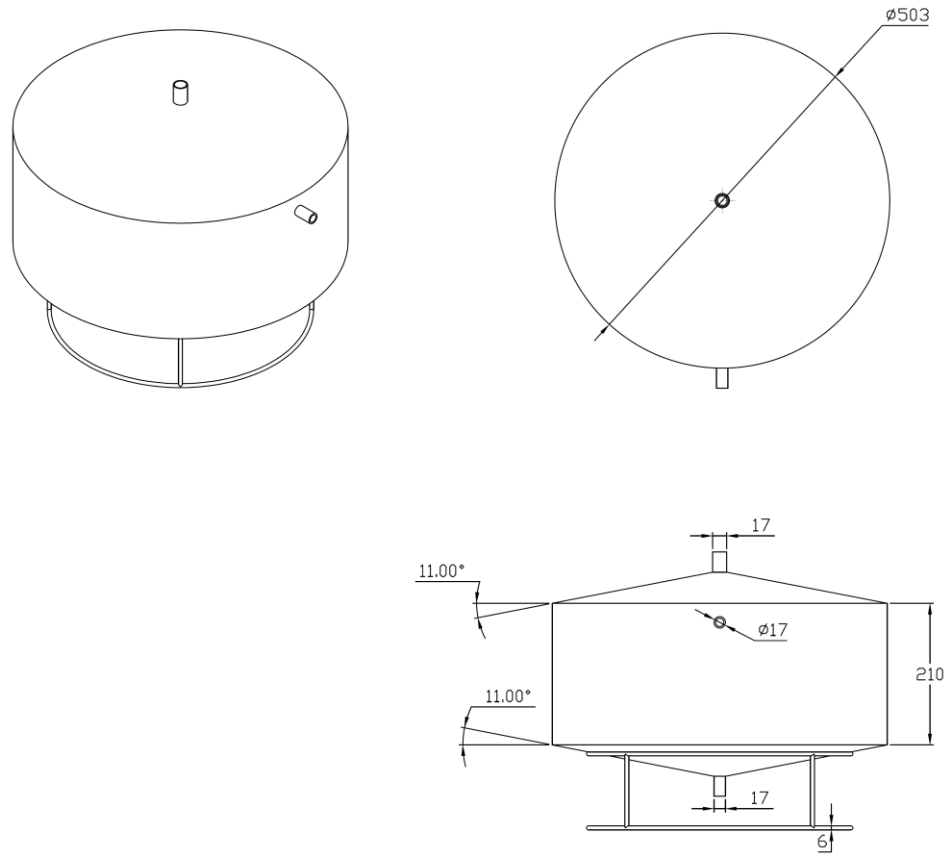
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.2 แบบถังตะแกรงกรอง



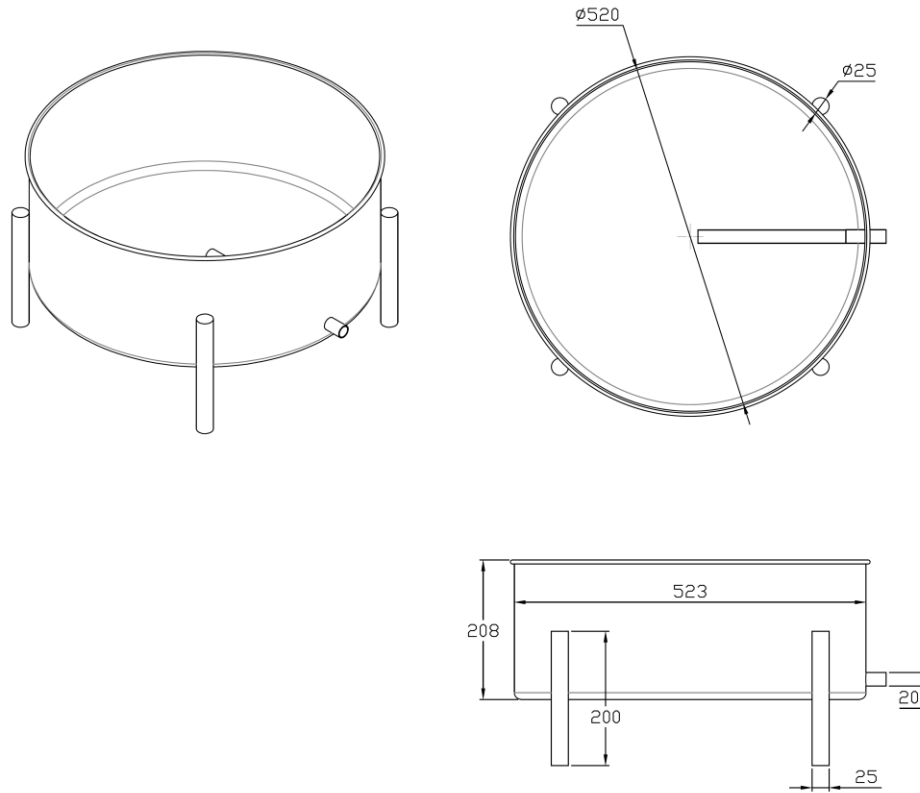
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.3 แบบถังเก็บของเหลวสก๊ต



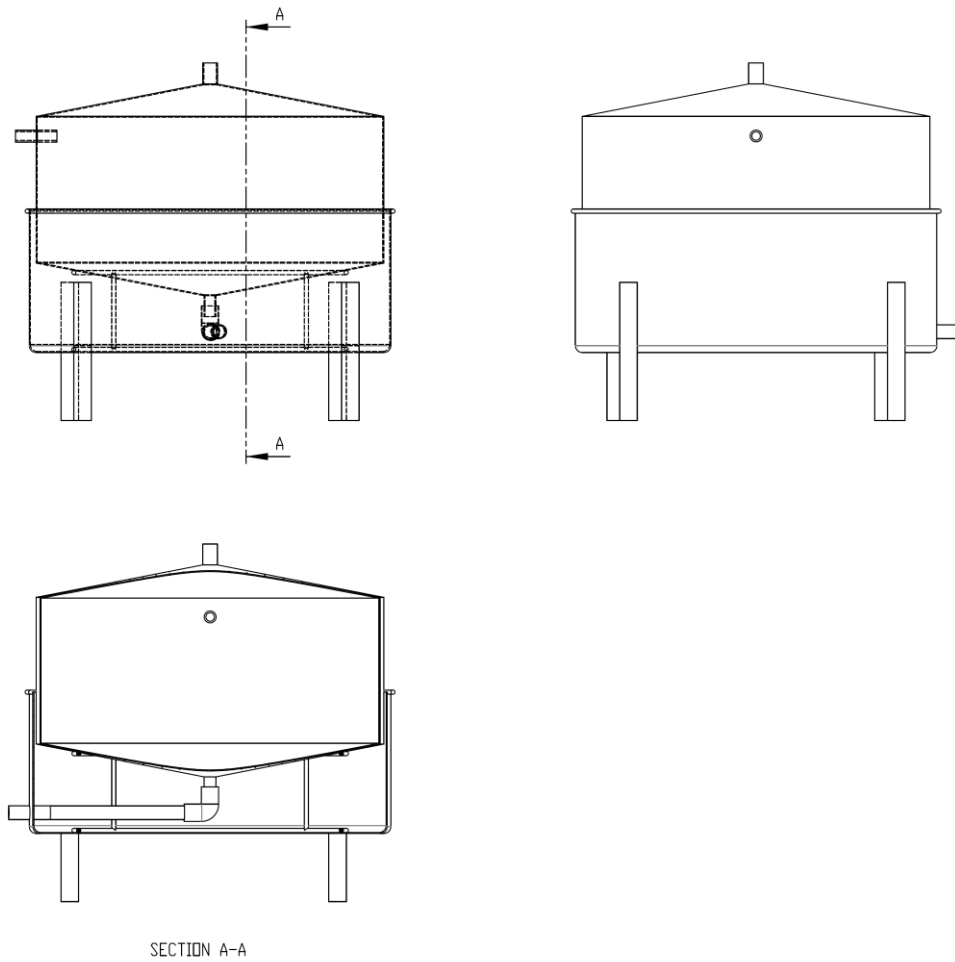
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.4 แบบถังอุ่นไล่ชั้นใน



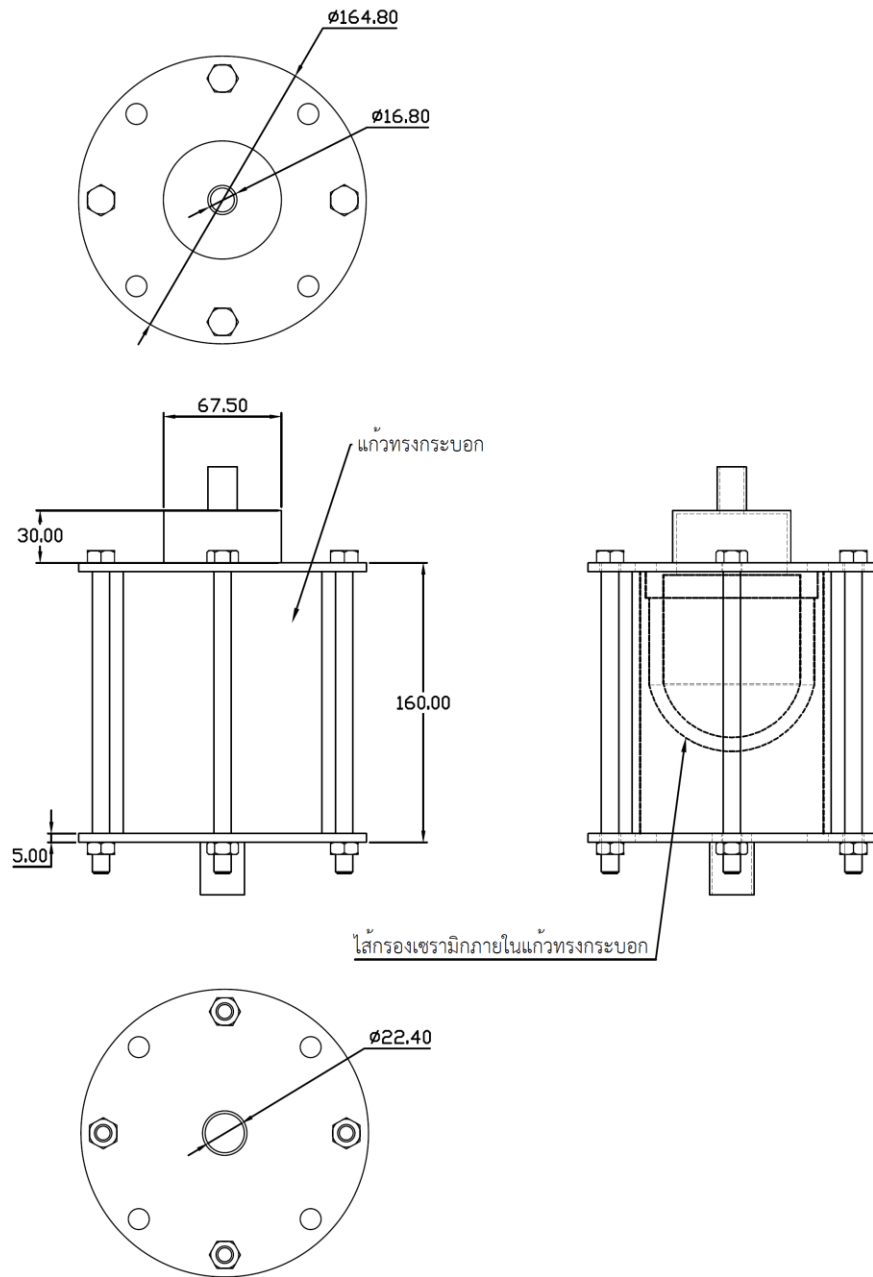
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.5 แบบถังน้ำร้อนชั้นนอก



