



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การศึกษาสภาวะ การออกแบบ และการคำนวณราคาของโรงงานสกัดน้ำมัน จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ The Study of Operating Condition, Process Design and Cost Calculation of Jatropha Kernel Oil Extraction Plants
นามผู้วิจัย	นายอรรถวุฒิ สุนโทย
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุสิทธิ์ ชนะพิมพ์เมธา, D.Eng.)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D.)
หัวหน้าภาควิชา	(รองศาสตราจารย์อภิญา ควงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มทาวิตยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสภาวะ การออกแบบ และการคำนวณราคาของโรงงานการสกัดน้ำมัน
จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

The Study of Operating Condition, Process Design and Cost Calculation of Jatropha Kernel Oil
Extraction Plants

โดย

นายอรรณวุฒิ สุนโท

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2558

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อรรถวุฒิ สุนโทย 2558: การศึกษาสภาวะ การออกแบบ และการคำนวณราคาของ
โรงงานสกัดน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุสิทธิ์ ชนะพิมพ์เมธา, D.Eng. 165 หน้า

งานวิจัยศึกษาสภาวะการสกัดน้ำมันสบู่ดำจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกทำการศึกษาผลของขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่สกัดได้ดีที่สุด ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดงานวิเคราะห์ (Analytical grade) พบว่าขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh ให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันได้สูงสุด ร้อยละ 88.21 ส่วนที่สองทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken โดยปัจจัย 3 ชนิดที่ทำการควบคุมคือ เวลาที่ใช้ในการสกัด (30 – 150 นาที) อัตราส่วนตัวทำละลายเฮกเซนต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ (10:1 – 60:1) และอัตราการกวน (100 – 500 รอบต่อนาที) ภายใต้การควบคุมขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำระหว่าง 40 และ 60 mesh พบว่าสภาวะการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่เหมาะสมคือ เวลาที่ใช้ในการสกัด 82 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายเฮกเซนต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 27.17 มิลลิลิตรต่อกรัม และอัตราการกวน 325 รอบต่อนาที หลังจากนั้นศึกษาผลทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value, NPV) ของแต่ละโครงการ รวมถึงศึกษาผลของปัจจัยของราคาเฮกเซน ราคาอุปกรณ์ ราคาเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ และราคาขายน้ำมันสบู่ดำที่ส่งผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ผลการศึกษาพบว่าโครงการที่ให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุดคือ ที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 581,958,755.27 บาท มีอัตราการตอบแทนภายใน (Internal rate of return, IRR) ร้อยละ 93.39 และระยะเวลาคืนทุน 1.12 ปี ราคาขายน้ำมันสบู่ดำที่ 25.60 บาทต่อกิโลกรัม (ลดลงร้อยละ 20) สามารถยังคงให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกที่ 305,920,390.24 บาท และมีอัตราตอบแทนภายในสูง ร้อยละ 57

Auttawut Soonhoey 2015: The Study of Operating Condition, Process Design and Cost Calculation of *Jatropha* Kernel Oil Extraction Plants. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Anusith Thanapimmetha, D.Eng. 165 pages.

This research aimed to investigate the oil extraction condition of *Jatropha* kernel. The study was divided into 3 parts. The first part studied the best size of the kernel for extraction using hexane AR grade. The result showed that the best size was between 40 and 60 mesh giving the highest extraction of 88.21%. The second part, Box-Behnken design was applied to find the best condition of *Jatropha* oil extraction. There were 3 parameters including extraction time (30 – 150 minutes), ratio of hexane to *Jatropha* kernel (10:1 – 60:1) and agitation rate (100 – 300 rpm). The kernel size was fixed between in the range of 40 and 60 mesh. The optimum condition was found at while 82 minutes, 27.17 ml/g and 325 rpm. Then the last part, the optimum condition obtained from previous part was used in Aspen plus to calculate mass balance of plants at the kernel feed rates of 10,000 30,000 and 50,000 kg/day (using commercial hexane at the ratio of 27.17 L/kg). After that, economy analysis was performed to calculate the net present value of each size of plant. Moreover, sensitivity analysis was studied with varying hexane cost, equipment cost, *Jatropha* kernel price and *Jatropha* oil price. The result shoed that pilot plant at the kernel feed rate of 50,000 kg/day gave the highest NPV value at 581,958,755.27 Baht, internal rate of return (IRR) 93.39% and 1.12 years (Payback period). At *Jatropha* oil price was 25.60 Baht/kg (20% price reduction), it also made NPV and IRR positive at 305,920,390.24 Baht and 57%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญจิตร์ ศรีนพคุณ ที่คอยดูแลให้คำแนะนำ รวมถึง การปรึกษา และแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดการศึกษาวิจัย ขอขอบพระคุณผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. อนุสิทธิ์ ชนะพิมพ์เมธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ช่วยให้คำแนะนำ และช่วยตรวจ แก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ รวมถึงอาจารย์เมธี สายศรีหยุด ที่กรุณาให้คำปรึกษา และ แนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว ที่กรุณา สละเวลาเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำ และแนวคิดที่เป็นประโยชน์ อย่างยิ่งต่อผู้จัดทำ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชีวกระบวนการ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่เอื้อเพื่อ สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรม เคมี รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำ วิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิต และวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ADB)

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัว รุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้ คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และสนับสนุนจนประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

อรรณวุฒิ สุนโทย
ตุลาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	63
อุปกรณ์	63
วิธีการ	64
ผลและวิจารณ์	68
สรุปและข้อเสนอแนะ	96
สรุป	96
ข้อเสนอแนะ	98
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	99
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก การศึกษาปัจจัยขนาดอนุภาคเนื้อในเมล็ดสับปะรดที่มีผลต่อผลได้ของ การสกัด	108
ภาคผนวก ข การออกแบบการทดลอง	116
ภาคผนวก ค หลักการใช้เครื่อง SOXTEC	124
ภาคผนวก ง ตารางสมมูลมวล	132
ภาคผนวก จ การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์	142
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	167

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อสบูดำ	7
2	การวิเคราะห์กรดไขมันน้ำมันเมล็ดสบูดำ	7
3	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความมีขี้ของตัวทำละลาย	11
4	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุต่าง ๆ	11
5	ค่าประมาณของค่าวิกฤติสำหรับค่า R_p	26
6	วิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกทางเดียว	31
7	ตารางทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ	35
8	การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken แบบ 3 ปัจจัย	40
9	ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดในการสกัดน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดสบูดำ	65
10	ปัจจัยที่ทำการศึกษาด้วยการติดตามผลเปลี่ยนแปลงของมูลค่าปัจจุบันสุทธิและจุดคุ้มทุน	67
11	การแสดงผลปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบูดำขนาดต่าง ๆ	68
12	ค่าสัมประสิทธิ์ และค่า p -value ของสถานะการสกัดน้ำมันสบูดำที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken	76
13	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสถานะการสกัดน้ำมันสบูดำ	76
14	การเปรียบเทียบปริมาณร้อยละของการสกัดน้ำมันสบูดำจากการทำนาย และจากการทดลองที่สกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้า	79
15	องค์ประกอบเนื้อในเมล็ดสบูดำ	81
16	องค์ประกอบของเฮกเซนเกรดการค้า	81
17	แสดงผลปริมาณสารนำเข้าและสารออกที่สำคัญของการสกัดน้ำมันสบูดำที่ 10,000 กิโลกรัม	82
18	แสดงผลปริมาณสารนำเข้าและสารออกที่สำคัญของการสกัดน้ำมันสบูดำที่ 30,000 กิโลกรัม	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	แสดงปริมาณสารนำเข้าและสารออกที่สำคัญของการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่ 50,000 กิโลกรัม	87
20	ผลการคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมดของขนาดโรงงานต่าง ๆ	90
21	ผลการคำนวณต้นทุนในการผลิตของโรงงานขนาดต่าง ๆ	
22	ผลการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานขนาดต่าง ๆ	91
ตารางผนวกที่		
ก1	ความชื้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ	109
ก2	ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ขนาดมากกว่า 25 mesh (ASTM E11)	109
ก3	ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ขนาดระหว่าง 25 และ 40 mesh	110
ก4	ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh	110
ก5	ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ขนาดน้อยกว่า 60 mesh	111
ก6	ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดมากกว่า 25 mesh	112
ก7	ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดระหว่าง 25 และ 40 mesh	112
ก8	ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh	113
ก9	ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดน้อยกว่า 60 mesh	113
ข1	จำนวนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken เมื่อปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 3 ปัจจัย	117

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
ข2	ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ออกจากเนื้อในเมล็ดขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh ซึ่งสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้า	118
ข3	จำนวนปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ครั้งที่ 1	119
ข4	จำนวนปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ครั้งที่ 2	120
ข5	จำนวนปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ครั้งที่ 3	121
ก1	ตัวอย่างที่จะนำมาผ่านกระบวนการ Hydrolysis	126
ก2	ข้อมูลแสดงความสามารถของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน	129
ง1	การสมมูลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ออกจากเนื้อในเมล็ดสบู่อุปกรณ์ขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวัน	133
ง2	การสมมูลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ออกจากเนื้อในเมล็ดสบู่อุปกรณ์ขนาด 30,000 กิโลกรัมต่อวัน	135
ง3	การสมมูลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ออกจากเนื้อในเมล็ดสบู่อุปกรณ์ขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวัน	138
จ1	การประเมินราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัดโรงงานขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวัน	143
จ2	การประเมินราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัดโรงงานขนาด 30,000 กิโลกรัมต่อวัน	145
จ3	การประเมินราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัดโรงงานขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวัน	146
จ4	การคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	147
จ5	การคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานขนาด 30,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	149
จ6	การคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	150

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ7 ต้นทุนหมุนเวียนที่ใช้ในการผลิตของโรงงานขนาด 10,000 กิโลกรัม ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	152
จ8 ต้นทุนการผลิตทั้งหมดของโรงงานขนาด 10,000 กิโลกรัม ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	153
จ9 ต้นทุนหมุนเวียนที่ใช้ในการผลิตของโรงงานขนาด 30,000 กิโลกรัม ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	154
จ10 ต้นทุนการผลิตทั้งหมดของโรงงานขนาด 30,000 กิโลกรัม ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	155
จ11 ต้นทุนหมุนเวียนที่ใช้ในการผลิตของโรงงานขนาด 50,000 กิโลกรัม ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	156
จ12 ต้นทุนการผลิตทั้งหมดของโรงงานขนาด 50,000 กิโลกรัม ด้วยเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม	157
จ13 รายละเอียดของพนักงานที่ถูกจ้างในรายเดือน	158
จ14 รายละเอียดของพนักงานที่ถูกจ้างในรายวัน	159
จ15 การคำนวณกระแสเงินสดรายปี และมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวัน	161
จ16 การคำนวณกระแสเงินสดรายปี และมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานขนาด 30,000 กิโลกรัมต่อวัน	163
จ17 การคำนวณกระแสเงินสดรายปี และมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวัน	165

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	รูปร่าง และส่วนประกอบของเมล็ดสบู่ดำ	6
2	ขั้นตอนการสกัดน้ำมันรำข้าวด้วยตัวทำละลาย	10
3	Power correlation for six-bladed, flat-blade with no vortex	16
4	ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงของเวลาต่าง ๆ บนของแข็งขนาด $L < x < L_0$	18
5	ฮิสโตรแกรมแสดง คะแนน IQ ที่ดี	23
6	กราฟปกติของส่วนค้ำจากการทดลอง	32
7	กราฟส่วนค้ำกับลำดับการทดลอง	33
8	กราฟส่วนค้ำกับค่าทำนายผลการทดลอง	33
9	พื้นผิวตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ	38
10	การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken แบบ 3 ปัจจัย	41
11	รูปแบบของหอสกัดจากการจำลองโครงสร้าง	42
12	การติดตั้งหอสกัดแบบตัวทำละลายที่ใช้ในปัจจุบัน	43
13	กระบวนการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองด้วยตัวทำละลาย	44
14	ขั้นตอนการประเมิน โครงการ โดยใช้โปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer	46
15	แสดงการศึกษาขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำ	69
16	สถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยของประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำ	71
17	การกระจายตัวของส่วนตกค้าง	73
18	การกระจายตัวในแผนภูมิฮิสโตรแกรมของส่วนตกค้าง	73
19	การกระจายตัวของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของผลตอบ	74
20	การกระจายตัวของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง	75
21	Input/Output diagram ของกระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ดำ	80
22	กระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่กำลังการนำเข้าเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 10,000 กิโลกรัม ต่อวัน	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	กระบวนการสกัดน้ำมันสบู่อัดที่กำลังการนำเข้าเนื้อในเมล็ดสบู่อัด 30,000 กิโลกรัม ต่อวัน	86
24	กระบวนการสกัดน้ำมันสบู่อัดที่กำลังการนำเข้าเนื้อในเมล็ดสบู่อัด 50,000 กิโลกรัม ต่อวัน	88
25	แผนภูมิของมูลค่าปัจจุบันสุทธิในโรงงานขนาดต่าง ๆ	92
26	ความสัมพันธ์ระหว่างมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และร้อยละที่เปลี่ยนแปลงไปของราคาขาย น้ำมันสบู่อัด ราคาเฮกเซน ราคาเมล็ดสบู่อัด และราคาอุปกรณ์	94
ภาพผนวกที่		
ข1	ปริมาณที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่อัด ครั้งที่ 1	119
ข2	ปริมาณที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่อัด ครั้งที่ 2	120
ข3	ปริมาณที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่อัด ครั้งที่ 3	121
ข4	ตารางแจกแจงค่าปกติ F (F-Test) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95	122
ค1	ขั้นตอนการย่อยด้วยกรด	127
ค2	ขั้นตอนการหาปริมาณไขมัน	131

การศึกษาภาวะ การออกแบบ และการคำนวณราคาของโรงงานสกัดน้ำมัน จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

The Study of Operating Condition, Process Design and Cost Calculation of Jatropha Kernel Extraction Plants

คำนำ

เนื่องจากปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมในปัจจุบันที่มีปริมาณจำกัด ส่งผลทำให้ราคาน้ำมันปิโตรเลียมพุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีความต้องการหาแหล่งพลังงานทดแทน ซึ่งไบโอดีเซลเป็นหนึ่งในทางเลือกของพลังงานทดแทน โดยส่วนใหญ่แล้วไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันจากพืช และไขมันสัตว์ ซึ่งพืชที่นิยมนำมาเป็นวัตถุดิบของไบโอดีเซลได้แก่ ปาล์ม สบู่ดำ เป็นต้น

สบู่ดำเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ในหลายสภาวะอากาศ และสามารถทนต่อสภาพอากาศที่ร้อนจัดได้ดี แต่เนื้อในเมล็ดสบู่ดำมีโปรตีนเคอซินที่เป็นสารพิษ เมื่อรับประทานเข้าไป มีผลกระทบต่อทางเดินหายใจของสิ่งมีชีวิต (นรบดี และ ปิยะเนตร, 2556) จึงทำให้ราคาของน้ำมันสบู่ดำคงที่ และไม่ถูกปลูกอย่างแพร่หลาย แต่กระทรวงพลังงานมีนโยบาย “แปลงดินว่างเปล่าให้เป็นเขื่อนพลัง” ที่ส่งเสริมการปลูกสบู่ดำ (รักษ, 2549) ประกอบกับน้ำมันปาล์มที่เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงทำให้น้ำมันสบู่ดำได้รับความสนใจในการใช้ผลิตไบโอดีเซล

การสกัดน้ำมันออกจากเมล็ดสบู่ดำ สามารถทำได้โดยหลายเทคนิค และเทคนิคที่นิยมใช้คือ เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย พบว่าสามารถสกัดน้ำมันออกจากเมล็ดสบู่ดำได้ในปริมาณที่มากกว่า การสกัดด้วยเทคนิคเชิงกลถึงร้อยละ 15 (ศิริวรรณ, 2551) และตัวทำละลายที่ใช้ยังสามารถ นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลง

ในเทคนิคการสกัดน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวทำละลาย จากงานวิจัยของ นรบดี และ ปิยะเนตร (2556) พบว่าการควบคุมปัจจัย ได้แก่ ชนิดตัวทำละลาย อุณหภูมิในการสกัด อัตราส่วนตัวทำละลาย และเวลาที่ใช้ในการสกัด ส่งผลกระทบบต่อปริมาณน้ำมันสบู่ดำที่สกัด นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่

ควบคุมปัจจัยดังกล่าว ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้การทดลองแบบปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า (One-Factor at a Time) แต่มีงานวิจัยจำนวนไม่มากที่ใช้การออกแบบการทดลอง

ดังนั้นการออกแบบการทดลองเป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูง ที่ได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมปัจจัยของการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ที่พบว่าให้ผลการทดลองที่เหมาะสม และแม่นยำ อีกทั้งยังเป็นการประหยัดทรัพยากรในการวิเคราะห์ เมื่อเทียบกับการทดลองแบบปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า (ไพโรจน์, 2555) และการใช้ประโยชน์จากสถานะเหมาะสมที่ได้ดังกล่าว จึงมีแนวคิดในการนำสถานะมาใช้ในการออกแบบการผลิตโรงงานสกัดน้ำมันสบู่ดำ

โดยปัจจุบันโรงงานสกัดน้ำมันสบู่ดำพบว่ายังไม่มีการผลิตเกิดขึ้นจริง ซึ่งการออกแบบการผลิตด้วยโปรแกรม Aspen plus มีข้อดีช่วยให้ผู้ใช้สามารถออกแบบการผลิต และกำหนดเครื่องมือส่วนต่าง ๆ ของโรงงานการสกัดน้ำมันสบู่ดำดังกล่าว อีกทั้งสามารถเชื่อมโยงกับโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถคำนวณราคาในส่วนต่าง ๆ ของโรงงาน (Aspentech Handbook, 2012) ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการดำเนินการสร้างโรงงานสกัดน้ำมันสบู่ดำในอนาคต

โครงการวิจัยนี้มีการศึกษาสถานะเหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันสบู่ดำ ในเทคนิคสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ด้วยการออกแบบการทดลอง และใช้การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสกัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Soxtec) นอกจากนี้ยังมีการออกแบบการผลิต และวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุน ที่แสดงให้เห็นในความเป็นไปได้ของการสร้างโรงงานสกัดน้ำมันสบู่ดำ

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาสภาวะเหมาะสมต่อการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ
2. ออกแบบและขยายกำลังการผลิตน้ำมันสบู่ดำจากเทคนิคการสกัด ด้วยโปรแกรม Aspen plus และศึกษาผลทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ต่อการลงทุน

ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะเหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันสบู่ดำ ด้วยเทคนิคการสกัด โดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซน และเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือความเร็วรอบในการกววน 100–500 รอบต่อนาที เวลาในการสกัดที่ 30-150 นาที ตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดที่มีอัตราส่วน 10-60 มิลลิลิตรต่อกรัมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ หลังจากนั้นนำมาออกแบบเพื่อขยายกำลังการผลิตน้ำมันสบู่ดำ ในอัตราการป้อน 10,000 30,000 และ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยโปรแกรม Aspen plus นอกจากนี้ยังศึกษาผลการลงทุน ด้วยการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน จากผลที่ได้จากการประเมินราคาด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer ซึ่งใช้ค่า NPV เป็นเครื่องมือในการประเมินผลของแต่ละโครงการ และมีการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความคุ้มค่าโครงการ ได้แก่ ราคาขายน้ำมันสบู่ดำ ราคาเฮกเซน ราคาเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ และราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงาน

การตรวจเอกสาร

1. สบู่ดำกับไบโอดีเซล

การใช้น้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซลจากพืชที่ค้นพบโดยชาวเยอรมันชื่อ Dr. Rudolf Diesel เมื่อปี ค.ศ. 1911 จึงได้มีการตั้งชื่อเพื่อเป็นเกียรติว่า “ เครื่องยนต์ดีเซล ” และในต่อมามีการนำน้ำมันสบู่ดำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลครั้งแรกในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ณ ประเทศมาลี (Mali) แต่ความนิยม และความสะดวกในการใช้น้ำมันจากฟอสซิล ทำให้การใช้น้ำมันจากพืชจำกัดอยู่ในบางประเทศเท่านั้น

หลังจากประสบปัญหาวิกฤตการณ์ของน้ำมันปิโตรเลียมทั่วโลกในช่วงปี ค.ศ.1970 ทำให้มีความสนใจในการศึกษาการนำน้ำมันจากพืชชนิดต่าง ๆ รวมถึงต้นสบู่ดำ มาใช้ประโยชน์กันอย่างจริงจัง (นภคดล, 2550)

ในปัจจุบันมีหลายประเทศทั้งยุโรปและอเมริกา ได้มีการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลอย่างแพร่หลาย โดยประเทศเยอรมันถือเป็นประเทศผู้นำในการนำไบโอดีเซลมาใช้แทนน้ำมันดีเซล และเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพ (Rape seed) ซึ่งได้รับการยอมรับจากผู้ใช้เป็นอย่างดี โดยรัฐบาลเยอรมันได้เข้ามาส่งเสริมการยกเว้นภาษีน้ำมันจึงทำให้ราคาไบโอดีเซลถูกกว่าน้ำมันดีเซลปกติ ซึ่งในปี 2548 ทางประเทศไทย รัฐบาลไทยได้กำหนดงบประมาณระยะยาวเพื่อส่งเสริมการปลูกและจัดหาเมล็ดพันธุ์ 800 ล้านบาท แบ่งเป็น พันธุ์ป่าลัม 600 ล้านบาท และสบู่ดำ 200 ล้านบาท ซึ่งมีกระทรวงการคลังเป็นผู้กำกับประกันความเป็นไปได้ในการพัฒนาสบู่ดำให้เป็นพืชเศรษฐกิจใหม่ สามารถแบ่งเป้าหมายการผลิตต้นสบู่ดำเป็นพลังงานทดแทนใน 2 ระดับ คือ การนำน้ำมันสบู่ดำมาใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตร เพื่อให้เกษตรกรพึ่งพาตนเองได้ และการใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงไบโอดีเซลในรถยนต์ทั่วไป (รักษ์, 2549)

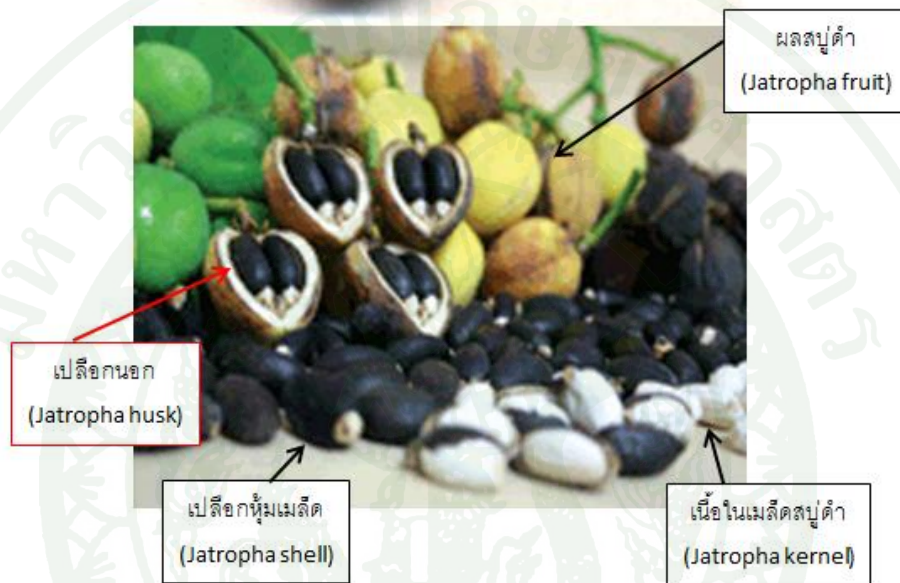
2. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเมล็ดสบู่ดำ

สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่งซึ่งเป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ที่ชาวโปรตุเกสได้นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยในช่วงปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา ปัจจุบันกระทรวงพลังงานได้มีการสนับสนุนการผลิตและการใช้พลังงานทดแทน ซึ่งไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากหลายวัตถุดิบ ในปี พ.ศ. 2555 คิดเป็นปริมาณ 8.5 ล้านลิตร/วัน (กระทรวงพลังงาน, 2555) วัตถุดิบที่ใช้มากที่สุดคือ

น้ำมันปาล์ม ซึ่งมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ รวมถึงน้ำมันปาล์มเป็นพืชที่สามารถบริโภคได้ การนำมาใช้เป็นวัตถุดิบพลังงานส่งผลให้น้ำมันปาล์ม และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มมีราคาสูงขึ้น ด้วยปัญหาการขาดแคลนพลังงาน รวมถึงต้นทุนราคาน้ำมันดีเซลที่ปรับตัวสูงขึ้น ทางกระทรวงพลังงานได้เสนอกลยุทธ์ในการแปลงดินว่างเปล่าให้เป็นเชื้อเพลิง ด้วยการนำผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ผลิตพลังงานทดแทน เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์ม น้ำมัน และสบู่ดำ นอกจากนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงแล้ว ยังสามารถช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกร ทั้งยังใช้พื้นที่ว่างเปล่าให้เกิดประโยชน์และส่วนอื่น ๆ เช่น ลำต้น ก้าน ใบ ยาง เป็นต้น ที่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการทำเชื้อเพลิงชีวมวล และกากสบู่ดำสามารถนำมาทำปุ๋ยได้ (รักษ์, 2549) ดังนั้นสบู่ดำจึงเป็นทางเลือกในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันในเมล็ดสบู่ดำที่อาจช่วยลดมูลค่าของพลังงานทดแทนได้ดียิ่งขึ้น

2.1 เมล็ดสบู่ดำ

รูปร่างเมล็ดของสบู่ดำเป็นแบบรีมีเปลือกหุ้มสีดำ โดยมีเนื้อเยื่ออยู่ภายในเป็นที่สะสมของน้ำมัน และสารจำพวกเคอซิน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ทำให้เกิดพิษทำให้ไม่เหมาะต่อการนำมาเป็นอาหาร โดยเคอซินยังมีผลต่อระบบทางเดินอาหาร และทางเดินหายใจอีกด้วย แต่สบู่ดำพบว่ายังมีประโยชน์โดยการนำไปสกัดน้ำมันที่มีอยู่ในเมล็ด ซึ่งเมล็ดประกอบด้วยเนื้อในเมล็ดสีขาว (Kemel) ประมาณร้อยละ 32 และเปลือกร้อยละ 30-38 ของน้ำหนักเมล็ด ซึ่งในปริมาณน้ำหนัก 100 เมล็ดหนักประมาณ 69.80 กรัมหรือประมาณ 1,000-2,000 เมล็ดต่อกิโลกรัม ขนาดของเมล็ดมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 1.94 เซนติเมตร เมล็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.16 เซนติเมตร เมล็ดแต่ละเมล็ดมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 0.64 กรัม (นภดล, 2550) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 รูปร่าง และส่วนประกอบของเมล็ดสบู่ดำ

ที่มา: Fang (2012)

2.1.1 ส่วนประกอบของเนื้อเมล็ดสบู่ดำ

การตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อสบู่ดำดังตารางที่ 1 ในการวิเคราะห์องค์ประกอบดังกล่าวที่มีการรวมเอาทั้งเปลือก และเนื้อในเมล็ดสบู่ดำซึ่งมีไขมันประมาณร้อยละ 47.25 โปรตีนร้อยละ 24.60 จากแหล่งที่มาของ Akintayo (2004) และสามารถเปรียบเทียบกับแหล่งที่มาของ พินิจ (2552) ที่ปริมาณไขมันอยู่ในช่วงร้อยละ 46.70-59.80 และ โปรตีนร้อยละ 20.20-28.40 อัตราส่วนขึ้นอยู่กับแหล่งที่เพาะพันธุ์สบู่ดำ ส่วนใหญ่บริเวณเปลือกของเมล็ดสามารถ

นำไปใช้ประโยชน์สามารถผลิตคือ Activated carbon ที่เป็นเชื้อเพลิงได้อีกด้วย เนื้อในเมล็ดสบู่ดำมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นซึ่งเนื้อในเมล็ดสบู่ดำมีองค์ประกอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อสบู่ดำ

องค์ประกอบ ¹	ปริมาณ (ร้อยละ)	องค์ประกอบ ²	ปริมาณ (ร้อยละ)
ไขมัน (Crude fat)	47.25 ±1.34	ไขมัน	46.70-59.80
โปรตีน (Crude protein)	24.60±1.40	โปรตีน	20.20-28.40
เส้นใย (Fiber)	10.12±0.52	เส้นใย	0.90-4.20
ความชื้น (Moisture)	5.54±0.20	ความชื้น	3.80-7.80
เถ้า (Ash)	4.50±0.14	เถ้า	3.80-6.40
คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)	7.99		

ที่มา: Akintayo¹ (2004) ; พินิจ² (2552)

2.1.2 องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ

จากการวิเคราะห์กรดไขมันในน้ำมันเมล็ดสบู่ดำพบว่าน้ำมันสบู่ดำมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวปริมาณมาก ดังตารางที่ 2 แสดงว่า มีคุณสมบัติที่ดี ซึ่งน้ำมันมีลักษณะใสที่อุณหภูมิต่ำ ไม่แข็งตัวได้ง่าย สามารถนำน้ำมันนี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี โดยน้ำมันสบู่ดำจะแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ -7.00 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์กรดไขมันน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ

ชนิดกรดไขมัน	องค์ประกอบ (ร้อยละ)
กรดปาล์มมิติกอิมตัว	16.17
กรดสเตียริกอิมตัว	5.11
กรดโอเลอิกไม่อิ่มตัว	44.89
กรดลิโอลิอิกไม่อิ่มตัว	33.83

ที่มา: รัชย์ (2549)

3. การสกัด (Extraction)

การสกัดหมายถึงกระบวนการแยก (Separation) โดยใช้ของเหลวอีกชนิดหนึ่งเป็นตัวทำละลายเพื่อละลายสารที่ต้องการให้ละลายออกมาในตัวทำละลาย (Sangsrichan, 2012) แต่ในอีกความหมายหนึ่งของทางอุตสาหกรรม การสกัดเป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากวัตถุดิบหรือสารผสมโดยอาศัยความสามารถในการละลายของสารที่ต้องการในสารทำละลาย ดังนั้นการสกัดจึงเป็นกระบวนการแยกที่เกี่ยวข้องกับเฟส 2 เฟส โดยเฟสทั้งสองนี้อาจจะเป็นของแข็งกับของเหลว (รัตนา, 2549)

3.1 การสกัดน้ำมันสบู่ดำสามารถสกัดได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

เมล็ดสบู่ดำจะมีปริมาณน้ำมันอยู่ประมาณร้อยละ 55 ซึ่งปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ จะสามารถสกัดออกมาได้มากน้อย ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องมือและวิธีการใช้ในการสกัด โดยสามารถแบ่งวิธีการสกัดน้ำมันวิธีต่าง ๆ ดังนี้

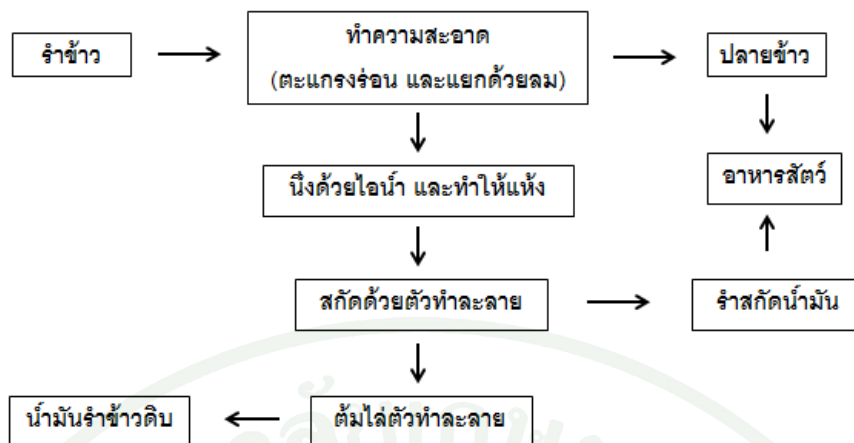
3.1.1 การสกัดด้วยระบบไฮดรอลิก (Hydraulic press) คือ การสกัดด้วยการใช้แรงดันไฮดรอลิก กดไปยังเมล็ดที่ต้องการสกัดในทิศทางแนวนอน เพื่อสกัดน้ำมันออกมาให้ได้ปริมาณมากที่สุด (Shahidi, 2005) ปัจจุบันใช้ระบบอัดเกลียว และสกัดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งใช้แรงงานและพลังงานน้อยกว่ามาก ซึ่งมีเพียงอุตสาหกรรมน้ำมันมะกอก ที่ยังคงใช้การสกัดด้วยระบบไฮดรอลิก เนื่องจากราคาที่สูงและไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อน หรือสารเคมีในการสกัด ในกรณีของเมล็ดสบู่ดำจะได้น้ำมันประมาณร้อยละ 25-30 และมีน้ำมันตกค้างในกากร้อยละ 10-15 (ศิริวรรณ, 2551)

3.1.2 การสกัดด้วยระบบอัดเกลียว (Screw press) คือ การสกัดด้วยการใช้แรงดันเช่นเดียวกับแบบระบบไฮดรอลิก แต่มีการพัฒนาที่ใช้แรงงานและพลังงานน้อยกว่า โดยออกแรงกดในทั้งทิศทางแนวตั้ง และแนวนอนช่วยเพิ่มให้พื้นที่ผิวสัมผัสเมล็ดมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันที่กดไปยังเมล็ดได้ดีขึ้น ซึ่งช่วยให้สกัดได้ต่อเนื่อง และประหยัดพลังงาน (Shahidi, 2005) การแยกด้วยวิธีดังกล่าวขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ ถ้าใช้แรงดันอัดมาก จะได้น้ำมันปริมาณสูง แต่คุณภาพลดลง เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจะไปเร่งปฏิกิริยาเคมีบางอย่าง ส่งผลให้คุณภาพน้ำมันเสื่อมเร็วขึ้น (ศิริวรรณ, 2551) ซึ่งการสกัดน้ำมันสบู่ดำจะได้น้ำมันประมาณร้อยละ 25-30 และมีน้ำมันตกค้างในกากร้อยละ 10-15 โดยเป็นปริมาณเช่นเดียวกับการสกัดด้วยระบบไฮดรอลิก (รักษ์, 2549)

3.1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลาย คือ การสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืชที่บดละเอียด แล้วสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ไขมันละลายไปสู่ตัวทำละลาย จากนั้นนำของผสมดังกล่าวไปสู่กระบวนการแยกตัวทำละลายออกจากรวม (Purified process) โดยสรุปจากการวิเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ได้น้ำมันร้อยละ 34.96 จากเมล็ดรวมเปลือก และร้อยละ 54.68 จากเนื้อในเมล็ด (รักษ์, 2549)

3.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น การสกัดน้ำมันพืชเพื่อใช้ประกอบอาหาร โดยนำวัตถุดิบมาจากเมล็ดของพืชชนิดต่าง ๆ ไปสกัดเพื่อเอาน้ำมัน ได้แก่ เมล็ดทานตะวัน ถั่วเหลือง ปาล์ม ถั่วลิสง ข้าวโพด เมล็ดบัว งา และรำข้าว เป็นต้น ในการสกัดน้ำมันพืชนิยมใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย หลังการสกัดจะได้สารละลายที่มีน้ำมันพืชละลายอยู่ในเฮกเซน จากนั้นนำไปกรองเอากากเมล็ดพืชออก แล้วนำสารละลายไปกลั่นแยกลำดับส่วน เพื่อแยกเฮกเซนจะได้น้ำมันพืช ซึ่งต้องนำไปฟอกสี ดูดกลิ่น และกำจัดสารอื่น ๆ ออกก่อน จึงจะได้น้ำมันพืชสำหรับใช้ปรุงอาหาร ทั้งนี้การสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นวิธีการแยกสารที่ใช้มากในอุตสาหกรรม ซึ่งจะแยกสารที่ต้องการออกจากส่วนต่าง ๆ ของพืชหรือจากของผสม โดยต้องเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดสารที่ต้องการ ทั้งนี้การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตน้ำมันพืช ดังตัวอย่างกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว ดังภาพที่ 2 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันรำข้าวด้วยตัวทำละลาย จะเห็นได้ว่าหลังจากนำรำข้าวมาทำความสะอาดด้วยตะแกรงร่อน และแยกสิ่งเจือปนเปื้อนด้วยลมแล้ว ทำการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน หลังจากต้มไล่ตัวทำละลายจะได้น้ำมันรำข้าวบริสุทธิ์ตามต้องการ (Thai Rice Brand Oil, 2012)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันรำข้าวด้วยตัวทำละลาย

ที่มา: Thai Rice Brand Oil (2012)

3.3 หลักทั่วไปของการเลือกตัวทำละลายที่นำมาใช้ในการสกัด

3.3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constants)

เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) ของวัสดุที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (Polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใด ๆ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยตัวทำละลายในการสกัดน้ำมันพืช นั้นมีค่าที่บ่งชี้ความเหมาะสมในการใช้ตัวทำละลาย ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีค่าใกล้เคียงกัน จะสามารถละลายกันได้ดีขึ้น เช่น จากตารางที่ 4 น้ำมันมีค่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ประมาณ 2.00-3.50 ส่วนเฮกเซน มีค่าเท่ากับ 2.00 ซึ่งค่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก มีความใกล้เคียงกัน โดยตารางที่ 3 และตารางที่ 4 เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อตัวที่ต้องการสกัด จึงพิจารณาค่าจากตารางของตัวทำละลายและสารที่ต้องการสกัดให้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความมีขั้วของตัวทำละลาย

ตัวทำละลาย (Solvent)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
ไม่มีขั้ว (Nonpolar)	1-20
กึ่งมีขั้ว (Semi polar)	20-50
มีขั้ว (Polar)	>50

ที่มา: Orgsoltab (2011)

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุต่าง ๆ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
ABS Resin Pellet	1.50-2.50	Hexane	2.00
Acetone	19.50	Hydrogen Cyanide	95.40
Acetyl Bromide	16.50	Hydrogen Peroxide	84.20
Acrylic Resin	2.70-4.50	Isobutylamine	4.50
Air	1.00	Lime, shell	1.20
Alcohol, Industrial	16.00-31.00	Marble	8.00-8.50
Alcohol, Isopropyl	18.30	Melamine Resin	4.70-10.20
Ammonia	15.00-25.00	Methane, Liquid	1.70
Aniline	5.50-7.80	Methanol	33.60
Aqueous Solutions	50.00-80.00	Mica, White	4.50-9.60
Ash (fly)	1.70	Milk, Powdered	3.50-4.00
Bakelite	3.60	Nitrobenzene	36.00
Barley Powder	3.00-4.00	Neoprene	6.00-9.00
Benzene	2.30	Nylon	4.00-5.00
Benzyl Acetate	5.00	Oil, For Transformer	2.20-2.40
Butane	1.40	Oil, Paraffin	2.20-4.80
Cable Sealing Compound	2.50	Oil, Peanut	3.00
Calcium Carbonate	9.10	Oil, Petroleum	2.10

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุต่าง ๆ (ต่อ)

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
Carbon Tetrachloride	2.20	Oil, Soybean	2.90-3.50
Cellulose	3.20-7.50	Paint	5.00-8.00
Cement	1.50-2.10	Paraffin	1.90-2.50
Chlorine, Liquid	2.00	Perspex	3.20-3.50
Ethanol	24.00	Polyamide (Nylon)	2.50
Ethyl Bromide	4.90	Polycarbonate	2.90
Ethylene Glycol	38.70	Polyester Resin	2.80-8.10
Flour	2.50-3.00	Polyethylene	2.30
Freon TM R22,R502 liq.	6.10	Polypropylene	2.00-2.30
Gasoline	2.20	Polystyrene	3.00
Glass	3.10-10.00	Polyvinyl Chloride	2.80-3.10
Glass, Raw Material	2.00-2.50	Resin	
		Porcelain	4.40-7.00

ที่มา: Orgsoltab (2011)

ตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดอย่างแพร่หลาย ได้แก่ น้ำ เบนซีน อีเทอร์ โทลูอิน และเฮกเซน ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืชจากเมล็ด หรือส่วนที่ให้น้ำมัน เฮกเซนเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (รัตน, 2549) หลังการสกัดจะได้สารละลายที่มีน้ำมันพืชละลายอยู่กับเฮกเซน จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวไปแยกเอาเฮกเซนออก การเลือกตัวทำละลาย นอกจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกันแล้ว อีกทั้งต้องอาศัยคุณสมบัติที่ดีในการเลือกเพิ่มเติมอีกดังต่อไปนี้

3.3.2 เกณฑ์ของคุณสมบัติที่ดีเพิ่มเติมในการเลือกตัวทำละลาย

3.3.2.1 ตัวทำละลายที่ดีต้องละลายสารที่ต้องการสกัดได้ดี และสามารถกำจัดได้ไม่ยุ่งยาก เพื่อให้สกัดสารที่ต้องการออกมาและแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย (Wolf, 1969)

3.3.2.2 ตัวทำละลายที่ดีจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการสกัด เพราะทำให้เกิดสารร่วมที่ไม่ต้องการ ส่งผลทำให้ผลผลิตลดลง เช่น ตัวทำละลายเอสเทอร์ถูกไฮโดรไลซิสโดยกรดแก่หรือสารละลายเบส ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาร่วมทั้งแอลกอฮอล์และกรด ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ลดลง (Wolf, 1969)

3.3.2.3 ในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายในการแยกสี ตัวทำละลายจะต้องไม่มีสี กรณีต้องการแยกกลิ่น ตัวทำละลายต้องไม่มีกลิ่น เพื่อให้แยกตัวทำละลาย และสารที่ต้องการสกัดออกได้โดยง่าย

3.3.2.4 ตัวทำละลายที่ดีต้องไม่มีพิษ มีจุดเดือดต่ำ ซึ่งจะทำให้แยกตัวออกจากสารที่ต้องการสกัดได้ง่าย และไม่เกิดการปนเปื้อนในกระบวนการอื่น ๆ ในอุตสาหกรรม (King, 1980)

3.3.2.5 ตัวทำละลายที่ดีจะไม่ละลายปนเป็นเนื้อเดียวกับสารที่ต้องการสกัด จึงจะสามารถแยกออกได้โดยง่าย (กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์แม่ค, 2555)

3.3.2.6 ตัวทำละลายที่ดีต้องมีราคาถูก กรณีที่แพงจนเกินไปจะทำให้ผลผลิตที่ได้มีมูลค่าสูง จึงไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน

3.3.2.7 ตัวทำละลายในการสกัดที่ดีในอุตสาหกรรม ควรที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต

3.3.2.8 ตัวทำละลายในการสกัดที่ดี ไม่ควรเกิดภาวะเสถียรในรูปแบบอิมัลชัน (Emulsion) ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกระหว่างตัวทำละลาย และผลิตภัณฑ์ได้ยาก

3.3.2.9 ตัวทำละลายในการสกัดที่ดีในอุตสาหกรรมควรมีความหนืดต่ำ เพื่อให้การเทถ่าย หรือผ่านจากปั๊มได้ง่าย (King, 1980)

3.4 ประโยชน์ของการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ประโยชน์ของสารสกัดด้วยตัวทำละลาย คือ สามารถแยกสารออกจากของผสมที่ได้จากการสังเคราะห์ หรือจากธรรมชาติทั้งในพืช และสัตว์ รวมทั้งสถานะที่เป็นทั้งของเหลว และของแข็ง อีกทั้งมีราคาถูกในการผลิต และได้ผลผลิตออกมาในปริมาณมาก ซึ่งทำให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุน ตัวอย่างประโยชน์ของการสกัดด้วยตัวทำละลายมีดังนี้

3.4.1 ใช้สกัดน้ำมันพืชจากเมล็ดพืช เช่น น้ำมันงา ถั่ว ปาล์ม นุ่น บัว เป็นต้น การใช้ประโยชน์ของน้ำมันพืชแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับสัดส่วน และชนิดของกรดไขมัน ที่เป็นองค์ประกอบและเป็นลักษณะเฉพาะของพืชแต่ละชนิด กรดไขมันบางชนิดอาจใช้ทดแทนกันได้ หรือนำไปผ่านกรรมวิธีบางอย่าง ให้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน แต่น้ำมันพืชบางชนิดมีคุณสมบัติพิเศษ ซึ่งต้องนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะอย่างเท่านั้น โดยในการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการบีบชนิดเชิงกล มีการเปรียบเทียบพบว่า ข้อดีของการสกัดด้วยตัวทำละลาย คือ ต้นทุนในการผลิตน้ำมันมีราคาต่ำกว่า ในด้านอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมัน (Shahidi, 2005) รวมถึงปริมาณน้ำมันที่ได้ออกมามีปริมาณสูงกว่า เนื่องจากการผลิตน้ำมันพืชด้วยการบีบเชิงกลจะมีน้ำมันหลงเหลืออยู่ในกากที่ปริมาณมากกว่า (พงษ์ศิริ และ วารุณี, 2555) และพบว่านอกจากการใช้พืชน้ำมันเป็นวัตถุดิบในการสกัดน้ำมันแล้ว ส่วนที่เหลืออยู่ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้อีก เช่น เมล็ดถั่วเหลือง หลังจากนำไปสกัดน้ำมันออกแล้ว กากที่เหลือมีโปรตีนในปริมาณสูง นำไปใช้เป็นอาหารคน และสัตว์ได้ (สารานุกรมไทยฉบับเยาวชน, 2555)