(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.6 แบบการประกอบถึงอุณหภูมิล้นในและถึงน้ำร้อนชั้นนอก



(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)



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

พิชัย เอียวเล็ก^{1,*} และกฤษฎ สมนึก²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

^{1,*}Email : pichai.eawlex@gmail.com, ²Email : krit.s@psu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้กล่าวถึงการใช้ประโยชน์จากกากกาแฟเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานในรูปของเหลวและของแข็ง ซึ่งทั่วโลกมีปริมาณการผลิตเมล็ดกาแฟดิบ ประมาณ 8.2 ล้านตัน/ปี เนื่องจากในปัจจุบันมีการบริโภคกาแฟในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้เกิดกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก หลังจากผ่านกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป และแบบการชงกาแฟสด กากกาแฟกลายเป็นขยะอินทรีย์ความชื้นสูง บางส่วนของขยะชนิดนี้จะทำให้เกิดก๊าซมีเทนและส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนได้ นักวิจัยหลายคนได้มีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากกากกาแฟเป็นพลังงานทดแทน โดยกากกาแฟแห้งมีค่าความร้อนสูงประมาณ 19.3 MJ/kg ซึ่งพลังงานชีวมวลระดับนี้สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งได้ และพบว่าในกากกาแฟมีปริมาณน้ำมันประมาณ 7-17 wt.% ดังนั้นน้ำมันกาแฟสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น ไบโอดีเซล และผลพลอยได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันคือ กากกาแฟไร้ไขมัน สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ด นอกจากนี้การใช้น้ำมันจากกากกาแฟจะช่วยลดการใช้วัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซล เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเรซิด เนื่องจากน้ำมันกาแฟไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มของน้ำมันเพื่อบริโภค

คำสำคัญ: กากกาแฟ น้ำมันกาแฟ เชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง

Abstract

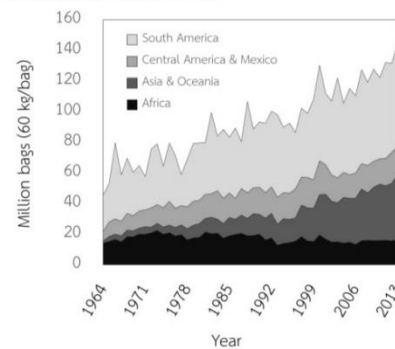
The utilization of spent coffee grounds (SCG) was discussed to produce the liquid- and solid-fuel. Based on close to 8.2 million tonnes of green coffee beans (GCB) produced globally each year. The SCG is the waste after brewing to produce an instant coffee and a fresh roasted coffee. After brewing, the 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 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

การบริโภคกาแฟเพิ่มขึ้นประมาณศตวรรษที่ 16 และได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นตลอดมาโดยจะเห็นได้จากปริมาณการผลิตเมล็ดกาแฟที่เพิ่มขึ้นทั่วโลกตลอดระยะเวลา 50 ปีที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 1 [1] จากข้อมูลองค์การกาแฟระหว่างประเทศ (International Coffee Organization, ICO) ระหว่างปี พ.ศ. 2556-2557 มีปริมาณเมล็ดกาแฟค้าขายในตลาดโลกประมาณ 8.2 ล้านตัน [2] สำหรับประเทศไทยการบริโภคกาแฟเริ่มแพร่หลายในกรุงรัตนโกสินทร์ สมัยรัชกาลที่ 4 และมีความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จากข้อมูลกระทรวงพาณิชย์ ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีความต้องการใช้เมล็ดกาแฟ 75,000 ตัน มีความสามารถปลูกได้ 37,366 ตัน (มีผลผลิตเป็นอันดับที่ 19 ของโลก) ส่วนที่เหลือต้องพึ่งพานำเข้าจากเวียดนามและอินโดนีเซีย [3] จากความนิยมบริโภคและความต้องการเมล็ดกาแฟที่เพิ่มมากขึ้น สร้างกากกาแฟเหลือทิ้งกลายเป็นขยะอินทรีย์ความชื้นสูงซึ่งยากต่อการจัดการ อาจเกิดปัญหาเรื่องเชื้อรา กลิ่น น้ำเสีย และก๊าซเรือนกระจกจากการหมักที่บด แต่ประโยชน์ของกากกาแฟคือ กากกาแฟมีคุณสมบัติด้านการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานชีวมวล ทั้งในรูปแบบของแข็งและของเหลว เนื่องจากกากกาแฟมีองค์ประกอบค่าพลังงานความร้อนสูง และมีน้ำมันในกากกาแฟประมาณ 7-17 wt.% [4] บทความฉบับนี้จึงได้รวบรวมการศึกษางานวิจัยเพื่อเป็นพื้นฐานในการวิจัยด้านการนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน





รูปที่ 1 ปริมาณการผลิตเมล็ดกาแฟ [1]

2. ลักษณะกากกาแฟ

ประเภทกาแฟที่นิยมปลูกมีเพียง 2 สายพันธุ์หลักๆ ได้แก่ พันธุ์อาราบิก้า (Coffea arabica L.) และ พันธุ์โรบัสตา (Coffea canephora, var. Robusta) โดยความแตกต่างของกาแฟทั้งสองชนิดนี้คือ สายพันธุ์อาราบิก้าเจริญเติบโตได้ดีในที่สูงอากาศเย็นจึงต้องปลูกในพื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 600-2,200 เมตร ปริมาณน้ำฝน 1,200-2,200 มิลลิเมตร/ปี ที่อุณหภูมิประมาณ 15-24 °C มีกลิ่นหอมมากกว่า ความเข้มข้นน้อยกว่า และมีปริมาณคาเฟอีนน้อยกว่าสายพันธุ์โรบัสตาสองเท่า ส่วนกาแฟพันธุ์โรบัสตาสามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ที่มีฝนตกชุก อากาศร้อนชื้น ความสูงจากระดับน้ำทะเล ประมาณ 0-800 เมตร มีปริมาณน้ำฝน 2,200-3,000 มิลลิเมตร/ปี อุณหภูมิประมาณ 18-36 °C ผู้ผลิตกาแฟมักจะนำกาแฟพันธุ์อาราบิก้ามาผสมกับพันธุ์โรบัสตาเพื่อเพิ่มความหอม [5] ทั้งสองสายพันธุ์สามารถสกัดน้ำมันกาแฟได้จากทั้งเมล็ดกาแฟสด (green coffee bean, GCB) และกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) โดยปริมาณน้ำมันในเมล็ดกาแฟอาราบิก้า จะมีปริมาณมากกว่าโรบัสตา [4] ในขั้นตอนการผลิตกาแฟ หลังจากเมล็ดกาแฟสด (GCB) ผ่านการคั่วแล้ว จะได้เมล็ดกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) เมล็ดกาแฟคั่วจะถูกนำมาแปรรูปเป็นน้ำกาแฟและเข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เพื่อผลิตเป็นกาแฟผงสำเร็จรูป และบดละเอียดเพื่อใช้ในการชงกาแฟโดยนิยมใช้เครื่องชงกาแฟแบบเอสเปรสโซ คือการผ่านน้ำร้อนอุณหภูมิ 88±2 °C และความดันสูง 9±1 bar ลงบนผงกาแฟเพื่อสกัดน้ำกาแฟไปใช้งาน ภายในเครื่องมีเศษเหลือทิ้งคือกากกาแฟ (spent coffee grounds, SCG) โดยมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 [6]

3. การใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน

จากคุณสมบัติที่ให้พลังงานความร้อนสูงกว่าชีวมวลชนิดอื่นๆ และมีปริมาณเถ้า (ash) ต่ำ ประกอบกับมีองค์ประกอบของน้ำมันผสมอยู่ในกากกาแฟ ทำให้มีโอกาสในการพัฒนากากกาแฟให้เป็นพลังงานทางเลือกทั้งแบบเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งได้แสดงแผนผังการนำกากกาแฟมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน ตามรูปที่ 2

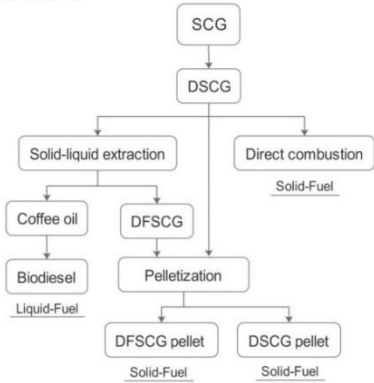
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของ SCG และ DFSCG [6]

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

กากกาแฟมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่เผาไหม้ให้พลังงานความร้อนสูง ประกอบกับมีปริมาณเถ้าที่ต่ำ ปัจจุบันมีการใช้กากกาแฟเผาไหม้โดยตรงในเตาเผาของหม้อไอน้ำในโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูป เนื่องจากมีกากกาแฟเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งง่ายต่อการจัดการ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การกำจัดและช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานในการผลิต Silva และคณะ [7] ทดสอบการเผาไหม้ของกากกาแฟ

เหลือทิ้งจากโรงงานในประเทศบราซิลโดยให้ความร้อนกับหม้อต้มน้ำด้วยการเผากากกาแฟพบว่า กากกาแฟใช้งานได้เทียบเท่าชีวมวลชนิดอื่นๆ และหากการกำจัดความชื้นออกจากกากกาแฟก่อนจะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อต้มน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 แผนผังการใช้ประโยชน์จากกากกาแฟเป็นเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง

3.2 เชื้อเพลิงอัดเม็ดจาก SCG และ DFSCG

เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด (pellet fuel) มีลักษณะที่ง่ายต่อการจัดเก็บ การขนส่ง รวมทั้งมีมาตรฐานกำหนดคุณลักษณะที่ชัดเจนต่อการนำไปใช้งานสำหรับเตาเผามาตรฐาน อีกทั้งกากกาแฟมีคุณสมบัติเหมาะสมเป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ดังแสดงในตารางที่ 2 [8,9] จึงมีการศึกษาและทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟโดย Limousy และคณะ [10] ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากกากกาแฟเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขี้เลื่อยไม้สน และกากกาแฟผสมขี้เลื่อยจากไม้สนในอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นทดสอบการใช้งานในหม้อน้ำขนาด 12 kW พบว่า เชื้อเพลิงที่อัดเม็ดทำจากกากกาแฟ, ขี้เลื่อยไม้สน และ กากกาแฟผสมขี้เลื่อยไม้สน มีค่าความร้อนเท่ากับ 19.55, 19.23 และ 19.63 MJ/kg ตามลำดับ ในขณะที่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และปริมาณเขม่าในก๊าซไอเสียจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟมีค่ามากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งกล่าวได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟผสมขี้เลื่อย มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขี้เลื่อยทั่วไป แต่จากค่าความร้อนและความหนาแน่นที่แตกต่างกันของกากกาแฟและขี้เลื่อยทำให้การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและการใช้งานในหม้อน้ำอาจต้องศึกษาปรับแต่งอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ออากาศ และประเภทเตาเผาใหม่ที่เหมาะสม อีกทั้งกรณีกากกาแฟที่เหลือจากการสกัดน้ำมันยังคงมีคุณสมบัติในการเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง ซึ่งควรมีการศึกษาไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง เนื่องจากค่าความร้อนของ DFSCG ก็ยังมีค่าที่สูง ถึงแม้ว่าจะถูกสกัดน้ำมันออกไปแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด [8,9]

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



กำมะถันรวม (total sulfur) ไม่ควเกิน 2 wt.%	0	14
ไม่มีสารออกซิไดเซอร์ (oxidizer)	n/a	n/a
ไม่มีสารที่ก่อให้เกิดการระเบิดเมื่อถูกทำให้ร้อน	n/a	n/a
ไม่มีสารกัดกร่อนที่เป็น strong oxidizing agent	n/a	n/a

ตารางที่ 3 การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงชนิดใหม่หม้อต้ม [10]

คุณสมบัติ	SCG	Pine sawdust	Blend 50:50
CO (ppm/vol)	11.8	7.9	6.7
Particles (mg/Nm ³)	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 การสกัดน้ำมันและการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟ

3.3.1 การสกัดน้ำมัน

การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟจะจัดอยู่ในประเภทการสกัดด้วยวิธีของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid extraction) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการชะ (leaching) คือ การละลายส่วนประกอบที่ต้องการออกจากของผสมแข็งด้วยตัวทำละลายของเหลว สำหรับกรณีที่ต้องการละลายอยู่ในผิวของของแข็งที่ไม่ละลาย เป็นเพียงกระบวนการชงน้ำมันออกด้วยตัวทำละลาย [11] เมล็ดกาแฟที่ผลิตในภูมิภาคต่างๆมีปริมาณน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 7-17 wt.% [4] การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ (SCG) กำลังเป็นที่สนใจในศึกษาในหลายประเทศ ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาและทดสอบความสามารถในการสกัดน้ำมันจาก SCG ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวทำละลายหลายประเภท เช่น hexane, isopropanol, pentane และ acetone เป็นต้น ที่มีวิจัยของ Ferrari และคณะ [12] ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดกาแฟคั่ว (roasted coffee bean, RCB) ของทั้งเมล็ดกาแฟพันธุ์อาราบิก้าและพันธุ์โรบัสต้า โดยใช้สารละลาย pentane ทำการสกัดด้วยวิธี Soxhlet extraction เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า กาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าและสายพันธุ์โรบัสต้าให้น้ำมัน 16.5±0.4 wt.% และ 9.2±0.1 wt.% ตามลำดับ Al-Hamamre และคณะ [13] ได้ทำการศึกษการสกัดน้ำมันจาก SCG จากตัวทำละลายแบบมีขั้ว (polar) และไม่มีขั้ว (non-polar) ด้วย Soxhlet extraction ใช้เวลาสกัด 30 นาที ด้วยตัวทำละลายแบบไม่มีขั้ว (pentane, hexane, toluene และ chloroform) ได้ปริมาณน้ำมัน 15.18, 15.28, 14.32 และ 8.60 wt.% ตามลำดับ และ ตัวทำละลายแบบมีขั้ว (acetone, isopropanol และ ethanol) ได้ปริมาณน้ำมัน 12.92, 10.68 และ 9.18 wt.% ตามลำดับ และมีทีมวิจัยอื่นๆ ที่ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากกาแฟซึ่งได้สรุปเงื่อนไขการสกัดน้ำมันด้วยเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 [13-15] ในขณะที่ Thawornprasert และคณะ [16] ทดสอบสกัดด้วยวิธีกวนผสมโดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนอุตสาหกรรม พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของกากกาแฟต่อเฮกเซน 1:15 g/g สามารถสกัดน้ำมันได้สูงสุด 14.0 wt.% และ Eawlex และ Somnuk [17] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดอัตราส่วนโดยมวลของกากกาแฟกับเฮกเซนและเวลาในการสกัดด้วยเทคนิค response surface methodology (RSM) พบว่าอัตราส่วนกากกาแฟต่อเฮกเซน 1:22.5 g/g เวลา 30.4 นาที สามารถสกัดน้ำมันได้สูงสุด 14.75 wt.% ทั้งนี้ Vardon และคณะ [18], Caetano และคณะ [6], Todaka และคณะ [19] ศึกษาสมบัติน้ำมันจากการสกัดในลักษณะใกล้เคียงกันด้วยวิธี Soxhlet extraction โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย ขณะที่ Abdullah และคณะ [20] ศึกษาใช้เฮกเซนและคลื่นเสียงอัลตราโซนิคในการสกัด โดยคุณสมบัติน้ำมันสกัด ได้แสดงดังในตารางที่ 5

3.3.2 การผลิตไบโอดีเซล

จากกากกาแฟที่มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ Caetano และคณะ [6] ศึกษาการสกัดน้ำมันจากกาแฟด้วยตัวทำละลาย hexane และ isopropanol ที่อัตราส่วนและความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทดสอบปริมาณน้ำมันที่สามารถสกัดได้ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยใช้แอลกอฮอล์ประเภทเมทานอล และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วรอบกวนผสม 80 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ความบริสุทธิ์ 86% Todaka และคณะ [19] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟน้ำมันสุต่า และ น้ำมันเรพซิด ด้วย methanol, ethanol, 1-propanol และ 1-butanol โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟที่ใช้ 1-butanol มีคุณสมบัติในด้านเชื้อเพลิงที่ดี, มีความเสถียรต่ออุณหภูมิ (thermal stability) และ ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี โดยคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟได้แสดงในตารางที่ 6

4. บทสรุป

การบริโภคกาแฟมีแนวโน้มได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องในอนาคต ด้วยศักยภาพของผู้ผลิตและความเสถียรของตลาด จะทำให้มีกากกาแฟจำนวนมากเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลดีสำหรับการใช้กากกาแฟเพื่อผลิตพลังงานทางเลือก ประกอบกับกากกาแฟมีปริมาณคาร์บอนคงที่สูง (fixed carbon) ส่งผลให้ค่าความร้อนสูง (heating value) สำหรับน้ำมันสกัดจากกากกาแฟมีคุณสมบัติสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากไตรกลีเซอไรด์เป็นเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลได้และยังสามารถนำกากที่เหลือทิ้งที่ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วปรับปรุงเป็นเชื้อเพลิงแข็งได้ จากผลการค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติด้านปริมาณและด้านพลังงานของกากกาแฟที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวจากขยะกากกาแฟเหลือทิ้ง ซึ่งสามารถวิจัยปรับปรุงประสิทธิภาพและการนำไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกที่อาจจะมีศักยภาพได้ในอนาคต

ตารางที่ 4 การทดสอบสกัดน้ำมันกาแฟ

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 คุณสมบัติน้ำมันกาแฟ

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 ³)	941	904.2	912
Viscosity 40°C (mm ² /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 คุณสมบัติไอโอดีเอสจากน้ำมันกาแฟเปรียบเทียบกับมาตรฐาน

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 ₂ /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-111-5-1e-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, "ภาพสรุปภาวะการผลิต การตลาด และราคาในประเทศ," 2014. [Online]. Available: http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=17878&filename=index. [Accessed: 05-Sep-2015].
- [4] K. Speer and I. Kölling-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. [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, คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน. กรุงเทพฯ: 2013.
- [9] J. Bok, H. Choi, Y. Choi, H. Park and S. Kim, "Fast pyrolysis of coffee grounds: Characteristics of product yields and bio-crude oil quality," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 17–24, 2012.
- [10] 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.
- [11] ชัยเรืองศรี ธรมินทร์, การสกัดของแข็ง-ของเหลว. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 2549.
- [12] M. Ferrari, F. Ravera, E. De Angelis, F. Liverani and L. Navarini, "Interfacial properties of coffee oils," *Colloids Surf. A*, vol. 365, no. 1–3, pp. 79–82, 2010.
- [13] 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.
- [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-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, 2013.
- [20] M. Abdullah and A. Bulent Koc, "Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication," *Renew Energy*, vol. 50, pp. 965–970, Feb. 2013.



เกี่ยวกับผู้เขียน

นายพิชัย เอี้ยวเล็ก นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เกี่ยวกับผู้เขียน

ดร.ภฤช สมนึก อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์






การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8
The 8th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-8)

ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า

พิชัย เอี้ยวเล็ก

ได้นำเสนอบทความ “การใช้ประโยชน์จากกากกาแฟเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง”

ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ระหว่างวันที่ 4 – 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช โยรินรินทร์
นายกสมาคม
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



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

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 still 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; Mitsubishi Kagaku Iatron 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.

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

Where Y is the coffee oil yield, W_o (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	+1.414
<i>R</i> : Ratios of DSCG-to-hexane (g/g)	1:5.1	1:8	1:15	1:22	1:24.9
<i>T</i> : Extraction time (min)	0.2	6	20	34	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 β : 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.

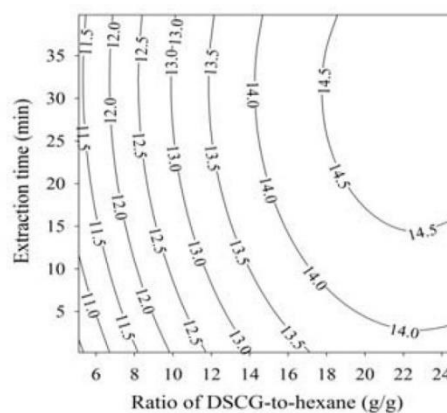


Figure-2. Contour plot of extraction time and mass ratio of DSCG-to-hexane on the yield of coffee oil under the room temperature of 30 °C.

**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	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_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].

2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON
RENEWABLE ENERGY AND GREEN
TECHNOLOGY



Malaysia Technical
Scientist Association

Registration No: PPM-029-04-12/01/2015



Certificate of Participation

This is to certify that

Pichai Eawlex

*had presented a paper in the International Conference on
Renewable Energy and Green Technology
held on 2 - 4 June 2015*

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Fareq'.

Assoc. Prof. Dr. Mohd Fareq Abd Malek
Conference Chairman

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Azlishah'.

Dr. Mohd Azlishah Bin Othman
President MALTESAS

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
(สถานะ 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⁻¹ 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 varieties¹ and have promising
58 feedstock amount to produce biodiesel.²⁻⁴ 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.^{1,5} 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.⁶ SCG from brewed coffee process was
64 used as a renewable fuel resource.⁷ 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.⁸ After coffee extraction with hot water, solid waste of the SCG amounted to 2 kg per
67 each 1 kg of ICP.⁹ 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).⁵ 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.⁸ In Thailand, coffee
72 beans have been used to produce instant coffee, roasted coffee, ground coffee, and canned
73 coffee.¹⁰ Increasing domestic consumption leads to an increase in SCG as well.^{5,11} The SCG
74 contains 10-15 wt.% oil content, depending on coffee varieties.^{1,12} 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.*³ 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.*⁴ 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.^{13,14}

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.¹⁵ 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.¹⁹ 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 ANKOM²⁰⁰ 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).²⁰ 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 Kagaku 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-63,²¹ and was
147 calculated using Eq. (2).²²

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

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

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).²³ 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

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

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); β_0 , β_i , β_{ii} , and β_{ij} are the intercept,
 174 linear, quadratic, and interaction constant coefficients, respectively; k is the number of
 175 variables; and ε 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.²⁴ 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⁻¹ 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.²⁵ 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⁻¹ HHV).²⁶ 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.²⁶ 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_{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 β_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 β_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 β 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⁻¹ 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.²⁷ 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.^{28,29} 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 ***1. 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 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⁻¹ 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 ¹R. W. Jenkins, N. E. Stageman, C. M. Fortune, and C. J. Chuck, *Energy Fuels*. **28**, 1166–
356 1174 (2014).

357 ²D. 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 ³Z. Al-Hamamre, S. Foerster, F. Hartmann, M. Kröger, and M. Kaltschmitt, *Fuel* **96**, 70–76
360 (2012).