3.4.2 สกัดสารมีสีออกจากพืช คุณประโยชน์จากอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม สามารถสกัดสาร Antioxidant ออกมาได้หลายชนิด ตัวอย่างเช่น แลโรทีนอยด์ วิตามินอี (ในรูป Tocopherol และ Tocotrienol) Phytosterols และสารจำพวก Phenolic Compounds (Edem, 2002) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการต่อต้านอนุมูลอิสระ และมีคุณสมบัติช่วยป้องกันโรคต่างๆ

3.4.3 ใช้สกัดน้ำมันหอมระเหยออกจากพืช เมื่อได้น้ำมันหอมระเหยจากการสกัดดังกล่าว ต้องนำไปแยกโดยการกลั่นเอาตัวทำละลายออก แต่วิธีนี้ไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดเนื่องจากมีตัวทำละลายปนอยู่ เมื่อเวลาใช้งานน้ำมันหอมระเหยดังกล่าวจึงอาจทำให้ระคายเคือง (Aromahub, 2006)

3.4.4 ใช้สกัดยาออกจากสมุนไพร สามารถทำได้โดยนำชิ้นส่วนของสมุนไพรที่มีองค์ประกอบของตัวยา ซึ่งสามารถทำได้โดยหลายเทคนิค เช่น Maceration percolation soxhlet extraction และ Liquid-liquid extraction เป็นต้น (วันดี, 2541)

3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัด

การสกัดเป็นกระบวนการที่อาศัยการถ่ายเทมวล และการแยกสารสกัดที่ต้องการออกจากตัวทำละลาย รวมถึงอาศัยกระบวนการสัมผัสสมดุล (Contact equilibrium process) ที่ตัวทำละลายสัมผัสกับวัตถุดิบ แล้วเกิดการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัตถุดิบมายังตัวทำละลายจนกระทั่งถึงจุดสมดุล (รัตน, 2549) ซึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดต้องอาศัยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

3.5.1 อัตราส่วนของตัวทำละลาย เมื่อตัวทำละลายมีอัตราส่วนมาก จะเกิดการสกัดในปริมาณมาก เนื่องจากโอกาสที่ตัวทำละลายจะแพร่เข้าไปในเฟสของแข็ง เพื่อละลายตัวถูกละลายออกมา และตัวถูกละลายจะแพร่ออกมาอยู่ในตัวทำละลายจนเกิดสมดุล ซึ่งโอกาสของการแพร่มีมากกว่าเมื่อเทียบกับตัวทำละลายที่อัตราส่วนต่ำ (รัตน, 2549)

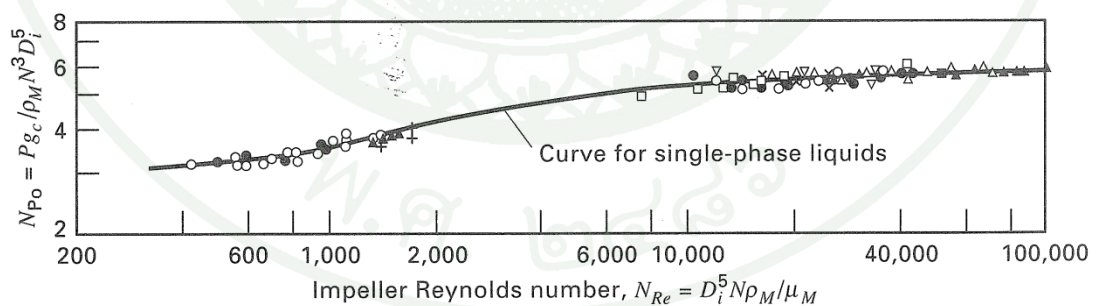
3.5.2 พื้นที่ผิวสัมผัส ในการสกัดของแข็งที่พื้นผิวสัมผัสมากขึ้น จะสามารถสกัดได้ดีขึ้น เนื่องจากมีโอกาสระหว่างของแข็งและตัวทำละลายสัมผัสกันมากขึ้น ช่วยให้การแพร่ขององค์ประกอบตัวทำละลายไปยังของแข็ง (Diffusivity in solid, D_{eff}) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงสามารถลดระยะเวลาในการสกัดลดลงได้ ซึ่งการลดขนาดนอกจากช่วยการแพร่ของตัวทำละลายได้ดีแล้ว ยังสามารถช่วยลดระยะทาง และจำนวนผนังเซลล์ที่กั้นระหว่างตัวทำละลายกับชั้นที่มีน้ำมันอยู่ในกรณีที่ต้องการสกัดน้ำมันพืช (Shahidi, 2005) แต่ในกรณีที่มีขนาดเล็กจนไม่เกิดการสกัดได้ดีขึ้น เนื่องจากการสกัดเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ที่เกิดจากความเข้มข้นของตัวทำละลายภายนอก และภายในมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงไม่คุ้มค่าในการลดขนาดเกินจำเป็น ซึ่งต้องศึกษาขนาดที่เหมาะสมในการสกัด (Seader and Henley, 1998)

3.5.3 อุณหภูมิ การที่อุณหภูมิของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการสกัดเพิ่มขึ้น และทำให้โมเลกุลของสารในระบบจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น โดยการเคลื่อนที่ของตัวทำละลายผ่านไปยังตัวสกัดที่ต้องการดียิ่งขึ้น เนื่องจากการลดลงของความหนืดตัวทำละลาย (รัตน, 2549) แต่การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงเกินไป เช่น เฮกเซนมีช่วงจุดเดือด 67-70 องศาเซลเซียสเป็นตัวทำละลาย เมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิสูงเกินจุดเดือด ในทางอุตสาหกรรม ตัวทำละลายจะเกิดการระเหย ส่งผลต่อการลดลงของตัวทำละลาย และเกิดการสะสมความดัน ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายในการสกัดได้ แต่ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำเกินไป จะทำให้การสกัดใช้เวลานานมากยิ่งขึ้น จึงต้องเลือกอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการสกัด (Shahidi, 2005)

3.5.4 ชนิดของตัวทำละลาย มีตัวทำละลายหลายชนิดที่ใช้ในการสกัดน้ำมันซึ่งตัวทำละลายแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของเมล็ดพืช โรงงานผลิตน้ำมันพืช โดยทั่วไปนิยมเลือกใช้เฮกเซนซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับน้ำมัน จึงละลายน้ำมันได้ดี (ชรณินทร์, 2549)

3.5.5 ความเร็วรอบการกวน การเพิ่มการกวนเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ และยังเป็น การเพิ่มเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ซึ่งช่วยการผสมกันระหว่างตัวทำละลายและของแข็งที่ต้องการสกัด โดยทำให้ประสิทธิภาพของการสกัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วจนถึงระดับหนึ่ง จะแสดงถึงประสิทธิภาพการกวนที่ไม่เพิ่มขึ้น (Power correlation) (Seader and Henley, 1998) จากภาพที่ 3 เป็นกรณีศึกษาของ (Laity and Treybal, 1963) ที่แสดงถึงการผสมกันของ Liquid-liquid extraction ที่การเพิ่มของ Re มีส่วนทำให้ Power correlation มีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่ในตอนท้าย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการผสมกันได้ดีขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่เป็นเฟสเดียวกัน แต่ใน Solid-liquid extraction ไม่จำเป็นต้องมีการผสมกันจนเป็นเฟสเดียว แต่ต้องการให้เกิดการแพร่ของตัวทำละลายไปยังของแข็งได้ดีเท่านั้น โดยความเร็วรอบการกวนจึงต้องมีค่าที่เหมาะสมจึงจะเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดได้ดี



ภาพที่ 3 Power correlation for six-bladed, flat-blade with no vortex

ที่มา: Laity and Treybal (1963)

3.5.6 เวลาที่ใช้ในการสกัด การสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำมันที่ได้เมื่อเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบต้องใช้เวลานานพอสมควร เพื่อให้ตัวทำละลายสามารถสกัดเอาน้ำมันออกมาให้ได้มากที่สุด โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง (ชมพกา, 2549) ซึ่งอาศัยเวลาที่นานมากพอที่ตัวทำละลายจะสามารถซึมผ่านของแข็งที่ต้องการสกัด โดยในทางอุตสาหกรรมเวลาที่ใช้ในการสกัดไม่เพียงแต่เป็นเวลาในตัวทำละลาย และของแข็งสัมผัสกันเท่านั้น ยังรวมถึงเวลาที่ผ่านตัวทำละลายลงไปยังเครื่องสกัด และเวลาที่ล้างหรือระบายตัวทำละลายออก ซึ่งเวลาที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัด และช่วยลดปริมาณน้ำมันที่คงเหลือในกากให้เหลือน้อยที่สุด (Shahidi, 2005)

นอกจากปัจจัยดังกล่าวที่สามารถอธิบายถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัดแล้ว ยังสามารถอธิบายด้วยกฎของ Fick (Fick's law) ตามสมการ (1) ดังต่อไปนี้

$$\frac{N}{A} = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

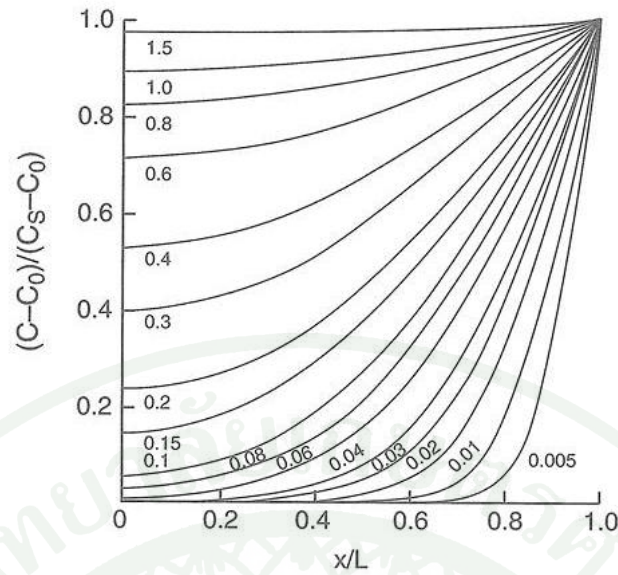
โดยที่ N/A คือ อัตราการถ่ายเทมวล
 D คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนของตัวทำละลายผ่านเยื่อหุ้มเซลล์บรรจุน้ำมัน
 dC คือ ความเข้มข้นของตัวทำละลายที่เปลี่ยนแปลงไป
 dx คือ ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ที่บรรจุน้ำมัน ที่สามารถลดได้จากการลดพื้นที่ผิวสัมผัส

และสามารถปรับเปลี่ยนสมการดังกล่าวเพื่ออธิบายเกี่ยวกับปัจจัยของเวลาในการสกัด และความเร็วรอบของการกวนในเทอมของเลขเรโนลด์ดังสมการ (2)

$$Fo_m = \frac{Dt}{L^2} \text{ หรือ } \frac{Dt}{R^2} \quad (2)$$

โดย Fo_m คือ เลขฟูเรียร์ที่เกี่ยวข้องในเทอมของเลขเรโนลด์
 t คือ เวลาที่ใช้ในการสกัดน้ำมัน
 D คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนของตัวทำละลายผ่านเยื่อหุ้มเซลล์บรรจุน้ำมัน
 L หรือ R คือ ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์หรือรัศมีของของแข็งที่ต้องการสกัด

โดยสมการดังกล่าวจะสามารถเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลจากภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงของเวลาต่าง ๆ บนของแข็งขนาด $L < x < L_0$ โดยที่ความเข้มข้นของสารละลาย (Uniform concentration) เป็น C_0 และ C_s คือความเข้มข้นพื้นผิว (Surface concentration)

ที่มา: Basmadjian (2007)

4. การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

การออกแบบการทดลองเป็นการกำหนดรูปแบบการทดลองที่เหมาะสมในการศึกษาระบบที่สนใจ โดยผลจากการทดลองตามการออกแบบดังกล่าว จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางสถิติ ซึ่งการใช้งานโดยทั่วไปจะพบในแขนงงานวิจัยทางการแพทย์ วิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม การแพทย์ สังคมศาสตร์ และทางวิศวกรรมศาสตร์ ส่วนสำคัญของการออกแบบการทดลองได้มีการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการกำหนดปัจจัยที่ควบคุมได้ ซึ่งจะช่วยในการประเมินผลการทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก และการกำหนดช่วงของการออกแบบ โดยสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 3 ส่วน (ประไพศรี และ พงษ์ชนัน, 2551) คือ การออกแบบระบบ เป็นการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์มากำหนดค่าเริ่มต้นของลักษณะทางคุณภาพที่ต้องการ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ เป็นการกำหนด และระบุค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ต้องการ และการออกแบบค่าพิกัดเพื่อ เป็นการกำหนดช่วงเพื่อที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตที่จะทำให้คุณภาพทางการผลิตสูง

4.1 หลักการสำคัญที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

4.1.1 การทดลองซ้ำ (Replication)

การทดลองซ้ำ คือการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันมากกว่าหนึ่งครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำ และความถูกต้องของการทดลอง การทดลองซ้ำดังกล่าวจะช่วยทำให้ผู้ทดลองสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดของการทดลอง เพื่อใช้ในการประเมินค่าความแปรปรวนของผลการทดลอง อีกทั้งยังกำจัดความคลาดเคลื่อน และอิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ ที่มีต่อปัจจัย ซึ่งสามารถใช้ในการเปรียบเทียบผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ มากพอที่จะยอมรับว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อค่าการทดลองจริง ไม่ใช่เพียงแต่เกิดจากความผิดพลาดของการทดลอง (ไพโรจน์, 2555)

4.1.2 การสุ่ม (Randomization)

การสุ่มการทดลองจะช่วยให้ความผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ รวมถึงการให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งนำไปสู่การทดลองด้วยโอกาสและขนาดเท่า ๆ กัน นอกจากนี้ข้อกำหนดเบื้องต้นในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ มักกำหนดว่าข้อมูล และความผิดพลาดในการทดลอง จะต้องเป็นปัจจัยที่มีการแจกแจงสุ่มอย่างอิสระ (Independently distributed random variables) หรือการกระจายตัวอย่างทั่วถึงสมดุล และสุ่มมาจากกลุ่มที่มีการแจกแจงปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่

4.1.3 การบล็อก (Blocking)

เป็นวิธีที่สามารถควบคุมปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการวัดค่าภายในระบบ เช่น วัตถุดิบจากแหล่งที่มาที่ต่างกัน ผู้ผลิตคนละชนิด รวมถึงสภาพแวดล้อมในการเลี้ยงเชื้อที่ต่างกัน (Hinkelmann and Kempthorne, 1994) ซึ่งวิธีดังกล่าวจะช่วยให้การทดลองได้ง่ายขึ้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวยังมีผลช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลการทดลอง ด้วยการลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

4.2 รูปแบบในการศึกษาการออกแบบการทดลอง

4.2.1 กำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ในการทดลอง

การกำหนดปัญหาของการทดลอง ควรกำหนดให้ชัดเจน เข้าใจง่ายและเป็นรูปธรรม รวมถึงต้องรู้ว่าการศึกษากการทดลองแบบไหน ขึ้นตอนอย่างไร และตัวชี้วัด หรือการวัดผลของการทดลองเป็นอย่างไร รวมถึงควรมีการศึกษาข้อมูลเพียงพอ ก่อนที่จะกำหนดขอบเขต และวัตถุประสงค์ ซึ่งจะช่วยให้การกำหนดปัญหา และวัตถุประสงค์ได้ง่าย ครอบคลุมปัญหามากยิ่งขึ้น

4.2.2 ศึกษาความสามารถของระบบการวัดผลตอบ

ความสามารถในการวัดผลตอบคือ การคำนึงถึงเครื่องมือ และความสามารถของผู้วัดผล ซึ่งอาจรวมไปถึงมาตรฐานของเครื่องวัดต่าง ๆ โดยที่เครื่องมือดังกล่าวต้องมีการบำรุงรักษา และเทียบมาตรฐานเพื่อให้เครื่องมือที่นั้นอยู่ในสภาพที่ดีพร้อมใช้งานอยู่เสมอ

4.2.3 เลือกปัจจัย ช่วง และระดับในการศึกษา

การเลือกปัจจัย การกำหนดช่วง และระดับที่ใช้ในการทดลอง ต้องศึกษาว่าจะสามารถควบคุมปัจจัย และวัดผลตอบได้อย่างไร โดยปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ต้องใช้หลักการสุ่ม ดังนั้นในการกำหนดช่วงของปัจจัยต่าง ๆ ต้องอาศัยการศึกษาข้อมูลเป็นอย่างดีก่อนที่จะมีการเลือก

4.2.4 เลือกรูปแบบวิธีการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม

ในการเลือกวิธีการออกแบบนั้น ต้องมีการกำหนดปัจจัยที่มีการศึกษาอย่างดีแล้ว รวมถึงการออกแบบดังกล่าว จะต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ เพื่อที่การออกแบบดังกล่าวจะสามารถทำการทดลอง วัดผลตอบออกมาได้อย่างแม่นยำ และถูกต้อง ซึ่งควรมีการกำหนดแผนงานก่อนที่จะทำการทดลอง เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่าง วิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น

4.2.5 คำเนิการทดลอง

หลักการสำคัญของการทดลองคือการทำให้ซ้ำ การสุ่ม ซึ่งจะช่วยให้ผลตอบที่ได้ออกมามีความแม่นยำ และถูกต้องมากยิ่งขึ้น วิธีดังกล่าวให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมปัจจัยในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง

4.2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ทางสถิติจะช่วยให้การสรุปผลการทดลองดังกล่าวได้สมกับเหตุและผล รวมถึงการตรวจสอบลักษณะ และคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการนำข้อมูลทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในการสรุปผลเชิงพรรณนา โดยวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติส่วนใหญ่ เช่น การวิเคราะห์ความแปรปรวน การวิเคราะห์ T-Test นอกจากการวิเคราะห์ดังกล่าวแล้ว ควรใช้การวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟ ซึ่งจะช่วยให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจ และสามารถสรุปผลการทดลองได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ กราฟปกติของส่วนผลกระทบและส่วนค้าง

4.2.7 วิเคราะห์ส่วนค้าง

ก่อนที่จะนำผลการทดลองดังกล่าวไปวิเคราะห์ในรูปแบบต่าง ๆ หรือ การนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไปใช้นั้น ควรที่จะมีการทดสอบยืนยันผล เพื่อยืนยันว่าผลการนำไปปฏิบัติในสภาวะจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำนายจากการทดลองหรือไม่ ซึ่งค่าแตกต่างกันของค่าทั้งสอง เรียกว่าค่าส่วนค้าง (Residuals) โดยเป็นตัวกำหนดค่าผลต่างระหว่างการทดลอง และค่าทำนายจากการทดลอง โดยค่าทำนายจะขึ้นกับประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวจะรวมกันของเทอมที่มีนัยสำคัญเท่านั้น และสร้างจากข้อมูลการทดลอง ซึ่งการวิเคราะห์ส่วนค้างดังกล่าวจะสามารถยืนยันได้ถึง ความเชื่อถือของผลการทดลอง และแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง (เกล็ดแก้ว, 2557)

4.2.8 สรุปผลการทดลอง

หลังจากการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ แล้ว ผู้ทดลองต้องสรุปผลการทดลองที่ได้ รวมถึงเปรียบเทียบผลกับวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดข้างต้น

4.2.9 การทำการทดลองยืนยันผล

เพื่อยืนยันผลการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำ 3 – 5 ครั้ง ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้อง ที่เปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่น หรือสมมติฐานของค่าเฉลี่ยของการทดลอง และการทำนาย

4.3 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นและการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

การเก็บรวบรวมข้อมูล การนำเสนอข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเป็นระบบ โดยทั่วไปค่าสถิติ (Statistics) จะเป็นเครื่องมือช่วยอธิบายลักษณะต่างๆ ของข้อมูล ค่าสถิติที่นิยมใช้ในการประมาณลักษณะที่แท้จริงของระบบที่สนใจนั้น จัดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก (ประไพศรี และ พงษ์ชนัน, 2551) ได้แก่

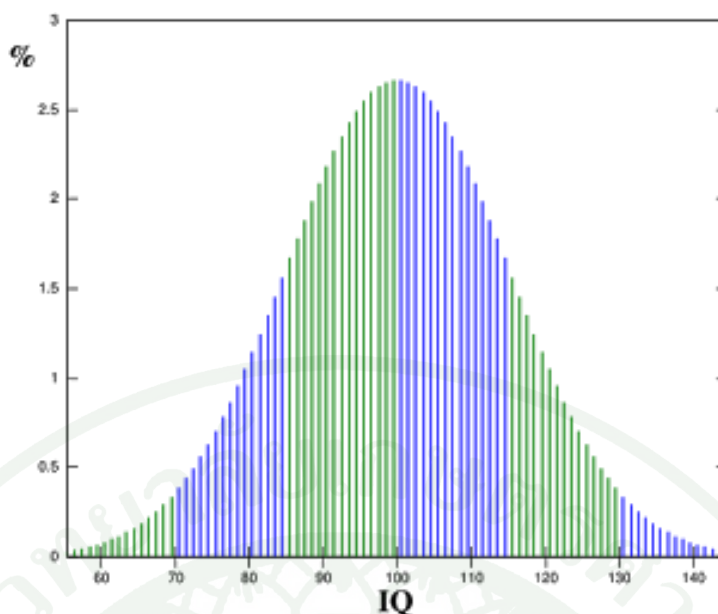
4.3.1 ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล

ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูลหรือค่าที่ใช้ชี้บ่งตำแหน่ง หรือเป็นตัวแทนตำแหน่งของกระบวนการ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่ามัธยฐาน (Medium) และค่าฐานนิยม (Mode) ซึ่งการใช้ตามวิธีดังกล่าวจะช่วยทำให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

4.3.2 ค่าการกระจาย (Dispersion)

ค่าการกระจายหรือค่าการเปลี่ยนแปลง (Variability) ในระบบ ได้แก่ ค่าพิสัย (Range) ค่าพิสัยควอไทล์ (Inter-quartile range) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error) วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองอย่างง่าย (Simple comparative experiments) แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ

4.3.2.1 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้น (Exploratory data analysis) สามารถวิเคราะห์ข้อมูลกราฟ และตารางออกมาได้ในรูปแบบของ แผนภาพจุด ฮิสโตแกรม แผนภูมิก้านใบ และแผนภาพกล่อง โดยแผนภาพฮิสโตแกรมตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 5 ที่เป็นการกระจายของคะแนน IQ ที่ดี และเป็นปกติของมนุษย์



ภาพที่ 5 ฮิสโตแกรมแสดง คะแนน IQ ที่ดี

ที่มา: Standardize Test Preparation (2008)

4.3.2.2 การทดสอบสมมติฐาน เป็นวิธีที่ทดสอบเพื่อหาข้อสรุปทางสถิติ เกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ของระบบ เป็นพื้นฐานการอนุมานทางสถิติ มักจะอิง และเน้นในค่าสถิติหลักทั้งสองกลุ่ม คือ ค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวน เนื่องจากแปรผันตรงกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายการกระจายของข้อมูลหรือความแตกต่างภายในระบบ โดยจะแบ่งข้อสมมติเป็นสองส่วน เรียกว่า สมมติฐานหลัก (Null hypothesis; H_0) และสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรอง (Alternate hypothesis; H_1) ตัวอย่างของการสมมติฐานทางสถิติ เช่น

$$\text{สมมติฐานหลัก } H_0 : \Theta \leq \Theta_0 \quad (3)$$

$$\text{สมมติฐานรอง } H_1 : \Theta > \Theta_0 \quad (4)$$

โดยที่ Θ คือ พารามิเตอร์ของประชากร เช่น ค่าเฉลี่ย (μ) หรือ ความแปรปรวน (σ^2)

Θ_0 คือ ค่าคงที่ที่ต้องการทดสอบ

4.3.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาข้อสรุปทางสถิติเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของระบบในกรณีศึกษาเปรียบเทียบบกลุ่มตัวอย่าง ตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไป โดยมีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าตอบสนอง (Responses) หรือค่าผลลัพธ์ลักษณะทางคุณภาพที่ต้องการควบคุม โดยเป็นวิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance)

เป็นการทดสอบสมมติฐานสำหรับข้อมูลที่ประกอบด้วยปัจจัยอิสระหรือปัจจัยต้นหลายปัจจัย กับปัจจัยตามเพียงตัวเดียว (Montgomery, 1976) การวิเคราะห์ความแปรปรวนมีจุดประสงค์เพื่อแยกแยะแหล่งของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการทดลอง ขั้นตอนในการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีดังต่อไปนี้

- กำหนดสมมติฐานหลัก (H_0) และสมมติฐานรอง (H_1)
- กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) เช่น 0.01 0.05 หรือ 0.10 เป็นต้น โดยจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละงานวิจัย
- คำนวณค่าสถิติจากสูตรที่กำหนดไว้ และเปิดตารางค่าสถิติเพื่อหาค่าวิกฤติของระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้
- สร้างเขตการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ที่ตรงข้ามกับสมมติฐานหลัก
- เปรียบเทียบค่าสถิติที่คำนวณได้กับค่าวิกฤติที่ได้จากการเปิดตาราง ถ้าค่าสถิติที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติที่ได้จากการเปิดตาราง ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)
- ยอมรับสมมติฐานรอง (H_1) และสรุปผลที่ได้

นอกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังกล่าวแล้วยังต้องมีข้อกำหนดเบื้องต้นว่า ข้อมูลดังกล่าวต้องมีการแจกแจงอย่างปกติ มีความเป็นอิสระจากกัน และมีความแปรปรวนเท่ากัน

1. การทดสอบว่ากลุ่มตัวอย่างมีการแจกแจงปกติหรือไม่ โดยการทดสอบด้วยวิธีของ Ryan-Joiner (RJ) (Ryan and Joiner, 1976) ซึ่งกราฟการแจกแจงของกลุ่มตัวอย่างเป็นการพล็อตกราฟระหว่างค่าผลตอบของการทดลองกับค่า P_i โดยวิธีการทดสอบสามารถคำนวณจากสูตร ดังแสดงในสมการที่ (5) และ (6)

$$P_i = \frac{\left(\frac{i-3}{n}\right)}{\left(\frac{n+1}{4}\right)} \times 100 \quad (5)$$

$$R_p = \frac{\sum Y_i b_i}{\sqrt{\sum b_i^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

โดยที่	P_i	คือ Probability ของข้อมูลลำดับที่ i ในกลุ่มตัวอย่าง
	i	คือ ลำดับตัวอย่าง
	n	คือ จำนวนตัวอย่าง
	R_p	คือ Correlation coefficient
	B_i	คือ Pith percentage point of the standard normal distribution
	Y_i	คือ ค่าผลตอบสนองของแต่ละตัวอย่าง
	\bar{Y}	คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนอง

และค่า b_i สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$b_i \approx 4.91 [p_i^{0.14} - (1-p_i)^{0.14}] \quad (7)$$

2. เมื่อได้กราฟการแจกแจงแล้วจะพิจารณาว่ากราฟดังกล่าวเป็นการแจกแจงแบบปกติหรือไม่โดยการพิจารณาจากค่า R_p เปรียบเทียบกับค่าวิกฤติ (Critical values) ที่ได้จากสูตรคำนวณดังแสดงในสมการที่ (8) (9) และ (10) เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) ได้แก่ 0.01 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ และแสดงตัวอย่างค่าวิกฤติตามจำนวนของการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5

$$cv(n) \approx 0.9963 - \frac{0.0211}{\sqrt{n}} - \frac{1.4106}{n} + \frac{3.1791}{n^2} \quad (8)$$

$$cv(n) \approx 1.0063 - \frac{0.1288}{\sqrt{n}} - \frac{0.6118}{n} + \frac{1.3505}{n^2} \quad (9)$$

$$cv(n) \approx 1.0071 - \frac{0.1371}{\sqrt{n}} - \frac{0.3682}{n} + \frac{0.7780}{n^2} \quad (10)$$

โดยที่ cv คือ Critical values และ n คือ จำนวนการทดลอง
 ตารางที่ 5 ค่าประมาณของค่าวิกฤติสำหรับค่า R_p

จำนวนการทดลอง	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.10$
4	0.8318	0.8734	0.8951
5	0.8320	0.8804	0.9033
10	0.8804	0.9180	0.9347
15	0.9110	0.9383	0.9506
20	0.9290	0.9503	0.9600
25	0.9408	0.9582	0.9662
30	0.9490	0.9639	0.9707

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

เมื่อพิจารณาว่าข้อมูลแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ทำได้โดยการเปรียบเทียบ

ถ้าค่า $R_p > cv(n)$ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

ถ้าค่า $R_p < cv(n)$ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

3. นอกจากนี้ยังสามารถพล็อตกราฟฮีستโตแกรมเพื่อดูการแจกแจงของข้อมูลว่ามี การแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่าผลตอบของการทดลองกับค่าความถี่ของ ผลการทดสอบ

1. กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน โดยมีวิธีการทดสอบคือ Kruskal-Wallis (H-test) ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ (Kruskal and Wallis, 1952)

- ตั้งสมมติฐานในการทดสอบ

- H_0 : กลุ่มตัวอย่างทุกกลุ่มมีค่า Median เท่ากัน
- H_1 : กลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 1 กลุ่มมีค่า Median ไม่เท่ากัน
- จำนวนค่าทดสอบทางสถิติ (F_H) โดยการเรียงข้อมูลแต่ละตัวจากน้อยไปหามาก และถือว่าเป็นข้อมูลชุดเดียวกัน จากนั้นหาผลรวมของข้อมูล และจำนวนค่า F_H โดยใช้สูตรดังแสดงในสมการที่ (11)

$$F_H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \left(\frac{T_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1) \quad (11)$$

โดยที่	F_H	คือ ค่าสถิติ F_H
	T_i^2	คือ ผลรวมของผลตอบ n จำนวนในกลุ่มตัวอย่าง
	n_i	คือ จำนวนตัวอย่างกลุ่มที่ i
	N	คือ จำนวนตัวอย่าง
	K	คือ จำนวนกลุ่ม

- เปิดตารางเพื่อหาค่า χ^2 ที่ตำแหน่ง $\chi^2_{\alpha,df}$
 - หาเขตปฏิเสธ และสรุปผล โดยจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า F_H ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า $\chi^2_{\alpha,df}$
2. กลุ่มตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะต้องมีความแปรปรวนเท่ากันทุกกลุ่ม (Variance homogeneity) $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 = \sigma^2$ มีวิธีการทดสอบคือ Levene test (Gastwirth *et al.*, 2009)

กำหนดสมมติฐานหลัก (H_0) และสมมติฐานรอง (H_1)

จำนวนค่า F_w โดยใช้สูตรดังแสดงในสมการที่ (12)

$$F_w = \frac{N-k \sum_{i=1}^k (\bar{z}_i - \bar{z})^2}{k-1 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} N_i (z_{ij} - \bar{z}_i)^2} \quad (12)$$

โดยที่	F_w	คือ ค่าสถิติ F_w
	T_i^2	คือ ผลรวมของผลตอบ n จำนวนในกลุ่มตัวอย่าง

- n_i คือ จำนวนตัวอย่างกลุ่มที่ i
 N คือ จำนวนตัวอย่าง
 k คือ จำนวนกลุ่ม

และค่า Z_{ij} สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (13)

$$Z_{ij} = |Y_{ij} - \bar{Y}_i| \quad (13)$$

โดยที่ Z_{ij} คือ ค่าผลต่างระหว่างค่าผลตอบในข้อมูลลำดับที่ i ของกลุ่ม j

Y_{ij} คือ ค่าผลตอบในข้อมูลลำดับที่ i ของกลุ่ม j

Y_i คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบในข้อมูลลำดับที่ i

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} Z_{ij}$$

$$\bar{Z}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} Z_{ij}$$

- เปิดตารางค่าหาค่า $F_{\alpha, k-1, N-k}$
- สรุปผลการทดสอบ ถ้าค่า F_w ที่ได้มีค่ามากกว่าค่า $F_{\alpha, k-1, N-k}$ จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

โดยจากการทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัย 2 ปัจจัย จำนวน 3 ระดับขึ้นไป ประกอบด้วย ความแปรปรวนจาก 2 แหล่ง ได้แก่ (นิภาพร, 2551)

1. ความแปรปรวนที่เกิดจากความผิดพลาดในการทดลอง

คือความแปรปรวนภายในวิธีปฏิบัติ (Treatment) เดียวกันที่ทดลองมากกว่า 1 ครั้ง โดยขนาดของความผันแปรที่เกิดขึ้นจะแสดงถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลอง

2. ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากผลของปัจจัย

ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากระหว่างการทรีตเมนต์ (Variance due to a factor between treatment variations) คือความแปรปรวนที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัย หรือเกิดจากผลกระทบของปัจจัยที่ศึกษา

ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแหล่งนั้น สามารถแสดงได้ดังสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนอง ปัจจัยและความผิดพลาด ตามรูปแบบการทดลองได้ดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (14)$$

$$= \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} + \beta_j \quad (15)$$

$$= \mu + \tau_i + \varepsilon_{ijk} + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} \quad (16)$$

$$= \mu + \tau_i + \gamma_k + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (17)$$

โดยที่ μ	คือ ค่าเฉลี่ยรวม เท่ากับ $\frac{\sum \sum Y_{ij}}{N}$ โดยที่ N คือ จำนวนครั้งที่ทดลอง
τ_i	คือ ผลกระทบจากปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i ; $i = 1, 2, \dots, a$
β_j	คือ ผลกระทบจากปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j ; $j = 1, 2, \dots, b$
γ_k	คือ ผลกระทบจากปัจจัยที่ 3 ที่ระดับที่ k ; $k = 1, 2, \dots, c$
$(\tau\beta)_{ij}$	คือ ผลกระทบร่วม (อันตรกิริยา; Interaction) ระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i และปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j
$(\tau\gamma)_{ik}$	คือ ผลกระทบร่วม ระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i และปัจจัยที่ 3 ที่ระดับที่ k
$(\beta\gamma)_{jk}$	คือ ผลกระทบร่วม ระหว่างปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j และปัจจัยที่ 3 ที่ระดับที่ k
$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$	คือ ผลกระทบร่วม ระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i ปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j และปัจจัยที่ 3 ที่ระดับที่ k
ε_{ijk}	คือ ความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังคงอธิบายไม่ได้จากการทดลอง (Error หรือ Residuals)

จากสมการข้างต้น จะสามารถแบ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนออกเป็น 3 แบบ
คือ

1. การจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA) เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทดลองทราบว่าปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลเพียงหนึ่งปัจจัย โดยระดับที่ศึกษาทั้งหมด a ระดับ หรือ a

ค่าที่แตกต่างกัน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 14 ระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนั้น จะมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของปัจจัยตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่อย่างไร และในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ CRD (Complete randomized design) นี้จะทำการวิเคราะห์ส่วนของความแปรปรวนได้จากสมการต้นแบบ คือ

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (18)$$

$$(Y_{ij} - \mu) = \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (19)$$

$$V(Y_{ij} - \mu) = V(\tau_i) + V(\varepsilon_{ij}) \quad (20)$$

$$\text{จาก } \sum_i^a \sum_j^n (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_i^a [n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2] + \sum_i^a \sum_j^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (21)$$

ความแปรปรวนทั้งหมดที่ปรับแล้วด้วยค่าเฉลี่ย = ความแปรปรวนจากปัจจัย + ความแปรปรวนจากค่าผิดพลาด จะเห็นได้ว่าแหล่งที่มาของความแปรปรวนแบ่งได้เป็น 2 ส่วน และสามารถเขียนแทนด้วยสมการ

$$SS_T = SS_{\text{Treatments}} + SS_E \quad (22)$$

โดยที่ SS_T คือ ผลบวกกำลังสองของทั้งหมดที่ปรับแล้ว (Sum square of total)
 $SS_{\text{Treatments}}$ คือ ผลบวกกำลังสองของปัจจัย A หรือ วิธีปฏิบัติ (Sum square of factor A effect or treatment)
 SS_E คือ ผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่อธิบายไม่ได้ (Sum square error or residuals)

สามารถสรุปและนำไปเขียนตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการจำแนกทางเดียวได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 วิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกทางเดียว

แหล่งที่มา (Source of Variation)	องศาเสรี (Degree of freedom)	ผลบวกกำลังสอง (Sum square)	ค่าเฉลี่ย SS (Mean square)	ค่าสถิติ (F)
วิธีปฏิบัติ (Between Treatments)	a - 1	$SS_{\text{Treatments}}$	$MS_{\text{Treatments}} = \frac{SS_{\text{Treatments}}}{a-1}$	$F = \frac{MS_{\text{Treatments}}}{MS_E}$
ค่าความผิดพลาด (Error)	N - a	SS_E	$MS_E = \frac{SS_E}{N-a}$	
ทั้งหมด (Total)	N - 1	SS_T		

ที่มา: Montgomery (1976)

2. การจำแนกสองทาง (Two-way ANOVA) เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทดลองมีปัจจัยศึกษาสองปัจจัย (ปัจจัยวิธีปฏิบัติ และปัจจัยกลุ่ม) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 15

3. การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial experiment) เป็นการออกแบบการทดลองกรณีที่มีหลายปัจจัย (มากกว่า 2 ปัจจัย) และสนใจศึกษาผลกระทบร่วมหรืออันตรกิริยา สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 17

4.5 ข้อสังเกตที่สำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถทำได้และรูปแบบสมการตัวแบบจะเหมาะสมเมื่อข้อสมมติทั้ง 4 ข้อนี้เป็นจริง

ก. ข้อมูลหรือค่าความผิดพลาด (ϵ) มีการแจกแจงปกติ

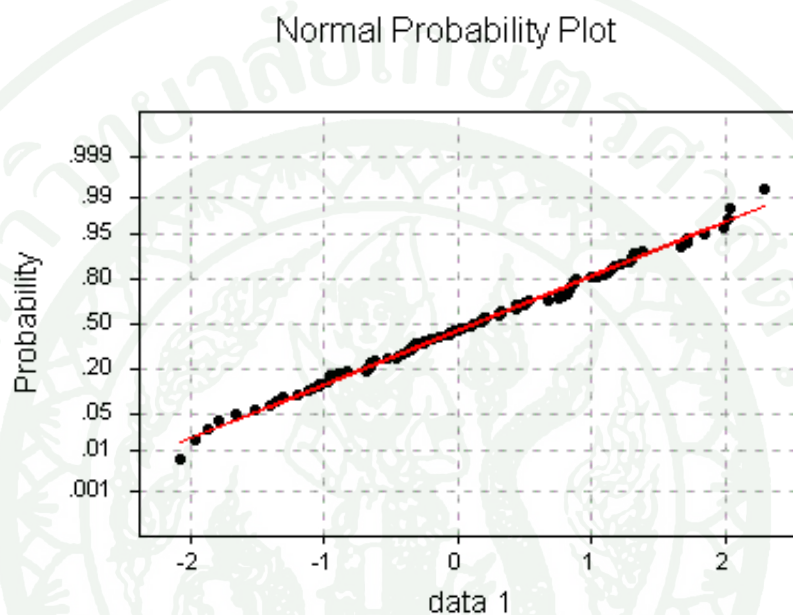
ข. ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ $E(\epsilon_{ij}) = 0$

ค. ความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดคงที่ $V(\epsilon_{ij}) = \sigma^2$

ง. ค่าความผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

$$\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$$

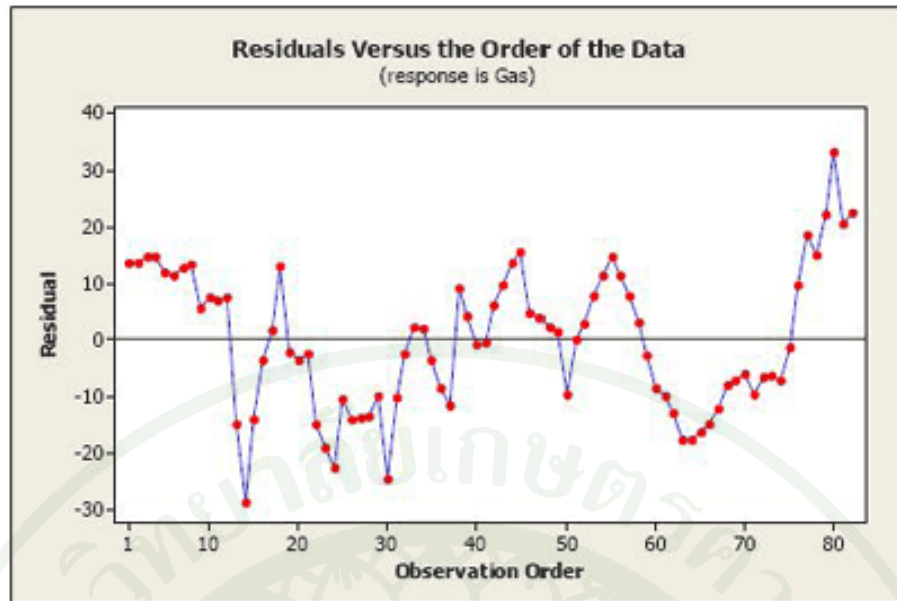
โดยสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานได้โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลดังต่อไปนี้ คือ กรณิตรวจสอบข้อสมมติที่ ก. ใช้กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal probability plot) ถ้ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่า ค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติตามแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟปกติของส่วนค้ำจากการทดลอง

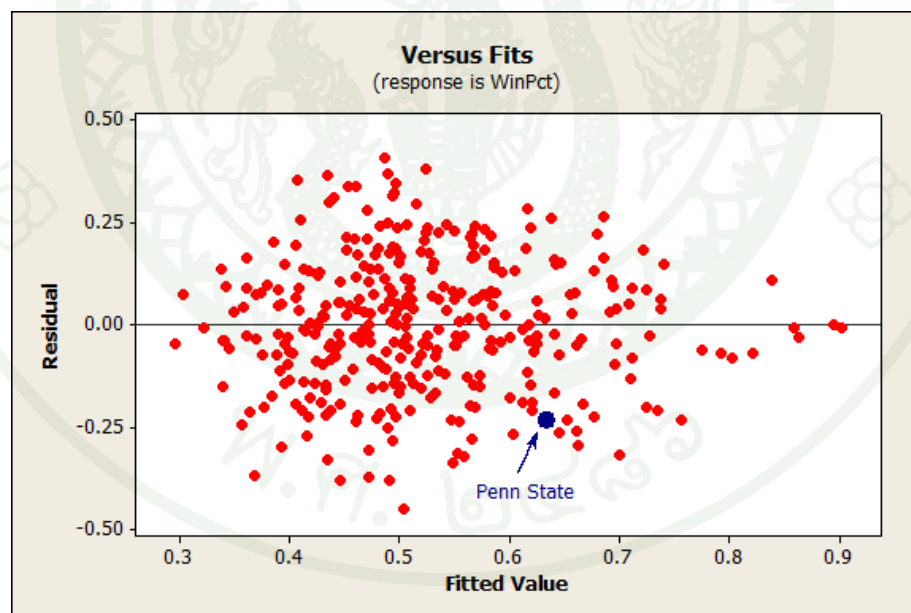
ที่มา: Statistics @SUNY Oswego (2014)

ส่วนกรณิตรวจสอบข้อสมมติที่ ข. ค. และ ง. จะใช้กราฟของค่าส่วนค้ำ (Residuals plot) โดยในการตรวจสอบข้อสมมติทั้ง 3 จะผ่าน เมื่อกราฟระหว่างขนาดของส่วนค้ำกับลำดับในการทดลองไม่มีรูปแบบที่คาดเดาได้ แสดงถึงความเป็นอิสระของข้อมูลต่อกัน แสดงดังภาพที่ 7 และเมื่อพิจารณากราฟของส่วนค้ำกับค่าทำนายจากแบบจำลอง ควรมีการกระจายตัวแบบสุ่มและไม่มีรูปแบบใดใด แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 กราฟส่วนค้างกับลำดับการทดลอง