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

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

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

365 ⁷Nestlé, see [http://www.nestle.com/csv/case-studies/allcasestudies/recycling-coffee-grounds-](http://www.nestle.com/csv/case-studies/allcasestudies/recycling-coffee-grounds-fuel)
366 [fuel](http://www.nestle.com/csv/case-studies/allcasestudies/recycling-coffee-grounds-fuel).

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

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

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

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

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

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

376 ¹⁴N. 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).

- 378 ¹⁵M. 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).
- 380 ¹⁶Chemical Intelligence, see <http://chemicalintelligence.com/public/S040714.pdf>.
- 381 ¹⁷Bank of Thailand, see
382 [https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib_CommodityQuater/Q](https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib_CommodityQuater/Q2_58_Ethanol.pdf)
383 [2_58_Ethanol.pdf](https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib_CommodityQuater/Q2_58_Ethanol.pdf).
- 384 ¹⁸Methanol Market Services Asia, see <http://chemicalintelligence.com/public/S040714.pdf>.
- 385 ¹⁹M. Abdullah, and A. B. Koc, *Renew. Energy.* **50**, 965–970 (2013).
- 386 ²⁰S. Obruca, S. Petrik, P. Benesova, Z. Svoboda, L. Eremka, and I. Marova, *Appl. Microbiol.*
387 *Biotechnol.* **98**, 5883–5890 (2014).
- 388 ²¹AOCS, Official test method Cd 3a–63 for acid value. Am. Oil. Chem. Soc. Champaign.
389 (1998).
- 390 ²²K. Somnuk, S. Niseng, and G. Prateepchaikul, *Energy. Convers. Manag.* **80**, 374–381
391 (2014).
- 392 ²³M. Ranic, M. Nikolic, M. Pavlovic, A. Buntic, A. Siler-Marinkovic, and S. Dimitrijevic-
393 Brankovic, *J. Clean. Prod.* **80**, 69–79 (2014).
- 394 ²⁴G. M. Bouafou, A. Konan, V. Zannou-Tchoko, and S. Kati-Coulibally, *Electron. J. Biol.* **7**,
395 74–80 (2011).
- 396 ²⁵M. A. Silva, S. A. Nebra, M. J. M. Silva, and C. G. Sanchez, *Biomass Bioenergy.* **14**, 457–
397 467 (1998).
- 398 ²⁶A. Demirbaş, *Fuel* **76**, 431–434 (1997).
- 399 ²⁷C. 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).
- 401 ²⁸K. Somnuk, P. Smithmaitrie, and G. Prateepchaikul, *Energy. Convers. Manag.* **68**, 193–199
402 (2013).

403 ²⁹A. 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 (μm)	237.2	216.2
Higher heating value, HHV (kJ.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 ⁻¹)	0.664	0.784	0.800	0.782
Boiling point (°C)	62.40	78.50	78.15	64.70
Price (USD.kg ⁻¹)	1.54 ¹⁶	0.46 ¹⁷	0.41 ¹⁷	0.37 ¹⁸

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 ⁻¹)	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 ⁻¹)	T (min)	Yield of coffee oil, Y (wt.%)			
			Hexane	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

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	p -value	C value	p -value	C value	p -value	C value	p -value
β_0	8.130	0.000262	6.207	0.00307	-0.04543	0.972	0.853	0.707
β_1	0.06449	0.231	0.131	0.06835	0.327	0.00121	-0.000235	0.998
β_2	0.500	0.00452	0.423	0.02232	0.716	0.00173	0.538	0.05888
β_3	-0.000981	0.295	-0.00222	0.07796	-0.00245	0.05072	-0.00102	0.578
β_4	-0.000211	0.926	0.000778	0.778	-0.00993	0.00801	0.00170	0.713
β_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_{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

24

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 ⁻¹)	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^{-1})	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^{-1})	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

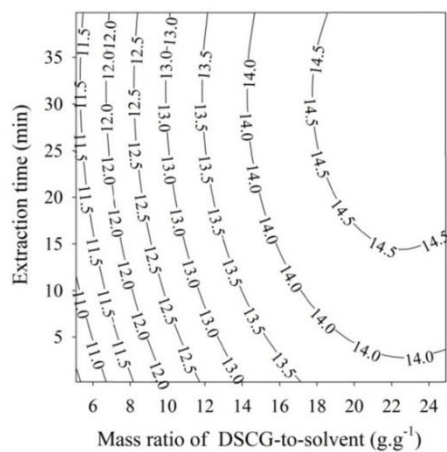
586

587

588

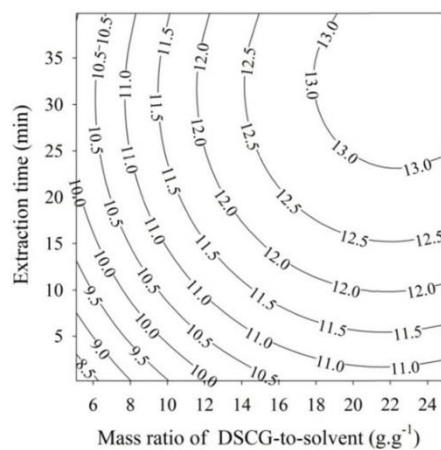
589

590



591

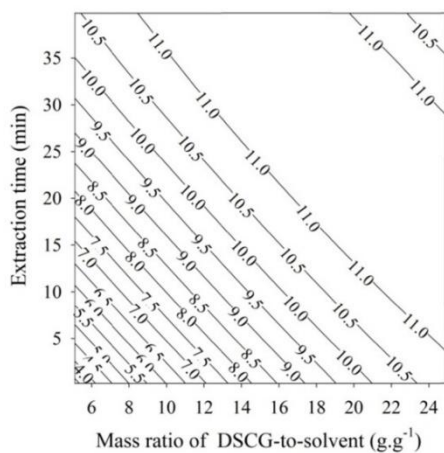
(a)



592

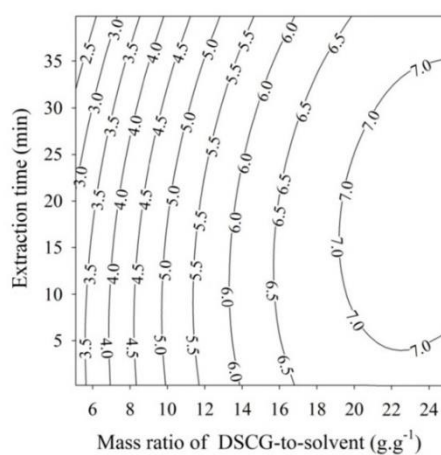
(b)

593



594

(c)



595

(d)

596

FIG. 2. Contour plots of mass ratio of DSCG-to-solvent and extraction time on the coffee

597

oil yield at 30 °C (a: hexane, b: anhydrous ethanol, c: hydrous ethanol, and d: methanol).

598

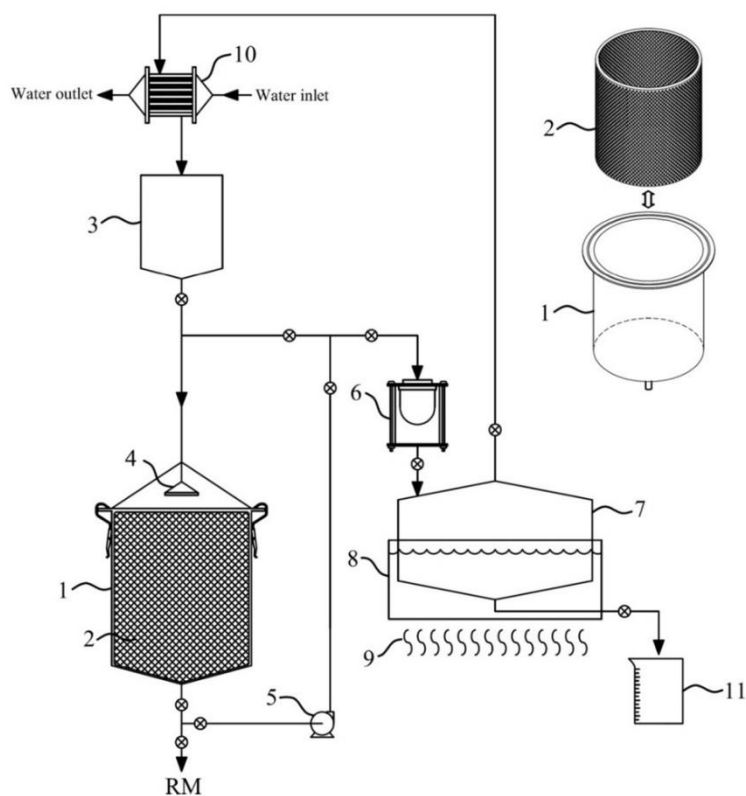
599

600

601

602

603



604

605

606

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

609

tube heat exchanger, and 11: coffee oil beaker).

610

611

612

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

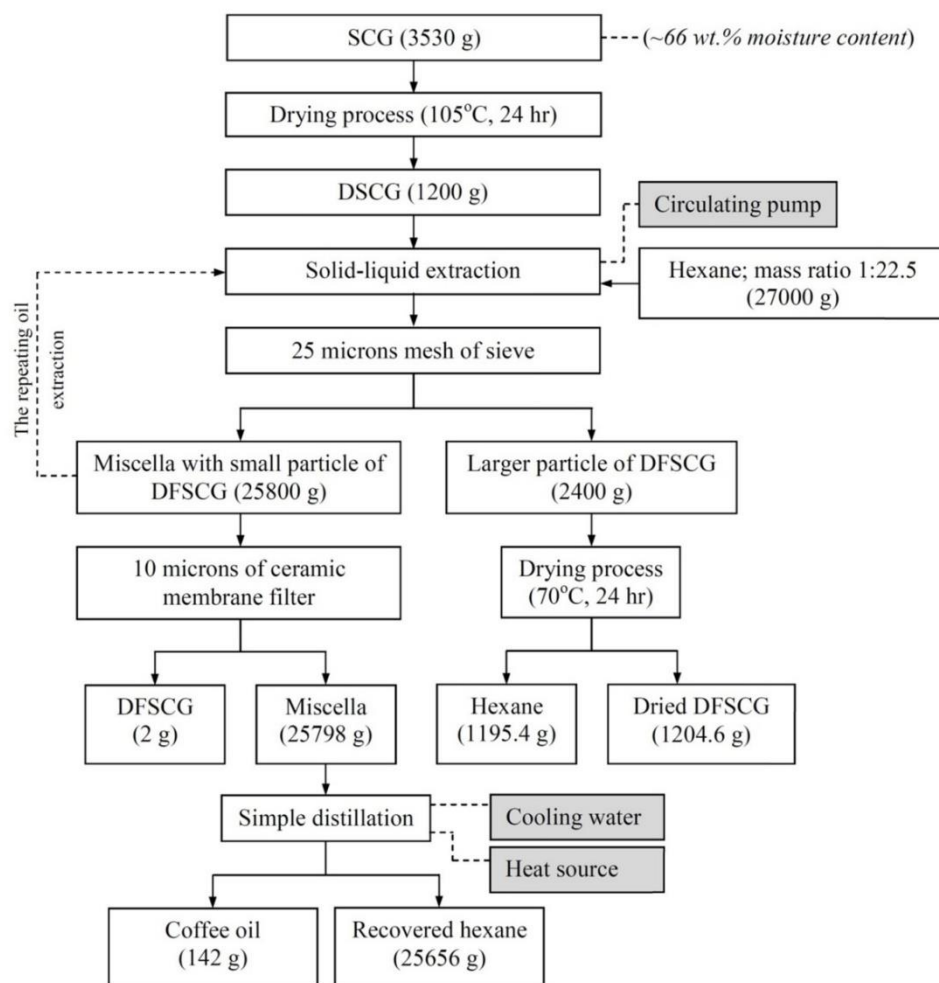
631

632

633

634

635



636

637

638

FIG. 5. Material balance of coffee oil extraction.

639

640

641

642

643

644

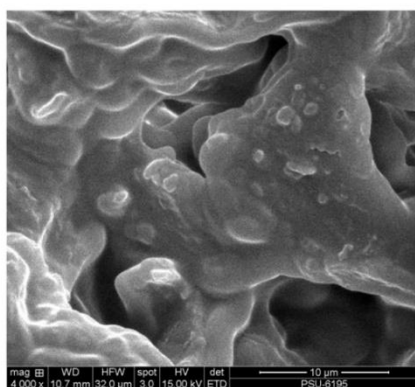
645

646

647

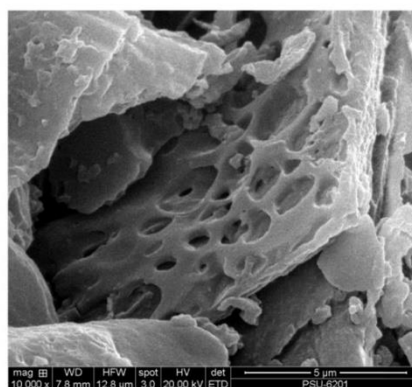
648

649



650

(a)



651

(b)

652

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

ภาคผนวก ฉ
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านสิ่งประดิษฐ์

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 4

กฤษ สมนึก และ พิชัย เอี้ยวเล็ก, เครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปศั้วทำ
ละลายวนซ้ำหลายรอบ, อนุสิทธิบัตร เลขที่ xxx (สถานะ กำลังขอเลขที่คำขอผ่านทางศูนย์ทรัพย์สิน
ทางปัญญา อว.ม.อ.)

หน้า 1 ของจำนวน 7 หน้า

รายละเอียดการประดิษฐ์

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

เครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปศุสัตว์ทำละลายวนซ้ำหลายรอบ

สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- 5 วิศวกรรมศาสตร์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปศุสัตว์ทำละลายวนซ้ำหลายรอบ
- ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง
- การบริโภคกาแฟ เริ่มได้รับความนิยมประมาณศตวรรษที่ 16 และได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตลอดหลายศตวรรษที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ความต้องการในตลาดที่สูงขึ้น ซึ่ง
- 10 ผลตอบแทนจากการขายเมล็ดกาแฟมูลค่าสูงมากขึ้นเช่นกัน ทำให้มีการปลูกกาแฟและผลิตเมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประเทศผู้ผลิตร่วมกันจัดตั้งองค์กรเพื่อส่งเสริมการพัฒนาการปลูกและบริหารความเสี่ยงในตลาดคั่วกาแฟ ทั้งหมดนี้ส่งเสริมให้ระบบการค้าและการผลิตกาแฟมีมูลค่าทางการค้าและเสถียรภาพที่สูง
- ประมาณเมล็ดกาแฟสดพร้อมคั่วในตลาดซื้อขายในปี พ.ศ. 2557 ทั่วโลกมีค่าเท่ากับ 8.71 ล้านตัน และการใช้
- 15 บริโภคภายในประเทศไทย 7.5 หมื่นตัน ปริมาณการบริโภคที่สูง สร้างกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นปริมาณที่สูงเช่นกัน กลายเป็นขยะอินทรีย์ความชื้นสูงที่สร้างปัญหาในการจัดเก็บและการกำจัด แต่หากมองกลับกันในแง่การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้ง กากกาแฟจะเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในด้านปริมาณ ความต่อเนื่องที่ไม่ขึ้นกับฤดูกาลต่างจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายๆชนิด
- ปัจจุบันมีความพยายามศึกษาใช้ประโยชน์จากกากกาแฟ (spent coffee grounds, SCG) เพื่อเพิ่ม
- 20 มูลค่าในหลายลักษณะ แต่ที่สอดคล้องกับความต้องการคือการพัฒนาศักยภาพในด้านเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลมีความต้องการใช้ในประเทศสูงและมีการใช้งานน้อยเมื่อเทียบกับความต้องการ ซึ่งหากพิจารณาเพียงองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณคาร์บอน เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงจะให้ความร้อนสูง ซึ่งกากกาแฟมีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 61.13% ซึ่งมากกว่าชีวมวลเกือบทุกประเภทที่มีใช้งานในปัจจุบัน
- การสกัดน้ำมันจากพืชน้ำมันมีหลากหลายประเภท เช่น การเจียว (rendering) การหีบหรือการอัด
- 25 (pressing or expelling) และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) ในการประดิษฐ์นี้ได้ใช้การสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเนื่องจากกากกาแฟมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก การสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม ซึ่งในกระบวนการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย มีกระบวนการสกัดแบบของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid extraction) เครื่องสกัดด้วยตัวทำละลาย มีหลายประเภทได้แก่ ถังแช่ (percolation tank), เครื่องสัมผัสหลายครั้งด้วยกระแสสวนทาง (counter-current multiple contact),
- 30 เครื่องชะแบบอัดกรอง (filter-press leaching), ถังกวน (agitator vessel), ถังโกรก (thickeners), ไฮโคลนน้ำ (hydro cyclones) และ เครื่องจำแนก (classifiers)
- มีผู้ประดิษฐ์ได้นำเครื่องสกัดน้ำมันจากพืชด้วยตัวทำละลาย เช่น สิทธิบัตรไทย เลขที่ประกาศ 136567 ได้เปิดเผยชุดอุปกรณ์สกัดกรดอะโรมาติกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในรูปแบบแคลเซียมอะโรมาติกคาร์เตท ซึ่งทำงานได้ทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วย ส่วนหลัก 3 ส่วน คือ เครื่องสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ด
- 35 มะม่วงหิมพานต์ (cashew nut shell liquid, CNSL) สำหรับสกัดแยกน้ำมันออกจาก CNSL ด้วยตัวทำ

ละลาย เครื่องทำปฏิกิริยากรด-ด่าง สำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันจาก CNSL กับสารละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อแยกกรดอนาครดิกจากสารประกอบอื่นที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันจาก CNSL และ เครื่องแยกแคลเซียมอนาครดิกสำหรับแยกตะกอนแคลเซียมอนาครดิกออกจากสารละลาย เป็นชุด อุปกรณ์ที่สามารถใช้ได้กับการผลิตกรดอนาครดิกในระดับอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตปริมาณมาก

- 5 สิทธิบัตรไทย เลขที่ 2014 ได้เปิดเผยกระบวนการสกัดน้ำมันและสารที่ละลายในน้ำมันจากพืชโดยใช้ตัว ทำละลายภายใต้ความดันในสภาวะอุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า โดยใช้ตัวทำละลาย ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (hydro-fluorocarbons) และ/หรือ ไฮโดรคลอโรฟลูออโร คาร์บอน (hydro-chlorofluorocarbons) และ/ หรือ คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbons) และ/หรือ อัลเคน (alkanes) และ/หรือ ไซโคลอัล เคน (cyclo- alkanes) และ/หรือ ไฮโดรคาร์บอนอีเธอร์ (hydrocarbon ethers) ทั้งที่เป็นสารเดี่ยว และ/ หรือสารประกอบเหล่านี้ผสมอยู่ ทำการสกัดภายใต้ความดันในช่วง 0 ถึง 10 บาร์ ในสภาวะอุณหภูมิห้องหรือ
- 10 ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องช่วง -20 ถึง 45 องศาเซลเซียส มีขั้นตอนที่สำคัญประกอบด้วย การผสม การแยก การอัด และการควบแน่น

- สิทธิบัตรไทย เลขที่ประกาศ 543 ได้เปิดเผยการสกัดน้ำมันจากวัสดุเมล็ดพืชที่ให้น้ำมันได้มาก โดยการ นำเมล็ดพืชนั้นมาป่นให้เป็นผงละเอียดมีความชื้นประมาณ 10-25% แخلลงในตัวทำละลายที่เป็นน้ำมันและ
- 15 สกัด น้ำมันจากของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในตัวทำละลายด้วยตัวทำละลายที่มากขึ้น ในที่สุดแยกตัวทำละลายที่มี น้ำมัน ออกจากวัสดุที่ไม่ละลายและเอาน้ำมันกลับคืนออกมาจากตัวทำละลายที่มีน้ำมันอยู่ด้วยนี้ มีผู้ ประดิษฐ์ได้เปิดเผยการรักษาเสถียรภาพของน้ำมันกาแฟดิบ (crude coffee oil) ซึ่งอาจจะได้มาจาก
- กระบวนการหีบเมล็ดกาแฟคั่ว ในสิทธิบัตร US4156031 (stabilization of purified coffee oil) ด้วยวิธีการ
- ต่าง ๆ เช่น การกำจัดกรด การแยกสาร การกลั่นภายใต้สุญญากาศ โดยน้ำมันกาแฟบริสุทธิ์ที่ได้รับการสัมผัส
- 20 ของเหลวจากสารกาแฟซึ่งมีสารต้านอนุมูลอิสระสามารถช่วยเพิ่มความมีเสถียรภาพของน้ำมันกาแฟบริสุทธิ์

ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

- การประดิษฐ์นี้เป็นการประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วย
- น้ำมันป่นตัวทำละลายวนซ้ำหลายรอบ มีลักษณะส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) ซึ่ง
- 25 วางอยู่ในถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) โดยใช้ปั๊มหมุนวน (10) บีบตัวทำละลายผ่านหัวสเปรย์ตัวทำละลาย (2) และ
- ตัวทำละลายจะไหลผ่านกากกาแฟที่วางอยู่ในชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) ซึ่งมีความละเอียด 26 ไมครอน
- เนื่องจากกากกาแฟมีลักษณะเป็นผงละเอียด ถ้ากากกาแฟหลุดลอดจากชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) มาก
- เกินไปจะทำให้ปั๊มหมุนวน (10) เกิดการอุดตันได้ และเพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลายออกจากถังสกัด
- น้ำมันกาแฟ (1) จึงใช้อุปกรณ์ล๊อค (11) ล๊อคฝาถังสกัด

- 30 ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้คือ กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันป่น
- ตัวทำละลายวนซ้ำหลายรอบ สกัดน้ำมันได้จากกากกาแฟโดยใช้น้ำมันป่นตัวทำละลาย (miscella) ด้วย
- กระบวนการหมุนวนตัวทำละลาย สิ่งประดิษฐ์นี้สามารถใช้ miscella วนซ้ำเพื่อนำมาใช้สกัดน้ำมันจากกาก
- กาแฟใหม่ได้จำนวนหลายรอบแล้ว ทำให้ความเข้มข้นของน้ำมันกาแฟใน miscella เพิ่มมากขึ้น จึงช่วย
- ประหยัดพลังงานในขั้นตอนกลั่นแยกตัวทำละลายกับน้ำมันกาแฟในกรณีใช้ตัวทำละลายสกัดน้ำมันหนึ่งรอบ

แล้วนำไปกลั่นตัวทำละลายกลับคืนทันที ใช้เวลาสกัดประมาณ 5-10 นาที ได้น้ำมันกาแฟ 5-14 % โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดของกากกาแฟ ชนิดของตัวทำละลาย และขนาดอนุภาคของกากกาแฟ เป็นต้น