ที่มา: The Pennsylvani State University (2004)



ภาพที่ 8 กราฟส่วนค้างกับค่าทำนายผลการทดลอง

ที่มา: The Minitab Blog (2014)

4.6 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปัจจัย หรือ ปัจจัยอิสระ (Independent variables; X) กับค่าตอบสนองหรือปัจจัยตาม (Response or Dependent variable; Y) ว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในการพยากรณ์ปัจจัยตาม ซึ่งในทางวิศวกรรมจะนำไปใช้เพื่อ ปรับปรุงกระบวนการผลิต และกำหนดค่าตัวปัจจัยเพื่อให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด ซึ่งจะทำให้ในอุตสาหกรรมมีการลงทุนน้อยที่สุด และจะช่วยให้กำไรมากที่สุด สามารถแสดงความสัมพันธ์การถดถอยเชิงเส้นได้ดังสมการ (23)

$$Y = f(x) \quad (23)$$

รูปแบบของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ขึ้นกับจำนวนปัจจัยอิสระ ดังนี้

4.6.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis)

คือการศึกษาการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง สองปัจจัย (ปัจจัยอิสระเพียง 1 ตัว กับปัจจัยตาม 1 ตัว) และความสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยดังกล่าวจะต้องเป็นในลักษณะเชิงเส้น ตัวอย่างลักษณะความสัมพันธ์สามารถแบ่งประเภทของการกำหนดได้ในรูปต่อไปนี้

1. สมการเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด

$$Y = \alpha_1 X + \varepsilon \quad (24)$$

2. สมการเส้นตรงเต็มรูป

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + \varepsilon \quad (25)$$

3. สมการพหุนามเชิงกำลังสอง (Quadratic model)

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 + \varepsilon \quad (26)$$

4. สมการพหุนามเชิงกำลังสาม (Cubic model)

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 + \alpha_3 X^3 + \varepsilon \quad (27)$$

4.6.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple regression analysis)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับปัจจัยตาม 1 ตัว โดยกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าว ยังคงอยู่ในรูปลักษณะเชิงเส้น ตัวอย่างความสัมพันธ์อาจกำหนดได้ดังนี้

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_{12} X_1 X_2 + \alpha_1 X_1^2 + \alpha_2 X_2^2 + \varepsilon \quad (28)$$

4.7 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ (Model adequacy checking)

การนำสมการที่ใช้ในการทำนายจำเป็นต้องผ่านการทดสอบความเหมาะสมของสมการ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือปัจจัยอิสระในสมการถดถอย ที่พบว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตองสนอง หรือปัจจัยตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน และสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 29 ดังนี้

$$R^2 = \frac{(SS_T - SS_E)}{SS_T} \quad (29)$$

R^2 มีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเพิ่มจำนวนปัจจัยอิสระในสมการ ทำให้ค่า R^2 เปลี่ยนแปลงได้ง่าย ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ค่า R^2 ที่ทำการปรับค่าแล้วเพื่อเป็นการช่วยเพิ่มการตรวจสอบ ทำให้สมการดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น คือ R^2_{adj} แทน จะสามารถเขียนได้ตามสมการ

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MS_E}{MS_T} \quad (30)$$

$$MS_T = \frac{SS_T}{n-1} \quad (31)$$

2. การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-fit test)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการ ใช้กับเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลค่าซ้ำ หรือ มีการซ้ำผลการทดลอง เพื่อให้มีการเปรียบเทียบความแม่นยำของผลการทดลอง ซึ่งผลลัพธ์ของค่า Y ที่ได้ต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ สามารถเขียนได้ตามสมการต่อไปนี้

$$SS_{LOF} = SS_E - SS_{PE} \quad (32)$$

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (33)$$

โดยที่ SS_{LOF} คือ ผลบวกกำลังสองที่เกิดจากการขาดความเหมาะสมของสมการ (Sum square Lack-of-Fit)
 SS_{PE} คือ ผลบวกกำลังสองของข้อผิดพลาดจริง (Sum square pure error)
 n_i คือ ขนาดตัวอย่างของ y ในกลุ่มที่เกิดค่า x ซ้ำ กลุ่มที่ i

จากสมการข้างต้น สามารถสรุปการทดสอบความเหมาะสมของสมการได้ โดยแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ

รูปแบบทดสอบ	Degree of freedom (d.f.)	SS (Sum square)	MS (Mean square)	F
Regression	p	SS_{Regr}	MS_{Regr}	F1
Error	n - p	SS_E	$MS_E = S^2$	
Lack-of-Fit		SS_{LOF}	MS_{LOF}	F2
PE		SS_{PE}	MS_{PE}	
Total (adj)	n - 1	SS_T		

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

4.8 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology)

คือ ชุดของเทคนิคทางสถิติ และคณิตศาสตร์ที่มีประโยชน์สำหรับการพัฒนา ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal condition) ของระบบโดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง (Mathematical model) ของข้อมูลที่มีอยู่ การใช้งานที่ครอบคลุมมากที่สุดของการวิเคราะห์ดังกล่าว อยู่ในกรณีโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่หลายปัจจัย อาจมีผลต่อการวัดผลการปฏิบัติงานบางส่วน หรือลักษณะที่มีคุณภาพของกระบวนการ ดังนั้นการวัดประสิทธิภาพ หรือคุณภาพลักษณะที่เรียกว่า การตอบสนอง ซึ่งสภาวะที่หาได้นั้นจะเหมาะกับกรณีที่มีความแปรปรวนของผลตอบสนอง มีค่าน้อย และคงที่ เช่น ผลตอบสนอง Y เป็นฟังก์ชันของปัจจัย X_1 และ X_2 ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

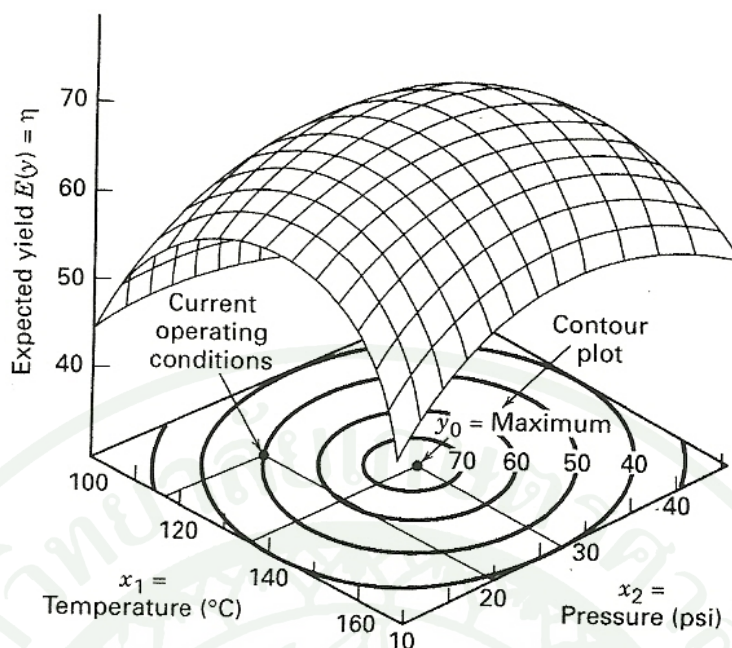
$$Y = f(X_1, X_2) + \varepsilon \quad (34)$$

โดยที่ ε คือ สิ่งรบกวน (Error) ที่เกิดขึ้นในการทดลองและมีผลกระทบต่อผลตอบสนอง Y ถ้ากำหนดให้ $E(Y) = \eta$ คือ ค่าคาดหวังของผลตอบสนอง Y

ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวสำหรับระบบที่มีจำนวน 2 ปัจจัย ได้ดังนี้

$$\eta = f(X_1, X_2) \quad (35)$$

พื้นผิวตอบสนองจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9 โดยเป็นการพล็อตระหว่าง η กับแต่ละระดับของปัจจัย X_1 และ X_2 ซึ่งรวมถึงจะพล็อตเส้นระดับ (Contour) ด้วย โดยเส้นระดับที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่ จะถูกพล็อตลงในระนาบ $X_1 - X_2$ โดยแต่ละเส้นระดับจะสอดคล้องกับความสูงของพื้นผิวตอบสนอง



ภาพที่ 9 พื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

ในกรณีที่พื้นผิวมีความโค้ง (Curvature) จะทำการประมาณโดยใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 2 โดยมีรูปแบบคือ

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^k \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (36)$$

4.9 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken

การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพ และได้รับความนิยมในการใช้ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้การออกแบบสามระดับ การออกแบบดังกล่าวถูกสร้างขึ้นจากการใช้หลักการของ 2^2 ซึ่งแฟลทอเรียลดังกล่าวเป็นแบบเต็มรูป และรวมเอาจุดกึ่งกลาง (Central points) รวมเข้าไปด้วย จึงทำให้ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากกว่า ในด้านจำนวนของการทดลองที่ต้องการมีจำนวนน้อย และมีคุณสมบัติด้านการหมุน (Rotatability) หรือใกล้เคียงการหมุน (Near rotatability) รวมถึงมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ 3^k แบบแฟลทอเรียลเต็มรูป

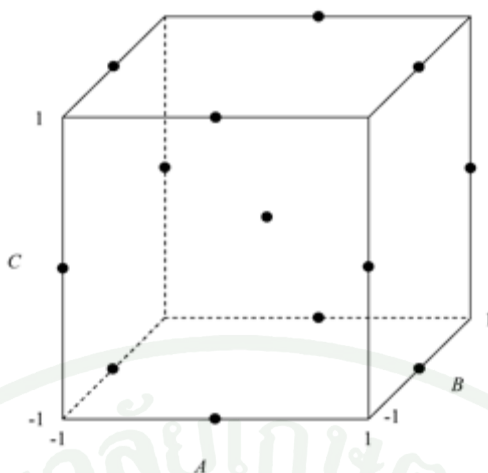
ในการออกแบบการทดลองตามวิธี Box-Behnken นั้น (Box and Behnken, 1960) ได้มีการแสดงตารางสำหรับแผนการทดลอง เพื่อใช้กับปัจจัยสูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย (ไม่รวมกรณี $k = 8$) ดังตารางที่ 8 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ที่มีปัจจัย 3 ตัว รูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบแสดงดังภาพที่ 10 พบว่า การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken เป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่จุดวางอยู่บนวงกลมรัศมี 2 นอกจากนี้ การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบน และล่างของแต่ละปัจจัยเอาไว้

การทำการทดลองด้วยวิธีนี้เป็นประโยชน์อย่างมาก เมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์คือการรวมของปัจจัยระดับ (Factor-level combination) ที่แพงมาก หรือใช้ปัจจัยในการทดลองปริมาณมากที่ทำการทดลอง ซึ่งจะทำให้ผู้ทดลองนั้น สิ้นเปลืองงบประมาณในการทดลองเป็นอย่างมาก หรือจุดที่เป็นไปไม่ได้ ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการทดลองนั้น ๆ

ตารางที่ 8 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken แบบ 3 ปัจจัย

การทดลอง	ปัจจัยการทดลอง		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

ที่มา: The Pennsylvania State University (2004)



ภาพที่ 10 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken แบบ 3 ปัจจัย

ที่มา: Box-Behnken Designs for Optimizing Product Performance (2011)

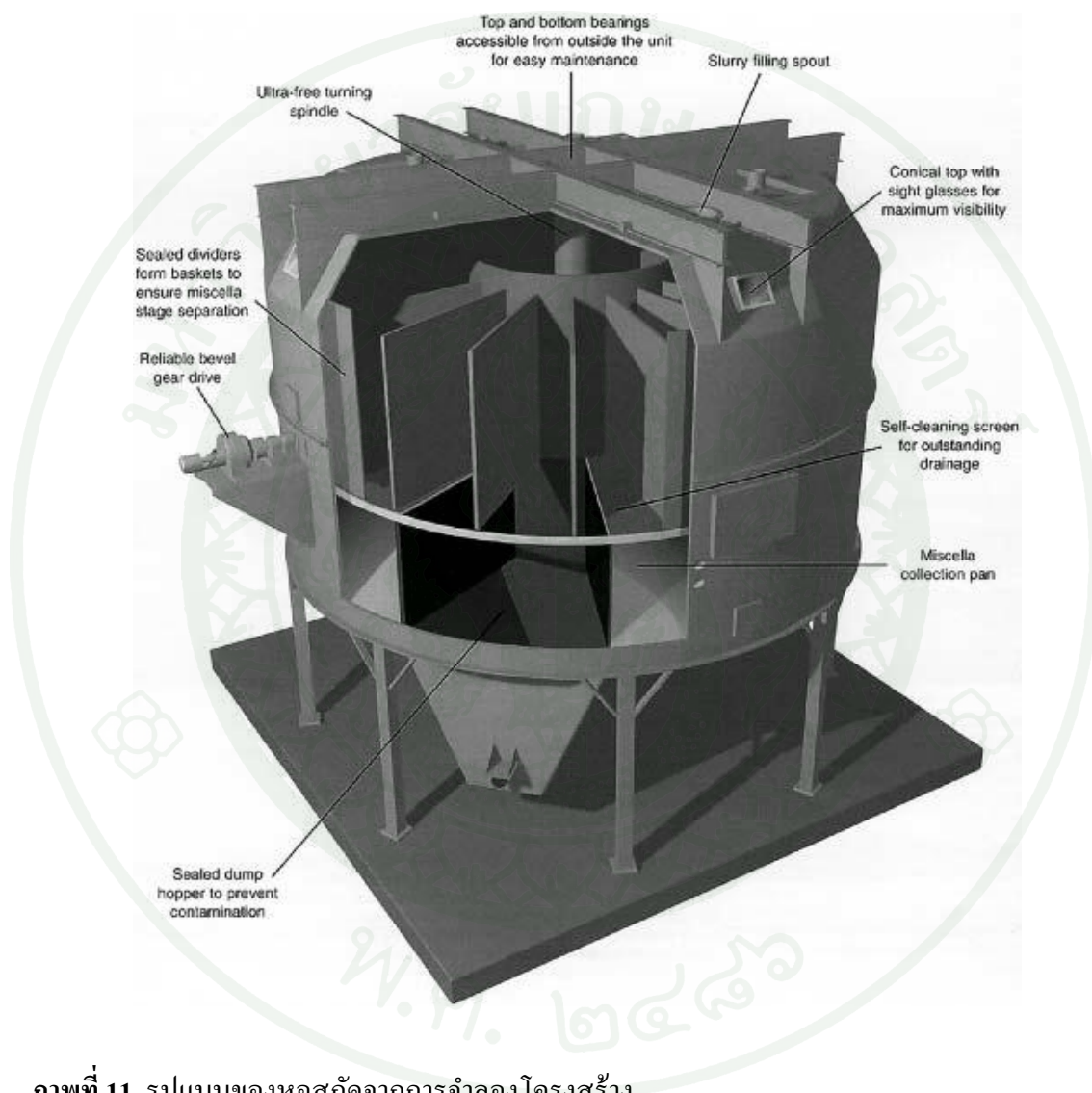
การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken สามารถศึกษาได้ทั้งผลกระทบเชิงเส้น (Linear effects) ผลกระทบในเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic effects) และอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor inter-actions) แต่มีข้อเสีย คือ จำนวนครั้งที่ทดลอง (Number of runs) มีค่ามาก และไม่สามารถที่จะลดได้ การออกแบบสามารถประมวลผลกระทบในรูปแบบโพลีโนเมียลกำลังสอง และผลกระทบร่วมสองปัจจัยได้เสมอ

5. การสกัดน้ำมันพืชในโรงงานปัจจุบัน

การสกัดน้ำมันในโรงงาน หรือสามารถเรียกอีกแบบในชื่อว่า การชะ (Leaching) ซึ่งการชะนั้นในโรงงานขนาดใหญ่ถือเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ โดยของแข็งที่บรรจุน้ำมัน และของเหลวหรือตัวทำละลายที่ใช้ต่างมีความต้านทาน ดังนั้นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการเลือกใช้ใบพัดในการผสมแล้ว ในโรงงานบางชนิดจึงมีการให้อากาศผ่านเข้าไปด้านล่างของส่วนสกัด ซึ่งจะช่วยให้ลดพลังงานของใบกวนได้ดียิ่งขึ้น โดยจากภาพที่ 11 เป็นการจำลองโครงสร้างของหอสกัดที่ใช้ ซึ่งแสดงถึงส่วนประกอบ และกลไกการทำงาน โดยในส่วนด้านล่างของหอสกัดที่มีการเคลื่อนที่ของของแข็ง และของเหลวที่ต้องการสกัดรอบแกนกลางของหอ ด้านบนและล่างของหอเป็นลักษณะกลวงเพื่อให้อากาศไหลผ่านได้ง่ายยิ่งขึ้น รวมถึงมีช่องที่สามารถมองผ่านไปยังด้านในที่แสดงให้เห็นถึงการทำงานภายใน และมีการขับเคลื่อนด้วยเกียร์ที่จะทำให้การสกัดหมุนรอบแกนกลาง

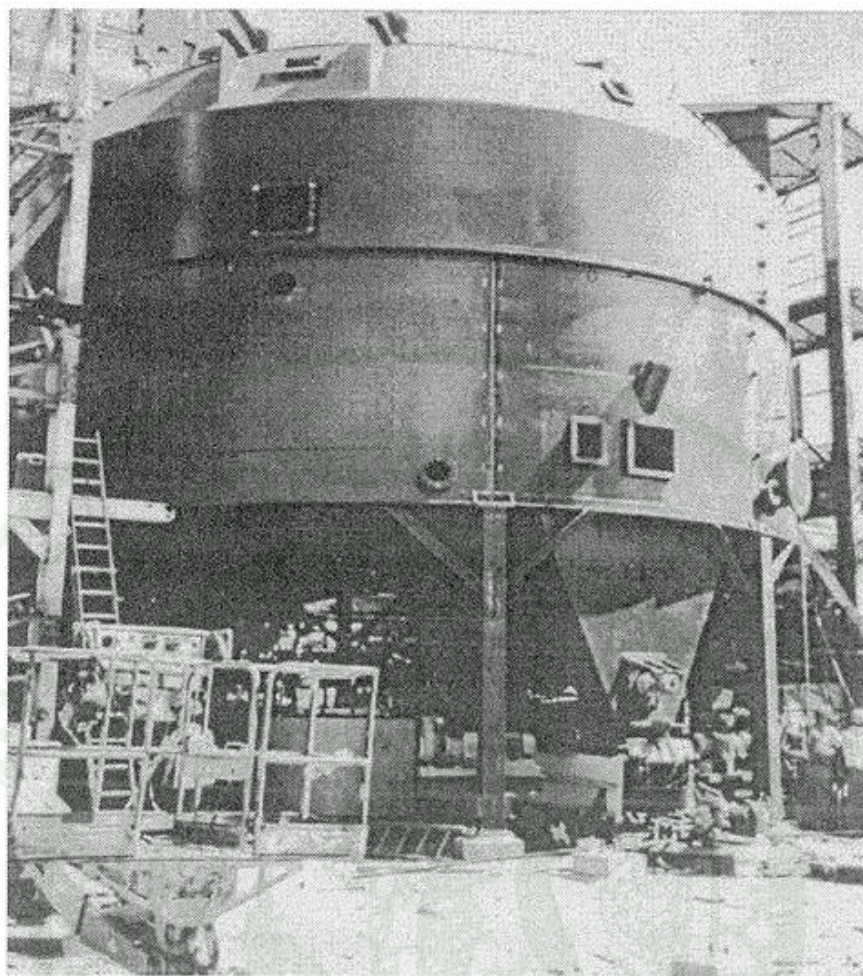
ในอุตสาหกรรมดังภาพที่ 12 ที่ใช้ในการสกัดพืชน้ำมันซึ่งการสกัดจะเป็นแบบสวนทาง (Counter current staged extraction) โดยหอดังกล่าวจะประกอบไปด้วยถังบรรจุเมล็ดเพื่อให้พักเมล็ด

ก่อนที่จะผ่านการสกัด มีสายพานเพื่อให้การเคลื่อนที่ และมีการสกัดน้ำมันได้ตามเวลาที่กำหนด ซึ่งใช้แปรย์ที่พื้นตัวทำละลายออกมาเพื่อสกัดน้ำมันภายในเมล็ด เมื่อการสกัดครั้งแรกได้เกิดขึ้นแล้ว เมล็ดที่ผ่านการสกัดจะตกลงมายังก้นหอ และถูกสูบไปยังถังต่อไปเพื่อให้มีปริมาณการสกัดน้ำมันเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งในส่วนประกอบของการสกัดจะประกอบด้วยน้ำมัน และตัวทำละลายบางส่วนเรียกว่า Miscella ซึ่งต้องใช้กระบวนการแยกด้วยการกลั่นต่อไป เพื่อให้ได้น้ำมันที่บริสุทธิ์มากขึ้น



ภาพที่ 11 รูปแบบของหอสกัดจากการจำลองโครงสร้าง

ที่มา: Shahidi (2005)

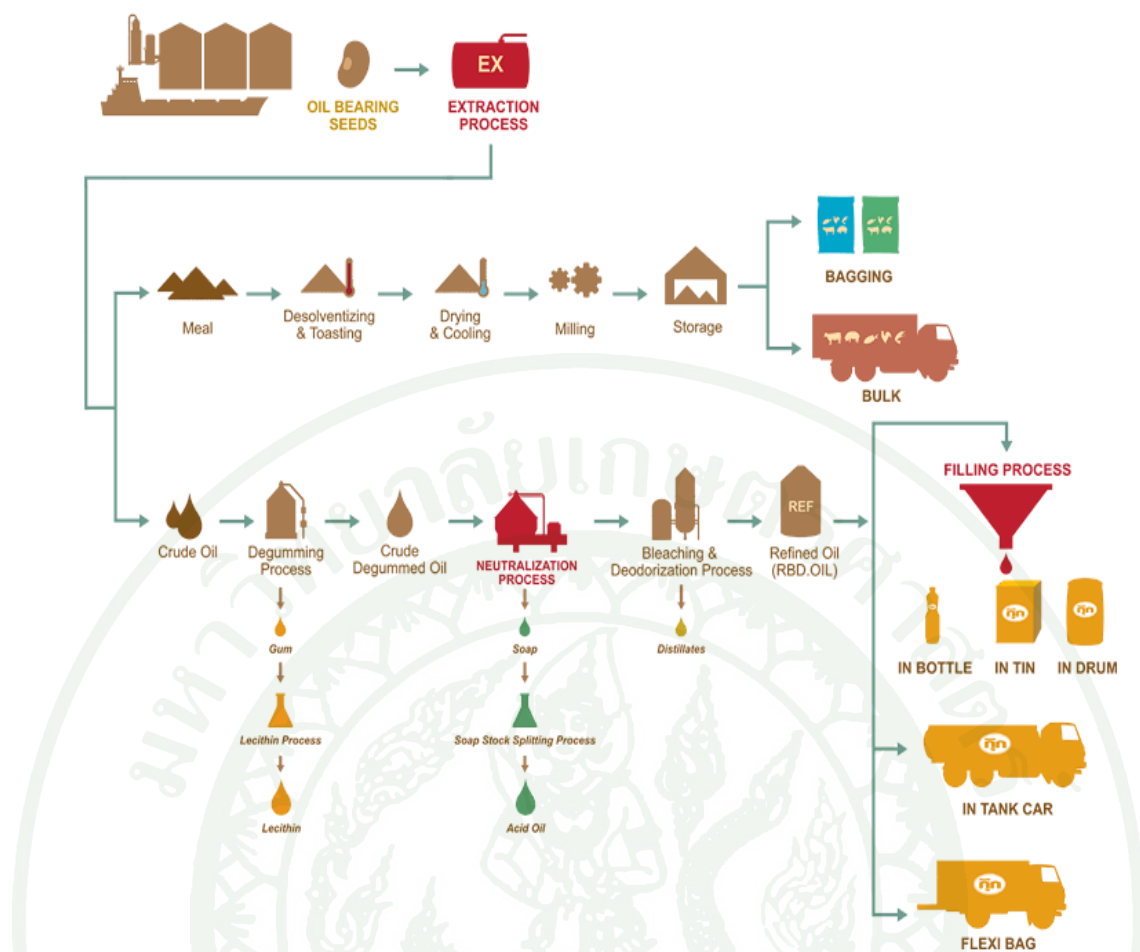


ภาพที่ 12 การติดตั้งหอสกัดแบบตัวทำละลายที่ใช้ในปัจจุบัน

ที่มา: Basmadjian (2007)

5.1 ตัวอย่างของการสกัดน้ำมันในโรงงาน

การสกัดน้ำมันถั่วเหลืองในอดีตนั้น มีการสกัดด้วยการอาศัยแรงเชิงกลในการบีบอัดเมล็ดถั่วเหลือง ไม่ว่าจะใช้แรงงานจากสัตว์ ตลอดจนการบีบอัดด้วยสกรู จนในปัจจุบันพัฒนาการสกัดด้วยตัวทำละลาย (NFI, 2014) เพื่อชะน้ำมันออกมาจากเมล็ดถั่วเหลือง แล้วจึงระเหยเอาตัวทำละลายออกเหลือไว้เพียงน้ำมันดิบ ที่จะถูกนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ต่อไป ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13



ภาพที่ 13 กระบวนการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองด้วยตัวทำละลาย

ที่มา: บริษัทนาครผลิตภัณฑ์น้ำมันพืชจำกัด (2557)

จากภาพที่ 13 สามารถแบ่งกระบวนการผลิตน้ำมันพืชออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ กระบวนการสกัด กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำมัน และกระบวนการเพิ่มมูลค่ากากถั่วเหลือง โดยกระบวนการแรกที่จะนำเมล็ดถั่วเหลืองมาสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งในอุตสาหกรรมดังกล่าวใช้เฮกเซนในการสกัด จากนั้นแยกเอาตัวทำละลายที่มีน้ำมันปนอยู่เรียกว่า Miscella และกากถั่วเหลืองออกจากกัน เมื่อทำการระเหยตัวทำละลายออกแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการต่อไปคือ กระบวนการทำบริสุทธิ์น้ำมัน ที่จะผ่านกระบวนการกำจัดยาง (Degumming process) ที่จะได้เลซิธิน (Lecithin) สารที่อุดมไปด้วยการต้านอนุมูลอิสระ จากนั้นทำการปรับสภาพของน้ำมันทั้ง ความเป็นกรด สี และกลิ่น แล้วทำการบรรจุในขวด โดยกระบวนการสุดท้ายที่จะนำกากมากำจัดตัวทำละลาย และบดให้มีขนาดเล็กลงเพื่อขายในการใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ต่อไป

5.3 โปรแกรมจำลองการผลิตในโรงงาน

Aspen plus เป็นโปรแกรมส่วนหนึ่งของ Aspen Engineering Suite ที่สามารถจำลองกระบวนการผลิตทางวิศวกรรมที่มีประโยชน์ โดยที่จะสามารถคำนวณหาข้อมูลสาร พลังงาน และ ข้อมูลที่สำคัญอื่น ๆ ได้ และทางโปรแกรมดังกล่าวได้แสดงถึงสถานะต่าง ๆ ปริมาณการไหลของสาร คุณสมบัติของสารขาเข้า และขาออก รวมทั้งพลังงานของสารขาเข้าและขาออก และยังสามารถให้ ข้อมูลของการจำลองกระบวนการแต่ละหน่วย ตัวอย่างเช่น แต่ละหน่วยปฏิบัติการใช้หรือให้พลังงาน ในปริมาณเท่าใด รวมถึงการให้ข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการ และโปรแกรมยังสามารถ จำลองเพื่อค้นหาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการ (Sensitivity) ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนปัจจัยหนึ่งปัจจัย ภายในกระบวนการนั้น ๆ โดยโปรแกรมดังกล่าวมีฐานข้อมูลทางวิศวกรรมที่จำเป็นในการจำลอง กระบวนการต่าง ๆ ซึ่งสามารถจำลองกระบวนการแบบกะ (Batch operation) และแบบต่อเนื่อง (Continuous operation) ของระบบของไหล ของแข็ง และก๊าซ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์การลงทุน ของแต่ละกระบวนการ รวมถึงหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการ (Optimization) และคุณสมบัติของ โปรแกรม Aspen plus ถือว่าเป็นประโยชน์ต่อการจำลองกระบวนการทางวิศวกรรม โดยเฉพาะ วิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมกระบวนการ ซึ่งรวมทั้งยังสามารถเอื้อประโยชน์ต่อผู้ใช้ ในกรณีที่เป็น กระบวนการเฉพาะ ที่ผู้ใช้สามารถใช้รูปแบบทางอุตสาหกรรมได้โดยการสร้างจากฐานข้อมูลดังกล่าว และโปรแกรมจะจำลองคุณสมบัติที่เหมาะสมให้ และคำนวณเป็นผลที่ต้องการดังต่อไปนี้ (Aspentech Handbook, 2012)

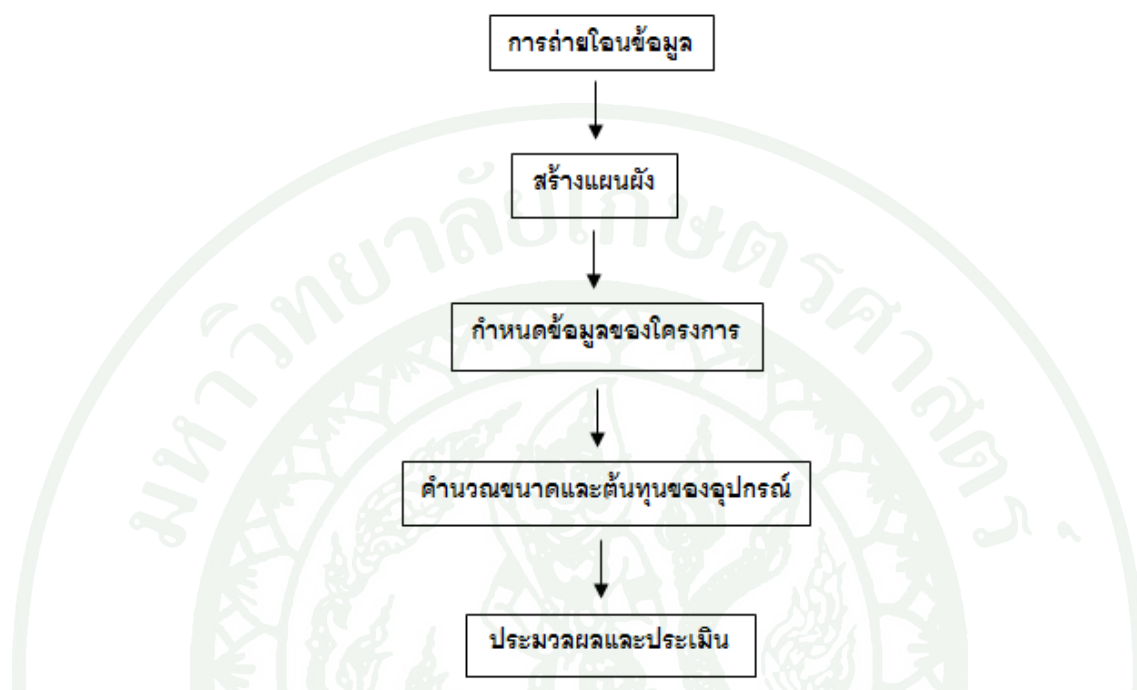
ในส่วนของการออกแบบการผลิตน้ำมันสบูดำ สามารถใช้การออกแบบได้ในหลาย โปรแกรม เช่น Pro II และ Aspen เป็นต้น โดยงานวิจัยดังกล่าวได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Aspen plus เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้ออกแบบได้ดี และฐานข้อมูลมีอย่างหลากหลาย อีกทั้ง สามารถทำสมดุลมวล และเชื่อมโยงผลของการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์กับโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer ซึ่งสามารถช่วยให้สามารถตอบจุดประสงค์ตรงกับงานวิจัยดังกล่าวที่ตั้งไว้ เบื้องต้น

6. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์

6.1 โปรแกรมประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

6.1.1 โปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer เป็นโปรแกรมที่สามารถใช้ ประโยชน์ในด้านการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวสามารถเชื่อมโยงกับ

โปรแกรม Aspen plus ที่ได้ออกแบบกระบวนการของการผลิต และโปรแกรมดังกล่าวที่ช่วยในการคำนวณหาผลทางเศรษฐศาสตร์ โดยหลักการทำงานพื้นฐานมีขั้นตอนของการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ดังรูป 14 ที่จะประกอบด้วย 5 ขั้นตอน (Aspentech Handbook, 2012)



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการประเมินโครงการโดยใช้โปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer

ที่มา: เพ็ญจิตร และคณะ (2555)

- การถ่ายโอนข้อมูล (Loading data)
การถ่ายโอนข้อมูลเป็นขั้นตอนที่สามารถทำได้หลังจากกระบวนการจำลองได้เสร็จสิ้นจากโปรแกรม Aspen plus แล้ว จากนั้นจึงส่งต่อข้อมูลไปยัง Aspen Process Economic Analyzer
- การสร้างแผนผัง (Mapping)
การสร้างแผนผังเป็นการเปลี่ยนหน่วย (Unit) จากโปรแกรม Aspen plus ให้อยู่ในแผนผังจำลองของโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer เพื่อจำลองการวางตำแหน่งต่าง ๆ ให้สอดคล้องกันสำหรับการประมวลผลใน Aspen Process Economic Analyzer

- การกำหนดข้อมูลของโครงการ (Defined project basis)
การป้อนค่าข้อมูลเบื้องต้น เพื่อเป็นประโยชน์ในการคำนวณต้นทุนในการผลิต เช่น ราคาวัตถุดิบ ราคาสาธารณูปโภค รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการที่ศึกษา
- การคำนวณขนาดและการประเมินต้นทุนอุปกรณ์ (Sizing and evaluate cost)
อุปกรณ์ที่อยู่ในโปรแกรมจากการสร้างแผนผังแล้ว จะถูกคำนวณเพื่อหาขนาดที่แน่นอนของอุปกรณ์แต่ละชนิด และประเมินราคาอุปกรณ์ของแต่ละชนิด
- การประมวลผลและประเมินราคาของโครงการ
หลังจากที่ได้ปัจจัยต่าง ๆ จากการประเมินแล้ว การดำเนินการในขั้นนี้จะให้ผลมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value) อัตราผลตอบแทน (IRR) จุดคุ้มทุน (Payback period) และต้นทุนทางตรง (Direct cost) ต้นทุนทางอ้อม (Indirect cost) ต้นทุนหลัก (Capital cost) และอื่น ๆ (Peters *et al.*, 2004)

6.2 หลักการคำนวณต้นทุนทั้งหมด และรายได้จากการขาย

ต้นทุนของเงินลงทุนทั้งหมด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด และต้นทุนในการผลิต

1. ต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด (Total capital investment, TCI) คือ เงินต้นทุนเริ่มต้นในการดำเนินการสร้างโรงงานทั้งหมด สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 องค์ประกอบหลัก คือ ต้นทุนทางตรง (Direct cost) ต้นทุนทางอ้อม (Indirect cost) เงินลงทุนคงที่ (Fixed-capital investment, FCI) เงินทุนหมุนเวียน (Working capital, WC) และต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด โดยมีการคำนวณดังนี้

$$TCI = FCI + WC \quad (37)$$

$$WC = \text{ร้อยละ } 10 - 20 \text{ ของต้นทุนการสร้างโรงงานทั้งหมด} \quad (38)$$

$$\text{เงินลงทุนคงที่} = \text{ต้นทุนทางตรง} + \text{ต้นทุนทางอ้อม} \quad (39)$$

ต้นทุนทางตรง คือ ต้นทุนที่ฝ่ายบริหารสามารถระบุได้ว่าเป็นต้นทุนชนิดใด เช่น วัตถุดิบทางตรง และค่าแรงงานทางตรงที่ใช้ในการผลิต หรือค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร ซึ่งเป็นต้นทุนทางตรงทั้งสิ้น

ต้นทุนทางอ้อม คือ ต้นทุนร่วมที่เกิดขึ้น โดยที่ไม่สามารถระบุว่าเป็นต้นทุนใด และโดยปกติต้นทุนเกี่ยวกับการผลิต เป็นต้นทุนทางอ้อมซึ่งหมายถึงค่าใช้จ่ายการผลิตของสินค้า รายละเอียดของแต่ละต้นทุน และสามารถแบ่งคิดออกได้เป็นร้อยละขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (Peters *et al.*, 2004)

ต้นทุนทางตรง ประกอบด้วย วัสดุและแรงงานที่เกี่ยวข้องกับค่าติดตั้งจริงของสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 65-85 ของเงินลงทุนคงที่สามารถแบ่งได้เป็นหลัก ๆ 4 ข้อดังต่อไปนี้

- ค่าอุปกรณ์ ค่าติดตั้ง ค่าเครื่องมือวัด ค่าการวางระบบท่อ ค่าไฟฟ้า ค่าฉนวนกันความร้อน และค่าทาสี (ร้อยละ 50-60 ของเงินลงทุนคงที่)
 - ค่าเครื่องมืออุปกรณ์ (ร้อยละ 15-40 ของเงินลงทุนคงที่)
 - ค่าการติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์ รวมค่าฉนวนกันความร้อนและการทาสี (ร้อยละ 25-55 ของค่าเครื่องมืออุปกรณ์)
 - ค่าเครื่องมือวัดและตัวควบคุม พร้อมค่าติดตั้ง (ร้อยละ 8-50 ของค่าเครื่องมืออุปกรณ์)
 - ค่าการวางระบบท่อ พร้อมค่าติดตั้ง (ร้อยละ 10-80 ของค่าเครื่องมืออุปกรณ์)
 - ค่าไฟฟ้า พร้อมค่าติดตั้ง (ร้อยละ 10-40 ของค่าเครื่องมืออุปกรณ์)
- ค่าก่อสร้าง ระบบโรงงาน และองค์ประกอบอื่น ๆ (ร้อยละ 10-70 ของค่าเครื่องมืออุปกรณ์)
- ค่าการบริการ และค่าทำนุบำรุงสถานที่ (ร้อยละ 40-100 ของค่าเครื่องมืออุปกรณ์)
- ค่าที่ดิน (ร้อยละ 1-2 ของเงินลงทุนคงที่ หรือร้อยละ 4-8 ของค่าเครื่องมืออุปกรณ์)

ต้นทุนทางอ้อม ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบและแรงงานของการติดตั้งจริง (ร้อยละ 15-35 ของเงินลงทุนคงที่)

- ค่าใช้จ่ายสำหรับวิศวกร และผู้ควบคุมดูแล (ร้อยละ 5-30 ของต้นทุนทางตรง)
- ค่าใช้จ่ายตามกฎหมาย (ร้อยละ 1-3 ของเงินลงทุนคงที่)
- ค่าภาษีของผู้รับเหมา (ร้อยละ 10-20 ของเงินลงทุนคงที่)
- ค่าใช้จ่ายฉุกเฉิน (ร้อยละ 5-15 ของเงินลงทุนคงที่)

2. ต้นทุนในการผลิต (Manufacturing cost)

เป็นค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตสินค้า ประกอบไปด้วยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสินค้า บริการต่างๆทั้งหมด รวมถึงค่าแรงพนักงาน ตลอดจนค่าซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และสาธารณูปโภคที่ใช้ในการผลิตสินค้า ซึ่งต้นทุนการผลิตจะประกอบไปด้วยต้นทุนการผลิตในด้านต่าง ๆ ดังนี้ (Peters *et al.*, 2004)

$$\text{ต้นทุนการผลิต} = \text{ต้นทุนผลิตภัณฑ์ทางตรง} + \text{ค่าใช้จ่ายคงที่} + \text{Plant overhead cost} \quad (40)$$

- ต้นทุนผลิตภัณฑ์ทางตรง (ร้อยละ 66 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด)
 - วัตถุดิบ (ร้อยละ 10-80 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด)
 - ต้นทุนค่าแรงพนักงาน (ร้อยละ 10-20 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด)
 - ค่าการดูแลโดยตรง และค่าใช้จ่ายงานธุรการ (ร้อยละ 10-20 ของต้นทุนค่าแรงพนักงาน)
 - ค่าอรรถประโยชน์ (ร้อยละ 10-20 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด)
 - ค่าวัสดุซ่อมบำรุง (ร้อยละ 2-10 ของเงินลงทุนคงที่)
 - ค่าวัสดุในการดำเนินงาน (ร้อยละ 0.5-1 ของต้นทุนค่าแรงพนักงาน)
 - ค่าสิทธิบัตร และลิขสิทธิ์ (ร้อยละ 0-6 ของต้นทุนในการผลิต)
- ต้นทุนคงที่ (ร้อยละ 10-20 ของต้นทุนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด)

- ค่าเสื่อมราคา (ร้อยละ 90 ของเงินลงทุนคงที่/อายุของโครงการ)
 - ค่าภาษีในพื้นที่ (ร้อยละ 1-4 ของเงินลงทุนคงที่)
 - ค่าประกันภัย (ร้อยละ 0.4-1 ของเงินลงทุนคงที่)
 - ค่าเช่า (ร้อยละ 8-12 ของมูลค่าเช่าของสถานที่และสิ่งก่อสร้าง)
 - ค่าการจัดการเงินทุน (ดอกเบี้ย) (ร้อยละ 0-10 ของเงินลงทุนคงที่)
- Plant overhead costs (ร้อยละ 50-70 ของต้นทุนค่าแรงพนักงาน ค่าควบคุมดูแล และค่าซ่อมบำรุง) นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย ค่าบรรจุภัณฑ์ ค่าบริการทางการแพทย์ ค่าความปลอดภัยและการป้องกัน ค่าที่พักผ่อน ค่าห้องปฏิบัติการ และค่าการเก็บรักษาสิ่งอำนวยความสะดวก

นอกจากนี้ยังมี ค่าใช้จ่ายทั่วไป ประกอบไปด้วย ต้นทุนทางการบริหาร ต้นทุนการจัดจำหน่ายและขาย และค่าวิจัยและพัฒนา (ร้อยละ 15-25 ของต้นทุนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด)

1. ต้นทุนทางการบริหาร ประกอบไปด้วยค่าอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ค่าธรรมเนียมทางกฎหมาย ค่าเครื่องใช้ในสำนักงาน และค่าการติดต่อสื่อสาร (ร้อยละ 2-5 ของต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด)
2. ต้นทุนการจัดจำหน่าย และการตลาด (ร้อยละ 2-5 ของต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด) ซึ่งจะรวมถึงค่ายอดขายของสำนักงาน ค่าพนักงานขาย ค่าขนส่งและค่าโฆษณา
3. ต้นทุนในการวิจัยและพัฒนา (ร้อยละ 2-5 ของต้นทุนในการสร้างโรงงาน)

6.3 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

ในการประเมินโครงการทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการหนึ่งโครงการจะเน้นมูลค่าผลประโยชน์สุทธิที่ได้แก่เจ้าของโครงการ ซึ่งผลการประเมินดังกล่าวจะพิจารณาว่า ผลประโยชน์ดังกล่าว มากกว่า หรือ น้อยกว่า ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และพิจารณาว่าโครงการใดมีต้นทุนค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด และโครงการดังกล่าวคุ้มค่าแก่การลงทุนหรือไม่ ซึ่งต้องอาศัยเกณฑ์ตัวชี้วัดการตัดสินใจ

6.3.1 ตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการมีความสำคัญต่อการตัดสินใจเป็นอย่างมากในการพิจารณา โดยตัวชี้วัดนี้สามารถวัดความคุ้มค่าของโครงการที่เพียงพอต่อการลงทุนหรือไม่ และตัวชี้วัดดังกล่าว คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value, NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ เป็นมูลค่าที่บ่งชี้ถึงจำนวนผลประโยชน์สุทธิที่ได้รับตลอดระยะเวลาดำเนินงานของโครงการ โดยค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิสามารถเป็นได้ทั้งบวก ลบ และศูนย์ ขึ้นอยู่กับขนาดของมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (Present value benefit, PVB) หักลบด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (Present value cost, PVC) ของโครงการนั้นดังสมการ

$$NPV = PVB - PVC \quad (41)$$

หลักในการตัดสินใจ (Decision rule) ที่ว่าโครงการจะมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐกิจ และการเงินหรือไม่ นั้นพิจารณาจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ คือ เมื่อ $NPV > 0$ หรือมีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมที่จะลงทุนได้ สามารถกล่าวได้ว่ามูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวมมากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม ($PVB > PVC$) และถ้ามีการเปรียบเทียบโครงการ 2 โครงการ ซึ่งพบว่าโครงการใด มีความคุ้มค่ามากกว่ากัน หรือน่าสนใจมากกว่ากัน ค่า NPV จะสามารถบอกได้เช่นกัน ถ้าโครงการแรกมีค่า NPV มากกว่าอีกโครงการแสดงว่าโครงการแรกมีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าโครงการที่สอง (ปรเมษฐ์ และ พรินัฐ, 2556) ส่วนการตีความหมายของ $NPV < 0$ คือ โครงการที่จะลงทุนไม่สามารถให้ผลตอบแทนที่สูงกว่าค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นการลงทุนจนถึงระยะเวลาของโครงการ ดังนั้นไม่สมควรลงทุนในโครงการนั้นๆ และกรณีที่ $NPV = 0$: ผลตอบแทนเท่ากับค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นการลงทุนจนถึงระยะเวลาของโครงการ การที่จะลงทุนหรือไม่ขึ้นอยู่กับผู้ลงทุน

6.3.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) คือ ระยะเวลาที่ได้รับผลตอบแทนในรูปแบบของกระแสเงินสดเข้าเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายลงทุน โดยไม่คำนึงถึงเรื่องมูลค่าของเงินตามระยะเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนจึงมองที่กระแสเงินสดรับ ไม่ใช่ตัวกำไรหรือขาดทุนของกิจการ โดย ณ จุดได้ที่ผลสะสมของกระแสเงินสดรับเท่ากับเงินลงทุนในการสร้างโรงงานครั้งแรกก็จะได้ระยะเวลาคืนทุนนั่นเอง

6.3.3 อัตราผลตอบแทนการลงทุน (The Internal Rate of Return, IRR) อัตราผลตอบแทนการลงทุน ที่ทำให้จุดที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นศูนย์ นั่นคือเป็นอัตราส่วนลด (Discount

rate) ที่อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ที่ส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันของรายรับ เท่ากับมูลค่าปัจจุบันของรายจ่าย โดยโครงการที่ทำให้อัตราผลตอบแทนการลงทุนสูงกว่า หรือเท่ากับอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ยอมรับได้ในการลงทุน (Minimum attractive rate of return, MARR) เป็นโครงการที่เหมาะสมแก่การลงทุน



งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศิริวรรณ (2551) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำด้วยตัวทำละลาย โดยศึกษาจากขนาดอนุภาคเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 0.5-0.7 0.7-1 1-1.4 1.4-2.4 และขนาดใหญ่กว่า 2.4 มิลลิเมตร ใช้ตัวทำละลาย 2 ชนิดได้แก่ นอร์มัลเฮกเซน (*n*-Hexane) และปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether) ที่อัตราส่วนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำต่อปริมาณตัวทำละลาย 1:4 1:6 และ 1:8 กรัมต่อมิลลิลิตร ใช้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลาในการสกัด 3 ชั่วโมง รวมถึงได้ศึกษาต้นทุนของการสกัดน้ำมันดังกล่าว ผลการทดลองพบว่า ขนาดอนุภาคเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ได้ปริมาณน้ำมันมากที่สุดคือ ขนาดตั้งแต่ 0.5-1.4 มิลลิเมตร และขนาดที่มากกว่า 1.4 มิลลิเมตรได้ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้มีแนวโน้มที่ลดลง นอร์มัลเฮกเซนเป็นตัวทำละลายที่ใช้สกัดน้ำมันได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่ถูกสกัดของปิโตรเลียมอีเทอร์เท่ากับร้อยละ 65.86 และ 64.19 ตามลำดับ และอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:8 กรัมต่อมิลลิลิตร นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบกับต้นทุนการสกัดน้ำมัน นอร์มัลเฮกเซน อัตราส่วน 1:4 1:6 และ 1:8 กรัมต่อมิลลิลิตร มีต้นทุนเท่ากับ 1,828.99 1,809.63 และ 2,213.94 บาท และปิโตรเลียมอีเทอร์อัตราส่วน 1:4 1:6 และ 1:8 มีต้นทุนเท่ากับ 2,307 2,472 และ 2,719 บาท ที่สามารถผลิตน้ำมันสบู่ดำได้ 1 ลิตร ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันปริมาณน้ำมันมากที่สุด และใช้ต้นทุนการสกัดต่ำสุด คือ สภาวะการสกัดที่ใช้อนุภาคเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาด 0.5-1.4 มิลลิเมตร ใช้ นอร์มัลเฮกเซนเป็นตัวทำละลายและใช้อัตราส่วนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1:6 กรัมต่อมิลลิลิตร

ฉิษรัตน์ (2550) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดน้ำมัน จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำด้วยตัวทำละลายโดยวิธีเขย่าที่อุณหภูมิ 30 และ 50 องศาเซลเซียส เวลาในการสกัด 3 6 และ 9 ชั่วโมง ใช้เฮกเซน ปิโตรเลียมอีเทอร์ และ น้ำ เป็นตัวทำละลายที่อัตราส่วนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำต่อปริมาณตัวทำละลาย 1:4 1:6 และ 1:8 กรัมต่อมิลลิลิตร และผ่านวิธีการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 3 ชั่วโมงแล้วกรองด้วยกระดาษกรอง จากนั้นนำน้ำมันที่สกัดได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105±5 องศาเซลเซียสเพื่อระเหยตัวทำละลายออก และคำนวณร้อยละของน้ำมันที่สกัดได้ รวมถึงได้มีการนำเอาน้ำมันสบู่ดำไปผลิตไบโอดีเซล โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้นร่วมในการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน ใช้เฮกเซนที่อัตราส่วน 1:8 กรัมต่อมิลลิลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้น้ำมันในปริมาณสูงที่สุดเทียบเป็นร้อยละ 91.91 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับตัวทำละลายอีกสองชนิดคือ ปิโตรเลียมอีเทอร์ และน้ำ ที่อัตราส่วน 1:4 และ 1:6 และการนำไปผลิตไบโอดีเซลในส่วนต่อไป มีผลได้ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าเท่ากับร้อยละ 80.6 โดยการคำนวณในเรื่อง

ค่าใช้จ่าย ที่ประกอบด้วย ค่าไฟฟ้า ค่าตัวทำละลาย และค่าเมล็ดสบู่ดำ และสามารถคิดราคาน้ำมันสบู่ดำได้เท่ากับ 36.03 บาทต่อลิตร

Asoiro and Akubuo (2011) ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำด้วยตัวทำละลายนอร์มัลเฮกเซน และใช้การสกัดด้วยเครื่องซอกเลต (Soxhlet extractor) มีช่วงอุณหภูมิของการสกัดคือ 40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส และมีการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันจากการสกัด ผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ของอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เทียบเป็นร้อยละเท่ากับ 60.99 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส สามารถสกัดได้เพิ่มเป็นร้อยละ 81.22 แต่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส กลับพบว่าให้ปริมาณการสกัดลดลงเท่ากับร้อยละ 75.89 โดยผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันจากการสกัด ค่า ปริมาณเถ้า (Ash content) ที่อุณหภูมิ 40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส คือร้อยละ 0.0017 0.014 0.019 0.0346 และ 0.05 โดยน้ำหนักของการสกัดตามลำดับ และค่าความเป็นกรด (Acid value) มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.11 11.6 13.30 27.33 และ 43.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และอุณหภูมิมีผลต่อค่าไอโอดีน (Iodine value) ซึ่งลดลงจาก 3.05 กรัมต่อ 100 กรัม น้ำมัน เป็น 0.76 กรัมต่อ 100 กรัม น้ำมัน ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ค่าความหนืดพลวัต (Kinematic Viscosity) 41.62 42.43 43.30 45.57 และ 47.83 เซนติสโตกร ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 0.91 0.16 0.90 0.91 และ 0.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และค่าไฮดรอกซิลเท่ากับ 0.16 0.11 0.069 0.066 และ 0.078 กรัม โมล ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการสกัดอยู่ในช่วง 60-70 องศาเซลเซียส

ชมพกา (2549) ศึกษาการจำลองการผลิตน้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวันด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย จากการใช้โปรแกรม Aspen plus และ Aspen Process Economic Analyzer โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส ความดันควบคุมในหอสกัด 5-25 เมกะปาสกาล ใช้เฮกเซน เมทานอล และเอทานอล ที่อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเมล็ดพืช 1:1-5:1 และคำนวณผลทางเศรษฐศาสตร์ กำหนดระยะเวลาในการผลิต 20 ปี ระบบการทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าสถานะที่ดีที่สุดของการสกัดน้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ด้วยตัวทำละลาย ใช้ตัวทำละลายเอทานอลที่อัตราส่วน 3:1 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 15 เมกะปาสกาล และผลจากการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ในโรงงานสกัดน้ำมันทานตะวัน ใช้ตัวทำละลายเฮกเซนให้กำไรมากที่สุด มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 600,346 ดอลลาร์สหรัฐ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal rate of return, IRR) ร้อยละ 24.40 และระยะเวลาคืนทุน 11.324 ปี โรงงานสกัดสบู่ดำ ใช้การสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนให้กำไรมากที่สุด มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 605,241

คอลลาจสหรัฐ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ ร้อยละ 25.59 และระยะเวลาคืนทุน 10.263 ปี แต่ในการทำกำไรของโครงการดังกล่าวต้องขายราคาน้ำมันที่ผลิตได้เท่ากับ 55 บาทต่อกิโลกรัม

Kasim and Harvey (2011) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน และผลิตไบโอดีเซลจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำด้วยตัวทำละลาย บังคับควบคุมได้แก่ ขนาดอนุภาคของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ น้อยกว่า 0.50 0.50-0.71 0.71-1.00 1.00-2.00 และ 2.00-4.00 มิลลิเมตร อัตราการกวน 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เวลาของการทดลองที่ 10-60 นาที ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.10 0.15 และ 0.20 นอร์มอล และอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 100 200 300 400 500 และ 600 โมลต่อโมลน้ำมัน ผลการทดลองพบว่าขนาดที่ต่ำกว่า 0.71 มิลลิเมตร ให้ปริมาณน้ำมันสกัดได้มากที่สุด และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.15 N. อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 400 โมลต่อโมลน้ำมัน อัตราการกวนที่ 300 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาการทดลองที่ 30 นาที ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมนั้นมีความสำคัญ โดยขนาดอนุภาคของเมล็ดสบู่ดำ และอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันส่งผลต่อค่าผลได้ของการผลิตไบโอดีเซลเป็นอย่างมาก

Jairurob *et.al* (2013) ศึกษาสภาวะในการผลิตไบโอดีเซลด้วยการรวม 2 กระบวนการผลิต คือ กระบวนการที่ตัวทำละลายสามารถสกัดน้ำมันปาล์ม และสามารถเกิดปฏิกิริยาผลิตไบโอดีเซล โดยใช้การเปรียบเทียบเทคนิคที่รวมทั้ง 2 กระบวนการและเทคนิคที่ผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแบบแยกกับการสกัดของกระบวนการ และมีการใช้วิธีการออกแบบการทดลองของ Taguchi Method ด้วยการศึกษาบังคับ ได้แก่ ความเข้มข้น โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1-4 น้ำหนักต่อปริมาตรน้ำมัน เวลาการทดลอง 8-11 ชั่วโมง และอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 147:1-225:1 โมลต่อโมลน้ำมัน น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จะถูกนำมาวัดมาตรฐาน EN 14214 ผลการศึกษาพบว่า ในการสกัดของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลน์ มีส่วนลดต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.2 และไบโอดีเซลที่ผลิตผ่านมาตรฐาน EN 14214 สภาวะที่เหมาะสมจากการออกแบบด้วยวิธี Taguchi Method คือ ตัวเร่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3.85 น้ำหนักต่อปริมาตรน้ำมัน เวลาการทดลอง 9 ชั่วโมง 36 นาที อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 225:1 โมลต่อโมลน้ำมัน ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้การผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 97.25 และผลการผลิตเท่ากับ 272 g biodiesel/kg FFB (Fresh fruit brunch) ดังนั้นการรวมกันของ 2 กระบวนการผลิตให้ผลลัพธ์ที่มีค่ามากกว่าไบโอดีเซลที่ผลิตกระบวนการแยกกัน ยังสามารถช่วยลดเวลา และค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ด้วย

Qian *et al* (2010) ศึกษาสภาวะในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยผ่านการใช้สารละลาย 2 เฟสในการสกัด ได้แก่ เมทานอล และนอร์มัลเฮกเซน มีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ การใช้ตัวอย่างเมล็ดสบู่ดำ 30 กรัม อัตราส่วนระหว่างเมทานอล และนอร์มัลเฮกเซน เท่ากับ 0:100 20:80 40:60 50:50 60:40 30:70 และ 20:80 อุณหภูมิ 20 25 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส และเวลา 10 - 60 นาที รวมถึงมีการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ เมื่อมีการสกัดแล้วกรองแยกเอากากของเมล็ดสบู่ดำออก จากนั้นนำกากที่เหลือไปสกัดด้วยเครื่องชอกเลต เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ และนำน้ำมันจากการสกัดในขั้นแรก ไปผลิตไบโอดีเซลที่มีการกำหนดปัจจัยคือ อุณหภูมิ 30 40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 4:1 5:1 6:1 7:1 8:1 และ 9:1 โมลต่อโมลน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 และ 1.3 กรัมต่อลิตร และเวลาการทดลอง 10 20 30 60 80 120 150 และ 180 นาที ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนเมทานอลต่อนอร์มัลเฮกเซนที่เหมาะสมคือ 60:40 เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลไม่ส่งผลต่อกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) และองค์ประกอบน้ำที่ระเหยแยกออกไปเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ลดลง ซึ่งอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และเวลาที่เหมาะสม 30 นาที มีค่าผลได้ของการสกัดเท่ากับร้อยละ 98 ส่วนปัจจัยที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซล คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.1 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 7:1 โมลต่อโมลน้ำมัน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาที มีค่าผลได้ของการผลิตไบโอดีเซลเท่ากับร้อยละ 98 การสกัดดังกล่าวช่วยลดปริมาณ FFA และน้ำในองค์ประกอบเป็นร้อยละ 0.42 และ 0.048 ดังนั้นการใช้สารละลาย 2 เฟสระหว่างเมทานอล และนอร์มัลเฮกเซนช่วยลดขั้นตอนในการล้างเอาสิ่งเจือปนออกจากไบโอดีเซลลงได้ถึงร้อยละ 50 และน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตสามารถผ่านมาตรฐาน ASTM D 6751-02

Kual *et al* (2011) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ และเมล็ดพังกาเมีย (Pongamia) ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ซึ่งอาศัยผลของอัลตราโซนิคคลื่นความถี่ต่ำ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดโดยวิธี กลั่นไหลกลับโดยตรง (Direct reflux) และชอกเลต โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของเฮกเซนที่อัตราส่วน 2.5:1 5:1 และ 10:1 มิลลิลิตรต่อกรัม เวลา 30 วินาที 1 2 3 5 10 และ 60 นาที รวมถึงได้นำน้ำมันไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM D-974/04 เพื่อรับรองเกี่ยวกับค่าความเป็นกรด ผลการศึกษาพบว่า จากวิธีกลั่นไหลกลับโดยตรง ให้ค่าผลได้ของการสกัดน้ำมันเท่ากับร้อยละ 97.21 ในเมล็ดสบู่ดำ และ 100 ในเมล็ดพังกาเมีย ซึ่งค่าความเป็นกรด เท่ากับ 3.83 และ 12.46 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งผลจากวิธีชอกเลตให้ค่าผลได้ของการสกัดน้ำมัน และค่าความเป็นกรดเท่ากับร้อยละ 33.4 และ 3.40 ในเมล็ดสบู่ดำและพังกาเมีย ซึ่งใน 2 วิธีข้างต้นใช้เวลาในการสกัดถึง 16 ชั่วโมง และจากการอาศัยผลอัลตราโซนิคคลื่นความถี่ต่ำ ก่อนนำมาสกัดทำให้ค่าผลได้ของ

น้ำมัน และค่าความเป็นกรดเท่ากับร้อยละ 33.32 และ 1.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ในเมล็ดสบู่ดำ ร้อยละ 29.29 และ 3.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ในเมล็ดพจนกาเมีย โดยสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ เวลาในการสกัดลดลงเหลือ 3 นาที และอัตราส่วนความเข้มข้นเฮกเซน 10:1 มิลลิลิตรต่อกรัม มีค่าผลได้ของน้ำมันเท่ากับร้อยละ 39.60 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เวลาที่ลดลงช่วยให้ต้นทุนของการผลิตมีราคาถูกลง และค่าความเป็นกรดที่ลดลง แสดงถึงคุณภาพของน้ำมันที่ดีซึ่งผ่านมาตรฐาน ASTM D-974/04

Sulaiman *et.al* (2013) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน จากเนื้อในของเสียมะพร้าว ด้วยตัวทำละลาย ใช้วิธีการสกัดแบบกะ และสกัดชอกเลต โดยศึกษาปัจจัยได้แก่ อนุภาคเนื้อของมะพร้าว 0.50 0.70 และ 1.20 มิลลิเมตร ใช้ตัวทำละลายเฮกเซน และปิโตรเลียมอีเทอร์ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อมะพร้าว 6:1 7:1 8:1 9:1 10:1 11:1 และ 12:1 ลิตรต่อกรัม อุณหภูมิในการสกัด 55 60 และ 65 องศาเซลเซียส เวลา 15 30 และ 45 นาที 1 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าตัวทำละลายเฮกเซน สกัดได้ดีกว่าปิโตรเลียมอีเทอร์ร้อยละ 1.30 ของวิชิชอกเลต และได้ดีกว่าร้อยละ 0.90 ในวิธีแบบกะ จากเหตุผลที่ว่าเฮกเซนเป็น สารละลายที่ไม่มีขั้ว (Non-polar solvent) สามารถแทรกซึมสู่ชั้นเนื้อมะพร้าวได้ดีกว่า อัตราส่วนตัวทำละลายที่เหมาะสมคือ 10:1 และจากการเพิ่มอุณหภูมิ ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้เพิ่มจากร้อยละ 19.70 เป็น 21.30 และ 21.90 เป็น 23.60 ของทั้ง 2 วิธี เวลาที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง แต่เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 0.50 มิลลิเมตร ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กต่าง ๆ กัน ส่งผลต่อการลดพื้นที่ผิวของตัวทำละลายในการสกัด นอกจากนี้มีการศึกษาทางจลนศาสตร์ โดยในปัจจัยของการถ่ายเทมวลดังสมการ $\frac{dWA}{dt} = k \frac{A}{V} [WA_i - WA]$ มีค่า $k.a$ เพิ่มจาก 0.89 เป็น 1.43 วิชิชอกเลต และ 1.23 เป็น 2.06 ในวิธีแบบกะ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ 0.50 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ $0.386 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ และผลทางการถ่ายเทมวลที่ขึ้นกับขนาดอนุภาคดังสมการ $\ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi D_{eff}}{r^2}$ และ $\phi = \frac{d_p}{6} \left(\frac{k_{pp}}{D_{eff}} \right)^{0.5}$ ค่าโมดูลัสทิวล์ (Thiele Modulus) ที่ขนาด 0.50 0.70 และ 1.20 มิลลิเมตร เท่ากับ 0.1645-0.4339 0.2315-0.3211 และ 0.3205-0.431 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวควบคุม และการแพร่ของตัวทำละลายดีโดยไม่ต้องเกิดปฏิกิริยา เพราะค่าโมดูลัสทิวล์ น้อย แสดงให้เห็นว่าไม่มีผลต่อการถ่ายเทมวลที่จำกัดภายใน และค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs Free Energy) เท่ากับ 0.12-1.16 กิโลจูลต่อโมล และเอนโทรปี (Entropy) เท่ากับ 33.10-38.24 จูลต่อโมลเคลวิน สามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนตัวทำละลายเฮกเซนต่อเนื้อเสียมะพร้าว 10:1 มิลลิลิตรต่อกรัม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 0.1 และ 0.2 เนื่องจากอัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อเสียมะพร้าว และอุณหภูมิ ค่าการถ่ายเทมวลไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าพลังงานอิสระกิบส์ เอนโทรปี และ เอนทาลปี (Enthalpy) แสดงถึงค่าการสกัดที่เกิดขึ้นได้เอง ไม่ผันกลับ และเป็นการดูดพลังงาน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ปริมาณน้ำมันมากที่สุดที่ร้อยละ 23.6 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อมะพร้าว 10:1 มิลลิลิตรต่อกรัม และขนาด 0.5 มิลลิเมตร ในวิธีของซอกเลต

นรบดี และ ปิยะเนตร (2556) ศึกษาตัวทำละลาย และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ ได้แก่ อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างเนื้อในเมล็ดสบู่ดำต่อปริมาตรของตัวทำละลาย 1:6 1:9 1:12 และ 1:15 กรัมต่อมิลลิลิตร เวลา 30 60 90 และ 120 นาที และจำนวนครั้งของการสกัดที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ นอกจากนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำตัวทำละลายที่ใช้สกัดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ เวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างเนื้อเมล็ดสบู่ดำต่อปริมาตรตัวทำละลาย 1:9 กรัมต่อมิลลิลิตร ให้ร้อยละน้ำมันที่สกัดได้ 57.67 หลังจากนั้นนำไปปัจจัยที่เหมาะสมไปศึกษาจำนวนครั้งของการสกัดที่มีผลต่อร้อยละของปริมาณน้ำมันที่สกัดซึ่งพบว่าเมื่อสกัดซ้ำ 4 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพในการสกัดครั้งแรกสูงที่สุด และเมื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่ามีประสิทธิภาพในการสกัดดีกว่าการสกัดที่ใช้ตัวทำละลายเฮกเซนที่ยังไม่ผ่านการใช้ ในปริมาณไม่มาก ในงานวิจัยดังกล่าวทดลองนำปิโตรเลียมอีเทอร์ และโทลูอิน (Toluene) เกรดการค้ามาผสมกับเฮกเซน เพื่อศึกษาความสามารถในการสกัด ซึ่งในการสกัดได้ผสมปิโตรเลียมอีเทอร์ และโทลูอินที่โดยร้อยละปริมาตร 5 10 และ 15 พบว่าการผสมระหว่างเฮกเซน และปิโตรเลียมอีเทอร์สามารถสกัดน้ำมันออกมาสูงสุดเทียบเป็นร้อยละเท่ากับ 54.76 ส่วนการผสมระหว่างเฮกเซน และโทลูอินสามารถสกัดน้ำมันออกมาสูงสุดเทียบเป็นร้อยละเท่ากับ 55.77 การผสมระหว่างตัวทำละลายต่าง ๆ มีความสามารถในการสกัดที่ต่ำกว่าการสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย เฮกเซนเพียงชนิดเดียว ดังนั้นตัวทำละลายเฮกเซนจึงเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดน้ำมันออกจากเนื้อเมล็ดสบู่ดำ

Peralta-Ruiz *et al.* (2013) ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ จากสาหร่ายชนิด *Chlorella* sp. แยกโรงงานการสกัดเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกตัวทำละลายที่ใช้สกัดคือ เฮกเซน อัตราส่วน 20:1 ของเนื้อสาหร่ายที่ใช้สกัด ในส่วนที่สองใช้สารผสมระหว่างเอทานอล และเฮกเซน ที่อัตราส่วนเอทานอล 4:1 ของเนื้อสาหร่ายที่ใช้สกัด จากนั้นใช้เฮกเพิ่มไปที่ส่วนอัตรา 1:1 ในการสกัด และในส่วนสุดท้ายสารผสมระหว่างเอทานอล และคลอโรฟอร์มอัตราส่วน 6:12 ในการทำต่อสาหร่ายในการสกัด 1 ส่วน ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม Aspen plus เวอร์ชัน 7.1 รวมถึงน้ำมันที่นำมาสกัดจากสาหร่ายได้มีการแจกแจงเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันที่เป็นตัวแทนในการนำเข้ามาของน้ำมัน เช่น C14-C18 เนื้อเยื่อสาหร่ายที่เป็น เซลลูโลส ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เป็นต้น โดยใช้การกำหนดกำลังการผลิตน้ำมัน และติดตามผลของการออกแบบจากสมดุลมวล พลังงาน จากผลของการวิเคราะห์

พบว่า ในส่วนของโรงงานสกัดชนิดแรกที่ใช้เฮกเซนในการสกัด สามารถสกัดกรดไขมันอิสระได้อัตราส่วนโมล 0.14 ที่อัตราการไหล 12,236.44 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในส่วนของโรงงานชนิดที่สองที่ใช้สารผสมระหว่างเอทานอล และเฮกเซน โดยสารผสมที่เพิ่มขึ้นมามีผลต่อการสกัดทำให้สกัดได้กรดไขมันอิสระเท่ากับอัตราส่วนโมล 0.15 ที่อัตราการไหล 12,212.38 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และในส่วนสุดท้ายสกัดได้กรดไขมันอิสระเท่ากับ 0.15 ที่อัตราการไหล 12,212.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลในส่วนของคุณภาพพลังงานที่ใช้พบว่าประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 51 24 และ 29 ของในส่วนที่ 1-3 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการสกัดน้ำมันสำหรับด้วยเฮกเซนให้ค่าการใช้พลังงานต่ำสุด และการใช้เอทานอล และเฮกเซนในการสกัดใช้ค่าพลังงานสูงที่สุดในการขยายกำลังการผลิต ซึ่งในโรงงานขั้นสุดท้ายถึงแม้จะมีการใช้พลังงานน้อยกว่า แต่พบว่ามีการใช้คลอโรฟอร์ม เมื่อเกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ก่อเกิดมลพิษมากที่สุด และพลังงานที่ออกมาจากจากการสกัด ถือว่าเป็นพลังงานที่สูง ดังนั้นทางงานวิจัยดังกล่าวจึงแนะนำให้นำมาให้ความร้อนแก่ส่วนอื่น ๆ เพื่อให้โรงงานดังกล่าวได้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานของส่วนต่าง ๆ จึงเป็นการช่วยพัฒนาและปรับปรุงเพื่อให้มีต้นแบบของการผลิตที่ดีต่อไป

Chapuis *et al.* (2014) ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันด้วยการใช้เครื่องบดแบบเกลียว (Screw press) แบบต่อเนื่อง ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของเมล็ดสบู่ดำที่มีทั้งกะเทาะเปลือก และไม่กะเทาะเปลือก ชนิดเกลียวที่ใช้ในการบดเมล็ด แบบ Open Medium และ Tight และความเร็วของการบด 9 18 และ 26 รอบต่อนาที ด้วยการติดตามผลในปัจจัยของน้ำมันที่สกัดได้ ปริมาณความชื้น และองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง โดยเมล็ดก่อนการบดจะผ่านการเตรียมด้วยการผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำด้วยวิธีวิเคราะห์ NMR spectroscopy ความชื้นที่ใช้ในการศึกษาผ่านวัดตามมาตรฐาน NF V03-909 อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง รวมถึงมีการออกแบบสมการทำนายผลของการสกัดน้ำมันในการทดสอบ ผลการทดลองพบว่า การให้ความเร็วรอบที่ 26 รอบต่อนาที เป็นความเร็วที่สูงจึงทำให้ความดัน และอุณหภูมิภายในเครื่องกลมีมากเกินไป ซึ่งผลที่ตามมาคือใบเกลียวของเครื่องบดติดขัด ในปัจจัยของชนิดของเมล็ดที่มีการบดทั้งที่ไม่มีกะเทาะเปลือก และเมล็ดของการกะเทาะเปลือกนั้น ให้ปริมาณน้ำมันคงเหลือในกากที่สูงทั้งคู่อยู่ที่ปริมาณร้อยละ 17 และ 18 ตามลำดับ การทดลองที่ได้ น้ำมันสบู่ดำสูงสุดคือ ใช้อัตรานำเข้าสู่สบู่ดำที่ปริมาณต่ำช่วง 50-75 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมล็ดที่ใช้เป็นผสมกันทั้งหมด ใบเกลียวเป็นแบบ Tight ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 0.83 หรือร้อยละ 83 และสมการที่ทำนายการสกัดน้ำมันสบู่ดำพบว่า มีความผิดพลาดในการทำนายเป็นประมาณร้อยละ 5 เท่านั้น

Bouffaron *et al.* (2012) ศึกษาการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ของน้ำมันสบู่ดำ โดยการสกัดน้ำมันสบู่ดำด้วยการบดด้วยเครื่องกลแบบเย็น (Cold-press) และเริ่มการศึกษาตั้งแต่การเพาะปลูกเมล็ดสบู่ดำ ด้วยการคำนึงถึงผลผลิตของเมล็ดสบู่ดำ จากนั้นมีการกำหนดผลได้ของการสกัดน้ำมัน แล้วจึงได้มีการคำนวณ และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ รวมถึงการวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อมูลค่าของโครงการ ปัจจัยที่มีการนำมาวิเคราะห์ได้แก่ ผลผลิตของเมล็ดสบู่ดำ ราคาน้ำมันปิโตรเลียม ลักษณะพื้นที่ที่ใช้ในการเพาะปลูก และค่าแรงของแรงงาน ซึ่งพื้นที่ของการเจริญเติบโตได้กำหนดปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่อยู่ในช่วง 200-1500 มิลลิเมตรต่อปี และกำหนดผลได้ของการสกัดร้อยละ 38 รวมถึงได้มีการทดสอบน้ำมันที่ได้จากการสกัดในเครื่องยนต์ และการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคิดเป็นรายได้ของทางเศรษฐศาสตร์ โดยการประเมินดังกล่าวได้มีการประเมินอ้างอิงผลต่าง ๆ จากประเทศมาลี ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ผลผลิตเมล็ดสบู่ดำต่อไร่เท่ากับ 1.0-7.8 ตัน และผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อโครงการคือ ผลผลิตของเมล็ดสบู่ดำมีผลร้อยละ 20 ราคาน้ำมันปิโตรเลียมมีผลร้อยละ 21 พื้นที่ในการใช้เพาะปลูกมีผลต่อโครงการถึงร้อยละ 25 ค่าแรงมีผลร้อยละ 11 และปัจจัยองค์ประกอบอื่น ๆ มีผลร้อยละ 23 ผลการสรุปพบว่าการวิเคราะห์สภาวะต่าง ๆ ดังกล่าวเพื่อความยั่งยืนของการวางแผนที่ใช้สบู่ดำให้เป็นประโยชน์ต่อประเทศที่กำลังพัฒนา อีกทั้งช่วยให้นักลงทุนได้เห็นว่าสบู่ดำเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่จะหมดในอนาคต

Chen *et al.* (2014) ศึกษาการสกัดน้ำมัน และ ไอโซฟลาเวอน (Soy isoflavones) จากกากที่ใช้หมักจากซอสถั่วเหลือง ด้วยตัวทำละลายผสมระหว่างสองเฟส ซึ่งมีกระบวนการอัลตราโซนิกในการช่วยสกัด และออกแบบพื้นผิวดูดซับสองด้วยวิธี Box-Behnken 4 ปัจจัยที่ประกอบด้วย ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 60 - 90 มิลลิลิตรต่อมิลลิลิตร อัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำต่อวัตต์คิวบิก 10:1 - 20:1 มิลลิลิตรต่อกรัม อัตราส่วนเฮกเซนต่อเนื้อวัตต์คิวบิก 7:1 - 13:1 ลิตรต่อกรัม และเวลา 10 - 20 นาที และทำการวิเคราะห์ส่วนที่สกัดได้ (ไอโซฟลาเวอน) หลังจากการแยกด้วยเครื่องกลั่นแยก (Rotary evaporator) แล้ว ใช้เทคนิค HPLC ส่วนน้ำมันที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC ผลจากการออกแบบพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่สกัดน้ำมัน และ soy isoflavones ได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 92.07 และ 92.53 ตามลำดับ ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 74.88 มิลลิลิตรต่อมิลลิลิตร อัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำต่อวัตต์คิวบิก 15:1 มิลลิลิตรต่อกรัม อัตราส่วนเฮกเซนต่อวัตต์คิวบิก 8.64:1 มิลลิลิตรต่อกรัม เวลา 20 นาที และพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก 160 วัตต์ ซึ่งสมการออกแบบดังกล่าว มีความผิดพลาดของการทำนายเท่ากับร้อยละ 0.75 และ 0.69 ตามลำดับ โดยน้ำมันถั่วเหลืองจากกากที่ใช้หมักซอสถั่วเหลือง จากการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย GC พบว่ามีองค์ประกอบจำพวก ค่าความเป็นกรดปริมาณมากถึง 66.6 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม จึงเหมาะสมที่จะนำไปเป็นวัตต์คิวบิกในการผลิตไบโอดีเซล โดยที่เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้ปรุงอาหารปกติมีค่าความเป็นกรด

เท่ากับ 0.22 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ดังนั้นประโยชน์จากการสกัดด้วยวิธีดังกล่าว นอกจากเป็นการใช้กากถั่วเหลืองเหลือทิ้งให้เป็นประโยชน์แล้ว ยังสามารถนำน้ำมันที่ได้มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งได้ไอโซพลาเวนที่เป็นองค์ประกอบที่มีประโยชน์

Tasic *et al.* (2014) ศึกษาการจำลอง และคำนวณผลทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน และเมทานอลเป็นวัตถุดิบ ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดที่มีการเปรียบเทียบกันของแต่ละโรงงานคือ โรงงานที่ใช้ตัวเร่งแบบเนื้อเดียวกัน(Homogeneous) (KOH) และ โรงงานที่ใช้ตัวเร่งเนื้อต่างชนิด (Heterogeneous) (CaO) และกำหนดกำลังการผลิตรายปี 8,356 ตัน และเวลาดำเนินงาน 7,920 ชั่วโมง จากการศึกษาด้วยโปรแกรม Aspen plus และ Aspen Process Economic Analyzer เวอร์ชัน 7.3 ผลการศึกษาพบว่า จากการสมมูลมวลของ โรงงานชนิดแรกใช้น้ำมันทานตะวันที่เป็นวัตถุดิบมากกว่าโรงงานชนิดที่สองอยู่ 41 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งในโรงงานชนิดตัวเร่งเนื้อต่างชนิด มีการใช้ปริมาณตัวเร่งที่มากกว่า และเมื่อมีการเปรียบเทียบพลังงานพบว่า ในโรงงานชนิดที่สองมีการใช้พลังงานรวมเท่ากับ 358 กิโลวัตต์ และสามารถนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ที่ 339 กิโลวัตต์ ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าโรงงานชนิดแรกที่ใช้พลังงานรวม 905 กิโลวัตต์ และนำพลังงานดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ 784 กิโลวัตต์ เป็นการ ใช้ปริมาณความร้อนที่ต่ำกว่า เนื่องด้วยกระบวนการแรกใช้หอก่อนในการแยกสารผสม ซึ่งต่างจากกระบวนการที่สองที่ใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก จึงทำให้การใช้พลังงานที่น้อยกว่า จากผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์พบว่าราคาต้นทุนโรงงานทั้งหมด ในโรงงานชนิดแรกมีปริมาณราคาที่สูงกว่าโรงงานชนิดที่สองในทุก ๆ ด้าน ซึ่งต่างกันเท่ากับ 2,119,355 ดอลลาร์สหรัฐ และจากการวิเคราะห์ปัจจัยพบว่า ราคาน้ำมันทานตะวัน และราคาขายไบโอดีเซลมีส่วนต่อโครงการมากที่สุด เมื่อกำหนดราคาน้ำมันทานตะวัน และน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้ตามจริงราคา 1.433 และ 0.99 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม ให้ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเป็นมูลค่าติดลบ ซึ่งไม่เหมาะที่จะดำเนินการลงทุน ดังนั้นงานวิจัยดังกล่าวจึงได้มีการกำหนดราคาของปัจจัยทั้งสองใหม่ที่ ราคาของไบโอดีเซลของโรงงานทั้งสองเพิ่มไปที่ราคา 2.055 และ 1.829 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัมตามลำดับ พบว่าให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่เป็นบวก จึงทำให้โครงการนี้มีความเหมาะสม และนำลงทุน เช่นเดียวกับปัจจัยของราคาน้ำมันทานตะวันที่ลดลงมาเหลือ 0.525 และ 0.696 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัมตามลำดับ ให้ผลมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่เป็นบวกเช่นเดียวกัน แต่การลดราคาดังกล่าว ในความเป็นจริงไม่สามารถควบคุมได้ง่าย เนื่องจากน้ำมันทานตะวันเป็นน้ำมันชนิดที่รับประทานได้ และสามารถสรุปได้ว่าในกระบวนการที่สองมีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งการใช้ปริมาณตัวเร่ง พลังงาน การลงทุน อีกทั้งการขายราคาไบโอดีเซลที่สูงกว่า ซึ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยให้โครงการดังกล่าวสามารถเป็นไปได้จริงมากกว่าโรงงานชนิดแรก

Ong *et al.* (2012) ศึกษาผลทางเศรษฐศาสตร์จากการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันปาล์ม มีการกำหนดอัตรานำเข้าน้ำมันปาล์ม 51 กิโลตัน สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 50 กิโลตันคิดเป็นผลได้ร้อยละ 98 และกำหนดระยะเวลาของการดำเนินการ 20 ปี ผลจากการศึกษาพบว่าราคาขายน้ำมันไบโอดีเซลเท่ากับ 665 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งคิดเป็นราคาต่อหน่วยได้เท่ากับ 0.632 ดอลลาร์สหรัฐต่อลิตร จากราคาวัตถุดิบน้ำมันปาล์มที่ใช้ผลิตราคา 0.5 ดอลลาร์สหรัฐต่อลิตร และราคาขายของกลีเซอรอลตลอดระยะเวลาโครงการมีมูลค่า 12.33 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ระยะเวลาคืนทุน หรือจุดคุ้มทุนของโครงการนี้อยู่ที่ 3.52 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงการนี้มีความเหมาะสมที่จะทำการลงทุน และการวิเคราะห์ปัจจัยทั้ง 5 ที่มีผลต่อโครงการ การวิเคราะห์ปัจจัยของราคาน้ำมันปาล์ม 1,300 ดอลลาร์ต่อตัน และอัตราดอกเบี้ยที่ร้อยละ 5 ทำให้รายได้โดยรวมของการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 790 และ 840 ล้านดอลลาร์ ตามลำดับ และเมื่อศึกษาปัจจัยการเพิ่มอัตราร้อยละผลได้เป็น 110 ปัจจัยการลดต้นทุนดำเนินการเหลือ 190 ดอลลาร์ต่อตัน และปัจจัยการลดต้นทุนเริ่มต้นเหลือ 7.5 ล้านดอลลาร์ ซึ่งทำให้รายได้โดยรวมของการผลิตเท่ากับ 710 720 และ 670 ล้านดอลลาร์ โดยทั้ง 5 ปัจจัย ปัจจัยที่มีผลต่อรายได้มากที่สุดคือ อัตราดอกเบี้ย เมื่อศึกษาปัจจัยของราคาภาษีที่มีผลต่อราคาขายไบโอดีเซล พบว่าการเพิ่มภาษีเป็นร้อยละ 15 และราคาน้ำมันปาล์มเป็น 1.3 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม ทำให้ราคาขายไบโอดีเซลเพิ่มเป็น 0.95 ดอลลาร์ต่อลิตร ในขณะที่ราคาดีเซลเท่ากับ 0.59 ดอลลาร์ต่อลิตร จึงสามารถสรุปได้ว่ารายได้จากการผลิตเท่ากับ 665 ล้านดอลลาร์ จุดคุ้มทุนเท่ากับ 3.52 ปี และการเพิ่มราคาน้ำมันปาล์ม 0.1 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม มีส่วนทำให้ราคาไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นถึง 0.5 ดอลลาร์ต่อลิตร ไบโอดีเซลสามารถจะนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ในกรณีที่ได้รับการยกเว้นภาษี จึงจะสามารถดำเนินการได้ การศึกษาจำเป็นต้องจำกัดปัจจัยบางตัวที่เกี่ยวกับสาธารณูปโภค เพื่อให้การผลิตมีรายได้เพิ่ม และดึงดูดความสนใจให้โครงการดังกล่าวน่าลงทุนยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เมล็ดสนูปดำ ได้รับความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน
2. เฮกเซน (Hexane) เกรดงานวิเคราะห์: J.T.Baker, United States of America
3. เฮกเซน เกรดการค้า ตั้งชื่อมาจากบริษัท : Lab system
4. ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether) เกรดงานวิเคราะห์: MERCK, Germany
5. กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 37 : MERCK, Germany

2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง : BL210S, Sartorius, Goettingen, Germany
2. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง : LM6100 บริษัท Mettler Toledo, Switzerland
3. เครื่อง Soxtec : 2050 Soxtec Automatic, FOSS, Sweden
4. เครื่องปั่นเหวี่ยง : Model 7780, KUBOTA CORPORATION, Japan
5. ตู้ดูดความชื้น : Bossmen รุ่น DBK series3, U&V Holding
6. ตู้อบ : FD115, Binder
7. ตู้ดูดควัน
8. ปีกเกอร์
9. ซ้อนตักสาร
10. ขวดดูแรน (Duran) ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร : Scott, Germany
11. เครื่องปั่น
12. ตระแกรงร่อนขนาด mesh 25 40 และ 60 : ASTM E11
13. เครื่องคอมพิวเตอร์ Intel inside core i7, Microsoft window7
14. โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen เวอร์ชัน 7.1
15. โปรแกรม Microsoft excel ปี 2010

วิธีการ

ตอนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบ (เมล็ดสบู่ดำ) และวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ขนาดต่าง ๆ

1.1 นำเมล็ดสบู่ดำมาแกะเปลือกออก ให้เหลือแต่เนื้อในเมล็ดสีขาว จากนั้นนำเนื้อในเมล็ดดังกล่าว ไปบดให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้เครื่องบด และคัดขนาดด้วยตระแกรงเบอร์ 25 40 และ 60 mesh (ขนาดอนุภาค 0.25 ถึง 0.71 มิลลิเมตร) จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันของเนื้อเมล็ดสบู่ดำด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Soxtec)

1.2 หาขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสม

ซึ่งเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว โดยแยกออกเป็น 4 เบอร์ได้แก่ ใหญ่กว่า 25 mesh (> 0.710 มิลลิเมตร) เบอร์ระหว่าง 25 และ 40 mesh ($0.710-0.425$ มิลลิเมตร) เบอร์ระหว่าง 40 และ 60 mesh ($0.425-0.250$ มิลลิเมตร) และเล็กกว่า 60 mesh (< 0.250 มิลลิเมตร) ปริมาณ 5 กรัม นำมาสกัดด้วยเฮกเซน ที่อัตราส่วน 8 มิลลิลิตรต่อกรัมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ เวลา 30 นาที และอัตราการกวน 200 รอบต่อนาที หลังจากนั้นทำการแยก โดยนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 7000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และนำเนื้อในเมล็ดสบู่ดำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

ตอนที่ 2 ศึกษาหาสภาวะเหมาะสมต่อร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำ จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ โดยการออกแบบด้วยวิธี Box-Behnken

การศึกษาหาสภาวะเหมาะสมต่อร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำ จากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน โดยอาศัยการออกแบบการทดลองตามวิธีของ Box-Behnken ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ เวลา และอัตราการกวน ซึ่งระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย จะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ขอบล่าง (-1), ขอบบน (+1) และค่ากลาง (0) ดังตารางที่ 9

ในการออกแบบการทดลองตามวิธี Box-Behnken ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ MINITAB version 16.0 สำหรับการทดลอง 3 ปัจจัย จะได้การทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง ซึ่งจะกำหนดอัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ เวลา และอัตราการกวน ที่ระดับการทดลองต่างๆ ในการทดลองนั้น จะนำเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ขนาดที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 ปริมาณ 5 กรัม มาสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ที่สภาวะต่าง ๆ ตามการทดลองที่ได้ออกแบบ หลังจากนั้นทำการแยก โดยนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 7000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และนำเนื้อในเมล็ดสบู่ดำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำได้จากการทดลองทั้ง 15 การทดลอง จะนำไปวิเคราะห์หาผลทางสถิติ พื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (Response surface-3D) กราฟคอนทัวร์ (Contour-2D) และสมการทำนายประสิทธิภาพการสกัดน้ำมัน ด้วยโปรแกรม MINITAB จากนั้นทำการทดลอง และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้การคำนวณจากสมการทำนาย

ตารางที่ 9 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดในการสกัดน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

ปัจจัยการทดลอง	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		
		-1	0	1
เวลา (นาที)	A	30	90	150
อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	B	10:1	35:1	60:1
อัตราการกวน (รอบต่อนาที)	C	100	300	500

ตอนที่ 3 ศึกษาการขยายกำลังการผลิตน้ำมันสบู่ดำ และผลทางเศรษฐศาสตร์

3.1 ศึกษาการขยายกำลังการผลิตน้ำมันสบู่ดำ

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัด และโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Simulation จากนั้นเริ่มเขียนแผนผังกระบวนการผลิตลงใน Aspen plus ดังแสดงในข้อมูลต่อไป นำสภาวะที่เหมาะสมจากการทำนายข้างต้น มาใช้ในการผลิตเพื่อสกัดน้ำมันสบู่ดำ โดยทำการศึกษาการควบคุมของอัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ (Kernel feed) 10,000 30,000 และ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน

3.2 ศึกษาผลทางเศรษฐศาสตร์

3.2.1 ประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน

เมื่อได้ทำการออกแบบ และศึกษาสมมูลมวลจากโปรแกรม Aspen plus แล้ว จากนั้นจึงทำการศึกษาผลทางเศรษฐศาสตร์ด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer ที่จะสามารถคำนวณราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต และต้นทุนในการผลิต รวมถึงใช้ประกอบในการคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงาน ในรูปแบบต่าง ๆ ที่สามารถใช้ประเมินของแต่ละโครงการ ซึ่งกำหนดการออกแบบการลงทุนเป็นระยะเวลา 20 ปี การผลิตของโรงงานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเฉลี่ยปีละ 300 วันการผลิต แล้วจึงทำการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value) อัตราการตอบแทนภายใน (Internal rate return) และจุดคุ้มทุน (Payback period) ของแต่ละโครงการ

3.2.2 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อโครงการ

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิของแต่ละโครงการแล้ว เลือกหนึ่งโครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงที่สุด โดยนำมาศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และจุดคุ้มทุน ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ราคาขายของน้ำมันสบู่ดำ ราคาต้นทุนของตัวทำละลายเฮกเซน ราคาเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ และราคาอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงตามระดับต่าง ๆ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปัจจัยที่ทำการศึกษาดูด้วยการติดตามผลเปลี่ยนแปลงของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และ
จุดคุ้มทุน

ปัจจัยการศึกษา	ระดับที่ศึกษา				
ราคาขายน้ำมันสุญุดำ (บาทต่อกิโลกรัม)	25.60	28.80	32.00	35.20	38.40
ราคาเฮกเซน (บาทต่อลิตร)	22.80	25.65	28.50	31.35	34.20
ราคาเนื้อในเมล็ดสุญุดำ (บาทต่อกิโลกรัม)	6.40	7.20	8.00	8.80	9.60
ราคาอุปกรณ์ (ร้อยละการเปลี่ยนแปลง)	-20.00	-10.00	0	+10.00	+20.00

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากการสกัดน้ำมันสบู่ดำจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน โดยในขั้นตอนแรกทำการศึกษานาขนาดที่เหมาะสมในการนำมาสกัดด้วยตัวทำละลาย จากนั้นทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสมจากขั้นตอนแรก และทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ขั้นตอนต่อไปทำการศึกษากการออกแบบโรงงานการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลอง ด้วยโปรแกรม Aspen plus โดยใช้อัตรากรนำเข้าเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ 10,000 30,000 และ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน และขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการศึกษาผลทางเศรษฐศาสตร์ด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer ที่มีการติดตามผลของมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานขนาดต่าง ๆ รวมถึงมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ได้แก่ ราคาตัวทำละลายเฮกเซน ราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานสกัด ราคาเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ และราคาขายน้ำมันสบู่ดำ

1. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำเบอร์ 25 – 60 mesh (ASTM E11)

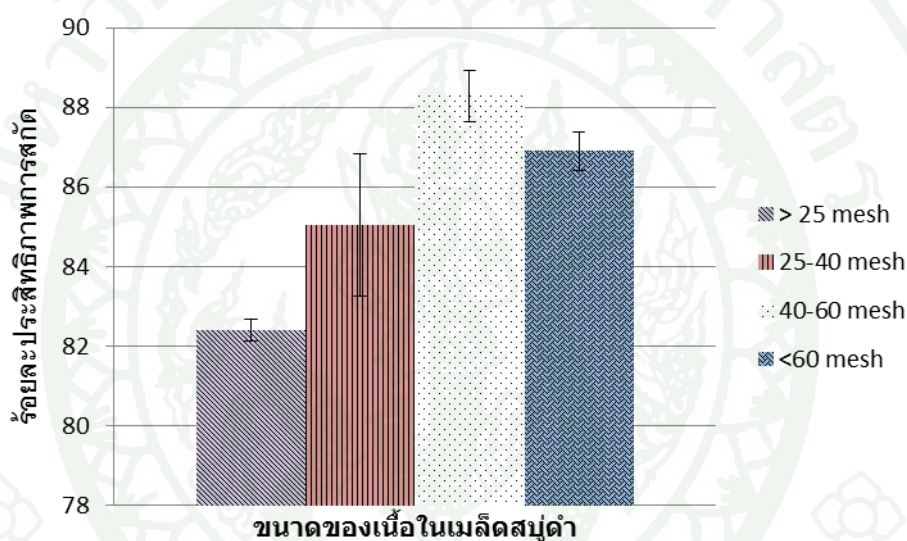
เป็นการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นก่อนการสกัดว่าภายในเนื้อในเมล็ดสบู่ดำมีปริมาณน้ำมันเท่าใด เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่เหลือในเนื้อในเมล็ดสบู่ดำหลังการสกัด ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การแสดงปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดต่าง ๆ

ขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ (มิลลิเมตร)	ปริมาณน้ำมันร้อยละโดยน้ำหนัก
> 25 mesh (> 0.710)	51.90
ระหว่าง 40 และ 25 mesh (0.710-0.425)	53.76
ระหว่าง 60 และ 40 mesh (0.425-0.250)	55.78
< 60 mesh (< 0.250)	55.80

2. การศึกษาขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสมในการนำมาสกัด ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน

ในการศึกษาขนาดของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสมที่สุด เพื่อคัดกรองตัวแปร หรือปัจจัย ก่อนที่จะคัดเลือกปัจจัยควบคุมในการออกแบบการทดลอง เนื่องจากขนาดเมล็ดสบู่ดำเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ยาก โดยตะแกรงกรอง (Sieve) ขนาดที่ใช้กับเนื้อในเมล็ดสบู่ดำมีราคาสูง จึงจำเป็นต้องเลือกขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสม ก่อนที่ทำการจะเลือกปัจจัยควบคุมในการออกแบบการทดลองดังวิธีต่อไป ซึ่งสภาวะควบคุมที่ใช้ในการศึกษาขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนตัวทำละลายเฮกเซนเกรดงานวิเคราะห์ 8 มิลลิลิตรต่อกรัม อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และเวลาในการสกัดที่ 60 นาที ผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงการศึกษาขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำ

จากการทดลองข้างต้น การศึกษาการสกัดน้ำมันสบู่ดำจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ขนาดต่าง ๆ พบว่าขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำตั้งแต่ขนาด มากกว่า 25 mesh ระหว่าง 25 และ 40 mesh และระหว่าง 40 และ 60 mesh ให้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการสกัดที่เพิ่มขึ้น ตามปริมาณขนาดของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ลดลง แต่กลับให้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการสกัดในปริมาณที่ลดลง จากขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำน้อยกว่า 60 mesh โดยสามารถอธิบายได้ว่า ปัจจัยขนาดเนื้อในเมล็ดที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันดังกล่าว จากกฎการถ่ายเทมวลที่ว่า ยิ่งปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสของของแข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้น สามารถส่งผลต่อโอกาสของของแข็ง และตัวทำละลายที่จะสัมผัสกันมากขึ้น (Basmadjian, 2007) อีกทั้งยังช่วยให้การแพร่ของตัวทำละลายเฮกเซนมายังน้ำมันภายในเนื้อในเมล็ดสบู่ดำได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งการลดขนาด เป็นการลด

ระยะทางและจำนวนผนังเซลล์ที่กั้นระหว่างตัวทำละลาย และชั้นที่มีน้ำมันอยู่ (Shahadi, 2005) แต่ที่ขนาดน้อยกว่า 60 mesh ให้ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดในปริมาณที่ลดลง เนื่องจากขนาดที่เล็กจน มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำจึงทำให้ไม่เกิดการสกัดได้ดีขึ้น (ศิริวรรณ, 2551) และสามารถอธิบายได้อีกสาเหตุคือ การสกัดเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวได้เร็วขึ้น ทำให้ความเข้มข้นภายนอก และภายในมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงมีโอกาสน้ำมันจะแพร่กลับ ส่งผลให้ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่ลดลง (Seader and Henley, 1998)

3. การศึกษาสภาวะเหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken

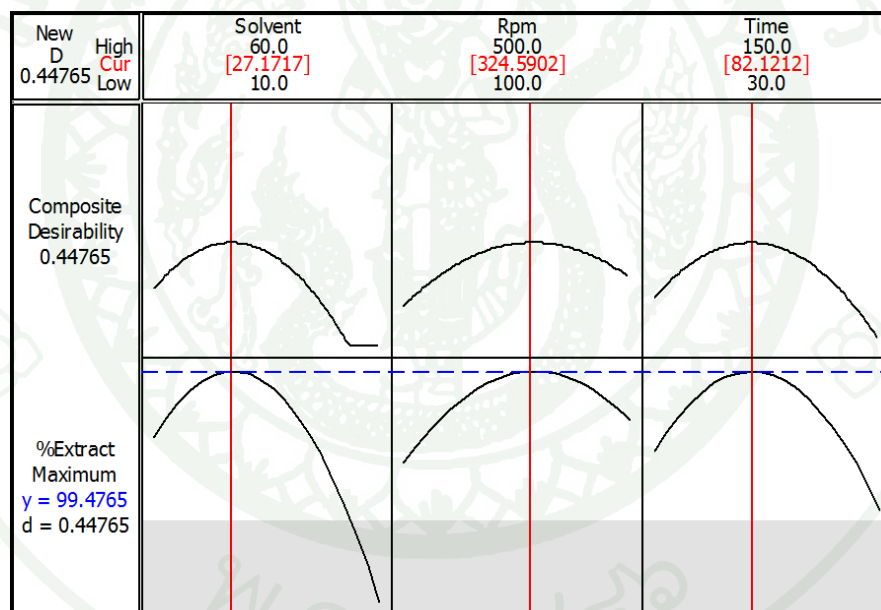
การศึกษาสภาวะเหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน เกรดการค้า จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ซึ่งการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken เป็นการออกแบบแบบการทดลองเพื่อ หาช่วงของปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันสบู่ดำ

จากงานวิจัยของ นรบดี และ ปิยะเนตร (2556) ได้ศึกษาตัวทำละลาย และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราส่วนระหว่างเนื้อเมล็ดสบู่ดำต่อปริมาตรตัวทำละลาย จำนวนครั้งของการสกัดที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ และยังศึกษาประสิทธิภาพของการนำตัวทำละลายที่ใช้สกัดแล้ว นำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้มีการศึกษาการผสมระหว่างตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยผลการทดลองพบว่า เวลาการสกัดที่ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างเนื้อเมล็ดสบู่ดำกับตัวทำละลาย 1:9 ซึ่งให้ผลการสกัดดีที่สุด ร้อยละ 57.67 ในปัจจัยของการสกัดซ้ำ สามารถสกัดได้สูงสุดที่ 4 ครั้ง ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของครั้งที่ 4 เท่ากับร้อยละ 43.66 และการผสมระหว่างเฮกเซนและ โทลูอีนให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันที่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 55.77 ซึ่งต่ำกว่าการใช้เฮกเซนสกัดเพียงชนิดเดียว

ดังนั้นจึงพิจารณาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันสบู่ดำ มาใช้เป็นปัจจัยเพื่อศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันคือ เวลาในการสกัด และอัตราส่วนของตัวทำละลาย จากงานวิจัยของ Kasim and Harvey (2011) ที่พบว่าปัจจัยดังกล่าวมีส่วนสำคัญในการสกัดน้ำมัน และในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นเมื่อทำการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม MINITAB version 16.0 จากจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร

โดยก่อนที่จะสามารถกำหนดช่วงของปัจจัยที่ดีที่สุดได้ดังตารางที่ 9 โดยจะได้การทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง พบว่าในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 มีความผิดพลาดในการกำหนดช่วงของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ทำให้ไม่สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ จึงมีการเพิ่มช่วงของปัจจัยที่มีการศึกษาในแต่ละการทดลองให้มากขึ้น เพื่อให้สามารถหาสภาวะที่เหมาะสม แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ข3 และ ข4 หลังจากการเพิ่มของปัจจัยดังกล่าวพบว่าการทดลองครั้งที่ 3 ที่กำหนดช่วงของปัจจัยที่ต้องการศึกษาใหม่ แสดงดังตารางที่ 9 ในส่วนของวิธีการทดลองข้างต้น เมื่อทำการทดลอง และวัดประสิทธิภาพของการสกัดน้ำมันของแต่ละการทดลอง ให้ผลการทดลองแสดงดังตารางภาคผนวก ข2

จากการทดลอง เมื่อนำผลการวัดประสิทธิภาพของน้ำมันสมุนไพรที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ MINITAB version 16.0 เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันออกมาสูงที่สุด ซึ่งจะได้กราฟแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยของประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสมุนไพร โดยการใช้ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้า และขนาดเนื้อในเมล็ดสมุนไพรระหว่าง 0.425-0.250 มิลลิเมตร

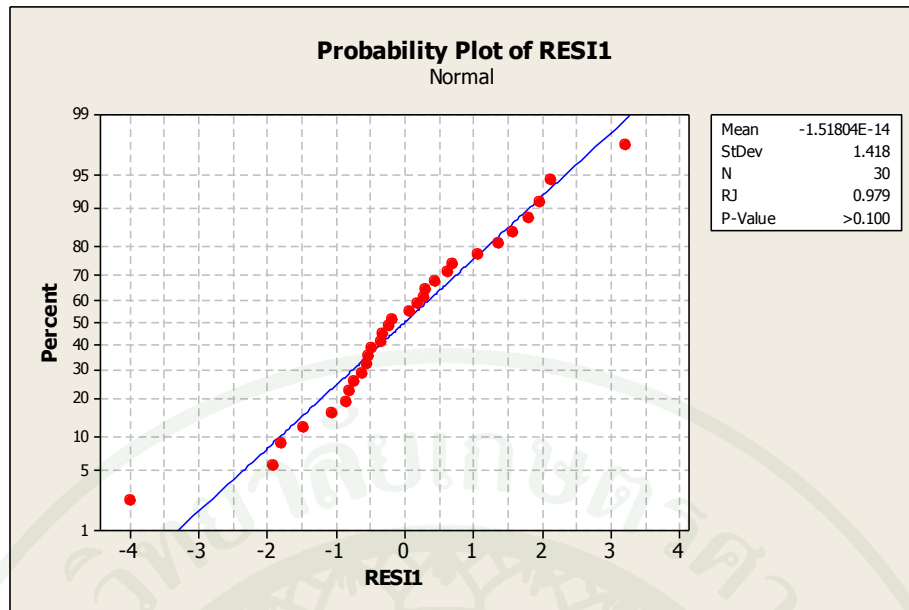
จากกราฟพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพของการสกัดน้ำมันสมุนไพรสูงสุดตามสมการทำนายเท่ากับ ร้อยละ 99.48 โดยปัจจัยเหมาะสมที่ได้คือ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อในเมล็ดสมุนไพร 27.17 มิลลิลิตรต่อกรัม อัตราการกวน 324.59 รอบต่อนาที และเวลาใน

การสกัด 82.12 นาที่ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าว เป็นสภาวะที่ได้ของการกำหนด ช่วงใหม่ จากการกำหนดช่วงของปัจจัยที่ผิดพลาดดังแสดงในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ดังภาพผนวก ข1 และ ข2

จากผลการทดลองดังกล่าวให้สภาวะที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ทำนายผลต่อไป แต่ก่อนที่จะนำไปใช้จำเป็นต้องนำไปวิเคราะห์ทางสถิติก่อน โดยต้องทำการทดสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เมื่อทำการแทนค่าของตัวแปรในแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เพื่อทำนายผลตอบสนอง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพยากรณ์ (\hat{Y}) กับค่าจริง (Y) และส่วนตกค้าง (Residuals) แบบจำลองดังกล่าวต้องตรวจสอบด้วยสมมติฐานหลัก 3 ข้อดังต่อไปนี้

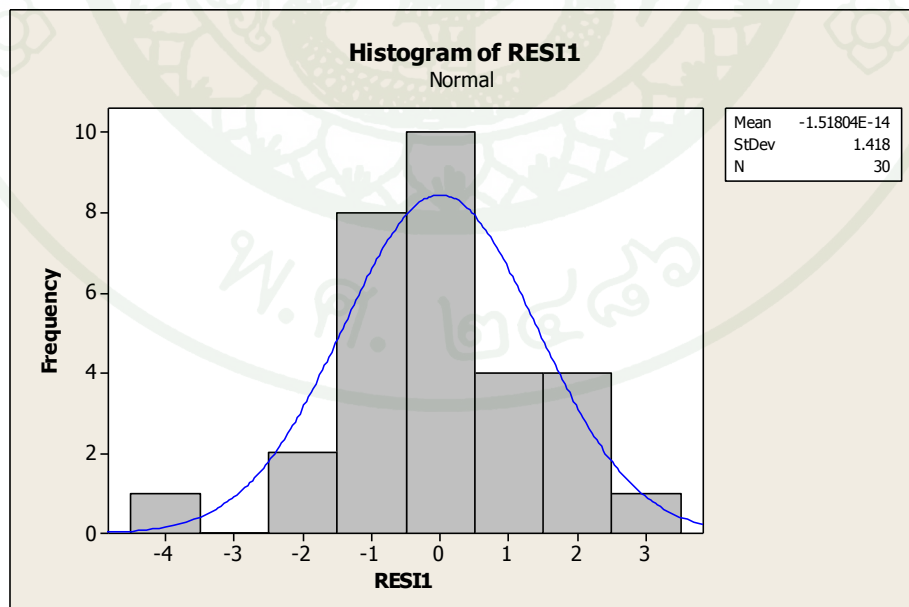
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

3.1.1 ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) โดยพิจารณาจากภาพที่ 17 พบว่าผลที่ได้จากการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากการทดสอบในส่วนของ Normality test และการแสดงผลของค่าที่ได้การทดสอบทางสถิติตามวิธีของ Ryan-Joiner (RJ) เท่ากับ 0.979 มีค่า p -value มากกว่า 0.100 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่ามากกว่า R_p ที่จุดวิกฤต และมากกว่าค่า p -value เท่ากับ 0.05 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



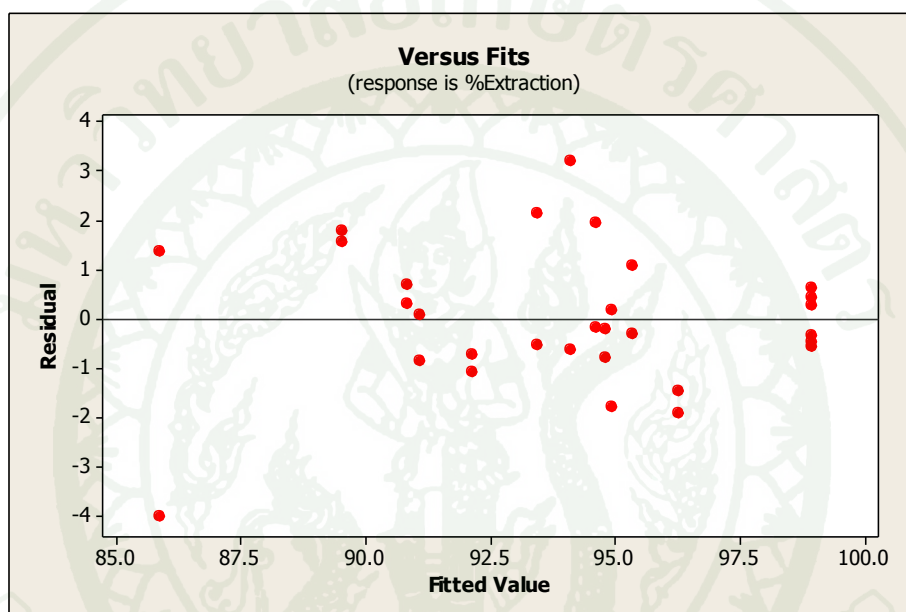
ภาพที่ 17 การกระจายตัวของส่วนตกค้าง

อีกกรณีที่ใช้พิจารณาการกระจายตัวของส่วนตกค้าง สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากกราฟฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง ดังแสดงในภาพที่ 18 พบว่า มีการกระจายตัวแบบปกติ โดยกราฟฮิสโตแกรมดังกล่าวมีการเรียงตัวแบบ Mesokurtic distribution (Yount, 2006) (Normal distribution)



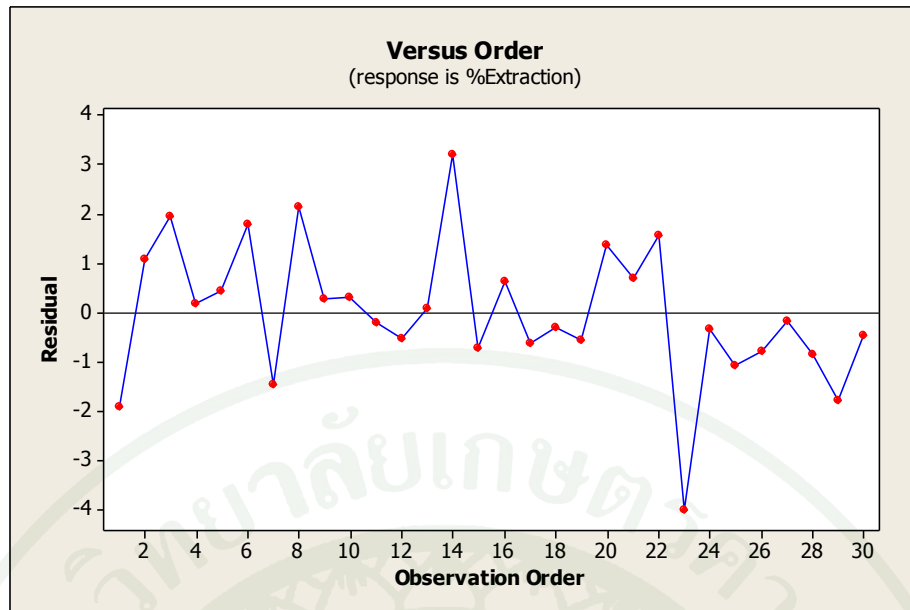
ภาพที่ 18 การกระจายตัวในแผนภูมิฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง

3.1.2 การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้าง (Variance stability) ในส่วนของกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของผลตอบของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 19 เมื่อทำการทดสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้าง ด้วยวิธีทดสอบของ Levene test (Gastwirth et al., 2009) พบว่าให้ค่า F_w เท่ากับ 0.00 ซึ่งน้อยกว่า $F_{\alpha, k-1, N-k}$ ($F_{0.05, 1, 28}$ ที่เท่ากับ 4.1960) และค่า p -value เท่ากับ 0.949 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าผลตอบของส่วนตกค้างให้ค่า p -value มากกว่า 0.05 แสดงว่าสมมติฐานของการทดสอบความแปรปรวนถูกยอมรับ (อาทิตยา, 2556) จึงสรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่



ภาพที่ 19 การกระจายตัวของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของผลตอบ

3.1.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าตกค้าง (Independently distributed) จากกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 20 เมื่อทดสอบด้วยวิธีการของ Kruskal-Wallis (Kruskal and Wallis, 1952) พบว่าให้ค่า F_H เท่ากับ 29 มีค่า p -value เท่ากับ 0.465 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และพบว่าผลตอบของส่วนตกค้างให้ค่า p -value มากกว่า 0.05 ให้ค่า F_H น้อยกว่า $\chi^2_{0.05, 29}$ (42.557) แสดงว่าสมมติฐานหลักของการทดสอบความเป็นอิสระของค่าตกค้างถูกยอมรับ จึงสามารถสรุปได้ว่าการกระจายตัวอย่างอิสระ



ภาพที่ 20 การกระจายตัวของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง

เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองแล้ว พบว่าไม่มีความผิดปกติของการทดลอง ซึ่งรูปแบบการทดลองที่ได้ออกมาแสดงให้เห็นว่ามีความน่าเชื่อถือ จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าว ไปใช้ทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติต่อไป โดยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้ง 3 จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ MINITAB version 16.0 และกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ระดับร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ดังตารางที่ 12 และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ดังแสดงตารางที่ 13

ตารางที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์ และค่า p -value ของสภาวะการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken

ปัจจัย	สภาวะการสกัดน้ำมันสบู่ดำ	
	ค่าสัมประสิทธิ์	p -value
ค่าคงที่	81.5939	0.000
Time (A)	0.1632	0.000
Solvent (B)	0.4489	0.000
Rpm (C)	0.0305	0.015
Time ² (A ²)	-0.0009	0.000
Solvent ² (B ²)	-0.0065	0.000
Rpm ² (C ²)	-0.0001	0.004
Time x Solvent (AB)	-0.0011	0.012
Time x Rpm (AC)	-0.0000	0.436
Solvent x Rpm (BC)	-0.0000	0.946

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสภาวะการสกัดน้ำมันสบู่ดำ

Source	Degree of freedom	Sum square	Mean square	F	p -value
Regression (model)	9	379.008	42.112	14.44	0.000
Residuals Error	20	58.340	2.917		
Total	29	437.349			

$R^2 = 86.66\%$ $R^2(\text{adj}) = 80.66\%$

3.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทำนายปริมาณร้อยละการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่ได้

สมการแบบจำลองที่ได้นั้น จะอยู่ในรูปแบบสมการกำลังสองที่ประกอบด้วย 4 พจน์ คือ พจน์ของค่าคงที่ พจน์เชิงเส้นตรง พจน์กำลังสอง และพจน์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ดังสมการที่ 42

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1A + \alpha_2B + \alpha_3C + \alpha_{11}A^2 + \alpha_{22}B^2 + \alpha_{33}C^2 + \alpha_{12}AB + \alpha_{13}AC + \alpha_{23}BC \quad (42)$$

โดยค่า Y	คือ ปริมาณร้อยละของการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่ได้
α_1	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) เวลาที่ใช้ในการสกัดในพจน์ของเส้นตรง
α_2	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำในพจน์ของเส้นตรง
α_3	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการกวนในพจน์ของเส้นตรง
α_{12}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์เวลาที่ใช้ในการสกัดใจพจน์ของกำลังสอง
α_{13}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำในพจน์ของกำลังสอง
α_{23}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการกวนในพจน์ของกำลังสอง
A	คือ เวลาที่ใช้ในการสกัด
B	คือ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ
C	คือ อัตราการกวน

จากสมการ (42) เมื่อทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลองแล้ว จากตารางที่ 12 จะสามารถได้สมการแบบจำลองอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดน้ำมันสบู่ดำกับค่าสถานะของของแต่ละปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้ Time Solvent และ Rpm แสดงได้ดังสมการที่ (43)

$$Y = 81.5939 + 0.1632A + 0.4489B + 0.0305C - 0.0009A^2 - 0.0065B^2 - 0.0001C^2 - 0.0011AB \quad (43)$$

ในส่วนถัดไปจะเป็นการพิจารณาค่า *p-value* ของสมการแบบจำลองและ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถบ่งชี้ถึงว่าสมการที่ได้ดังกล่าวนี้ มีความเหมาะสม และ

สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้อย่างมากน้อยเพียงใด โดยค่า p -value จะหาได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากโปรแกรมวิเคราะห์ MINITAB version 16.0 ดังแสดงในตารางที่ 13 จะแสดงให้เห็นว่าค่า p -value ของสมการแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 0.000 โดยมีค่าน้อยกว่า 0.05 ตามหลักทางสถิติแล้วแสดงให้เห็นว่าสมการนี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ทำนายปริมาณร้อยละการสกัดน้ำมันสบู่ดำ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจจะแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของสมการแบบจำลอง เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจมีค่ามาก สมการที่ได้นั้นยังมีความเหมาะสม และน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น และจากตารางที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 86.66 แสดงให้เห็นว่าสมการนี้มีความเหมาะสม และสามารถนำไปใช้ทำนายต่อไปได้

เมื่อทำการพิจารณาค่าวิกฤตการแจกแจง (F) ของสมการจำลองดังกล่าว จากตารางที่ 13 ซึ่งค่าวิกฤตการแจกแจงจะแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการนำสมการไปใช้ สามารถตรวจสอบได้โดยการนำค่าวิกฤตจากการแจกแจงดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤตการแจกแจงจากตารางค่าวิกฤตการแจกแจง (F-test) ถ้าค่า F_{model} มีค่ามากกว่า F_{table} นั้นแสดงให้เห็นว่าสมการที่ได้จากการทำนายมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ได้ ซึ่งจากการเปิดตารางค่าวิกฤตการแจกแจงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามภาคผนวกที่ ข1 จะทำให้ได้ค่า F_{table} ($F_{\alpha(\text{model}, \text{residual error})} = F_{(0.05, 9, 20)}$) เท่ากับ 2.3928 โดยเปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวจากตารางที่ 13 ที่ F_{model} มีค่าเท่ากับ 14.44 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการดังกล่าว มีความเหมาะสม และมีความน่าเชื่อถือ

3.3 การยืนยันผลการทดลอง

ในการยืนยันผลการทดลอง คือ การทำการทดลองของสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken เพื่อเป็นการพิสูจน์ความแม่นยำของการทำนายของสมการดังกล่าว โดยการยืนยันผลการทดลองนั้น ได้เลือกเอาสภาวะเหมาะสมที่ทำนายจากโปรแกรม ดังที่แสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบปริมาณร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสมุนไพร จากการทำนายและจากการทดลองที่สกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้า

สถานะที่ใช้ในการเปรียบเทียบ			ร้อยละของการสกัดน้ำมันสมุนไพรที่ได้		
A	B	C	ค่าจากสมการ	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
82	27.17:1	324	99.48	98.19	1.30

จากการทดลองเมื่อทำการสกัดน้ำมันสมุนไพรตามสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแล้ว พบว่าให้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสมุนไพรเท่ากับ 98.19 แสดงในตารางที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการแล้ว จึงมีค่าที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 1.30 ซึ่งค่าจากความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ควรมีระดับที่ไม่เกินร้อยละ 10 (เกล็ดแก้ว, 2557) ดังนั้นสมการแบบจำลองดังกล่าวจึงมีความเหมาะสม และสามารถนำไปใช้ทำนายร้อยละของการสกัดน้ำมันสมุนไพรได้

เมื่อได้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสมุนไพรสูงสุดจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ตามข้างต้นแล้ว จึงนำไปใช้ศึกษาในส่วนขั้นตอนถัดไป ที่จะเป็นการศึกษาผลของการออกแบบการขยายกำลังการผลิตด้วยโปรแกรม Aspen plus ที่จะศึกษาการควบคุมอัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสมุนไพร 10,000 30,000 และ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน และใช้ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้าในการสกัด

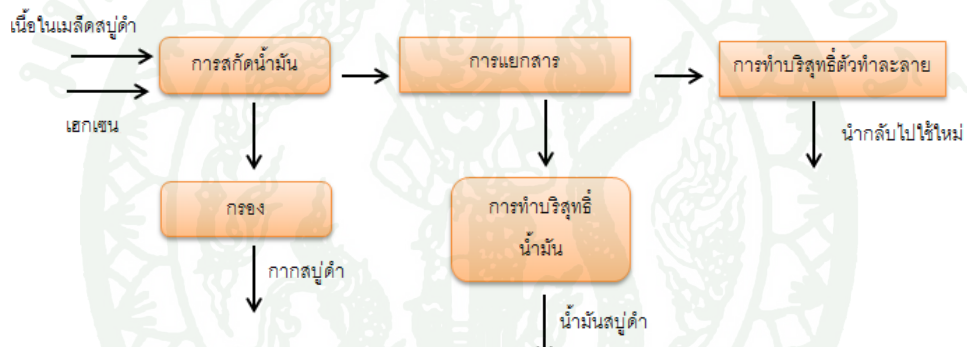
4. ผลจากการดำเนินการด้วยโปรแกรม Aspen plus

เมื่อได้สถานะสูงสุดจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken แล้วจึงได้นำมาดำเนินการต่อทางโปรแกรม Aspen plus โดยการศึกษาการควบคุมของการผลิต ด้วยการควบคุมอัตราส่วนตัวทำละลายต่อเนื้อในเมล็ดสมุนไพรที่ 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม และอัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสมุนไพรที่ 10,000 30,000 และ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน ในส่วนต่อไปจะเป็นการสรุปผลการดำเนินงานของโปรแกรมเมื่อเปรียบเทียบสถานะที่ดำเนินการ

4.1 ผลการศึกษาการควบคุมที่โรงงานขนาดต่าง ๆ

การผลิตน้ำมันจากการสกัดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำด้วยตัวทำละลายเฮกเซน เกรดการค้า ประกอบไปด้วยกำลังการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่อัตรา 10,000 30,000 และ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน โดยกำลังการป้อนทั้งสามจะมีวิธี และขั้นตอนในการดำเนินการที่เหมือนกัน

กระบวนการผลิตน้ำมันสบู่ดำจะประกอบด้วยสารตั้งต้นหลัก เนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ถูกกะเทาะเปลือกออกเรียบร้อยแล้ว และเฮกเซนเกรดการค้า เมื่อผ่านกระบวนการสกัดแล้วจะผ่านด้วยเครื่องกรองเพื่อแยกเอากากสบู่ดำออก รวมถึงนำตัวทำละลายที่ผสมกับน้ำมันที่เหลือไปผ่านกระบวนการกลั่นเพื่อแยกเอาตัวทำละลาย และน้ำมันสบู่ดำออกจากกัน โดยตัวทำละลายที่เหลือจะถูกนำมาใช้ใหม่เพื่อสกัดน้ำมันสบู่ดำอีกครั้ง โดยมีรูปที่ 21 เพื่อแสดงกระบวนการผลิต



ภาพที่ 21 Input/Output diagram ของกระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ดำ

สมมติฐานการทำสมดุลมวล

- กำหนดให้อุณหภูมิของการสกัดที่ 30 องศาเซลเซียส
- กำหนดให้ความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ
- กำหนดให้อัตราส่วนตัวทำละลายเฮกเซนต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม
- กำหนดให้ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 99.48
- กำหนดให้ในส่วนของ Rotary drum ในส่วนที่ออกกลางหอยมีของเหลวออกไปกับของแข็งเป็นร้อยละ 10 ของของเหลวทั้งหมด
- กำหนดให้สภาวะหอกลั่นมี 41 ชั้น และชั้นที่นำเข้า (Feed stage) ที่ 15

- กำหนดให้อัตราฟลักเท่ากับ 19.22 ความดันคอนเดนเซอร์ และรีบอยเรอร์เท่ากับ 1 บรรยากาศ
- กำหนดให้การใช้เนื้อในเมล็ดสบู่ดำ และเฮกเซนในการผลิตน้ำมันสบู่ดำตั้ง องค์ประกอบในตารางที่ 15 และ 16

ตารางที่ 15 องค์ประกอบของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

ชนิดขององค์ประกอบ	องค์ประกอบ (ร้อยละ)
น้ำมันสบู่ดำประกอบไปด้วย	55.78
กรดปาล์มมิติก*	16.17
กรดสเตียริก*	5.11
กรดโอเลอิก*	44.89
กรดลิโอเลอิก*	33.83
ความชื้น	5
กากสบู่ดำ	39.22

* ที่มา: รักษ์ (2549)

ตารางที่ 16 องค์ประกอบของเฮกเซนเกรดการค้า

ชนิดขององค์ประกอบ	องค์ประกอบ (ร้อยละ)
Hexane	52.0
Cyclo-hexane	16.0
2-pentane	15.0
3-pentane	15.0
Dimethylbutane	2.0

ที่มา: Chevronphilips (2014)

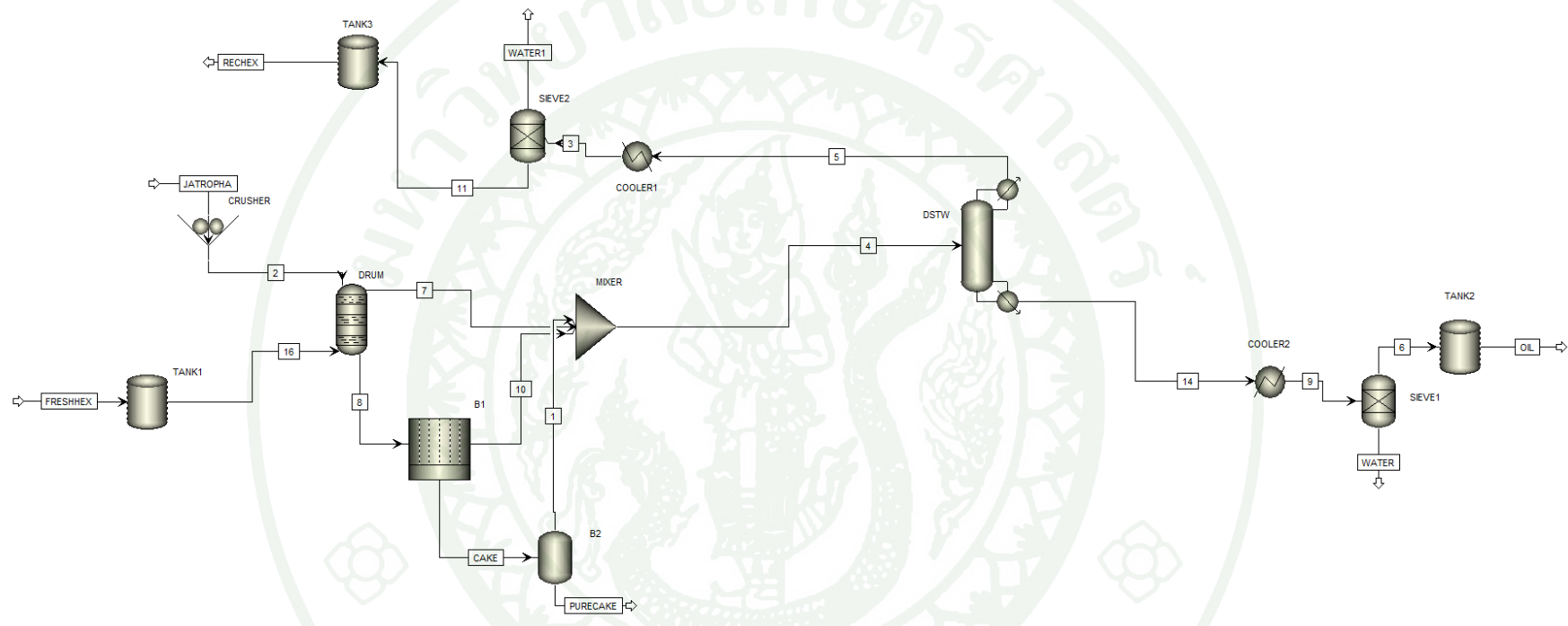
4.1.1 การสกัดน้ำมันสบู่ดำที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 10,000 กิโลกรัมต่อวันด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนที่อัตราส่วน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

การสกัดน้ำมันสบู่ดำที่อัตราป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 10,000 กิโลกรัมต่อวัน และสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนที่อัตราส่วน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ ซึ่งการใช้ตัวทำละลายในครั้งแรกเท่ากับ 271,717 ลิตรต่อวัน ซึ่งสกัดกันภายใน เครื่องสกัด (Rotary drum) และกรองเพื่อแยกเอากากสบู่ดำออกจากของเหลว โดยของเหลวที่เหลือจะถูกแยกโดยหอกลั่น เพื่อแยกเอาตัวทำละลายและน้ำมันสบู่ดำออก รายละเอียดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 22

ตารางที่ 17 แสดงปริมาณสารนำเข้าและสารขาออกที่สำคัญของการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่ 10,000 กิโลกรัม (ปริมาณต่อวัน)

Base line	สารขาเข้า				สารขาออก			
	Jatropha cake (kg)	Hexane (L)	Oil (kg)	Water (kg)	Jatropha cake (kg)	Hexane (L)	Oil (kg)	Water (kg)
JATROPHA	3,922		5,578	500				
FRESHHEX		271,717						
PURECAKE					3,922	53.49	11.34	0.003
OIL							5,568	
RECHHEX						271,663.53		
WATER								387.16
WATER1								112.88

จากตารางที่ 17 สามารถแสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาด 10,000 กิโลกรัม และใช้ตัวทำละลายเฮกเซนปริมาณ 271,717 ลิตรต่อวัน สามารถผลิตน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 5,568 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งคิดเป็นผลได้เท่ากับร้อยละ 99.82 และได้กากจากการกรองปริมาณเท่ากับ 3,922 กิโลกรัมต่อวัน และตัวทำละลายเฮกเซนที่แยกได้เท่ากับ 271,663.53 ลิตรต่อวัน คิดเป็นอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่เท่ากับร้อยละ 99.98 ดังนั้นข้อมูลดังต่อไปนี้จะถูกนำไปใช้ในส่วนของการคำนวณมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนต่อไป



ภาพที่ 22 กระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ดำจากตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้าที่กำลังการนำเข้าเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 10,000 กิโลกรัมต่อวัน

4.1.2 การสกัดน้ำมันสบู่ดำที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 30,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนที่อัตราส่วน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

การสกัดน้ำมันสบู่ดำที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 30,000 กิโลกรัมต่อวัน และสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนที่อัตราส่วน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ ซึ่งการใช้ตัวทำละลายในครั้งแรกเท่ากับ 815,151 ลิตรต่อวัน ซึ่งสกัดกันภายในเครื่องสกัด ที่ต่างจากกำลังการนำเข้าที่ 10,000 กิโลกรัม เนื่องจากใช้ถึง 3 ถังในการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ซึ่งการใช้หลายถังในการสกัด จากงานวิจัยของ Bundithum (2011) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ติดตามผลของการทำสมดุลมวล และทดสอบการกำหนดเวลาในการผลิต พบว่าการที่ใช้หลายถังของการผลิตจะช่วยให้ผลผลิตที่ได้มีจำนวนมากกว่าภายในถังเดียวที่ปริมาตรขนาดใหญ่ รวมถึงให้ค่าการใช้น้ำในการผลิตที่ถูกลงกว่า ดังนั้นงานวิจัยดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบในการสกัดที่ปริมาณ 3 ถัง และจากนั้นผ่านการกรองเพื่อแยกเอากากสบู่ดำออกจากของเหลว โดยของเหลวที่เหลือจะถูกแยกโดยหอกลับเพื่อแยกเอาตัวทำละลาย และน้ำมันสบู่ดำออก รายละเอียดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 23

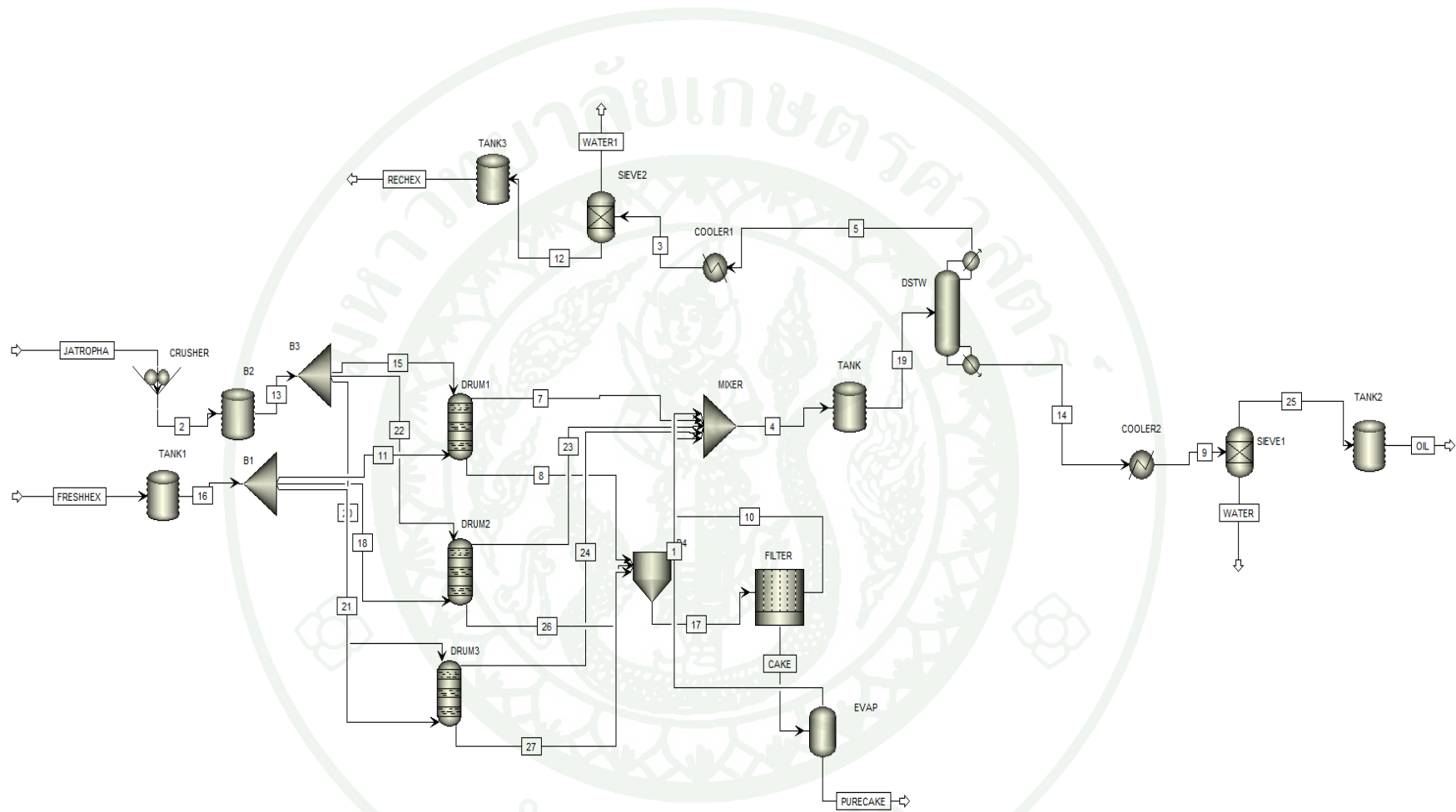
ตารางที่ 18 แสดงปริมาณสารนำเข้าและสารขาออกที่สำคัญของการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่ 30,000 กิโลกรัม (ปริมาณต่อวัน)