- การประดิษฐ์นี้มีความแตกต่างจากที่ได้กล่าวมาคือ กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวน และการนำ miscella จากการสกัดน้ำมันครั้งที่ 1 วนซ้ำเพื่อนำมาใช้สกัดน้ำมันจากกากกาแฟใหม่ได้จำนวน
- 5 หลายๆรอบแล้ว ทำให้ความเข้มข้นของน้ำมันกาแฟใน miscella เพิ่มมากขึ้น จึงช่วยประหยัดพลังงานในขั้นตอนกลั่นแยกตัวทำละลายกับน้ำมันกาแฟในกรณีใช้ตัวทำละลายสกัดน้ำมันหนึ่งรอบแล้วนำไปกลั่นตัวทำละลายกลับคืนทันที โดยสรุปการประดิษฐ์นี้ได้ใช้ระบบการสกัดน้ำมันแบบตัวทำละลายหมุนวน ซึ่งตัวทำละลายจะไหลวนผ่านกากกาแฟสดที่เหลือทิ้งหลังจากผ่านกระบวนการชงกาแฟ ซึ่งมีคล้ายคลึงกับวิธีการชงกาแฟด้วยถุงผ้า คือ นำกาแฟผงหรือกาแฟสำเร็จรูปใส่ลงในถุงผ้า แล้วใช้น้ำร้อนเทผ่านผงกาแฟในถุงผ้าจะได้
- 10 น้ำกาแฟตกลงมาด้านล่างของถุงชงกาแฟ แต่ในกระบวนการสกัดน้ำมันกาแฟต้องใช้ตัวทำละลายเพื่อสกัดน้ำมันออกมาจากกากกาแฟ ปัญหาหนึ่งของกากกาแฟสดคือ มีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยเฉลี่ย 237.2 ไมครอน ภายหลังจากนำเมล็ดกาแฟสดผ่านกระบวนการบดให้ละเอียดเพื่อใช้สำหรับชงกาแฟสด การที่จะนำถุงผ้าชงกาแฟมาใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟจึงมีความละเอียดของการกรองไม่เพียงพอ ดังนั้นชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) จะต้องมีความละเอียดเล็กกว่า 26 ไมครอน เพื่อไม่ทำให้กากกาแฟส่วนใหญ่
- 15 หลุดลอดออกไปจากกระบวนการสกัดแบบตัวทำละลายหมุนวน

คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

- รูปที่ 1 แสดงวิธีการดำเนินการสกัดน้ำมันกาแฟจากกากกาแฟ
- รูปที่ 2 แสดงกระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปนตัวทำละลายวนซ้ำหลาย
- 20 รอบ
- รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบแยกชิ้นของถังสกัดน้ำมันกาแฟ
- รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยมวลของกากกาแฟกับตัวทำละลาย (กรณีใช้เฮกเซนปั่นตัวทำละลาย) ที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟ (yield of coffee oil)
- รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการใช้น้ำมันปนตัวทำละลาย (miscella) มาใช้สกัด
- 25 น้ำมันจากกากกาแฟวนซ้ำส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของน้ำมันกาแฟใน miscella

การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

- ตามการประดิษฐ์นี้ได้เสนอเครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปนตัวทำละลายวนซ้ำหลายรอบ
- ก่อนนำกากกาแฟสดเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบของกระบวนการสกัดน้ำมัน หลังจากกากกาแฟสดผ่าน
- 30 กระบวนการชงมาแล้วนั้นจะต้องนำกากกาแฟมาอบหรือตากแดดเพื่อลดความชื้น ซึ่งได้แสดงแผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันกาแฟจากกากกาแฟสดได้ดำเนินการตามแผนการดำเนินการ ตามรูปที่ 1 ในการประดิษฐ์นี้มีความมุ่งหมาย ดังแสดงในรูปที่ 2 คือ กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปนตัวทำละลาย (miscella) วนซ้ำหลายรอบ
- นำกากกาแฟแห้งใส่ลงในชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) ซึ่งวางอยู่ในถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) ทำการปิด
- 35 ฝาถังสกัดน้ำมันกาแฟด้วยอุปกรณ์ล็อก (11) เพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลาย ซึ่งได้แสดงส่วนประกอบ

หน้า 4 ของจำนวน 7 หน้า

- แยกชั้นของถึงสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ ตามรูปที่ 2 หลังจากนั้นเตรียมตัวทำลาย เช่น เฮกเซน เอทานอล หรือ เมทานอล ใส่ลงในถังเก็บตัวทำลายและถังเก็บน้ำมันสกัดปนตัวทำลาย (miscella) (3) เมื่อเริ่มกระบวนการสกัดน้ำมันกาแฟ ปิดวาล์วทั้งหมด แล้วจึงเปิดวาล์ว (31) ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่งท่อต่อเชื่อมระหว่าง ถังเก็บตัวทำลายและถังเก็บน้ำมันสกัดปนตัวทำลาย (3) กับหัวสเปรย์ตัวทำลาย (2) ตัวทำลายจะ
- 5 ไหลลงมาถึงถึงสกัดน้ำมันกาแฟ (1) โดยจะไปผสมกับกากกาแฟที่อยู่ในชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) หลังจากปล่อยตัวทำลายลงมาถึงถึงสกัดน้ำมันกาแฟ (1) จนหมดแล้ว ปิดวาล์วทั้งหมด แล้วจึงเปิดวาล์ว (8) (26) และ (23) ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งท่อต่อเชื่อมในระบบสกัดแบบหมุนวน แล้วเปิดปั๊มตัวทำลายหมุนวน (10) เพื่อให้ตัวทำลายไหลวนเพื่อสกัดน้ำมันภายในถึงสกัดน้ำมันกาแฟ (1) ดังนั้นในกระบวนการนี้ตัวทำลายจะ ไหลหมุนวนผ่านกากกาแฟซึ่งอยู่ในตะแกรง (7) ด้วยปั๊มตัวทำลาย (10) ใช้เวลาสกัดประมาณ 5-10 นาที ก็
- 10 จะได้น้ำมันกาแฟประมาณ 5-14 %โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดของกากกาแฟ ชนิดของตัวทำลาย และ ขนาดอนุภาคของกากกาแฟ เป็นต้น และได้แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยมวลของ กากกาแฟกับตัวทำลาย (กรณีใช้เฮกเซนเป็นตัวทำลาย) ที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของน้ำมันจากกากกาแฟ (yield of coffee oil) ในรูปที่ 4 ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสกัดน้ำมันกาแฟ ทำการปิดปั๊ม (10) และ ปิดวาล์วทั้งหมด แล้วจึงทำการเปิดวาล์ว (26) และ (24) เปิดปั๊มตัวทำลาย (10) เพื่อปัมน้ำมันปนตัวทำ
- 15 ละลาย (miscella) จากถึงสกัดน้ำมันกาแฟ (1) ไปที่ถังเก็บตัวทำลาย (3) ดังนั้น เพื่อใช้ miscella สกัด น้ำมันจากกากกาแฟซ้ำในกระบวนการสกัดครั้งต่อไป โดยไม่จำเป็นต้องนำ miscella ไปกลั่นแยกตัวทำลาย เนื่องจากผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่าการใช้ miscella เพื่อสกัดน้ำมันจากกากกาแฟซ้ำ โดยทำการเปลี่ยน กากกาแฟใหม่เข้ามาในตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) ก็ยังมีประสิทธิภาพในการสกัดน้ำมันได้ปริมาณน้ำมัน
- 20 ใกล้เคียงเคียงกับตัวทำลายบริสุทธิ์ ซึ่งสังเกตได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการใช้ miscella มาสกัดซ้ำเทียบกับปริมาณน้ำมันจากกากกาแฟที่ได้ (yield) ตามรูปที่ 5 ในขั้นตอนการใช้ miscella เพื่อสกัดน้ำมันวนซ้ำ เริ่มกระบวนการสกัดด้วยตัวทำลาย (miscella) วนซ้ำหลายรอบ หลังจาก เปลี่ยนกากกาแฟใหม่เข้ามาในถึงสกัดน้ำมันกาแฟ (1) โดยขั้นตอนการเปลี่ยนกากกาแฟมีดังนี้ ปลดอุปกรณ์ ล็อคฝาถัง (11) แล้วเปิดฝาด้านบนชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) ออกจากถึงสกัดน้ำมันกาแฟ (1) แล้วจึงนำ
- 25 กากกาแฟใหม่ใส่เข้าไปในตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) อันใหม่ แล้วจึงวางตะแกรงกรอง (7) ลงไปในถึงสกัด น้ำมัน (1) หลังจากนั้นจึงทำเหมือนขั้นตอนการสกัดน้ำมันดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น แต่ใช้ miscella ในถังเก็บ ตัวทำลาย (3) แทนตัวทำลายบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถใช้ miscella สกัดน้ำมันจากกากกาแฟใหม่ได้เรื่อยๆ จนกว่าประสิทธิภาพการสกัดจะลดลง หรือ miscella หลังจากผ่านกระบวนการสกัดตามจำนวนรอบสกัดนั้นๆ มีความสามารถสกัดน้ำมันจากกากกาแฟได้ปริมาณลดลง หรืออาจจะพิจารณาจากจุดคุ้มทุนจาก ราคาต้นทุน
- 30 ของสารเคมี ราคาต้นทุนของกระบวนการแยกตัวทำลายออกจากน้ำมันกาแฟ เนื่องจากต้นทุนของ กระบวนการสกัดด้วยตัวทำลาย จะต้องสูญเสียมากที่กระบวนการแยกตัวทำลาย ดังนั้นถ้าสามารถนำ miscella มาใช้สกัดน้ำมันได้จำนวนหลายๆรอบแล้วนั้น ความเข้มข้นของน้ำมันกาแฟใน miscella จะเพิ่ม มากขึ้น ดังนั้นในขั้นตอนการแยกตัวทำลายออกจากน้ำมันกาแฟด้วยการกลั่นแบบธรรมดา (simple distillation) ก็จะใช้พลังงานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณ miscella ที่ปริมาณเท่ากันแต่มีปริมาณน้ำมัน
- 35 ใน miscella น้อยกว่า ในขั้นตอนการการกลั่นตัวทำลาย เริ่มจากปิดวาล์วทั้งหมด แล้วเปิดวาล์ว (8) (26) (25) (12) ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งท่อต่อเชื่อมระหว่างถึงสกัดน้ำมันกาแฟ (1) กับเครื่องกรองละเอียดกากกาแฟ