Base line	สารขาเข้า				สารขาออก			
	Jatropha cake (kg)	Hexane (L)	Oil (kg)	Water (kg)	Jatropha cake (kg)	Hexane (L)	Oil (kg)	Water (kg)
JATROPHA	11,766		16,733	1,500				
FRESHHEX		815,151						
PURECAKE					11,766	153.89	28.72	0.08
OIL							16,705	
RECHEX						814,997.19		
WATER								1185.88
WATER1								314.11

จากตารางที่ 18 สามารถแสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาด 30,000 กิโลกรัม และใช้ตัวทำละลายเฮกเซนปริมาณ 815,151 ลิตรต่อวัน สามารถผลิตน้ำมันสบู่ดำ

เท่ากับ 16,705.21 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งคิดเป็นผลได้เท่ากับร้อยละ 99.82 และได้จากการกรอง ปริมาณเท่ากับ 11,766.02 กิโลกรัมต่อวัน และตัวทำละลายเฮกเซนที่แยกได้เท่ากับ 814,997.19 ลิตร ต่อวัน คิดเป็นอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่เท่ากับร้อยละ 99.98 ดังนั้นข้อมูลดังต่อไปนี้จะถูกนำไปใช้ ในส่วนของการคำนวณมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนต่อไป





ภาพที่ 23 กระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ออกจากตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้าที่กำลังการนำเข้าเนื้อในเมล็ดสบู่อ่า 30,000 กิโลกรัมต่อวัน

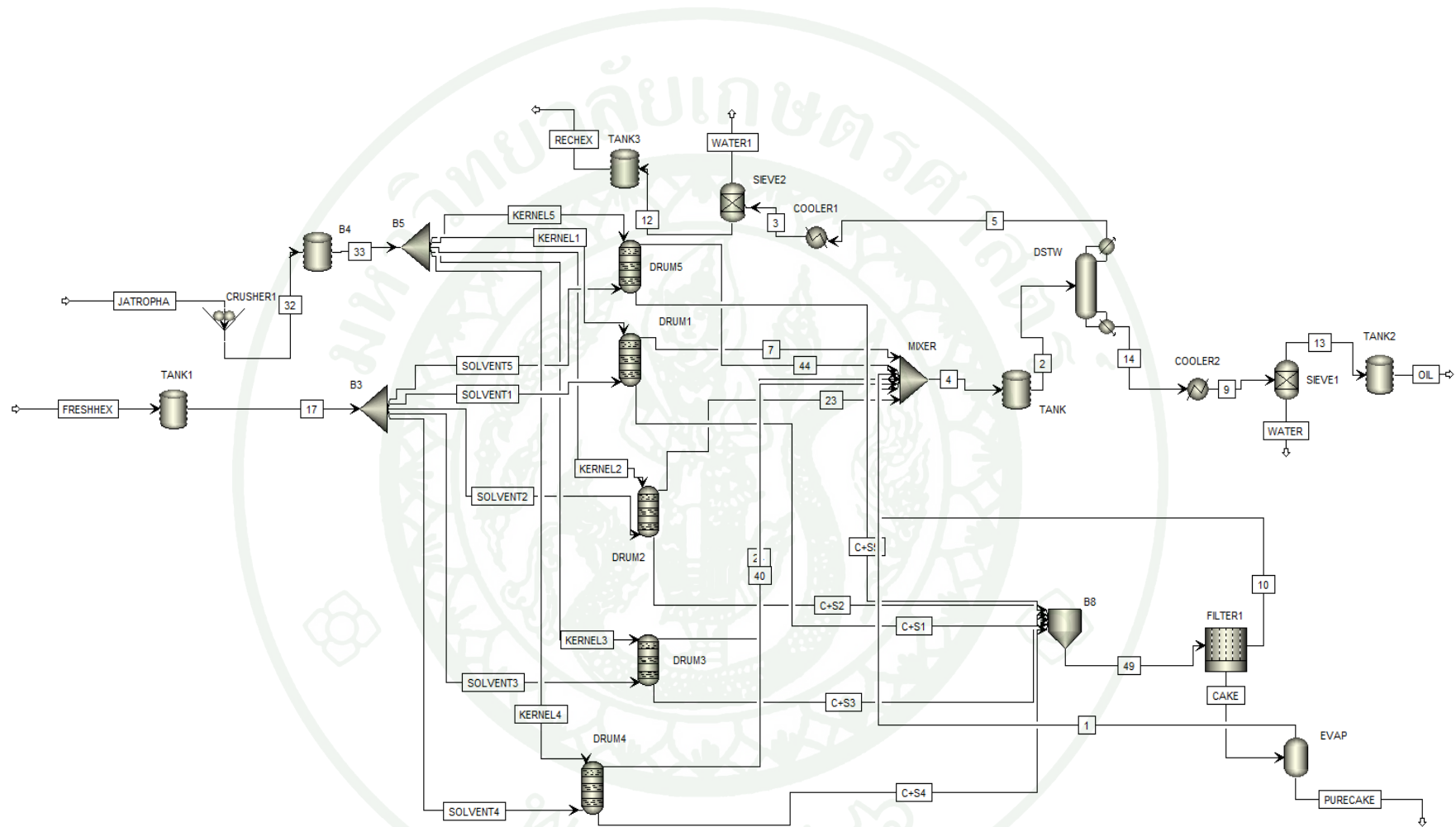
4.1.3 การสกัดน้ำมันสบู่ดำที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนที่อัตราส่วน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

การสกัดน้ำมันสบู่ดำที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน และสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนที่อัตราส่วน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ ซึ่งการใช้ตัวทำละลายในครั้งแรกเท่ากับ 1,358,585 ลิตรต่อวัน ซึ่งสกัดกันภายในเครื่องสกัด ซึ่งใช้ถึงสกัด 5 ถัง และจากนั้นผ่านการกรองเพื่อแยกเอากากสบู่ดำ โดยของเหลวที่เหลือจะถูกแยกโดยหอกลิ้น เพื่อแยกเอาตัวทำละลาย และน้ำมันสบู่ดำออก รายละเอียดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 24

ตารางที่ 19 แสดงปริมาณสารนำเข้าและสารขาออกที่สำคัญของการสกัดน้ำมันสบู่ดำที่ 50,000 กิโลกรัม (ปริมาณต่อวัน)

Base line	สารขาเข้า				สารขาออก			
	Jatropha cake (kg)	Hexane (L)	Oil (kg)	Water (kg)	Jatropha cake (kg)	Hexane (L)	Oil (kg)	Water (kg)
JATROPHA	19,609		27,889	2,500				
FRESHHEX		1,358,585						
PURECAKE					19,609	267.39	50	0.01
OIL							27,839	
RECHEX						1,358,317		
WATER								1,965.6
WATER1								534.3

จากตารางที่ 19 สามารถแสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาด 50,000 กิโลกรัม และใช้ตัวทำละลายเฮกเซนปริมาณ 1,358,585 ลิตรต่อวัน สามารถผลิตน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 27,839.32 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งคิดเป็นผลได้เท่ากับร้อยละ 99.82 และได้กากจากการกรองปริมาณเท่ากับ 19,609.68 กิโลกรัมต่อวัน และตัวทำละลายเฮกเซนที่แยกได้เท่ากับ 1,358,317 ลิตรต่อวัน คิดเป็นอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่เท่ากับร้อยละ 99.98 ดังนั้นข้อมูลดังต่อไปนี้จะถูกนำไปใช้ในส่วนของการคำนวณมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนต่อไป



ภาพที่ 24 กระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ดำจากตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้า ที่กำลังการนำเข้าเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน

จากกำลังการผลิตทั้ง 3 โครงการที่อัตราส่วนตัวทำละลาย 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม เนื้อในเมล็ดสบู่ดำ อุณหภูมิสกัด 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ให้ค่าผลได้เท่ากับ ร้อยละ 99.82 และมีอัตราการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่คิดเป็นร้อยละ 99.98 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ชมพกา (2549) ที่สกัดได้สูงสุดโดยใช้เฮกเซนที่อัตราส่วน 3 ลิตรต่อกิโลกรัม อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 15 เมกะปาสคาล ให้ค่าผลได้ร้อยละ 59.75 มีอัตราการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่คิดเป็นร้อยละ 74.21 สามารถอธิบายได้ว่างานวิจัยนี้ถึงแม้ใช้อัตราส่วนตัวทำละลายที่สูง แต่ให้อัตราผลได้สูงกว่างานวิจัยของ ชมพกา (2549) และยังสามารถนำเฮกเซนกลับมาใช้ได้สูงถึง 99.98 ที่แสดงถึงต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลง เพื่อให้เห็นภาพรวมของการผลิตน้ำมันมากขึ้น จึงมีการศึกษาผลทางเศรษฐศาสตร์จากข้อมูลที่ได้จากการจำลองการผลิตดังกล่าว ดังขั้นตอนต่อไป

5. ผลจากการดำเนินการจากโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer และการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ส่วนดังกล่าวนี้เป็นการคำนวณทางด้านเศรษฐศาสตร์ ที่มีการใช้โปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer ในการประเมินค่าอุปกรณ์ในการผลิต รวมถึงการใช้สาธารณูปโภคที่ใช้ในการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ซึ่งการคำนวณต้นทุนของการผลิตสามารถแบ่งการคำนวณออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด และต้นทุนในการผลิต โดยในส่วนต่อไปจะแสดงถึงผลจากการคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานขนาดต่าง ๆ

5.1 ผลการคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด

ในการคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานดังกล่าวเป็นการประเมินราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงาน ซึ่งได้จากการประเมินด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer รวมถึงมีองค์ประกอบอื่น ๆ คือ ต้นทุนทางตรง ต้นทุนทางอ้อม เงินลงทุนคงที่ และเงินทุนหมุนเวียน ที่จะเป็นส่วนเกี่ยวข้องเนื่องกับการประเมินราคาของอุปกรณ์ ซึ่งรายละเอียดและสัดส่วนต่าง ๆ มีแสดงดังภาคผนวก จ1-จ6 โดยผลที่สำคัญและการเปรียบเทียบราคาต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด ที่โรงงานผลิตขนาดต่าง ๆ ได้แสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมดของขนาดโรงงานต่าง ๆ

รายละเอียด	10,000 กิโลกรัมต่อวัน (บาท)	30,000 กิโลกรัมต่อวัน (บาท)	50,000 กิโลกรัมต่อวัน (บาท)
1. ต้นทุนทางตรง	36,527,693	64,536,326	84,586,545
ค่าเครื่องมืออุปกรณ์	21,114,274	37,304,235	48,983,957
2. ต้นทุนทางอ้อม	10,122,132	17,883,560	23,439,645
3. เงินลงทุนคงที่	46,649,825	82,419,887	108,026,190
4. เงินทุนหมุนเวียน	2,058,174	10,549,912	10,311,662
5. ต้นทุนในการสร้าง โรงงานทั้งหมด	48,708,000	92,969,798	118,337,852

หมายเหตุ: รายละเอียดและสัดส่วนต่าง ๆ มีแสดงดังภาคผนวก จ1-จ6

5.2 ผลการคำนวณต้นทุนในการผลิต

ในการคำนวณต้นทุนในการผลิตคือการประเมิน และคำนวณสัดส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการสกัดน้ำมัน ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ คือ ค่าสารเคมีที่ใช้ในการผลิต ค่าเมล็ดสบู่ดำ ค่าสาธารณูปโภคที่ใช้ในการผลิต ค่าแรงงานพนักงาน รวมถึงค่าซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และค่าใช้ในการบริหารงาน ซึ่งตารางที่ 21 จะแสดงผลของการคำนวณ หรือองค์ประกอบที่สำคัญที่ใช้การคำนวณต้นทุนในปีแรกของการผลิต

ตารางที่ 21 ผลการคำนวณต้นทุนในการผลิตของโรงงานขนาดต่าง ๆ

รายละเอียด	10,000 กิโลกรัมต่อวัน (บาทต่อปี)	30,000 กิโลกรัมต่อวัน (บาทต่อปี)	50,000 กิโลกรัมต่อวัน (บาทต่อปี)
1. ต้นทุนการผลิต โดยตรง	35,791,450.53	95,604,157.12	155,050,135.47
ค่าวัสดุดิบ	26,244,473.19	79,081,068.59	131,471,850.30
2. ค่าประกันภัย	186,599.30	329,679.55	432,104.76
3. ค่าใช้จ่ายในการ บริหาร	1,461,239.99	2,789,093.95	3,550,135.57
4. ต้นทุนในการผลิต ทั้งหมด	36,791,450.53	98,722,930.62	159,032,375.80

หมายเหตุ: รายละเอียดและสัดส่วนต่าง ๆ มีแสดงดังภาคผนวก จ7-จ12

5.3 ผลการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ

เมื่อได้ค่าต้นทุนในการสร้างโรงงานทั้งหมด และต้นทุนในการผลิตทั้งหมดแล้ว มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ เป็นหลักการคำนวณจากค่ากระแสเงินสดในแต่ละปี แล้วหักลบด้วยเงินลงทุนทั้งหมดของโครงการ โดยการพิจารณานั้นจะเป็นการเปรียบเทียบ มูลค่าปัจจุบันสุทธิว่ามีค่าเป็นบวก เป็นลบหรือเป็นศูนย์ ซึ่งถ้าหากมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวก ถือว่าเป็น โครงการที่ได้กำไร คຸ້ມຄ່າແກ່การลงทุน ถ้าหากเป็นลบ ถือว่าโครงการนั้นเป็นโครงการที่ขาดทุน ไม่เหมาะสมแก่การลงทุน และเป็นศูนย์ถือว่าโครงการนั้นมีการลงทุนที่เท่าทุน ไม่ได้กำไรหรือขาดทุน ในระยะเวลาที่กำหนดในการดำเนินโครงการ โดยตารางที่ 22 จะแสดงองค์ประกอบที่ใช้ในการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาโรงงานที่ขนาดต่าง ๆ และมูลค่าซากโรงงาน รวมถึงการกำหนดองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

กำหนดให้

อัตราเงินเฟ้อ(คงที่) ร้อยละ 2.20 ต่อปี

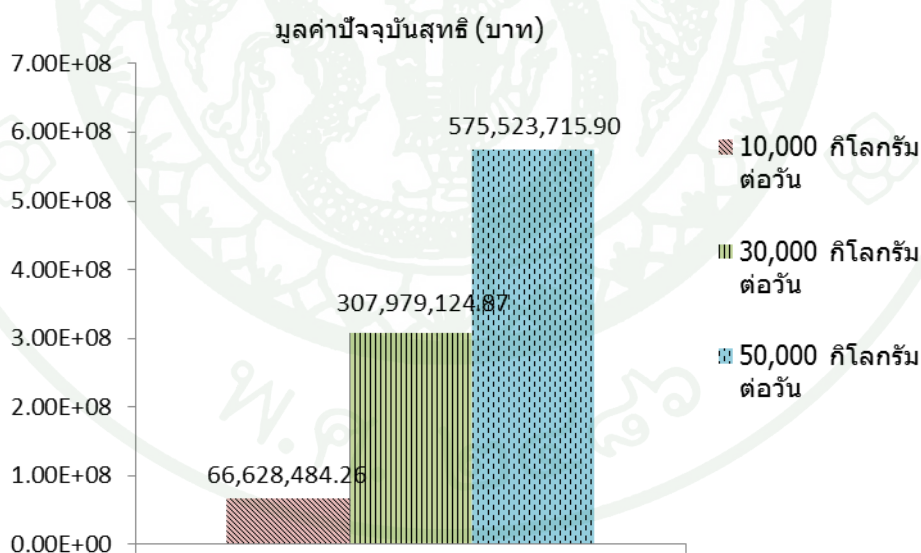
อัตราภาษี ร้อยละ 20 ต่อปี

อายุโครงการ 20 ปี
อัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่รับได้ (MARR) ร้อยละ 17 ต่อปี
จำนวนวันที่โรงงานทำงาน 300 วัน/ปี

ตารางที่ 22 ผลการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานขนาดต่าง ๆ

รายละเอียด	10,000 กิโลกรัมต่อวัน	30,000 กิโลกรัมต่อวัน	50,000 กิโลกรัมต่อวัน
	(บาทต่อปี)	(บาทต่อปี)	(บาทต่อปี)
1. ค่าเสื่อมราคา โรงงาน	2,132,491.26	3,720,994.33	4,901,309.49
2. มูลค่าซากโรงงาน	4,000,000.00	7,000,000.00	10,000,000.00
3. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	66,628,484.26	307,979,124.87	575,523,715.90

หมายเหตุ: รายละเอียดสัดส่วนและการคำนวณกระแสเงินสดในส่วนต่าง ๆ มีแสดงตั้งภาคผนวก
จ15-จ17



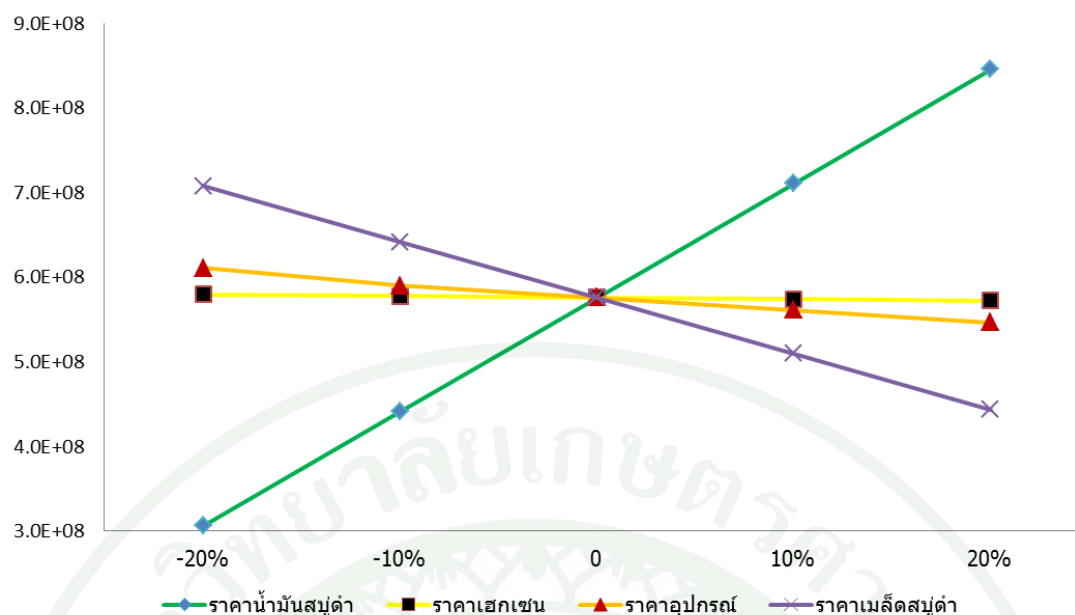
ภาพที่ 25 แผนภูมิของมูลค่าปัจจุบันสุทธิในโรงงานขนาดต่าง ๆ

จากภาพที่ 25 แสดงผลของการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่โรงงานขนาดต่าง ๆ พบว่าค่า
มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานสกัดน้ำมันสบู่น้ำที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสบู่น้ำ 10,000 กิโลกรัม

เท่ากับ 66,628,484.26 บาท ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2 ปี 8.13 เดือน อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 39 เป็นอัตราที่มากกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่รับได้ที่ร้อยละ 17 แสดงให้เห็นถึงโครงการดังกล่าวมีความคุ้มค่า และนำลงทุน เมื่อเพิ่มกำลังอัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสับดูดำไปยังโรงงานขนาด 30,000 และ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน พบว่าค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเท่ากับ 307,979,124.87 และ 575,523,715.90 บาท ซึ่งผลของมูลค่าปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณขนาดที่เพิ่มขึ้น และสามารถวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนได้เท่ากับ 1 ปี 6.26 เดือน อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 69 ในโรงงานขนาด 30,000 กิโลกรัมต่อวัน และระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1 ปี 1.73 เดือน อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 92.54 ของโรงงานขนาด 50,000 กิโลกรัม จากโครงการที่มีระยะการคืนทุนที่สั้น และอัตราการตอบแทนภายในที่สูงแสดงให้เห็นว่า โครงการดังกล่าวมีความเสี่ยงของการขาดทุนต่ำ คืนทุนได้อย่างรวดเร็วส่งผลทำให้ได้กำไรมากขึ้น เนื่องด้วยการคืนทุนในระยะเวลาสั้น อีกทั้งอัตราการตอบแทนภายในสูง ทำให้โครงการเหมาะสม คุ้มค่าที่จะลงทุน และเมื่อเปรียบเทียบกำลังการผลิตทั้ง 3 ขนาด พบว่าโรงงานสกัดน้ำมันสับดูดำที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสับดูดำขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวันให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมากที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงการสกัดน้ำมันสับดูดำดังกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุนมากที่สุด ดังนั้นจึงได้มีการใช้โรงงานขนาดดังกล่าวในศึกษาเพิ่มเติม โดยศึกษาราคาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Sensitivity) ในส่วนต่อไป

5.4 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ

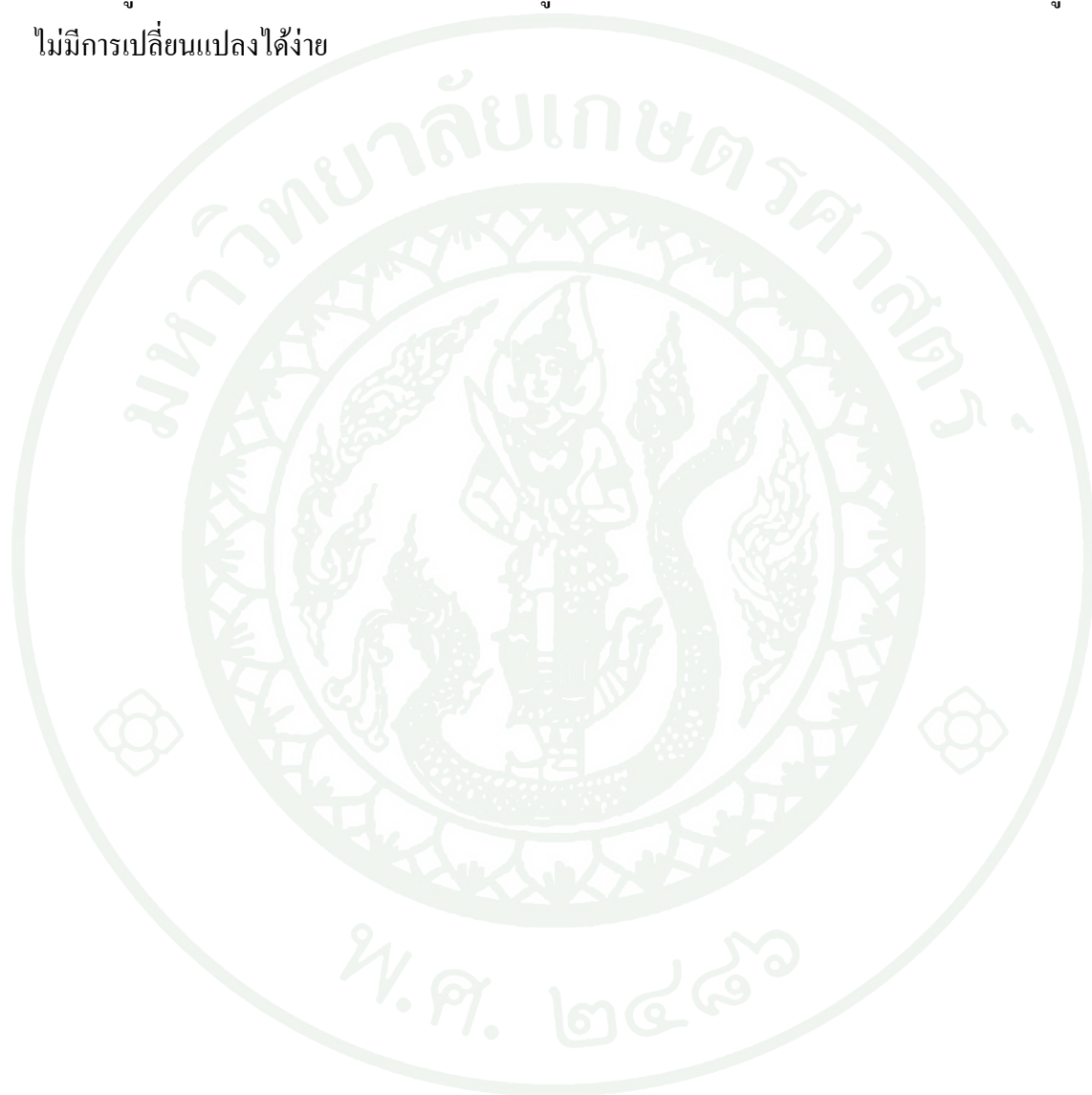
ในส่วนดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยปัจจัยหลักที่เลือกศึกษามีถึง 4 ปัจจัย คือ ราคาขายน้ำมันสับดูดำ ราคาตัวทำละลายเฮกเซน ราคาเมล็ดสับดูดำ และราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานสกัดน้ำมันสับดูดำ เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิมากที่สุด ซึ่งทำให้โครงการดังกล่าวมีผลกำไรเพิ่มขึ้น โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และร้อยละที่เปลี่ยนแปลงไปของราคาขายน้ำมันสับดูดำ ราคาเฮกเซน ราคาเนื้อในเมล็ดสับดูดำ และราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานสกัดน้ำมัน



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และร้อยละที่เปลี่ยนแปลงไปของราคาขาย น้ำมันดิบ ราคาเฮกเซน ราคาเมล็ดสบู่ดำ และราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานสกัดน้ำมัน

จากภาพที่ 26 พบว่า ราคาขายน้ำมันดิบมีความอ่อนไหวต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเนื่องจากกราฟที่แสดงมีความชันสูง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงราคาขายน้ำมันดิบไม่มาก แต่ส่งผลทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีการเปลี่ยนแปลง มากกว่าปัจจัยของราคาเฮกเซน ราคาอุปกรณ์ และราคาเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ ซึ่งหากราคาเฮกเซน และราคาเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ใช้มีราคาถูกลงจะส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับปัจจัยของราคาอุปกรณ์ที่มีความชันของกราฟแสดงที่ใกล้เคียงกัน จึงเปรียบเทียบได้ว่าในโครงการดังกล่าวมีค่าต้นทุนถูกลงส่งผลทำให้ได้กำไรเพิ่มมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อทำการวิเคราะห์การเพิ่มราคาของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ เฮกเซน และอุปกรณ์ พบว่าการเพิ่มของราคาทั้ง 3 ชนิดขึ้น ร้อยละ 10 ส่งผลทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิลดลงเท่ากับร้อยละ 11.47 2.54 และ 0.31 ซึ่งการเพิ่มราคาเมล็ดเนื้อในสบู่ดำ ส่งผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมากที่สุด และหากราคาขายน้ำมันดิบยังสูงขึ้น ส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่สูงขึ้นด้วย เมื่อราคาขายน้ำมันดิบลดลงในอัตราต่ำกว่าร้อยละ 20 หรือที่ราคาขาย 25.60 บาทต่อกิโลกรัม ยังคงให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกที่ 305,920,390.24 บาท มีช่วงระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1 ปี 10.13 เดือน และอัตราผลตอบแทนภายในที่มากกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่รับได้ (ร้อยละ 17) เท่ากับ ร้อยละ 57 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับราคาน้ำมันปาล์มที่ซื้อขายในปัจจุบันมีราคาเท่ากับ 29.03 บาทต่อกิโลกรัม (กรมการค้าภายใน, 2557) น้ำมันดิบยังมีราคาต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม รวมถึงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ชมพกา (2549) ที่กำลังการนำเข้าเมล็ดสบู่ดำ 2,100 กิโลกรัมต่อวันที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 605,241 ดอลลาร์สหรัฐ หรือเท่ากับ

19,603,755.99 บาท และมีอัตราการตอบแทนภายใน ร้อยละ 25.58 ซึ่งใช้ราคาขายน้ำมันสุญุดำเท่ากับ 55.00 บาทต่อกิโลกรัม โดยราคาน้ำมันสุญุดำนี้เป็นราคาที่สูงกว่า อีกทั้งให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ต่ำกว่ามาก เนื่องจากผลิตที่ก้ำลังการผลิตต่ำ ถ้ามีการขยายก้ำลังการผลิตจะทำให้สามารถลดราคาขายของน้ำมันสุญุดำลงได้ ดังนั้นการที่ราคาขายน้ำมันสุญุดำที่ 25.60 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราตอบแทนภายในสูง จึงทำให้โครงการดังกล่าว มีความเหมาะสมในการสร้างโรงงานผลิตน้ำมันสุญุดำในอนาคตมากยิ่งขึ้น อีกทั้งน้ำมันสุญุดำไม่สามารถรับประทานได้ ราคาขายน้ำมันสุญุดำจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสกัดน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ในขั้นตอนแรกได้ทำการศึกษาหาขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำ ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน และทำการศึกษาต่อด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Bhenken จากนั้นเมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลอง จึงนำค่าที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลอง ไปใช้ในการควบคุมของกระบวนการผลิตขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้นด้วยโปรแกรม Aspen plus และทำการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer รวมถึงการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวทำละลายเฮกเซน

ในการศึกษาการสกัดน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดงานวิเคราะห์ ด้วยการใช้น้ำขนาดของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ ขนาดใหญ่กว่า 25 mesh ขนาดระหว่าง 25 และ 40 mesh ขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh และขนาดเล็กกว่า 60 mesh พบว่าขนาดที่สกัดน้ำมันสบู่ดำได้ดีที่สุดคือขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh ให้ร้อยละของการสกัดเท่ากับ 88.21

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาด 40 และ 60 mesh จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้ำ ของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาด 40 และ 60 mesh ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองคือ เวลาในการสกัด 82 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายเฮกเซนต่อเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 27.17 มิลลิลิตรต่อกรัม และอัตราการกวน 325 รอบต่อนาที โดยสามารถสกัดน้ำมันสบู่ดำได้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.48

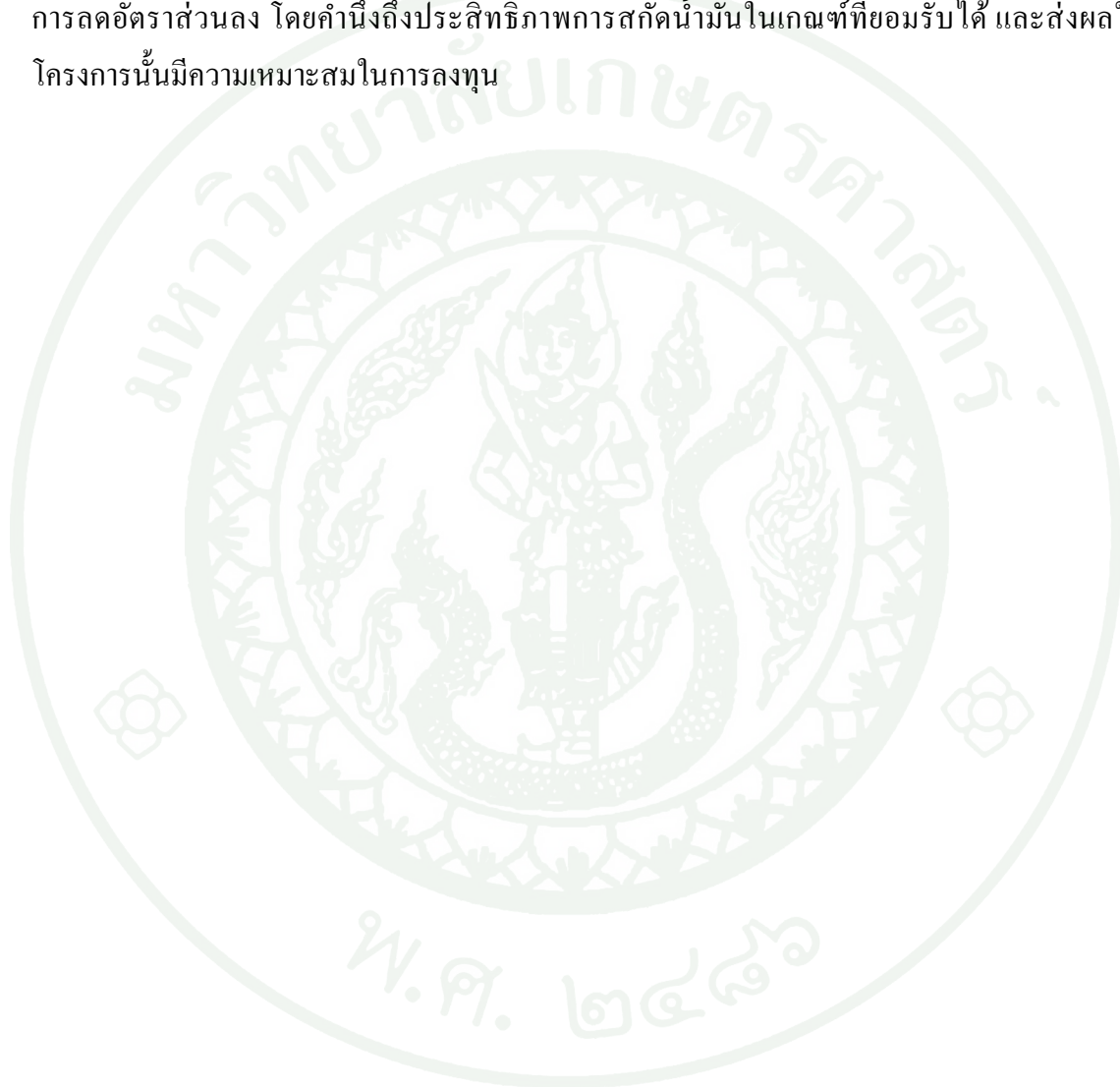
3. การควบคุมของกระบวนการสกัดน้ำมันสนูป่าที่กำลังการผลิตที่สูงขึ้นขนาดด้วยโปรแกรม Aspen plus และเศรษฐศาสตร์ด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer

ศึกษาควบคุมกำลังการผลิตด้วยโปรแกรม Aspen plus ของกระบวนการสกัดน้ำมัน ด้วยการศึกษาที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสนูป่า 10,000 30,000 และ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค่า 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการออกแบบการทดลอง พบว่าสามารถสกัดน้ำมันสนูป่าได้เท่ากับ 5,568 16,705.21 และ 27,839.32 กิโลกรัมต่อวัน ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละผลได้เท่ากับร้อยละ 99.82

จากการศึกษาผลทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการที่อัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสนูป่าที่ 10,000 และ 30,000 จากการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค่าที่อัตราส่วน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม ให้ผลของมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 66,628,484.26 และ 307,979,124.87 โดยอัตราการป้อนเนื้อในเมล็ดสนูป่า 50,000 กิโลกรัมต่อวัน เป็นโครงการที่ให้ผลมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุดที่ 575,523,715.90 บาท ระยะเวลาคืนทุน 1 ปี 1.73 เดือน และอัตราการตอบแทนภายใน ร้อยละ 92.54 เป็นกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในการลงทุน และปัจจัยของราคาขายน้ำมันสนูป่ามีผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่ำที่สุด ซึ่งการลดราคาขายน้ำมันสนูป่าลงเป็น 25.60 บาทต่อกิโลกรัม ยังคงทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกที่ 305,920,390.24 บาท ซึ่งมีอัตราการตอบแทนภายใน ร้อยละ 57 โดยแสดงให้เห็นว่าถึงความเหมาะสมในการสร้างโรงงานผลิตน้ำมันสนูป่าในอนาคตมากยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการสกัดน้ำมันสบูดำด้วยตัวทำละลาย ด้วยการสกัดที่อัตราส่วนที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-behnken ที่อัตราส่วนตัวทำละลาย 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม ซึ่งให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันในปริมาณที่สูง แต่เนื่องจากว่าเป็นอัตราส่วนที่สูง จึงทำให้มูลค่าของการผลิตสูงขึ้นไปด้วย ดังนั้นจึงเสนอให้ผู้ใช้อาจมีการลดอัตราส่วนลง โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และส่งผลให้โครงการนั้นมีความเหมาะสมในการลงทุน



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมการค้าภายใน. 2557. **ราคาน้ำมันปาล์มดิบ**. แหล่งที่มา:

<http://www.dit.go.th/Chumpon/contentdet.asp?deptid=67&id=7481>, 15 พฤศจิกายน 2557.

เกล็ดแก้ว รัตนปัญญาพันธุ์. 2557. **การเพาะเลี้ยงและการผลิตไลโปดของ Arthrobacter AK19 โดยการใช้วิธีการออกแบบการทดลองร่วมภายใต้สภาวะบีบคั้น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กระทรวงพลังงาน. 2555. **โครงการศึกษาและกำหนดรูปแบบการจัดการสตูด้าเป็นเชื้อเพลิงอย่างครบวงจร**. แหล่งที่มา :

http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=898&Itemid=123&lang=th, 7 มกราคม 2557.

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์แม่ค. 2555. **ความรู้เกี่ยวกับการแยกสาร**. แหล่งที่มา:

<http://www.maceducation.com/e-knowledge/2412212100/16.htm>, 11 กันยายน 2556.

ชมพกา ต้นตระกูล. 2549. **การจำลองการสกัดน้ำมันจากเมล็ดทานตะวันและเมล็ดสตูด้าเพื่อผลิตไบโอดีเซล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิชรัตน์ มะลิมาศ. 2550. **การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดสตูด้าด้วยตัวทำละลาย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ธรณินทร์ ไชยเรืองศรี. 2549. **การสกัดของแข็ง-ของเหลว**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โอ เอส พรีน ดิงเฮ้าส์, กรุงเทพฯ

นภค พลเสน. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสบู่ดำ. 2550. คณะกรรมการจัดการเกษตรและสหกรณ์.
แหล่งที่มา:

http://www.thaienv.com/index.php?option=com_content&task=view&id=888&Itemid=48,
17 กันยายน 2555.

นรบดี ชีร์วัฒน์โพธิ์ทอง และ ปิยะเนตร ขวัญแก้ว. 2556. การสกัดน้ำมันจากเนื้อเมล็ดสบู่ดำด้วย
วิธีการเขย่ากับตัวทำละลาย. ไซโอบีโอเทคโนโลยีแอนดอินเตอร์เนชันนอลคอนเฟอร์เรน,
กรุงเทพฯ.

นิภาพร ชุตินันต์. 2551. การออกแบบการทดลองเบื้องต้น. หจก. มิตรภาพการพิมพ์ 1995,
กรุงเทพฯ.

บริษัทธนาคารผลิตภัณฑ์น้ำมันพืชจำกัด. 2557. น้ำมันพืชกึ่ง. แหล่งที่มา:

http://www.cook.co.th/th/about_us/story-thanakorn/company-profile, 11 ตุลาคม 2557.

บริษัทออยเซอร์ฟ จำกัด. 2557. การแยกน้ำออกจากน้ำมัน. แหล่งที่มา:

<http://www.oilservethai.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539165407&Ntype=1>
1, 8 ตุลาคม 2557.

ปรเมษฐ์ บัวครอง และ พีรณัฐ สัจจเวจ. 2556. การประเมินความคุ้มค่าของการผลิตไบโอดีเซล
แบบหนึ่งและสองขั้นตอนจากน้ำมันสบู่ดำที่มีค่าความเป็นกรด 8 และ 12 มิลลิกรัม
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม. โครงการวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปรัชญา รัศมีธรรมวงศ์. 2546. การเพาะปลูกและการดูแลรักษาสบู่ดำพลังงานทดแทนทางเลือกใหม่
แห่งอนาคต. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ เพชรกะรัต จำกัด, กรุงเทพฯ.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและการวิเคราะห์
การทดลอง. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

- พงษ์ศิริ วินิจชัย และวารุณี ธนะแพสย์. 2555. การศึกษาวิธีการสกัดและการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันเมล็ดเสาวรส. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พินิจ จันทร. 2552. สบู่ดำหินสุดยอดพืชน้ำมันพันธุ์ใหม่. สำนักพิมพ์ บู้คส์เอ็กเพรส, กรุงเทพฯ.
- ไพโรจน์ วิริยจารี. 2555. การออกแบบการทดลองขั้นสูง. บริษัท ตรีโอบีแอดเวอร์ไทซิ่งแอนด์มีเดีย จำกัด, กรุงเทพฯ.
- เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, อนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา และเนติพล สกฤษชาติ. 2555. การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงงานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์จากสาหร่าย. วารสารศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง, กรุงเทพฯ.
- รักษ์ พฤษชาติ. 2549. การปลูกและการพัฒนาสบู่ดำ เพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ นีออน บู้ค มีเดีย, กรุงเทพฯ.
- รัตนา ม่วงรัตน์. 2549. พื้นฐานการสกัดในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. โซตนาพริน, เชียงใหม่.
- วรพล สวयพุ่ม. 2551. การสกัดน้ำมันสบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://woraphon9.blogspot.com/2008/02/jatropha-curcas-linn.html>, 7 มกราคม 2557.
- วันดี กฤษณพันธ์. 2541. สมุนไพรน่ารู้. แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ศิริวรรณ ปรีชาจิตต์. 2551. สภาพที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำด้วยตัวทำละลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม.
- สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2555. ความรู้เกี่ยวกับพืชน้ำมัน. แหล่งที่มา: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=19&chap=2&page=t19-2-infodetail01.html>, 16 กันยายน 2556.

สำนักงานพัฒนาและวิจัยเกษตร. 2557. การแปรรูปน้ำมันปาล์ม. แหล่งที่มา:

<http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-02.php>, 8 ตุลาคม 2557.

อาทิตย์ ไชยเชษฐ์. 2556. สารอาหารที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยง *Arthrobacter AK19* เพื่อการผลิตชีวมวล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Aromahub. 2006. วิธีสกัดน้ำมันหอมระเหย. แหล่งที่มา:

<http://www.aromahub.com/articles/essential-oils/176-2012-10-07-08-57-20/59-2010-04-03-15-40-01>, 13 ตุลาคม 2555.

Aspentech handbook. 2012. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรม Aspen. แหล่งที่มา:

<http://www.aspentech.com/products/aspen-process-manual.aspx>, 18 ตุลาคม 2556.

Sangsrichan, S. 2012. การสกัด (Extraction). มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.

Thai Rice Brand Oil. 2012. ความรู้เกี่ยวกับน้ำมันรำข้าว. Available Source:

<http://thairicebranoil.blogspot.com/2011/02/blog-post.html>, May 1, 2014.

Akintayo, E.T. 2004. Characteristics and composition of *Parkia globbosa* and *Jatropha curcas* oils and cakes. **Bioresource Technology** 92: 307–310.

Asoiro, F.U. and C.O. Akubuo. 2011. Effect of Temperature on Oil Extraction of *Jatropha curcas* L. Kernel. **The Pacific Journal of Science and Technology** 12: 456-463.

Basmadjian, D. 2007. **Mass Transfer and Separation Processes Principles and Applications**. CRC Press, England.

Box, G. and D. Behnken. 1960. Some New Tree Level Design for the Study of Quantitative Factors. **Technometrics** 2:455-475.

Box-Behnken Designs for Optimizing Product Performance. 2011. **Box-Bhenken Design.**

Available source: <http://www.weibull.com/hotwire/issue130/hottopics130.htm>,
September 30, 2014.

Bouffaron, P., F. Castagno and S. Herold. 2012. Straight vegetable oil from *Jatropha curcus L.* for rural electrification in Mali – A techno-economic assessment. **Biomass and Energy** 37: 298-308.

Bundithum, S. 2011. **Material Balance, Scheduling and Cost Evaluation of Commercial Biodiesel Plant from Palm Oil.** Master degree thesis, Kasetsart University.

Chapuis, A., J. Blin, P. Carre and D. Lecomte. 2014. Separation efficiency and energy consumption of oil expression using a screw-press: The case of *Jatropha curcus L.* seeds. **Industrial crops and Products** 52: 752-761.

Chen, X., Y. Luo, B. Qi and Y. Wan. 2014. Simultaneous extraction of oil and soy isoflavones from soy sauce residue using ultrasonic-assisted two-phase solvent extraction technology. **Separation and Purification Technology** 128: 72-79.

Chevronphilips. 2014. **Material Safety Data Sheet.** Available Source: www.cpchem.com/en-us/news/Pages/Chevron-Phillips-Chemical-Announces-Mechanical-Completion-and-Start-Up-of-World's-Largest-1-Hexene-Plant.aspx, May 1, 2014.

Edem, D.O. 2002. Palm oil: biochemical, physiological, nutritional, hematological, and toxicological aspects: a review. **Plant Foods for Human Nutrition** 57 (3-4), 319-341.

Fang, Z. 2012. **Biodiesel - Feedstocks, Production and Applications.** Available Source: <http://www.intechopen.com/books/biodiesel-feedstocks-production-and-applications>, November 2, 2014.

- Gastwirth, J.L., Y.R. Gel and W. Miao. 2009. The impact of Levene's test of equality of variances on statistical theory and practice. **Statistical Science** 24 (3): 343-360.
- Hinkelmann, K. and O. Kempthorne. 1994. **Design and Analysis of Experiments**. A Wiley-Interscience Publication, USA.
- Jairurob, P., C. Phalakornkule, A. Na-udom and A. Petiraksakul. 2013. Reactive extraction of after-stripping sterilized palm fruit to biodiesel. **Fuel** 107:282–289.
- Kasim, F.H. and A.P. Harvey. 2011. Influence of various parameters on reaction extraction of *Jatropha curcas L.* for biodiesel production. **Journal of Chemical Engineering** 171: 1373-1378.
- Kaul, S., G. Sharma, J. Porwal and N. Bisht. 2011. Effect of low frequency ultrasonic assisted extraction on the quality of seed oils of Indian origin. **Fuel Processing Technology** 92: 1813–1820.
- Kruskal, W. H. and W. A. Wallis. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association** 47 (260): 583-621.
- KUBIODIESEL. 2014. **Jatropha seed price**. Available Source: <http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/>, October 10, 2014.
- King, J.C. 1980. **Separation Processes**. The United States of America : McGraw-Hill, USA.
- Laity, D.S. and R.E. Treybal. 1963. **Liquid Extraction**. 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Ministry of Energy (MOEN). 2012. **Thailand 20-Year Energy Efficiency Development Plan (2011 - 2030)**. Available Source: http://www.eppo.go.th/encon/ee-20yrs/EEDP_Eng.pdf, October 13, 2014.

Montgomery, D.C. 1976. **Design and Analysis of Experiments**. JOHN WILEY & SONS, USA.

NFI. 2012. **Thailand Food Industry Profiles**. Available Source: <http://fic.nfi.or.th>, October 11, 2014.

Norceline Chemicals Suppliers. 2014. **Hexane price**. Available Source: <http://norcelinechemicals.wowcity.com/>, August 5, 2014.

Ong, H.C., T.M.I. Mahlia, H.H. Masjuki and D. Honnery. 2012. Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production. **Fuel** 98: 131-139.

Orgsoltab M. 2011. **Common Organic Solvent: Table of Properties**. Vogel's Practical Organic Chemistry.

Peralta-Ruiz, Y., A.D. Gonzalez-Delgado and V. Kafarov. 2013. Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. **Applied Energy** 101: 226-236.

Peters, S.M., Timmerhaus K.D. and West R.E. 2004. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. McGraw-Hill Companies, Inc, USA.

Qian, J., H. Shi and Z. Yun. 2010. Preparation of biodiesel from *Jatropha curcas L.* oil produced by two-phase solvent extraction. **Bioresource Technology** 101: 7025–7031.

Ryan, T. A. and B. L. Joiner. 1976. **Normal probability plots and tests for normality**. Statistics Department, The Pennsylvania State University, USA.

Seader, J.D. and E.J. Henley. 1998. **Separation Process Principles**. John Wiley & Sons, USA.

Shahidi, F. 2005. **Bailey's Industrial Oil and Fat Products**. London: John Wiley & Sons, England.

Standardize Test Preparation. 2008. **What is a good IQ score? Blog.** Available source:

<http://testprephelp.blogspot.com/2008/05/what-is-good-iq-score.html>, September 23, 2014.

Statistics@SUNY Oswego. 2014. **Statistics Blog Page.** Available Source:

http://www.oswego.edu/~srp/stats/normal_prb_plot.htm, September 23, 2014.

Sulaiman, S., A.R. Aziz and M.K. Aroua. 2013. Optimization and modeling of extraction of solid coconut waste oil. **Journal of Food Engineering** 114: 228–234.

Tasic, M.B., O.S. Stamenkovic and V.B. Veljkovic. 2014. Cost analysis of simulated base-catalyzed biodiesel production processes. **Energy conservation and Management** 84: 405-413.

Thanh, L.T., K. Okitsu, Y. Sadanaga, N. Takenaka, Y. Maeda and H. Bandow. 2013. A new co-solvent method for the green production of biodiesel fuel – Optimization and practical application. **Fuel** 103: 742–748.

The Pennsylvania State University. 2004. **Design of Experiments.** Available Source:

<https://onlinecourses.science.psu.edu/stat503/>, September 30, 2014.

The Minitab Blog. 2014. **Data analysis.** Available Source: <http://blog.minitab.com/blog/fun-with-statistics/regression-analysis-they-call-them-free-throws-for-a-reason>, September 30, 2014.

Yount, W. R. 2006. **Research Design and Statistical Analysis in Christian Ministry.** Fort Worth, USA.

Wolf, F.J. 1969. **Separation Methods in Organic Chemistry and Biochemistry.** New York and London : Academic Press, England.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การศึกษาปัจจัยขนาดอนุภาคเนื้อในเมล็ดสับปะรดที่มีผลต่อผลได้ของการสกัด

ตารางผนวกที่ ก1 ความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับปะรด

ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ (g.)	น้ำหนักหลังอบ (g.)	ร้อยละของความชื้น
สับปะรด 1	5.1400	4.8856	4.95
สับปะรด 2	5.1183	4.9264	3.75
สับปะรด 3	8.2804	7.7781	6.06

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสับปะรดที่ขนาด มากกว่า 25 mesh (ASTM E11)

ตัวอย่าง	น้ำหนักเนื้อ ในเมล็ดสับ ปะรด (g.) (W ₁)	น้ำหนัก calcite 545 (g.)	น้ำหนัก Aluminum can เริ่มต้น (g.) (W ₂)	น้ำหนัก Aluminum can หลังจาก ผ่านเครื่อง soxtec (g.) (W ₃)	ปริมาณ น้ำมันของ เนื้อในเมล็ด สับปะรด (g.)	ร้อยละของ น้ำมันใน เนื้อในเมล็ด สับปะรด
1	1.5270	1.0024	43.9484	44.7280	0.7796	51.0540
2	1.5273	1.0024	44.1645	44.9603	0.7958	52.1050
3	1.5324	1.0242	44.0215	44.8267	0.8052	52.5503
					เฉลี่ย	51.9031

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสับคั่วที่ขนาดระหว่าง 25 และ 40 mesh

ตัวอย่าง	น้ำหนักเนื้อ ในเมล็ดสับ คั่ว (g.) (W ₁)	น้ำหนัก calcite 545 (g.)	น้ำหนัก Aluminum can เริ่มต้น (g.) (W ₂)	น้ำหนัก Aluminum can หลังจาก ผ่านเครื่อง soxtec (g.) (W ₃)	ปริมาณ น้ำมันของ เนื้อในเมล็ด สับคั่ว (g.)	ร้อยละของ น้ำมันใน เนื้อในเมล็ด สับคั่ว เฉลี่ย
1	1.5335	1.0151	43.7391	44.5788	0.8397	54.7571
2	1.5307	1.0120	43.8275	44.6515	0.8240	53.8315
3	1.5596	1.0100	43.9279	44.7499	0.8220	52.7058
						เฉลี่ย 53.7648

ตารางผนวกที่ 4 ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสับคั่วที่ขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh

ตัวอย่าง	น้ำหนักเนื้อ ในเมล็ดสับ คั่ว (g.) (W ₁)	น้ำหนัก calcite 545 (g.)	น้ำหนัก Aluminum can เริ่มต้น (g.) (W ₂)	น้ำหนัก Aluminum can หลังจาก ผ่านเครื่อง soxtec (g.) (W ₃)	ปริมาณ น้ำมันของ เนื้อในเมล็ด สับคั่ว (g.)	ร้อยละของ น้ำมันใน เนื้อในเมล็ด สับคั่ว เฉลี่ย
1	1.5148	1.0696	43.8252	44.6893	0.8641	57.0438
2	1.5094	1.1844	44.3079	45.1578	0.8499	56.3071
3	1.5076	1.0321	44.1343	44.9483	0.8140	53.9931
						เฉลี่ย 55.7813

ตารางผนวกที่ ก5 ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ขนาดน้อยกว่า 60 mesh

ตัวอย่าง	น้ำหนักเนื้อ ในเมล็ดสบู่ ดำ (g.) (W ₁)	น้ำหนัก calcite 545 (g.)	น้ำหนัก Aluminum can เริ่มต้น (g.) (W ₂)	น้ำหนัก Aluminum can หลังจาก ผ่านเครื่อง soxtec (g.) (W ₃)	ปริมาณ น้ำมันของ เนื้อในเมล็ด สบู่ดำ (g.)	ร้อยละของ น้ำมันใน เนื้อในเมล็ด สบู่ดำ
1	1.5087	1.0003	43.9299	44.7682	0.8383	55.5643
2	1.5231	1.0012	44.1559	45.0104	0.8545	56.1026
3	1.5105	1.0082	43.8377	44.6797	0.8420	55.7431
					เฉลี่ย	55.8033

การวิเคราะห์ขนาดเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่มีผลต่อผลได้ร้อยละของการสกัดน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้
ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดงานวิเคราะห์ อัตราส่วน 8 มิลลิลิตรต่อกรัมสบู่ดำ อัตราการกวน 200 รอบต่อ
นาที เวลาในการสกัด 60 นาที

ตารางผนวกที่ ก6 ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดมากกว่า 25 mesh

ตัวอย่าง	น้ำหนัก เนื้อใน	น้ำหนัก เนื้อใน	น้ำหนัก calcite	น้ำหนัก Aluminum can	น้ำหนัก Aluminum can	ร้อยละ น้ำมัน เริ่มต้น ของเนื้อ ในเมล็ด สบู่ดำ (g.)	ร้อยละ น้ำมันที่ เหลือ ของ เนื้อใน เมล็ด สบู่ดำ	ร้อยละ ของ การ สกัด น้ำมัน
1	5.0163	1.5220	1.0003	43.7211	43.8601		9.1327	82.404
2	5.0064	1.5050	1.0012	43.5101	43.6457	51.9031	9.0100	82.641
3	5.0068	1.5210	1.0029	44.1567	44.2987		9.3360	82.013
							เฉลี่ย	82.353

ตารางผนวกที่ ก7 ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดระหว่าง 25 และ 40 mesh

ตัวอย่าง	น้ำหนัก เนื้อใน	น้ำหนัก เนื้อใน	น้ำหนัก calcite	น้ำหนัก Aluminum can	น้ำหนัก Aluminum can	ร้อยละ น้ำมัน เริ่มต้น ของเนื้อ ในเมล็ด สบู่ดำ (g.)	ร้อยละ น้ำมันที่ เหลือ ของ เนื้อใน เมล็ด สบู่ดำ	ร้อยละ ของ การ สกัด น้ำมัน
1	5.0296	1.5150	1.0012	44.0052	44.1270		8.039	85.048
2	5.0593	1.5238	1.0436	43.8339	43.9627	53.7648	8.453	84.278
3	5.0435	1.5254	1.0704	43.9366	44.0330		6.319	88.247
							เฉลี่ย	85.858

ตารางผนวกที่ ก8 ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาด ระหว่าง 40 และ 60 mesh

ตัวอย่าง	น้ำหนัก เนื้อใน เมล็ดสบู่ ดำที่ใช้ ในการ สกัด(g.)	น้ำหนัก เนื้อใน เมล็ด สบู่ดำ (g.) (W ₁)	น้ำหนัก calcite 545 (g.)	น้ำหนัก Aluminum can เริ่มต้น (g.) (W ₂)	น้ำหนัก Aluminum can หลังจาก ผ่านเครื่อง soxtec (g.) (W ₃)	ร้อยละ น้ำมัน เริ่มต้น ของเนื้อ ในเมล็ด สบู่ดำ	ร้อยละ น้ำมันที่ เหลือ ของ เนื้อใน เมล็ด สบู่ดำ	ร้อยละ ของ การ สกัด น้ำมัน
1	5.0845	1.5002	1.0141	43.5071	43.6052		6.5390	88.277
2	5.0860	1.5045	1.1036	43.9227	44.0159	55.7813	6.1950	88.894
3	5.0025	1.5250	1.2357	43.8303	43.9369		6.9902	87.469
							เฉลี่ย	88.212

ตารางผนวกที่ ก9 ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ดำของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาด น้อยกว่า 60 mesh

ตัวอย่าง	น้ำหนัก เนื้อใน เมล็ดสบู่ ดำที่ใช้ ในการ สกัด(g.)	น้ำหนัก เนื้อใน เมล็ด สบู่ดำ (g.) (W ₁)	น้ำหนัก calcite 545 (g.)	น้ำหนัก Aluminum can เริ่มต้น (g.) (W ₂)	น้ำหนัก Aluminum can หลังจาก ผ่านเครื่อง soxtec (g.) (W ₃)	ร้อยละ น้ำมัน เริ่มต้น ของเนื้อ ในเมล็ด สบู่ดำ	ร้อยละ น้ำมัน ที่เหลือ ของ เนื้อใน เมล็ด สบู่ดำ	ร้อยละ ของ การ สกัด น้ำมัน
1	5.0017	1.5062	1.0163	44.1582	44.2609		6.818	87.782
2	5.0092	1.5205	1.0212	44.0071	44.1183	55.8033	7.314	86.893
3	5.0152	1.5136	1.3270	43.7321	43.8443		7.413	86.716
							เฉลี่ย	87.130

ตัวอย่างการคำนวณการวัดค่าความชื้น

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{[(\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ})/\text{น้ำหนักก่อนอบ}] \times 100}{}$$

ตั้งตัวอย่าง สบู่ดำ 1 (น้ำหนักก่อนอบ 5.1400 g น้ำหนักหลังอบ 4.8856g.)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละความชื้น} &= [(5.1400 - 4.8856)/5.1400] \times 100 \\ &= 4.950 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณการวัดค่ากรดไขมันอิสระและไตรกลีเซอรอล (Total Fat & Oil)

หลักการคำนวณ (AOCS, Am 5-04)

$$\text{ร้อยละของ Fat} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100$$

โดย

W_1	=	น้ำหนักเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ (Sample weight (g))
W_2	=	Extraction cup weight (น้ำหนัก Aluminum Cup เริ่มต้น (g))
W_3	=	Extraction cup + residue weight (น้ำหนัก Aluminum Cup + Oil (g))

ตั้งตัวอย่างการคำนวณร้อยละปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

ตั้งตัวอย่าง ขนาดมากกว่า 25 mesh

น้ำหนักเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ (W_1) เท่ากับ 1.5220 g.

น้ำหนัก Aluminum Cup เริ่มต้นเท่ากับ 43.7211 g.

น้ำหนัก Aluminum Cup+ Oil เท่ากับ 43.8601 g.

$$\text{ร้อยละของ Fat} = \frac{43.8601 - 43.7211}{1.5220} \times 100$$

$$\text{ร้อยละของ Fat} = 51.0540$$

ตัวอย่างการคำนวณการวัดร้อยละประสิทธิภาพการสกัดของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

จากการคำนวณดังสูตร

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละ Extraction} &= \frac{\text{Started Oil} - \text{Remained Oil}}{\text{Started Oil}} \times 100 \\ \text{โดย ร้อยละ Started Oil} &= \text{ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นก่อนถูกสกัดตัวอย่างข้างบน} \\ \text{ร้อยละ Remained Oil} &= \text{ปริมาณน้ำมันที่เหลือในเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการ} \\ &\quad \text{สกัดแล้ว} \end{aligned}$$

ตั้งตัวอย่างการคำนวณของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

ตั้งตัวอย่าง ขนาดมากกว่า 25 mesh

จากตัวอย่างที่ 1

ร้อยละปริมาณน้ำมันเริ่มต้นก่อนถูกสกัด เท่ากับ 51.9031

ร้อยละปริมาณน้ำมันที่เหลือในเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการสกัดแล้ว เท่ากับ 9.1327

$$\text{ร้อยละ Extraction} = \frac{51.9031 - 9.1327}{51.9031} \times 100$$

$$\text{ร้อยละ Extraction} = 82.404$$



ภาคผนวก ข
การออกแบบการทดลอง

ภาคผนวก ข
การออกแบบการทดลอง

1. การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken

เมื่อทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken จำนวนของการทดลองที่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัย ดังแสดงตามตารางภาคผนวกที่ ข1

ตารางผนวกที่ ข1 จำนวนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken เมื่อปัจจัยใช้ในการทดลองเท่ากับ 3 ปัจจัย

การทดลอง	อัตราส่วนตัวทำละลาย	อัตราการกวน	เวลา
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

2. ผลของการออกแบบด้วยวิธี Box-Behnken

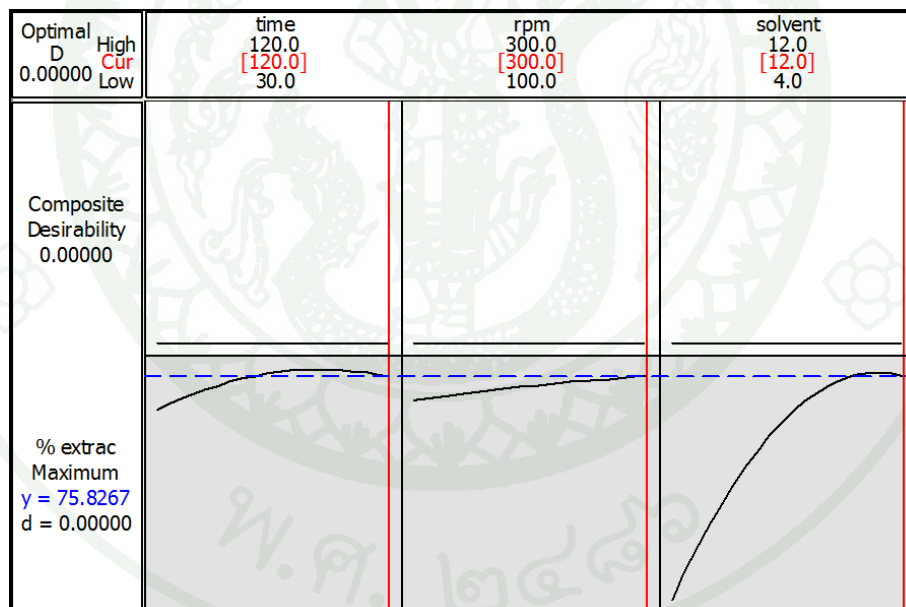
ตารางผนวกที่ ข2 ร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสบู่ออกจากเนื้อในเมล็ดสบู่ดำขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh ซึ่งสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้า ตามการออกแบบการทดลอง Box-Behnken จำนวน 15 การทดลอง

การทดลอง	ร้อยละประสิทธิภาพการสกัด		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
1	87.26	81.90	84.58
2	91.14	91.52	91.33
3	91.41	91.07	91.24
4	91.35	91.126	91.238
5	91.17	90.247	90.7085
6	99.21	98.37	98.79
7	99.85	98.59	99.22
8	99.37	98.45	98.91
9	95.56	92.90	94.23
10	96.42	95.04	95.73
11	95.12	93.14	94.13
12	96.56	94.41	95.485
13	94.34	94.783	94.5615
14	94.59	94.02	94.305
15	97.34	93.51	95.425

3. ผลของการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ครั้งที่ 1-3

ตารางผนวกที่ ข3 จำนวนปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองด้วยBox-Behnken ในการสกัดน้ำมันสมุนไพร โดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้าโดยเนื้อในเมล็ดสมุนไพรขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh การทดลองครั้งที่ 1

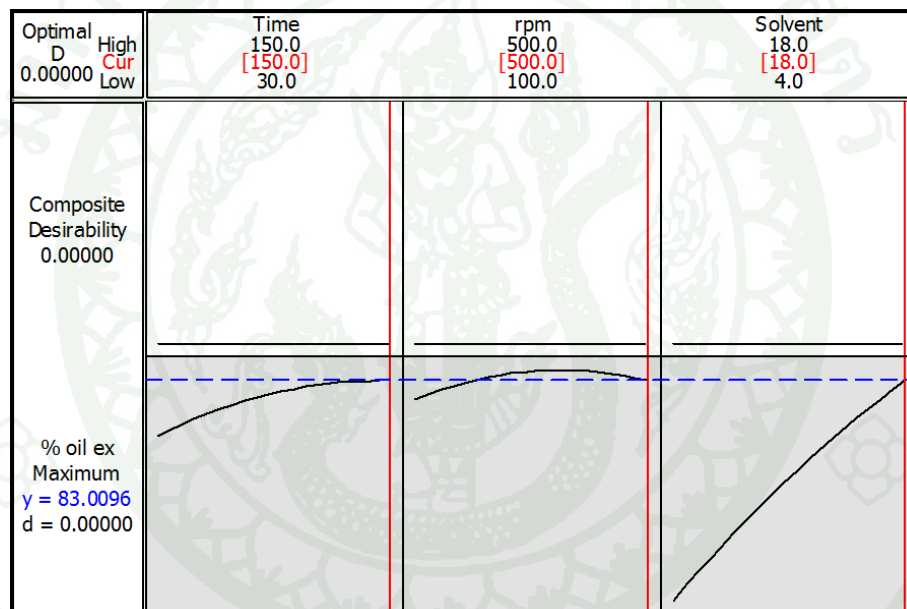
ปัจจัยการทดลอง	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		
		-1	0	+1
เวลา	A	30	75	120
อัตราส่วนตัวทำละลาย	B	4	8	12
อัตราการกวน	C	100	200	300



ภาพผนวกที่ ข1 ปริมาณที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อร้อยละประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันสมุนไพร โดยการใช้ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้าในการสกัด (การทดลองครั้งที่1)

ตารางผนวกที่ ๗4 จำนวนปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ในการสกัดน้ำมันสมุนไพร โดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้า โดยเนื้อในเมล็ดสมุนไพรขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh การทดลองครั้งที่ 2

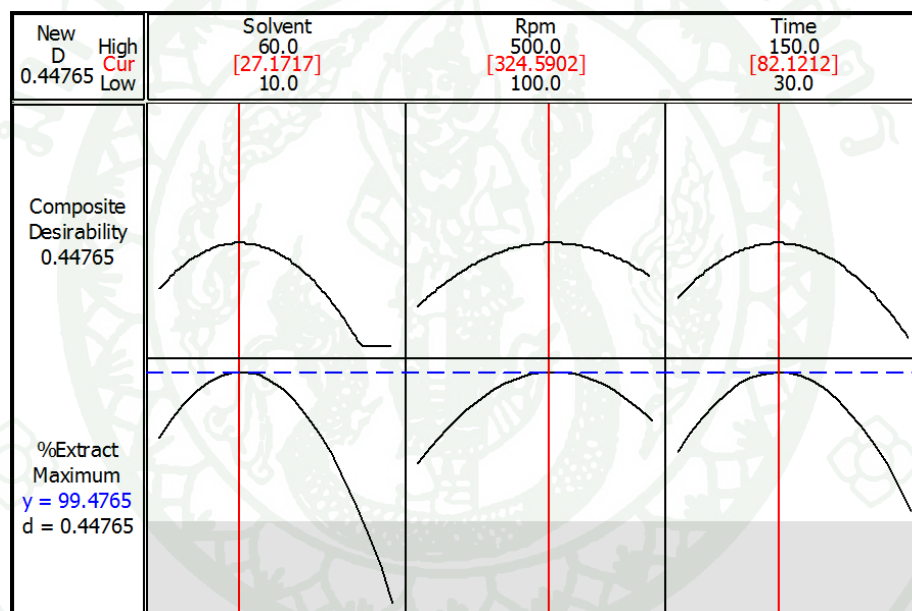
ปัจจัยการทดลอง	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		
		-1	0	+1
เวลา	A	30	90	150
อัตราส่วนตัวทำละลาย	B	4	11	18
อัตราการกวน	C	100	300	500



ภาพผนวกที่ ๗2 ปริมาณที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อร้อยละประสิทธิภาพการสกัดสมุนไพร โดยการใช้ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้าในการสกัด (การทดลองครั้งที่ 2)

ตารางผนวกที่ ข5 จำนวนปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ในการสกัดน้ำมันสมุนไพร โดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้า โดยเนื้อในเมล็ดสมุนไพรขนาดระหว่าง 40 และ 60 mesh การทดลองครั้งที่ 3

ปัจจัยการทดลอง	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		
		-1	0	+1
เวลา	A	30	90	150
อัตราส่วนตัวทำละลาย	B	10	35	60
อัตราการกวน	C	100	300	500



ภาพผนวกที่ ข3 ปริมาณที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อร้อยละประสิทธิภาพการสกัด โดยการใช้ตัวทำละลายเฮกเซนเกรดการค้าในการสกัด (การทดลองครั้งที่3)

4. ตารางที่ใช้ในการคำนวณค่าทางสถิติ

ตารางแสดงค่าแจกแจงปกติ F (F – Test) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

F - Distribution ($\alpha = 0.05$ in the Right Tail)

df ₂	df ₁	Numerator Degrees of Freedom								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
2		18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385
3		10.128	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123
4		7.7086	7.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	6.9988
5		6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725
6		5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990
7		5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767
8		5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881
9		5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789
10		4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204
11		4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962
12		4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964
13		4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144
14		4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458
15		4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876
16		4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377
17		4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943
18		4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563
19		4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227
20		4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928
21		4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660
22		4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419
23		4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201
24		4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002
25		4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821
26		4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655
27		4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501
28		4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360
29		4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229
30		4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107
40		4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240
60		4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401
120		3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588
∞		3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799

ภาพผนวกที่ ข4 ตารางแจกแจงค่าปกติ F (F – Test) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

F - Distribution ($\alpha = 0.05$ in the Right Tail)

Denominator Degrees of Freedom df_2	Numerator Degrees of Freedom df_1									
	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	241.88	243.91	245.95	248.01	249.05	250.10	251.14	252.20	253.25	254.31
2	19.396	19.413	19.429	19.446	19.454	19.462	19.471	19.479	19.487	19.496
3	8.7855	8.7446	8.7029	8.6602	8.6385	8.6166	8.5944	8.5720	8.5494	8.5264
4	5.9644	5.9117	5.8578	5.8025	5.7744	5.7459	5.7170	5.6877	5.6581	5.6281
5	4.7351	4.6777	4.6188	4.5581	4.5272	4.4957	4.4638	4.4314	4.3985	4.3650
6	4.0600	3.9999	3.9381	3.8742	3.8415	3.8082	3.7743	3.7398	3.7047	3.6689
7	3.6365	3.5747	3.5107	3.4445	3.4105	3.3758	3.3404	3.3043	3.2674	3.2298
8	3.3472	3.2839	3.2184	3.1503	3.1152	3.0794	3.0428	3.0053	2.9669	2.9276
9	3.1373	3.0729	3.0061	2.9365	2.9005	2.8637	2.8259	2.7872	2.7475	2.7067
10	2.9782	2.9130	2.8450	2.7740	2.7372	2.6996	2.6609	2.6211	2.5801	2.5379
11	2.8536	2.7876	2.7186	2.6464	2.6090	2.5705	2.5309	2.4901	2.4480	2.4045
12	2.7534	2.6866	2.6169	2.5436	2.5055	2.4663	2.4259	2.3842	2.3410	2.2962
13	2.6710	2.6037	2.5331	2.4589	2.4202	2.3803	2.3392	2.2966	2.2524	2.2064
14	2.6022	2.5342	2.4630	2.3879	2.3487	2.3082	2.2664	2.2229	2.1778	2.1307
15	2.5437	2.4753	2.4034	2.3275	2.2878	2.2468	2.2043	2.1601	2.1141	2.0658
16	2.4935	2.4247	2.3522	2.2756	2.2354	2.1938	2.1507	2.1058	2.0589	2.0096
17	2.4499	2.3807	2.3077	2.2304	2.1898	2.1477	2.1040	2.0584	2.0107	1.9604
18	2.4117	2.3421	2.2686	2.1906	2.1497	2.1071	2.0629	2.0166	1.9681	1.9168
19	2.3779	2.3080	2.2341	2.1555	2.1141	2.0712	2.0264	1.9795	1.9302	1.8780
20	2.3479	2.2776	2.2033	2.1242	2.0825	2.0391	1.9938	1.9464	1.8963	1.8432
21	2.3210	2.2504	2.1757	2.0960	2.0540	2.0102	1.9645	1.9165	1.8657	1.8117
22	2.2967	2.2258	2.1508	2.0707	2.0283	1.9842	1.9380	1.8894	1.8380	1.7831
23	2.2747	2.2036	2.1282	2.0476	2.0050	1.9605	1.9139	1.8648	1.8128	1.7570
24	2.2547	2.1834	2.1077	2.0267	1.9838	1.9390	1.8920	1.8424	1.7896	1.7330
25	2.2365	2.1649	2.0889	2.0075	1.9643	1.9192	1.8718	1.8217	1.7684	1.7110
26	2.2197	2.1479	2.0716	1.9898	1.9464	1.9010	1.8533	1.8027	1.7488	1.6906
27	2.2043	2.1323	2.0558	1.9736	1.9299	1.8842	1.8361	1.7851	1.7306	1.6717
28	2.1900	2.1179	2.0411	1.9586	1.9147	1.8687	1.8203	1.7689	1.7138	1.6541
29	2.1768	2.1045	2.0275	1.9446	1.9005	1.8543	1.8055	1.7537	1.6981	1.6376
30	2.1646	2.0921	2.0148	1.9317	1.8874	1.8409	1.7918	1.7396	1.6835	1.6223
40	2.0772	2.0035	1.9245	1.8389	1.7929	1.7444	1.6928	1.6373	1.5766	1.5089
60	1.9926	1.9174	1.8364	1.7480	1.7001	1.6491	1.5943	1.5343	1.4673	1.3893
120	1.9105	1.8337	1.7505	1.6587	1.6084	1.5543	1.4952	1.4290	1.3519	1.2539
∞	1.8307	1.7522	1.6664	1.5705	1.5173	1.4591	1.3940	1.3180	1.2214	1.0000

ภาพผนวกที่ ข4 (ต่อ)



ภาคผนวก ค
หลักการการใช้เครื่อง Soxtec

1. การหาปริมาณไขมันโดยการย่อย Hydrolysis ด้วยระบบ Soxtec System 2047 SoxCap

หลักการเครื่อง 2047 SoxCap มีหลักการทำงานบนพื้นฐานของ SoxCap capsule โดยจะมี Polyester filter บรรจุอยู่ภายในแคปซูล ซึ่งภายในแคปซูลเป็นที่ใส่ตัวอย่างเพื่อทำการย่อยตัวอย่าง และสกัดตัวอย่างด้วยตัวทำละลาย

ตัวอย่างที่ต้องผ่านกระบวนการย่อยจะถูกชั่งแล้วใส่ในแคปซูลแล้วนำไปวางไว้ที่ถาดใส่แคปซูล และระหว่างทำการย่อยแคปซูลจะถูกแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrolysis solution (3 N HCl)) ที่กำลังเดือด ซึ่งสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถเข้า-ออกภายในแคปซูล ได้ ขณะที่ทำการย่อยตัวอย่างจะมีไอของกรดระเหย แล้วควบแน่นกลับลงมาในบีกเกอร์ ดังนั้น เครื่องจะต้องมีระบบควบแน่น (Condenser) ที่ดี และเครื่องมีระบบเอาไอกรดบางส่วนทิ้งเองอัตโนมัติโดยใช้ระบบปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

การล้างตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการย่อยจะล้างด้วยน้ำ และทำควบคู่กับการกรองที่ใช้ระบบสุญญากาศ ทั้งหมดจะกระทำภายในบีกเกอร์ และจะถูกควบคุม โดยวาล์วปล่อยสาร (Rinsing valve) และวาล์วสุญญากาศ (Vacuum valves)

นำตัวอย่างที่ผ่านการล้างแล้วไปวางที่ถาด (Drying tray) เพื่อทำการอบตัวอย่างให้แห้ง หลังจากนั้นนำตัวกรองเมมเบรน (thimble) มาสวมที่ปากของแคปซูล แล้วทำการกลับด้านของขวดแคปซูล จากนั้น Polyester filter พร้อมตัวอย่างจะไหลมาอยู่ที่ตัวกรองเมมเบรน แล้วนำตัวล็อก (Adapter) มาครอบติดกับแคปซูล เพื่อเข้าสู่กระบวนการสกัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

องค์ประกอบของเครื่องย่อย Hydrolysis

เครื่อง 2022 Hotplate เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมอุณหภูมิบนเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ใช้กับตัวจ่ายไฟ (Power supply) หลายขนาด และทำงานเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายในบีกเกอร์ ซึ่งอยู่บนเครื่องให้ความร้อน และปั๊มปรับอุณหภูมิด้วย นอกจากนี้ที่เครื่องให้ความร้อนยังมีวาล์ว 2 ตัว สำหรับปรับระบบ สุญญากาศ และน้ำ

วาล์วสูญญากาศไว้สำหรับนำไอกรดออกระหว่างทำการย่อยด้วยกรด และเอาสารละลายออกจากบีกเกอร์ระหว่างกระบวนการกรอง

วาล์วควบคุมน้ำไว้สำหรับควบคุมการควบแน่น และควบคุมการล้าง ระหว่าง กระบวนการย่อยด้วยกรด

2. การเตรียมตัวอย่าง (AOAC, 2000)

ตัวอย่างที่จะนำมาผ่านกระบวนการย่อยด้วยกรด นั้นต้องเป็นเนื้อเดียวกันตลอด และต้องผ่านการบดให้มีขนาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร และชั่งน้ำหนักถูกต้อง

ตารางผนวกที่ 1 ตัวอย่างที่จะนำมาผ่านกระบวนการ Hydrolysis

Fat Content (ร้อยละ)	น้ำหนัก
0-10	2-3 g \pm 0.1 mg
10-25	1-2 g \pm 0.1 mg
>20-25	0.5-1 g \pm 0.1 mg

3. วิธีการ Hydrolysis (AOAC, 2000)

- นำ Polyester filter ใส่ในแคปซูล (Glass capsule) ซึ่งควรใส่ตัวกรอง ให้ต่ำกว่าขอบขวดแคปซูล
- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ในแคปซูล (Sample weight = W_1) โดยตัวอย่างอยู่บนตัวกรอง แล้วนำแคปซูล ไปวางที่แท่น (Boiling stand)
- เติมสารละลายกรดไฮดรอกลอลิก ปริมาตรประมาณ 800 มิลลิลิตร (อยู่ในระดับ “R” ของบีกเกอร์)
- นำ แท่น ที่มีแคปซูล ใส่ในบีกเกอร์ แล้วนำตัวควบแน่น มาวางบนบีกเกอร์ เปิดระบบน้ำหล่อเย็น ต้มสารละลายให้เดือดแล้วเริ่มจับเวลาตาม Application sub note ประมาณ 60

นาที

5. เมื่อทำการย่อยตัวอย่างเสร็จแล้ว ให้ปิดเครื่องให้ความร้อน และเอา สารละลายกรด ออก โดยใช้ระบบสูญญากาศ และทำการล้างตัวอย่างด้วยน้ำจำนวน 6-7 ครั้ง
6. หลังจากนั้นนำ แท่น ที่มี แคปซูล มาวางบนกระดวยเขັดชูเพื่อซับน้ำ แล้วนำสำลี ปราสจากไขมันมาใส่ทั้งด้านบนแคปซูลย้ายถาดใส่แคปซูลไปยังถาดเหล็กเพื่อซับเอา สารละลายกรดออก แล้วนำไปอบไมโครเวฟ ไฟปานกลาง ประมาณ 30 นาที
7. นำตัวกรองเมมเบรน มาสวมกับปากของแคปซูล ใช้แท่งแก้ว (Glass rod) เขี่ยให้ตัวกรอง ลงไปใน แคปซูล นำตัวล็อก มาสวมกับแคปซูล จากนั้นนำเข้าเครื่องวิเคราะห์ปริมาณ ไขมัน (2050 Soxtec Automatic Extraction)

4. ขั้นตอนการหาปริมาณไขมัน โดยการย่อย Hydrolysis ด้วยระบบ Soxtec System 2047 SoxCap โดยการใช้ Hydrochloric ร้อยละ 37 โดยปริมาตร

เตรียมกรดไฮดรอกลอลิก ร้อยละ 37 โดยปริมาตร 246 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 754 มิลลิลิตร
เตรียมใส่ขวดปรับปริมาณ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร



นำเมล็ดสบู่ดำมากะเทาะเปลือก ชั่งน้ำหนักเปลือก (กรัม)
และชั่งน้ำหนักเนื้อ (กรัม) แล้วบดเนื้อในเครื่องด้วยเครื่องบด



นำ Polyester filter ใส่ในแคปซูลซึ่งเมล็ดสบู่ดำที่บดแล้วใส่แคปซูล
ทั้งหมด 6 แคปซูล โดย แคปซูล ละ 1.5 กรัม



เติม celite 545 ชั่งใส่ แคปซูล ทั้งหมด 6 แคปซูลละ โดย แคปซูล ละ 1 กรัม

ภาพผนวกที่ ค1 ขั้นตอนการย่อยด้วยกรด

นำ แคปซูล ไปวางที่ แท่น เติมสารละลายกรดปริมาณประมาณ 800 มิลลิลิตร
(อยู่ในระดับ “R” ของ บีกเกอร์)



นำ แท่น ที่มี แคปซูล ใส่ในบีกเกอร์ แล้วนำ ตัวควมแน่น มาวางบน บีกเกอร์
เปิดระบบน้ำหล่อเย็น โดยต้ม สารละลายกรด
ให้เดือดแล้วจับเวลาตาม Application sub note ประมาณ 60 นาที



กระบวนการย่อยด้วยกรด เพื่อการย่อยตัวอย่างด้วยสารละลาย



เมื่อย่อยตัวอย่างเสร็จแล้ว ให้ปิดเครื่องให้ความร้อน และเอาสารละลายกรดออก
โดยใช้ระบบสุญญากาศ และทำการล้างตัวอย่างด้วยน้ำ 6-7 ครั้ง



นำ แท่น ที่มี แคปซูล มาวางบนกระดวยเซ็ดชูเพื่อซับน้ำ



นำสำลีที่ปราศจากไขมันมาใส่ด้านบน แคปซูล ย้าย ถาดบรรจุแคปซูล ไปยัง
ถาดเพื่อซับสารละลายกรด นำไปอบไมโครเวฟ ไฟปานกลาง ประมาณ 30 นาที



นำ ตัวกรองเมมเบรน มาสวมกับปากของ แคปซูล ใช้ แท่งแก้ว
เขี่ยให้ ตัวกรองภายใน ลงไปใน แคปซูล



นำตัวลือกมาสวมกับ แคปซูล แล้วเข้าเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน
(2050 Soxtec Automatic Extraction)

ภาพผนวกที่ ค1 (ต่อ)

5. การสกัดกรดไขมันอิสระและไตรกลีเซอรอล (Total Fat & oil) ด้วยระบบ Soxtec Automatic 2050

หลักการเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมันใช้การสกัดเป็นการแยกส่วนของสารละลายได้ด้วยการใช้ตัวทำละลาย เช่น Crude fat additives ยาฆ่าแมลง (Pesticide) และส่วนประกอบสำคัญที่มีปริมาณน้อยในสารเชิงซ้อนออกมา การสกัดใช้หลักการชอกเลต เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการยอมรับในด้านความถูกต้อง และความแม่นยำ (Reproducible) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์โดยวิธีชอกเลต จะกินเวลานาน ไม่สะดวก นอกจากนี้ อาจมีอันตรายจากการระเบิดของตัวทำละลาย ได้

เครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน สามารถใช้กับตัวทำละลาย ในการสกัดได้หลายชนิด และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดโดยวิธีชอกเลต นั้น จะเห็นว่ารวดเร็ว ปลอดภัย และประหยัด

เทคนิคนี้ช่วยลดเวลาในการสกัดลงเหลือเพียงร้อยละ 20 ของเวลาที่ใช้กับวิธีชอกเลต และสามารถนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ได้ร้อยละ 60-70 การรวมเทคนิคการสกัดโดยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน กับการใช้ตัวทำละลาย ได้หลายชนิดนั้น ทำให้สามารถนำเอาระบบการวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ไปใช้ได้กับหลากหลายในตัวอย่าง เช่น อาหาร อาหารสัตว์ ดิน ไฟเบอร์ ผลิตภัณฑ์ทางเคมี และยา เป็นต้น

ตารางผนวกที่ ค2 ข้อมูลแสดงความสามารถของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ได้สูงสุด	ประมาณ 65 มิลลิกรัม (thimble ขนาด 33×80 มิลลิเมตร)
ตัวอย่างที่ทดสอบต่อ 1 ครั้ง	6 ตัวอย่าง
ความเร็วของการสกัด	ประมาณ 30-60 นาที ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง
Reproducibility	ร้อยละ 1 relative หรือดีกว่า
เวลาในการทำให้ร้อน	จาก 20-50 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 8-10 นาที (230 v)

6. วิธีการสกัด Total Fat & oil โดยใช้เครื่อง 2050 Soxtec Automatic Extraction (AOCS, Ba 3-38)

1. เปิดระบบน้ำหล่อเย็น ไว้ก่อนการวิเคราะห์ให้มีอุณหภูมิไม่เกิน 20 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที และจะเปิดปิดอัตโนมัติเมื่อเปิดเครื่องให้ความร้อน
2. ชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียม (Extraction cup aluminum (Extraction cup weight = W_2)) ก่อนใส่ตัวทำละลาย (Petroleum Ether)
3. นำตัวอย่าง มาสวมกับ แคปซูล ที่ได้จากการอบไมโครเวฟ ในวิธีการย่อยด้วยกรด เข้าเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (2050 Soxtec Automatic Extraction)
4. จากนั้นนำถาดอลูมิเนียม ทั้งหมด 6 ถาด นำเข้าไปในบริเวณที่ใช้สกัด (Extraction Unit) แล้วเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ 40 มิลลิลิตร ลงในถาดอลูมิเนียมทั้งหมด 6 ถาด
5. หลังจากนั้น สารที่ละลายได้จะถูกสกัดลงใน ตัวทำละลายตามขบวนการ 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ใช้เวลา 20 นาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลานาน 40 นาที และขั้นตอนที่ 3 ใช้เวลา 10 นาที รวมถึงการทำ Solvent recovery 1 นาที โดยใช้อุณหภูมิของถาดอลูมิเนียมไม่เกิน 210 องศาเซลเซียส และติดตั้งอุณหภูมิของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ที่ 135 องศาเซลเซียส
6. ขั้นตอนสุดท้าย นำถาดอลูมิเนียมทั้งหมด 6 ถาด ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนัก (Extraction cap + residue weight = W_3)

ระยะเวลาในการสกัดแต่ละขั้นตอน (Extraction Times) (AOCS, Ba 3-38)

Boiling time 20 นาที

Rinsing time 40 นาที

Recovery time 9-10 นาที

7. ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่า Total Fat & oil ด้วยระบบ Soxtec Automatic 2050 โดยการใช้
Petroleum Ether

เปิดน้ำระบบน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิไม่เกิน 20 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 ลิตร/นาที
เปิดปิดอัตโนมัติเมื่อเปิดเครื่องให้ความร้อน

ชั่งน้ำหนัก ถาดอลูมิเนียม (Extraction cup weight = W_2)

นำตัวอย่าง จากวิธีการย่อยด้วยกรด มาสวมกับแคปซูล ทั้งหมด 6 ถาด
และนำเข้าเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

นำถาดอลูมิเนียมทั้งหมด 6 cup ใส่ในบริเวณที่ใช้สกัดทั้งหมด 6 ถาด
แล้วเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ 40 มิลลิลิตร ทั้งหมด 6 ถาด