หน้า 5 ของจำนวน 7 หน้า

- (5) แล้วจึงเปิดปั๊มตัวทำละลาย (10) เพื่อปั๊ม miscella จากถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) ไปที่เครื่องกรองละเอียดกากกาแฟ (5) ดังนั้น miscella จะไหลผ่านท่อเชื่อมไปที่เครื่องกรองละเอียดกากกาแฟ (5) เพื่อแยกกากกาแฟที่ปนมากับ miscella ดังนั้น miscella หลังจากผ่านขั้นตอนการกรองละเอียดจะไม่มีอนุภาคกากกาแฟปนมาด้วย และ miscella จะไหลลงสู่ถังอุ่นไต้ตัวทำละลาย (29) เมื่อปั๊ม miscella จากถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) จนหมดแล้ว ต้องตรวจสอบว่าในเครื่องกรองละเอียดกากกาแฟ (5) ยังมี miscella อยู่หรือไม่ ถ้ายังมี miscella เหลืออยู่ทำการปิดวาล์วทั้งหมด และเปิดวาล์ว (30) และ (12) ใช้ลมจากถังอัดอากาศ (4) เพื่ออัดอากาศเข้าสู่เครื่องกรองละเอียดกากกาแฟ (5) ผ่านท่อต่อเชื่อมระหว่างถังอัดอากาศ (4) กับเครื่องกรองละเอียดกากกาแฟ (5) หลังจากใช้ลมระบาย miscella ออกจากเครื่องกรองละเอียดกากกาแฟ (5) แล้วนั้น จะไม่มี miscella เหลือในเครื่องกรองละเอียด (5) ทำการปิดวาล์วทั้งหมด หลังจากนั้นต้มน้ำที่อยู่ในหม้อต้มน้ำ (13) ด้วยแหล่งความร้อน (16) แหล่งความร้อนได้มาจากการเผาไหม้ เช่น ก๊าซหุงต้ม ถ่าน และ ฮีตเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำภายในหม้อต้มน้ำ (13) โดยอุณหภูมิของน้ำจะถูกถ่ายเทให้กับหม้อต้มน้ำ (13) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของ miscella ซึ่งอยู่ในถังอุ่นไต้ตัวทำละลาย (29) จะทำให้ตัวทำละลายถึงจุดเดือด โดยใช้หลักการการแยกสารละลายที่ตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยยาก และตัวถูกละลายมีจุดเดือดสูงกว่าตัวทำละลายมาก ในกระบวนการอุ่นไต้ตัวทำละลาย ตัวทำละลายจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอเข้าสู่ท่อต่อเชื่อมระหว่างถังอุ่นไต้ตัวทำละลาย (29) กับเครื่องควบแน่นตัวทำละลาย (6) โดยเครื่องควบแน่นจะทำหน้าที่เปลี่ยนสถานะของตัวทำละลายจากไอเป็นของเหลว ด้วยการใช้ น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไหลสวนทางกับทิศทางการไหลของไต้ตัวทำละลายเหมือนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไป วิธีการควบแน่นตัวทำละลาย คือ ปิดวาล์วทั้งหมดและเปิดวาล์ว (21) ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่งท่อต่อเชื่อมระหว่างถังเก็บน้ำหล่อเย็น (18) กับปั๊มหมุนวนน้ำหล่อเย็น (19) น้ำหล่อเย็นจะถูกปั๊มจากถังเก็บน้ำหล่อเย็น (18) ด้วยปั๊มหมุนวนน้ำหล่อเย็น (19) เพื่อส่งไปที่เครื่องควบแน่นตัวทำละลาย (6) แล้วไหลวนกลับมาที่ถังเก็บน้ำหล่อเย็น (18) ตัวทำละลายของเหลวจากเครื่องควบแน่นตัวทำละลาย (6) จะไหลผ่านท่อต่อเชื่อมระหว่างเครื่องควบแน่นตัวทำละลาย (6) กับถังเก็บตัวทำละลายหลังจากกระบวนการกลั่น (17) เพื่อนำไปใช้ต่อในกระบวนการสกัด โดยทำการปิดวาล์วทั้งหมด และเปิดวาล์วที่ท่อเชื่อม (22) เพื่อปั๊มตัวทำละลายด้วยปั๊มตัวทำละลาย (27) เข้าสู่ถังเก็บตัวทำละลาย (3) หลังจากระบวนการแยกตัวทำละลายออกจาก miscella เสร็จสิ้นแล้ว จะเหลือน้ำมันกาแฟในถังอุ่นไต้ตัวทำละลาย (29) โดยสามารถนำน้ำมันกาแฟออกมาใช้โดยการเปิดวาล์ว (14) ที่ติดตั้งในตำแหน่งท่อต่อเชื่อมระหว่างถังอุ่นไต้ตัวทำละลาย (29) กับภาชนะรับน้ำมันกาแฟ (28) ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องการล้างเครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟสามารถล้างด้วยน้ำแล้วปล่อยให้ น้ำไหลผ่านวาล์วที่ตำแหน่งด้านล่างของถัง โดยปิดวาล์วทั้งหมดและเปิดวาล์ว (8) และ (9) และในส่วนของ การเก็บตัวทำละลายจากถังเก็บตัวทำละลายหลังจากกระบวนการกลั่น (17) ไว้ในภาชนะอื่นๆ โดยไม่จำเป็นต้องปั๊มนำไปเก็บไว้ที่ถังเก็บตัวทำละลาย (3) ก็สามารถทำได้ด้วยการ ปิดวาล์วทั้งหมด และเปิดวาล์ว (15) เพื่อถ่ายตัวทำละลายเก็บไว้ที่ภาชนะอื่นๆ ในส่วนของถังเก็บน้ำหล่อเย็น (18) ได้ติดตั้งวาล์วถ่ายน้ำหล่อเย็น (20) เพื่อถ่ายน้ำหล่อเย็นทิ้งเมื่อต้องการทำความสะอาดถังเก็บน้ำหล่อเย็น

วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

- 35 ตั้งที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

หน้า 6 ของจำนวน 7 หน้า

ข้อถ้อยสิทธิ

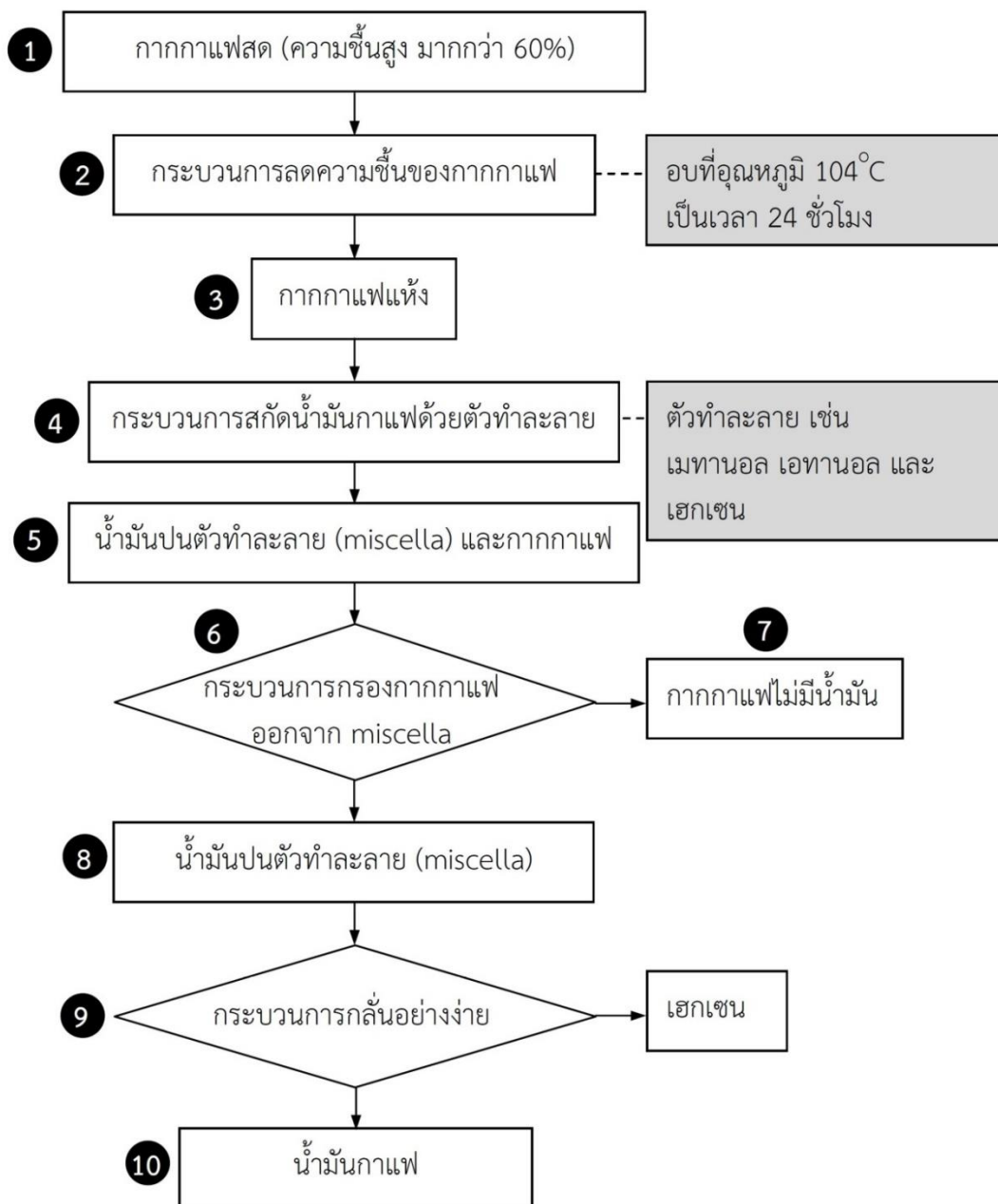
- 5 1. กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปนตัวทำละลายวนซ้ำหลายรอบ ประกอบด้วย ชุดสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวน คือ ชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) ซึ่งวางอยู่ในถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) ทำหน้าที่กรองกากกาแฟให้หลุดลอดออกจากถังสกัดน้ำมัน (1) ให้น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้บีมหมุนวน (10) เกิดการอุดตัน บีมหมุนวน (10) สามารถบีมตัวทำละลายผ่านหัวสเปรย์ตัวทำละลาย (2) และตัวทำละลายจะไหลผ่านกากกาแฟที่วางอยู่ในชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) และเพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลายออกจากถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) จึงใช้อุปกรณ์ล๊อค (11) ล็อคฝาถังสกัด
- โดยมีลักษณะพิเศษ คือ
- 10 1. กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวน สามารถใช้ตัวทำละลายวนซ้ำหลายรอบ
2. กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวน สามารถถลันตัวทำละลายกลับคืนได้

หน้า 7 ของจำนวน 7 หน้า

บทสรุปการประดิษฐ์

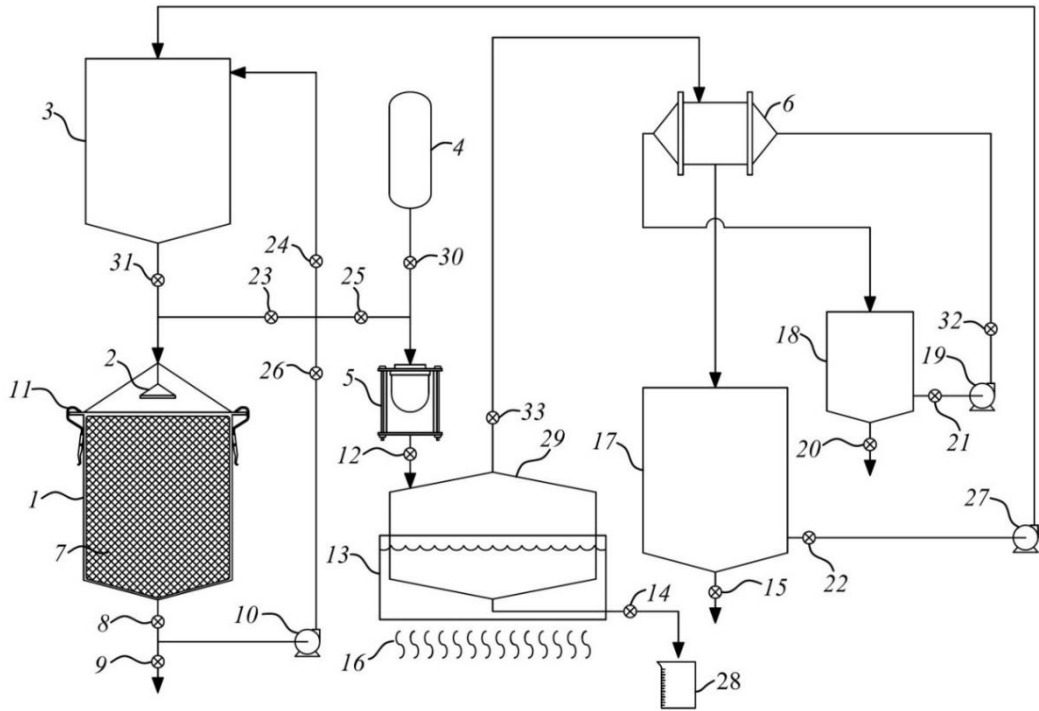
- กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วยน้ำมันปศุสัตว์ทำละลายวนซ้ำหลายรอบ ประกอบด้วย ชุดสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวน คือ ชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) ซึ่งวางอยู่ในถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) ทำหน้าที่กรองกากกาแฟให้หลุดลอดออกจากถังสกัดน้ำมัน (1) ให้น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้บีมหมุนวน (10) เกิดการอุดตัน บีมหมุนวน (10) สามารถบีมตัวทำละลายผ่านหัวสเปรย์ตัวทำละลาย (2) และตัวทำละลายจะไหลผ่านกากกาแฟที่วางอยู่ในชุดตะแกรงกรองกากกาแฟ (7) และเพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลายออกจากถังสกัดน้ำมันกาแฟ (1) จึงใช้อุปกรณ์ล้อยึด (11) ล้อยึดฝาถังสกัด

หน้า 1 ของจำนวน 5 หน้า



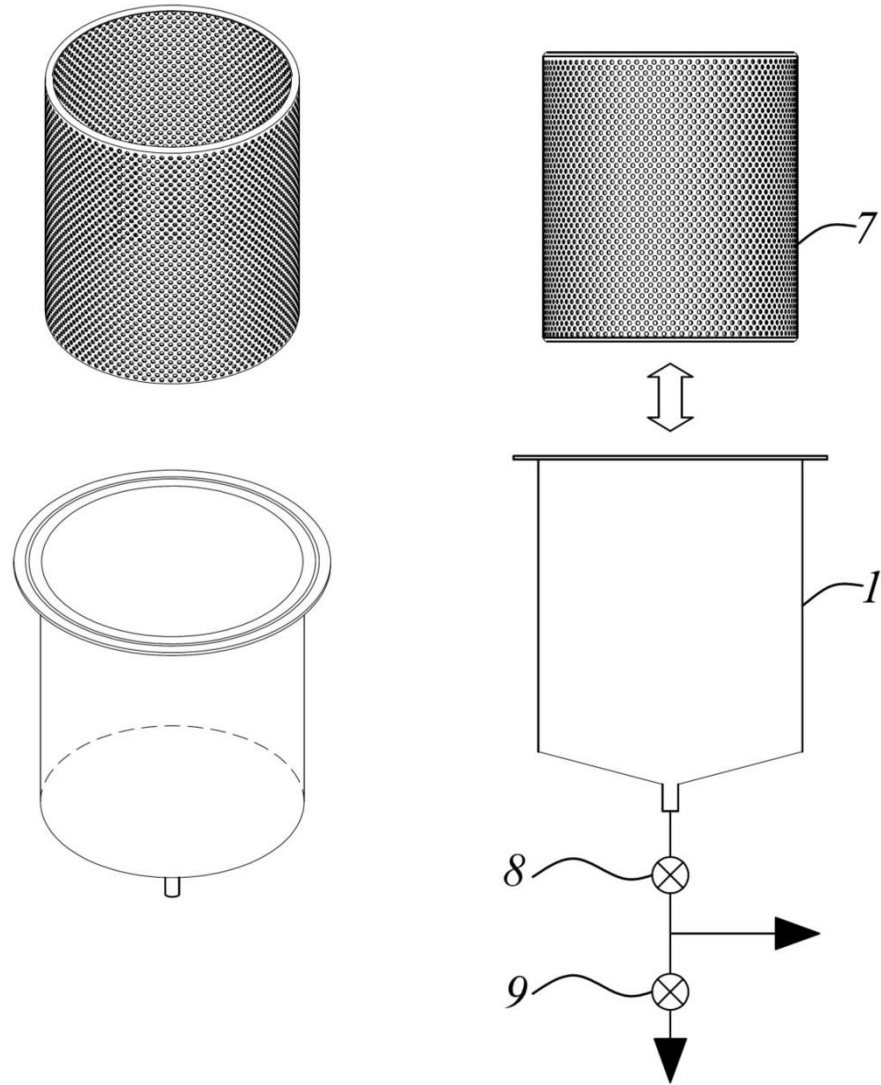
รูปที่ 1

หน้า 2 ของจำนวน 5 หน้า



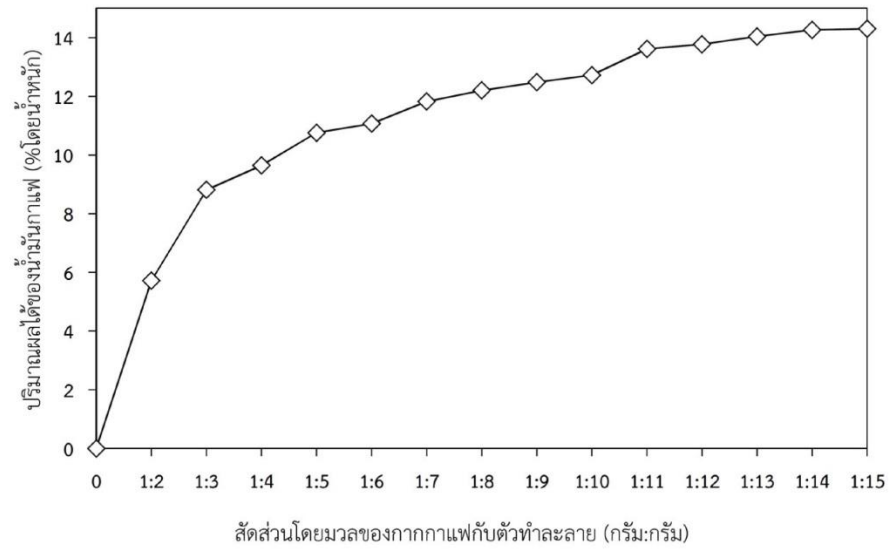
รูปที่ 2

หน้า 3 ของจำนวน 5 หน้า



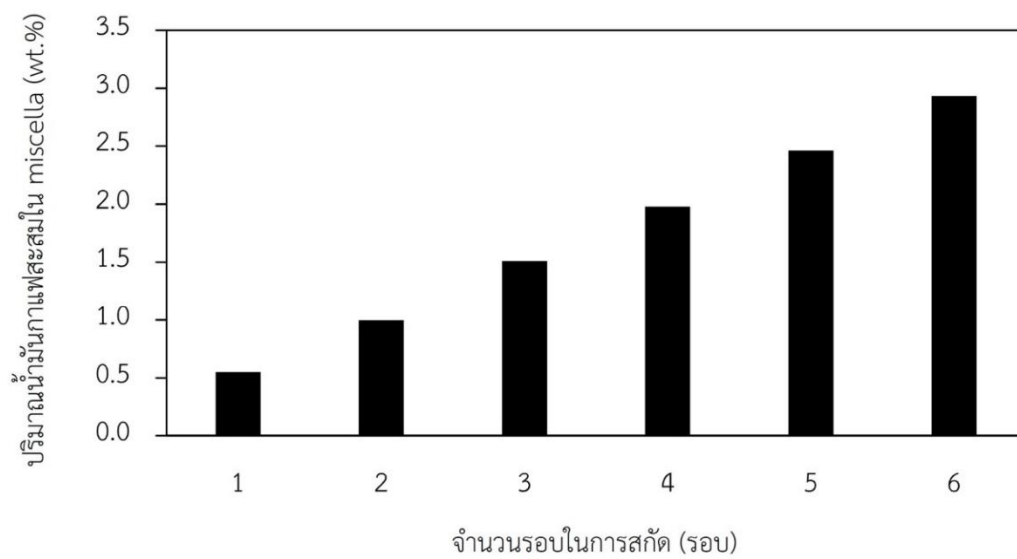
รูปที่ 3

หน้า 4 ของจำนวน 5 หน้า



รูปที่ 4

หน้า 5 ของจำนวน 5 หน้า



รูปที่ 5

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 5

ได้รับคัดเลือกให้เข้าร่วมประกวดสิ่งประดิษฐ์ของโครงการค่านักประดิษฐ์รุ่นใหม่ ประจำปี 2559

ด่วนที่สุด

ที่ วข ๐๐๐๕/๘๗๑๕



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
๑๙๖ พหลโยธิน จตุจักร กทม. ๑๐๙๐๐

๑๒ พฤศจิกายน ๒๕๕๘

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

เรียน ดร.กฤษ สมนึก

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบตอบรับยืนยันการนำผลงานประดิษฐ์คิดค้นเข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการในงาน “วันนักประดิษฐ์”
ประจำปี ๒๕๕๙

ตามที่ ท่านได้เสนอผลงานประดิษฐ์คิดค้น เรื่อง “เครื่องสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแบบหมุนวนด้วย
น้ำมันปศุสัตว์ที่ละลายวนเข้าหลายรอบ” เพื่อขอรับรางวัลโครงการ “รางวัลนักคิดสิ่งประดิษฐ์รุ่นใหม่” ประจำปี
๒๕๕๙ จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) นั้น

ในการนี้ วช. ได้ทำการพิจารณาคัดเลือกในรอบแรก และตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นแล้วเห็นว่า
ผลงานสิ่งประดิษฐ์ของท่านเป็นประโยชน์และมีคุณภาพ วช. จึงขอเชิญท่านนำผลงานสิ่งประดิษฐ์เรื่องดังกล่าว
เข้าร่วมจัดแสดงในงาน “วันนักประดิษฐ์” ประจำปี ๒๕๕๙ ระหว่างวันที่ ๒ - ๖ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๙ ณ Event Hall
102 -103 ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค กรุงเทพฯ เพื่อให้คณะกรรมการฯ ได้ชมการสาธิต 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. - ๑๘.๐๐ น. - ผู้ประดิษฐ์ประจำคูหาของตนเพื่ออธิบายและสาธิตผลงานต่อผู้เข้าชม
นิทรรศการและกรรมการฯ

วันที่ ๖ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๙

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

ทั้งนี้ วช. ขอความอนุเคราะห์ยืนยันการนำผลงานประดิษฐ์ฯ เข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการโดย
สามารถดาวน์โหลดแบบตอบรับยืนยันฯ ได้ที่ <http://rrm.nrct.go.th> และ www.inventorday.nrct.go.th และส่งแบบ
ตอบรับยืนยันฯ ได้ทาง E-mail : Goodidea.nrct@hotmail.com ภายในวันอังคารที่ ๑ ธันวาคม ๒๕๕๘
หากท่านไม่ส่งแบบตอบรับยืนยันฯ ภายในวันที่กำหนด วช. ขออนุญาตถือว่าท่านสละสิทธิ์ในการนำผลงานประดิษฐ์
คิดค้นเข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการครั้งนี้ วช. ขอความกรุณาเบิกจ่ายค่าที่พักในการเดินทางเข้าร่วมจัดแสดงนิทรรศการ
ในครั้งนี้จากหน่วยงานต้นสังกัด

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(นางสาวสุกัญญา ธีระกูรณ์เลิศ)

รองเลขาธิการคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

รักษาการแทน เลขาธิการคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

กองประเมินผลและจัดการความรู้วิจัย

โทร. ๐ ๒๕๖๑ ๒๔๔๕ ต่อ ๒๒๗, ๕๓๐

ผู้ประสานงาน : นางสาวธนิดา พิณศรี

โทรสาร ๐ ๒๕๗๙ ๒๒๘๘

E-mail : Goodidea.nrct@hotmail.com



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายพิชัย เอี้ยวเล็ก
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120023
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

พิชัย เอี้ยวเล็ก และ กฤษ สมนึก “การใช้ประโยชน์จากกากกาแฟเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง” การสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8

4-6 พฤศจิกายน 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,” *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 16, 2015.