สารที่ละลายได้จะถูกสกัดลงในตัวทำละลาย ตามขบวนการ 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนสุดท้าย นำถาดอลูมิเนียมทั้งหมด 6 ถาด ไปอบในตู้อบ
ที่อุณหภูมิ 105 องศา และชั่งน้ำหนัก (Extraction cup + residue weight = W_3)

ภาพผนวกที่ ค2 ขั้นตอนการหาปริมาณไขมัน



ตารางผนวกที่ 1 การสมมูลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ดำของอัตราเนื้อในเมล็ดสบู่ดำปริมาณ 10,000 กิโลกรัมต่อวัน (ในหน่วยต่อชั่วโมง)

	JATROPHA	FRESHHEX	1	PURECAKE	7	8	CAKE	10	4
PALMITIC	90.204	0	0.16176489	1.4157e-06	79.2097773	10.9942227	0.1617663	10.8324564	90.0422351
STEARIC	28.5048	0	0.05111868	6.5484e-08	25.0305847	3.47421534	0.05111875	3.42309658	28.4536813
OLEIC	250.416	0	0.44907484	5.8065e-06	219.894856	30.5211441	0.44908064	30.0720634	249.966925
LINOLEIC	188.7192	0	0.33843449	2.9129e-06	165.717771	23.0014292	0.3384374	22.6629918	188.380766
CAKE	392.2296			392.2296		392.2296	392.2296		
CYCLO	0	4347.47232	1.0619982	31.6898813	2121.53618	2225.93614	32.7518795	2193.18426	4346.41032
2-PENT	0	4075.75536	0.66513703	30.0397504	1988.9402	2086.81516	30.7048875	2056.11028	4075.09022
3-PENT	0	4075.75536	0.72929133	29.9755961	1988.9402	2086.81516	30.7048875	2056.11028	4075.02607
DIMET	0	543.43416	0.06563631	4.02834953	265.192081	278.242079	4.09398584	274.148093	543.368524
WATER	50.004	0	0.00031036	0.08936372	43.9094242	6.09457578	0.08967409	6.00490168	50.0036896
HEXANE	0	14129.2853	2.82739411	103.616216	6894.9927	7234.29258	106.44361	7127.84897	14126.4579
Temp (°C)	30	30	70	70	29.4311426	29.8490841	29.8490713	29.8490605	30.9245503

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

	14	9	WATER	6	OIL	5	3	WATER1	11	RECHX
PALMITIC	90.0422351	90.0422351	0	90.042	90.042235	2.451e-101	2.451e-101	0	0	0
STEARIC	28.453681	28.453681	0	28.453	28.453681	1.028e-114	1.028e-114	0	0	0
OLEIC	249.96692	249.96692	0	249.96	249.96692	2.0768e-99	2.0768e-99	0	0	0
LINOLEIC	188.38076	188.38076	0	188.380	188.38076	1.4612e-96	1.4612e-96	0	0	0
CAKE										
CYCLO	1.137e-124	1.137e-124	0	0	0	4346.4103	4346.4103	0	4346.4103	4346.4103
2-PENT	9.659e-139	9.659e-139	0	0	0	4075.0902	4075.0902	0	4075.0902	4075.0902
3-PENT	9.331e-136	9.331e-136	0	0	0	4075.0260	4075.0260	0	4075.0260	4075.0260
DIMET	1.06e-137	1.06e-137	0	0	0	543.36852	543.36852	0	543.36852	543.36852
WATER	38.7158376	38.7158376	38.7158376	0	0	11.287852	11.287852	11.28785	0	0
HEXANE	3.123e-136	3.123e-136	0	0	0	14126.4579	14126.4579	0	14126.4579	14126.4579
Temp (°C)	120.909934	30	30	30	29.9998441	67.3771279	30	30	30	30

ตารางผนวกที่ ง2 การสมมูลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันสบู่อัตราเนื้อในเมล็ดสบู่ดำปริมาณ 30,000 กิโลกรัมต่อวัน (ในหน่วยต่อชั่วโมง)

	JATROPH	FRESHHE	1	PURECAK	15	22	20	11	18	21
PALMITIC	270.588	0	4.2449e-06	0.46442381	89.29404	89.29404	91.99992	0	0	0
STEARIC	85.5072	0	1.9634e-07	0.14676146	28.217376	28.217376	29.072448	0	0	0
OLEIC	751.188	0	1.7414e-05	1.28929617	247.89204	247.89204	255.40392	0	0	0
LINOLEIC	566.1096	0	8.7338e-06	0.97164256	186.81616	186.81616	192.47726	0	0	0
CAKE	1176.602			1176.6024	388.27879	388.27879	400.04481			
CYCLO	0	13042.417	95.226104	3.05553777	0	0	0	4434.42	4303.997	4303.997
2-PENT	0	12227.2661	90.226064	1.91297675	0	0	0	4157.27	4034.997	4034.997
3-PENT	0	12227.2661	90.041369	2.09767129	0	0	0	4157.27	4034.997	4034.997
DIMET	0	1630.30248	12.096481	0.18872704	0	0	0	554.302	537.9998	537.9998
WATER	150	0	0.2566037	0.00085119	49.5	49.5	51	0	0	0
HEXANE	0	42387.856	311.281351	8.133994	0	0	0	14411.87	13987.992	13987.992
Temp (°C)	30	30	70	70	30.0000079	30.0000079	30.0000079	30	30	30

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

	7	23	24	8	26	27	17	CAKE	10	4
PALMITIC	79.203474	89.04446	79.899262	10.090565	0.2495730	12.100657	22.440795	0.4644280	21.976367	270.12357
STEARIC	25.028705	28.13850	25.248578	3.1886704	0.0788663	3.8238699	7.0914068	0.1467616	6.9446451	85.360438
OLEIC	219.8793	247.1991	221.81089	28.012740	0.6928478	33.593021	62.298610	1.2893135	61.009296	749.89870
LINOLEI	165.70523	186.2940	167.16092	21.110935	0.5221433	25.316341	46.949420	0.9716513	45.977769	565.13795
CAKE				388.27879	388.27879	400.04481	1176.6024	1176.6024		
CYCLO	2229.6425	4028.758	2035.1245	2204.7792	275.23875	2268.8730	4748.8910	98.281642	4650.6094	13039.361
2-PENT	2090.2899	3776.961	1907.9292	2066.9805	258.03633	2127.0685	4452.0854	92.139041	4359.9463	12225.353
3-PENT	2090.2899	3776.961	1907.9292	2066.9805	258.03633	2127.0685	4452.0854	92.139041	4359.9463	12225.168
DIMET	278.70537	503.5949	254.39062	275.59746	34.404852	283.60919	593.61151	12.285208	581.32630	1630.1137
WATER	43.906312	49.36164	44.292021	5.5936876	0.1383504	6.7079789	12.440017	0.2574549	12.182562	149.99914
HEXANE	7246.3384	13093.46	6614.1548	7165.5326	894.52597	7373.8376	15433.896	319.41534	15114.480	42379.722
Temp (°C)	29.445009	29.56896	29.416659	29.857693	29.9967147	29.8401282	29.8565106	29.8564977	29.8564869	30.9260648

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

	14	9	WATER	25	OIL	5	3	WATER1	12	RECHX
PALMITIC	270.12357	270.12357	0	270.123	270.12357	1.6994e-98	1.6994e-98	0	0	0
STEARIC	85.360438	85.360438	0	85.3604	85.360438	1.212e-111	1.212e-111	0	0	0
OLEIC	749.89870	749.89870	0	749.898	749.89870	7.7071e-97	7.7071e-97	0	0	0
LINOLEI	565.13795	565.13795	0	565.137	565.13795	1.7676e-92	1.7676e-92	0	0	0
CAKE										
CYCLO	3.418e-124	3.418e-124	0	0	0	13039.361	13039.361	0	13039.36	13039.36
2-PENT	2.902e-138	2.902e-138	0	0	0	12225.353	12225.353	0	12225.35	12225.35
3-PENT	2.804e-135	2.804e-135	0	0	0	12225.168	12225.168	0	12225.16	12225.16
DIMET	3.185e-137	3.185e-137	0	0	0	1630.1137	1630.1137	0	1630.113	1630.113
WATER	118.587763	118.587763	118.587763	0	0	31.4113861	31.4113861	31.4113861	0	0
HEXANE	9.38e-136	9.38e-136	0	0	0	42379.722	42379.722	0	42379.722	42379.722
Temp (°C)	123.132199	30	30	30	29.9998441	67.3395801	30	30	30	30

ตารางผนวกที่ ง3 การสมดุลมวลของกระบวนการสกัดน้ำมันสบู่ดำของอัตราเนื้อในเมล็ดสบู่ดำปริมาณ 50,000 กิโลกรัมต่อวัน (ในหน่วยต่อชั่วโมง)

	JATROPHA	FRESHHEX	1	PURECAKE	KERNEL1	KERNEL2	KERNEL3	KERNEL4	KERNEL5	4
PALMITIC	450.972	0	7.0e-06	0.80855802	90.1944	90.1944	90.1944	90.1944	90.1944	450.163
STEARIC	142.512	0	3.27e-07	0.25551494	28.5024	28.5024	28.5024	28.5024	28.5024	142.256
OLEIC	1251.96	0	2.9e-05	2.24465835	250.392	250.392	250.392	250.392	250.392	1249.715
LINOLEIC	943.488	0	1.45e-05	1.69160147	188.6976	188.6976	188.6976	188.6976	188.6976	941.7963
CAKE	1960.968			1960.968	392.1936	392.1936	392.1936	392.1936	392.1936	
CYCLO	0	21737.3616	158.436	5.30831837	0	0	0	0	0	21732.05
2-PENT	0	20378.7768	150.185	3.32463043	0	0	0	0	0	20375.45
3-PENT	0	20378.7768	149.865	3.64530195	0	0	0	0	0	20375.13
DIMET	0	2717.1708	20.1400	0.32807707	0	0	0	0	0	2716.842
WATER	249.996	0	0.44667	0.00155097	49.9992	49.9992	49.9992	49.9992	49.9992	249.994
HEXANE	0	70646.4264	518.037	14.1325027	0	0	0	0	0	70632.293
Temp (°C)	30	30	70	70	30.000007	30.000007	30.000007	30.000007	30.000007	30.924

ตารางผนวกที่ 33 (ต่อ)

	SOLVENT1	SOLVENT2	SOLVENT3	SOLVENT4	SOLVENT5	44	7	23	24	40
PALMITIC	0	0	0	0	0	79.20379	79.20379	79.20379	79.20379	79.20379
STEARIC	0	0	0	0	0	25.02925	25.02925	25.02925	25.02925	25.02925
OLEIC	0	0	0	0	0	219.8805	219.8805	219.8805	219.8805	219.8805
LINOLEIC	0	0	0	0	0	165.7039	165.7039	165.7039	165.7039	165.7039
CAKE										
CYCLO	4347.47232	4347.47232	4347.47232	4347.47232	4347.47232	2121.736	2121.736	2121.736	2121.736	2121.736
2-PENT	4075.75536	4075.75536	4075.75536	4075.75536	4075.75536	1989.127	1989.127	1989.127	1989.127	1989.127
3-PENT	4075.75536	4075.75536	4075.75536	4075.75536	4075.75536	1989.127	1989.127	1989.127	1989.127	1989.127
DIMET	543.43416	543.43416	543.43416	543.43416	543.43416	265.2171	265.2171	265.2171	265.2171	265.2171
WATER						43.90656	43.90656	43.90656	43.90656	43.90656
HEXANE	14129.2853	14129.2853	14129.2853	14129.2853	14129.2853	6895.643	6895.643	6895.643	6895.643	6895.643
Temp (°C)	30	30	30	30	30	29.43118	29.43118	29.43118	29.43118	29.43118

ตารางผนวกที่ ง3 (ต่อ)

	C+S1	C+S2	C+S3	C+S4	C+S5	49	CAKE	10	2	14
PALMITI	10.990601	10.990601	10.990601	10.990601	10.990601	54.953007	0.8085650	54.144442	450.16344	450.16344
STEARIC	3.4731482	3.4731482	3.4731482	3.4731482	3.4731482	17.365741	0.2555152	17.110225	142.25648	142.25648
OLEIC	30.511413	30.511413	30.511413	30.511413	30.511413	152.55707	2.2446873	150.31238	1249.7153	1249.7153
LINOLEIC	22.993668	22.993668	22.993668	22.993668	22.993668	114.96834	1.6916160	113.27672	941.79639	941.79639
CAKE										
CYCLO	2225.7359	2225.7359	2225.7359	2225.7359	2225.7359	11128.679	163.74466	10964.935	21732.053	5.696e-124
2-PENT	2086.6274	2086.6274	2086.6274	2086.6274	2086.6274	10433.137	153.51062	10279.626	20375.452	4.838e-138
3-PENT	2086.6274	2086.6274	2086.6274	2086.6274	2086.6274	10433.137	153.51062	10279.626	20375.131	4.674e-135
DIMET	278.21705	278.21705	278.21705	278.21705	278.21705	1391.0852	20.468088	1370.6171	2716.8427	5.311e-137
WATER	6.0926319	6.0926319	6.0926319	6.0926319	6.0926319	30.463159	0.4482274	30.014932	249.99444	196.56472
HEXANE	7233.6419	7233.6419	7233.6419	7233.6419	7233.6419	36168.209	532.17018	35636.039	70632.293	1.564e-135
Temp (°C)	29.849110	29.849110	29.849110	29.849110	29.849110	29.849021	29.849009	29.848998	30.924415	123.25227

ตารางผนวกที่ ง3 (ต่อ)

	9	WATER	13	OIL	5	3	WATER1	12	RECHEX
PALMITIC	450.163442	0	450.163442	450.163442	46772.5837	46772.5837	0	0	0
STEARIC	142.256485	0	142.256485	142.256485	4.319e-114	4.319e-114	0	0	0
OLEIC	1249.71534	0	1249.71534	1249.71534	8.8473e-99	8.8473e-99	0	0	0
LINOLEIC	941.796399	0	941.796399	941.796399	6.2096e-96	6.2096e-96	0	0	0
CAKE									
CYCLO	5.696e-124	0	0	0	21732.0533	21732.0533	0	21732.0533	21732.0533
2-PENT	4.838e-138	0	0	0	20375.4522	20375.4522	0	20375.4522	20375.4522
3-PENT	4.674e-135	0	0	0	20375.1315	20375.1315	0	20375.1315	20375.1315
DIMET	5.311e-137	0	0	0	2716.84272	2716.84272	0	2716.84272	2716.84272
WATER	196.564727	196.564727	0	0	53.4297217	53.4297217	53.4297217	0	0
HEXANE	1.564e-135	0	0	0	70632.2939	70632.2939	0	70632.2939	70632.2939
Temp (°C)	30	30	30	29.9998441	67.3372686	30	30	30	30



ภาคผนวก จ
การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ตารางผนวกที่ จ1 การประเมินราคาอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ใช้ในแผนผังของการสกัดขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวันถูกประเมินด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer

รหัสในแผนภาพ	อุปกรณ์	ราคา (บาท)
MIXER	Pan Mixer	1,678,714.93
SIEVE1	Molecular Sieve	876,156.02
TANK1	Vertical tank- Vertical process vessel	651,860.08
TANK2	Vertical tank- Vertical process vessel	525,693.61
TANK3	Vertical tank- Vertical process vessel	651,860.08
DEHUMID	Headspace dehumidification	227,625.33
B1	Pressure leaf filter	1,002,322.48
B6	Distillation tray tower	6,777,942.94
COOLER1	Cooling tower, complete field assembly	130,967.80
COOLER2	Cooling tower, complete field assembly	130,967.80
CRUSHER	Pulverizer- crushing soft material	539,712.11
DRUM	Rotary drum	4,836,381.21
EVAP	Standard Vertical tube evaporator	3,084,069.18
	รวม	21,114,273.56

หมายเหตุ: ราคาที่แสดงดังตารางภาคผนวกที่ จ1 เป็นราคาที่เปลี่ยนเพื่อให้เทียบเคียงกับปัจจุบันมากที่สุด โดยใช้การเปลี่ยนของตัวแปร Chemical Engineering Plant Cost Index

โดยจากโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer ราคาจะเป็นในปีของ 2009
 Chemical Engineering Plant Cost Index เท่ากับ 521.9 ของปี 2009
 Chemical Engineering Plant Cost Index เท่ากับ 564.7 ของปี 2013

นอกจากนี้จาก โปรแกรมเป็นหน่วยของดอลลาร์สหรัฐ จากการแปลงหน่วยให้เป็น บาท

1 Dollar = 32.390 บาท (ธนาคารแห่งประเทศไทย ณ วันที่ 1 กรกฎาคม 2557)

1. ตัวอย่างการคำนวณของราคาที่เปลี่ยนเพื่อเทียบเคียงกับปัจจุบัน คือ

จาก MIXER ที่โปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer ประเมินราคาเท่ากับ 47,900 ดอลลาร์
 สหรัฐ

เมื่อเปลี่ยนเป็นเงิน (บาท) มีค่าเท่ากับ $47,900 \times 32.390 = 1,551,481.0$ บาท

จากนั้นเมื่อเปลี่ยนจากปี 2009 \rightarrow 2013
 ราคาเมื่อปี 2013 = $\frac{1,551,481.0 \times 564.7}{521.9}$
 = 1,678,714.93 บาท

2. ตัวอย่างการคำนวณมูลค่าซากโรงงานสกัดน้ำมันสบู่น้ำขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวันที่สกัดด้วยตัว ทำละลายเฮกเซน 27.1717 ลิตรต่อกิโลกรัม

มูลค่าซากโรงงาน เท่ากับ ร้อยละ 10 ของเงินลงทุนคงที่

$$\begin{aligned} \text{มูลค่าซากโรงงาน} &= (0.1)(46,649,825) \\ &= 4,664,982.51 \text{ บาท} \end{aligned}$$

เพื่อสะดวกต่อการพิจารณาจึงปัดค่าให้เป็นจำนวนเต็มมูลค่าซากโรงงานสกัดน้ำมันสบู่น้ำ
 ขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวันเท่ากับ 4,000,000 บาทเพื่อใช้ในการคำนวณค่าเสื่อมราคาตั้งตัวอย่าง
 ต่อไป

3. ตัวอย่างการคำนวณค่าเสื่อมราคาโรงงานสกัดน้ำมันสบู่อำนาจขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวันที่สกัดด้วย
ตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \text{ค่าเสื่อมราคา} &= (\text{เงินลงทุนคงที่} - \text{มูลค่าซากโรงงาน}) / \text{อายุโครงการ} \\ \text{ดังตัวอย่าง} \quad \text{ค่าเสื่อมราคา} &= (46,649,825 - 4,000,000) / 20 \\ &= 2,132,491.26 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ จ2 การประเมินราคาอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ใช้ในแผนผังของการสกัดขนาด 30,000
กิโลกรัมต่อวันถูกประเมินด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer

รหัสในแผนภาพ	อุปกรณ์	ราคา (บาท)
MIXER	Pan Mixer	2,256,977.90
SIEVE1	Molecular Sieve	876,156.02
B2	Vertical process vessel	525,693.61
TANK1	Vertical process vessel	960,266.99
TANK2	Vertical process vessel	525,693.61
TANK3	Vertical process vessel	960,266.99
DEHUMID	Headspace dehumidification	227,625.33
FILTER1	Pressure leaf filter	1,990,626.47
B5	Distillation tray tower	9,048,939.34
COOLER1	Cooling tower, complete field assembly	280,965.71
COOLER2	Cooling tower, complete field assembly	280,965.71
CRUSHER	Pulverizer- crushing soft material	876,156.02

ตารางผนวกที่ จ2 (ต่อ)

รหัสในแผนภาพ	อุปกรณ์	ราคา (บาท)
DRUM1	Rotary drum	4,836,381.21
DRUM2	Rotary drum	4,836,381.21
DRUM3	Rotary drum	4,836,381.21
TANK	Vertical tank- Vertical process vessel	960,266.99
EVAP	Standard Vertical tube evaporator	3,084,069.18
	รวม	37,304,234.90

ตารางผนวกที่ จ3 การประเมินราคาอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ใช้ในแผนผังของการสกัดขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวันถูกประเมินด้วยโปรแกรม Aspen Process Economic Analyzer

รหัสในแผนภาพ	อุปกรณ์	ราคา (บาท)
MIXER	Pan Mixer	2,786,176.13
SIEVE1	Molecular Sieve	876,156.02
B4	Vertical process vessel	525,693.61
TANK	Vertical process vessel	1,040,873.35
TANK1	Vertical process vessel	1,040,873.35
TANK2	Vertical process vessel	525,693.61
TANK3	Vertical process vessel	1,040,873.35
DEHUMID	Headspace dehumidification	227,625.33
FILTER1	Pressure leaf filter	1,990,626.47
B5	Distillation tray tower	9,956,636.97
COOLER1	Cooling tower, complete field	400,087.88

ตารางผนวกที่ ๓ (ต่อ)

รหัสในแผนภาพ	อุปกรณ์	ราคา (บาท)
COOLER2	Cooling tower, complete field assembly	400,087.88
CRUSHER	Pulverizer	816,577.41
DRUM1	Rotary drum	4,836,381.21
DRUM2	Rotary drum	4,836,381.21
DRUM3	Rotary drum	4,836,381.21
DRUM4	Rotary drum	4,836,381.21
DRUM5	Rotary drum	4,836,381.21
EVAP	Standard Vertical tube evaporator	3,084,069.18
	รวม	48,893,956.59

ตารางผนวกที่ ๔ การคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานสกัดน้ำมันสบู่ดำขนาด 10,000 กิโลกรัม ต่อวันด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

รายละเอียด	กำหนด	จำนวนเงิน (บาท)
1. ต้นทุนทางตรง		
1.1 ค่าเครื่องมืออุปกรณ์		21,114,274
1.2 ค่าการติดตั้งเครื่องมือ อุปกรณ์	ร้อยละ 25 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	5,278,568
1.3 ค่าเครื่องมือวัดและเครื่อง ควบคุม (พร้อมค่าติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	2,111,427

ตารางผนวกที่ ๑4 (ต่อ)

รายละเอียด	กำหนด	จำนวนเงิน
		(บาท)
1.4 ค่าการวางระบบท่อ (พร้อมค่าติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	2,111,427
1.5 ค่าระบบไฟฟ้า (พร้อมค่าติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	2,111,427
1.6 ค่าก่อสร้าง (รวมค่าบริการ)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	2,111,427
1.7 ค่าที่ดิน	ร้อยละ 8 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	1,689,142
รวม		36,527,693
2. ต้นทุนทางอ้อม		
2.1 ค่าใช้จ่ายสำหรับวิศวกร และ ผู้ควบคุมดูแล	ร้อยละ 6 ของต้นทุนทางตรง	2,191,662
2.2 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง	ร้อยละ 2 ของเงินลงทุนคงที่	932,997
2.3 ค่าใช้จ่ายตามกฎหมาย + ค่า ภาษีของผู้รับเหมา	ร้อยละ 10 ของเงินลงทุนคงที่	4,664,983
2.4 ค่าใช้จ่ายฉุกเฉิน	ร้อยละ 5 ของเงินลงทุนคงที่	2,332,491
รวม		10,122,132
1. เงินลงทุนคงที่	ต้นทุนทางตรง + ต้นทุน ทางอ้อม	46,649,825
2. เงินทุนหมุนเวียน	จ่ายจริงสำรองเดือนถัดไป	2,058,174
3. ต้นทุนในการสร้าง โรงงานทั้งหมด	เงินลงทุนคงที่ + เงินทุน หมุนเวียน	48,708,000

ตารางผนวกที่ ๑5 การคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานสกัดน้ำมันสนูปัจขนาด 30,000
กิโลกรัมต่อวันด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

รายละเอียด	กำหนด	จำนวนเงิน (บาท)
1. ต้นทุนทางตรง		
1.1 ค่าเครื่องมืออุปกรณ์		37,304,235
1.2 ค่าการติดตั้งเครื่องมือ อุปกรณ์	ร้อยละ 25 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	9,326,059
1.3 ค่าเครื่องมือวัดและเครื่อง ควบคุม (พร้อมค่าติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	3,730,423
1.4 ค่าการวางระบบท่อ (พร้อมค่าติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	3,730,423
1.5 ค่าระบบไฟฟ้า (พร้อมค่าติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	3,730,423
1.6 ค่าก่อสร้าง (รวมค่าบริการ)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	3,730,423
1.7 ค่าที่ดิน	ร้อยละ 8 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	2,984,339
รวม		64,536,326
2. ต้นทุนทางอ้อม		
2.1 ค่าใช้จ่ายสำหรับวิศวกร และ ผู้ควบคุมดูแล	ร้อยละ 6 ของต้นทุนทางตรง	3,872,180
2.2 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง	ร้อยละ 2 ของเงินลงทุนคงที่	1,648,398

ตารางผนวกที่ ๑5 (ต่อ)

รายละเอียด	กำหนด	จำนวนเงิน (บาท)
2.3 ค่าใช้จ่ายตามกฎหมาย + ค่า ภาษีของผู้รับเหมา	ร้อยละ 10 ของเงินลงทุนคงที่	8,241,989
2.4 ค่าใช้จ่ายลูกเงิน	ร้อยละ 5 ของเงินลงทุนคงที่	4,120,994
รวม		17,883,560
1. เงินลงทุนคงที่	ต้นทุนทางตรง + ต้นทุน ทางอ้อม	82,419,887
2. เงินทุนหมุนเวียน	จ่ายจริงสำรองเดือนถัดไป	10,549,912
3. ต้นทุนในการสร้าง โรงงานทั้งหมด	เงินลงทุนคงที่ + เงินทุน หมุนเวียน	92,969,798

ตารางผนวกที่ ๑6 การคำนวณต้นทุนในการสร้างโรงงานสกัดน้ำมันสบู่ดำขนาด 50,000 กิโลกรัม
ต่อวันด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

รายละเอียด	กำหนด	จำนวนเงิน (บาท)
1. ต้นทุนทางตรง		
1.1 ค่าเครื่องมืออุปกรณ์		48,893,957
1.2 ค่าการติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์	ร้อยละ 25 ของค่า เครื่องมืออุปกรณ์	12,223,489
1.3 ค่าเครื่องมือวัดและเครื่องควบคุม (พร้อมค่าติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่า เครื่องมืออุปกรณ์	4,889,396

ตารางผนวกที่ ๖6 (ต่อ)

รายละเอียด	กำหนด	จำนวนเงิน
		(บาท)
1.4 ค่าการวางระบบท่อ (พร้อมค่าติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	4,889,396
1.5 ค่าระบบไฟฟ้า (พร้อมค่า ติดตั้ง)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	4,889,396
1.6 ค่าก่อสร้าง (รวมค่าบริการ)	ร้อยละ 10 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	4,889,396
1.7 ค่าที่ดิน	ร้อยละ 8 ของค่าเครื่องมือ อุปกรณ์	3,911,517
รวม		84,586,545
2. ต้นทุนทางอ้อม		
2.1 ค่าใช้จ่ายสำหรับวิศวกร และ ผู้ควบคุมดูแล	ร้อยละ 6 ของต้นทุนทางตรง	5,075,193
2.2 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง	ร้อยละ 2 ของเงินลงทุนคงที่	2,160,524
2.3 ค่าใช้จ่ายตามกฎหมาย + ค่า ภาษีของผู้รับเหมา	ร้อยละ 10 ของเงินลงทุนคงที่	10,802,619
2.4 ค่าใช้จ่ายฉุกเฉิน	ร้อยละ 5 ของเงินลงทุนคงที่	5,401,309
รวม		23,439,645
3. เงินลงทุนคงที่	ต้นทุนทางตรง + ต้นทุน ทางอ้อม	108,026,190
4. เงินทุนหมุนเวียน	จ่ายจริงสำรองเดือนถัดไป	10,311,662
5. ต้นทุนในการสร้าง โรงงานทั้งหมด	เงินลงทุนคงที่ + เงินทุน หมุนเวียน	118,337,852

ตารางผนวกที่ ๗ ต้นทุนหมุนเวียนที่ใช้ในการสกัดน้ำมันสบู่อำของโรงงานสกัดขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน
27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

ลำดับ	รายการ	ราคาต่อหน่วย	จำนวน	มูลค่าต่อเดือน	มูลค่าต่อปี
1.	สบู่ดำ	8.00 บาทต่อกิโลกรัม *	10,000 กิโลกรัม	2,000,000	24,000,000
2.	เฮกเซน	28.50 บาทต่อลิตร **	54,343.40 ลิตร	1,548,786.90	-
3.	ค่าน้ำ	2.00 บาทต่อตัน ***		802.33	9,627.94
4.	ค่าไอน้ำ	142.50 บาทต่อตัน ****		19,257.19	231,086.34
5	เฮกเซนใหม่เพิ่มเติม	28.50 บาทต่อลิตร	53.495 ลิตร	38,114.95	457,379.34
รวม (ไม่คิดราคาเฮกเซนที่นำเข้ามาครั้งแรก)				2,058,174.47	24,698,093.62

หมายเหตุ: ในโรงงานสกัดน้ำมันสบู่ดำดังกล่าวไม่ได้ทำการคิดค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต ซึ่งราคาน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในครั้งแรกของการผลิตมีราคา
641.86 บาท ซึ่งกำหนดน้ำที่สูญเสียแต่ละการผลิตคิดเป็นร้อยละ 5 และราคาอ้างอิงอื่น ๆ แสดงดังต่อไปนี้

* ราคาอ้างอิงจาก (KUBIODIESEL, 2014)

** ราคาอ้างอิงจาก (Norceline Chemicals Suppliers, 2014)

*** ราคาอ้างอิงจาก Ministry of Energy (MOEN, 2012)

**** ราคาอ้างอิงจาก Ministry of Energy (MOEN, 2012)

ตารางผนวกที่ ๑๘ ต้นทุนการผลิตทั้งหมดที่ใช้ในการสกัดน้ำมันสบู่น้ำของโรงงานสกัดขนาด
10,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

รายละเอียด	ข้อกำหนด	จำนวนเงิน	จำนวนเงิน
		(บาทต่อปี)	(บาทต่อปี)
1. ต้นทุนการผลิต		ปีแรกของการผลิต	ปีถัดไปของการผลิต
1.1 ต้นทุนการผลิตโดยตรง			
1. วัตถุดิบ		26,244,473.19	24,698,093.62
2. ค่าแรงงานพนักงาน		2,580,000.00	2,580,000.00
3. ค่าการดูแลโดยตรงและค่างานธุรการ	ร้อยละ 15 ของค่าแรงพนักงาน	387,000.00	387,000.00
4. ค่าอรรถประโยชน์	ร้อยละ 10 ของต้นทุนการผลิต	3,679,145.05	3,507,325.10
5. ค่าซ่อมบำรุง	ร้อยละ 3 ของเงินทุนคงที่	1,399,494.75	1,399,494.75
6. ค่าสนับสนุนการดำเนินงาน	ร้อยละ 1 ของเงินทุนคงที่	466,498.25	466,498.25
7. ค่าใช้จ่ายในห้องปฏิบัติการ	ร้อยละ 15 ของค่าแรงพนักงาน	387,000.00	387,000.00
1.2 ต้นทุน			
ค่าประกันภัย	ร้อยละ 0.4 ของเงินลงทุนคงที่	186,599.30	186,599.30
1.3 ค่าใช้จ่ายในการบริหาร	ร้อยละ 3 ของต้นทุนในการสร้างโรงงาน	1,461,239.99	1,461,239.99
2. ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด	รวม	36,791,450.53	35,073,251.02

ตารางผนวกที่ ๑๑ ต้นทุนหมุนเวียนที่ใช้ในการสกัดน้ำมันสบู่อ่างของโรงงานสกัดขนาด 30,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน
27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

ลำดับ	รายการ	ราคาต่อหน่วย	จำนวน	มูลค่าต่อเดือน	มูลค่าต่อปี
1.	สบู่ดำ	8.00 บาทต่อกิโลกรัม	30,000 กิโลกรัม	6,000,000	72,000,000
2.	เฮกเซน	28.50 บาทต่อลิตร	163,030.20 ลิตร	4,646,360.70	-
3.	ค่าน้ำ	2.00 บาทต่อตัน		2,407.03	28,884.35
4.	ค่าไอน้ำ	142.50 บาทต่อตัน		91,408.97	1,096,907.60
5.	เฮกเซนใหม่ที่เติม	28.50 บาทต่อลิตร	153.89 ลิตร	109,646.84	1,315,762.07
รวม (ไม่คิดราคาเฮกเซนที่นำเข้ามาในครั้งแรก)				6,203,462.83	74,441,554.01

หมายเหตุ: ราคาน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในครั้งแรกของการผลิตมีราคา 1,925.62 บาท

ตารางผนวกที่ ๑10 ต้นทุนการผลิตทั้งหมดที่ใช้ในการสกัดน้ำมันสบู่น้ำของโรงงานสกัดขนาด
30,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

รายละเอียด	ข้อกำหนด	จำนวนเงิน	จำนวนเงิน
		(บาทต่อปี)	(บาทต่อปี)
1. ต้นทุนการผลิต		ปีแรกของการผลิต	ปีถัดไปของการผลิต
1.1 ต้นทุนการผลิตโดยตรง			
1. วัตถุดิบ		79,081,068.59	74,441,554.01
2. ค่าแรงงานพนักงาน		2,580,000.00	2,580,000.00
3. ค่าการดูแลโดยตรงและค่า งานธุรการ	ร้อยละ 15 ของค่าแรงพนักงาน	387,000.00	387,000.00
4. ค่า อรรถประโยชน์	ร้อยละ 10 ของต้นทุนการผลิต	9,872,293.06	9,356,791.44
5. ค่าซ่อมบำรุง	ร้อยละ 3 ของเงินทุนคงที่	2,472,596.60	2,472,596.60
6. ค่าสนับสนุน การดำเนินงาน	ร้อยละ 1 ของเงินทุนคงที่	824,198.87	824,198.87
7. ค่าใช้จ่ายใน ห้องปฏิบัติการ	ร้อยละ 15 ของค่าแรงพนักงาน	387,000.00	387,000.00
1.2 ต้นทุน ค่าประกันภัย	ร้อยละ 0.4 ของเงินลงทุนคงที่	329,679.55	329,679.55
1.3 ค่าใช้จ่ายในการบริหาร	ร้อยละ 3 ของต้นทุนในการสร้าง โรงงาน	2,789,093.95	2,789,093.95
2. ต้นทุนในการผลิต ทั้งหมด	รวม	98,722,930.62	93,567,914.42

ตารางผนวกที่ ๑11 ต้นทุนหมุนเวียนที่ใช้ในการสกัดน้ำมันสบู่ดำของโรงงานสกัดขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน
27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

ลำดับ	รายการ	ราคาต่อหน่วย	จำนวน	มูลค่าต่อเดือน	มูลค่าต่อปี
1.	สบู่ดำ	8.00 บาทต่อกิโลกรัม	50,000 กิโลกรัม	10,000,000	120,000,000
2.	เฮกเซน	28.50 บาทต่อลิตร	271,717.00 ลิตร	7,743,934.50	-
3.	ค่าน้ำ	2.00 บาทต่อตัน		4,011.57	48,138.86
4.	ค่าไอน้ำ	142.50 บาทต่อตัน		117,136.92	1,405,643.10
5.	เฮกเซนใหม่ที่เติม	28.50 บาทต่อลิตร	267.39 ลิตร	190,513.81	2,286,165.69
รวม (ไม่คิดราคาเฮกเซนที่นำเข้ามาในครั้งแรก)				10,311,662.30	123,739,947.64

หมายเหตุ: ราคาน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในครั้งแรกของการผลิตมีราคา 3,209.26 บาท

ตารางผนวกที่ ๑12 ต้นทุนการผลิตทั้งหมดที่ใช้ในการสกัดน้ำมันสบู่น้ำของโรงงานสกัดขนาด
50,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

รายละเอียด	ข้อกำหนด	จำนวนเงิน	จำนวนเงิน
		(บาทต่อปี)	(บาทต่อปี)
1. ต้นทุนการผลิต		ปีแรกของการผลิต	ปีถัดไปของการผลิต
1.1 ต้นทุนการผลิตโดยตรง			
1. วัตถุดิบ		131,471,850.30	123,739,947.64
2. ค่าแรงงานพนักงาน		2,580,000.00	2,580,000.00
3. ค่าการดูแลโดยตรงและค่า งานธุรการ	ร้อยละ 15 ของค่าแรงพนักงาน	387,000.00	387,000.00
4. ค่า อรรถประโยชน์	ร้อยละ 10 ของต้นทุนการผลิต	15,903,237.58	15,044,137.28
5. ค่าซ่อมบำรุง	ร้อยละ 3 ของเงินทุนคงที่	3,240,785.70	3,240,785.70
6. ค่าสนับสนุน การดำเนินงาน	ร้อยละ 1 ของเงินทุนคงที่	1,080,261.90	1,080,261.90
7. ค่าใช้จ่ายใน ห้องปฏิบัติการ	ร้อยละ 15 ของค่าแรงพนักงาน	387,000.00	387,000.00
1.2 ต้นทุน ค่าประกันภัย	ร้อยละ 0.4 ของเงินลงทุนคงที่	432,104.76	432,104.76
1.3 ค่าใช้จ่ายในการ บริหาร	ร้อยละ 3 ของต้นทุนในการสร้าง โรงงาน	3,550,135.57	3,550,135.57
2. ต้นทุนในการผลิต ทั้งหมด	รวม	159,032,375.80	150,441,372.85

4. การคำนวณเงินเดือนของพนักงาน

โดยทำงานตั้งแต่ วันจันทร์ – เสาร์ ดำเนินการผลิตเป็นเวลาตลอด 24 ชั่วโมง เฉลี่ยการทำงาน 25 วันต่อเดือน และ 300 วันต่อปี ซึ่งจะแบ่งประเภทของพนักงานออกเป็น 2 ประเภท คือ พนักงานรายเดือน และพนักงานรายวัน

4.1 ประเภทพนักงานรายเดือน

ทำงาน ตั้งแต่วันจันทร์ – เสาร์ เวลา 8.00 น. – 17.00 น. ดังตาราง จ13

ตารางผนวกที่ จ13 รายละเอียดของพนักงานที่ถูกจ้างในรายเดือน

ลำดับที่	ตำแหน่ง	จำนวน (คน)	อัตราเงินเดือน (บาท/เดือน/คน)	ค่าจ้าง (บาท/ เดือน)
1.	ผู้จัดการ	1	50,000	50,000
2.	เจ้าหน้าที่ธุรการ	1	15,000	15,000
3.	วิศวกร	1	22,000	22,000
4.	พนักงานฝ่าย การตลาด	1	12,000	12,000
5.	พนักงานวิจัยและ ตรวจสอบ คุณภาพ	1	16,000	16,000
6.	ช่างเทคนิค	1	10,000	10,000
ค่าจ้างต่อเดือน		6	125,000	125,000
ค่าจ้างต่อปี		= (12)x(125,000) = 1,500,000 บาทต่อปี		

4.2 ประเภทพนักงานรายวัน

ทำงาน ตั้งแต่วันจันทร์ – เสาร์ แบ่งออกเป็น 3 กะ คือ เวลา 08.00 – 16.00 น. 16.00 – 24.00 น. และ 24.00 – 8.00 น. ค่าแรงงานพนักงานชั้นต่ำของพนักงานคือ 300 บาทต่อวัน โดยทั้งหมดทำงาน 25 วันต่อเดือน และมีเงินเดือนเท่ากับ 7,500 บาทต่อเดือน แสดงรายละเอียดดังตาราง จ14

ตารางผนวกที่ จ14 รายละเอียดของพนักงานที่ถูกจ้างในรายวัน

ลำดับที่	ตำแหน่ง	จำนวน (คน)	จำนวน (คน/ วัน)	อัตรา เงินเดือน (บาท/เดือน/ คน)	ค่าจ้าง (บาท/ เดือน)
1.	ช่างซ่อมบำรุง	1	3	7,500	22,500
2.	พนักงาน ช่วยงานทั่วไป	1	3	7,500	22,500
3.	พนักงานรักษา ความปลอดภัย	1	3	7,500	22,500
4.	พนักงานทำ ความสะอาด	1	3	7,500	22,500
ค่าจ้างต่อเดือน		10	30	30,000	90,000
ค่าจ้างต่อปี					$= (12) \times (90,000) = 1,080,000$ บาทต่อปี

5. การคำนวณ NPV (Net present value) ของโรงงานสกัดน้ำมันสุญุดำ

5.1 ขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 27.1717 ลิตรต่อกิโลกรัม

กำหนดให้

อัตราเงินเฟ้อ (คงที่)	ร้อยละ 2.20	ต่อปี
อัตราภาษี	ร้อยละ 20	ต่อปี
อายุโครงการ	20	ปี
อัตราดอกเบี้ยเงินกู้สูงสุด	12.625	ต่อปี
อัตราผลตอบแทนพันธบัตรรัฐบาล	ร้อยละ 4.10	ต่อปี
จำนวนวันที่โรงงานทำงาน	300	วันต่อปี
มูลค่าซากโรงงาน	4,000,000	บาท
ค่าเสื่อมราคา	2,132,491.26	บาทต่อปี
อัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่รับได้ =	อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ + ผลตอบแทนพันธบัตร	
=	ร้อยละ 12.625 + ร้อยละ 4.10	
=	ร้อยละ 16.725	

ดังนั้น กำหนดให้อัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่รับได้ (MARR) ของโรงงานมีค่าประมาณ ร้อยละ 17 ต่อปี

5.1 การคำนวณกระแสเงินสดใน 1 ปีของโรงงานสกัดน้ำมันสบู่อำนาจขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อกิโลกรัม

ตารางผนวกที่ 15 การคำนวณกระแสเงินสดรายปี และมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานสกัดน้ำมันสบู่อำนาจขนาด 10,000 กิโลกรัมต่อวัน

ปีของการผลิต	ยอดขาย	ค่าใช้จ่ายในการผลิต	รายได้ก่อนหักค่าเสื่อมราคา	รายได้หลังหักค่าเสื่อมราคา	ภาษี	รายได้หลังหักภาษี	กระแสเงินสด
2014	57,009,912.27	36,791,450.53	20,218,461.74	18,085,970.48	3,617,194.10	14,468,776.38	16,601,267.64
2015	58,264,130.34	35,073,251.02	23,190,879.33	21,058,388.07	4,211,677.61	16,846,710.45	18,979,201.71
2016	59,545,941.21	35,844,862.54	23,701,078.67	21,568,587.41	4,313,717.48	17,254,869.93	19,387,361.19
2017	60,855,951.92	36,633,449.51	24,222,502.40	22,090,011.14	4,418,002.23	17,672,008.91	19,804,500.17
2018	62,194,782.86	37,439,385.40	24,755,397.46	22,622,906.20	4,524,581.24	18,098,324.96	20,230,816.22
2019	63,563,068.08	38,263,051.88	25,300,016.20	23,167,524.94	4,633,504.99	18,534,019.95	20,666,511.21
2020	64,961,455.58	39,104,839.02	25,856,616.56	23,724,125.30	4,744,825.06	18,979,300.24	21,111,791.50
2021	66,390,607.60	39,965,145.48	26,425,462.12	24,292,970.86	4,858,594.17	19,434,376.69	21,566,867.95
2022	67,851,200.97	40,844,378.68	27,006,822.29	24,874,331.03	4,974,866.21	19,899,464.82	22,031,956.08

ตารางผนวกที่ 15 (ต่อ)

ปีของการผลิต	ยอดขาย	ค่าใช้จ่ายในการผลิต	รายได้ก่อนหักค่าเสื่อมราคา	รายได้หลังหักค่าเสื่อมราคา	ภาษี	รายได้หลังหักภาษี	กระแสเงินสด
2023	69,343,927.39	41,742,955.01	27,600,972.38	25,468,481.12	5,093,696.22	20,374,784.89	22,507,276.15
2024	70,869,493.79	42,661,300.02	28,208,193.77	26,075,702.51	5,215,140.50	20,860,562.01	22,993,053.27
2025	72,428,622.66	43,599,848.62	28,828,774.03	26,696,282.77	5,339,256.55	21,357,026.22	23,489,517.48
2026	74,022,052.36	44,559,045.29	29,463,007.06	27,330,515.80	5,466,103.16	21,864,412.64	23,996,903.90
2027	75,650,537.51	45,539,344.29	30,111,193.22	27,978,701.96	5,595,740.39	22,382,961.57	24,515,452.83
2028	77,314,849.33	46,541,209.87	30,773,639.47	28,641,148.21	5,728,229.64	22,912,918.57	25,045,409.83
2029	79,015,776.02	47,565,116.48	31,450,659.54	29,318,168.28	5,863,633.66	23,454,534.62	25,587,025.88
2030	80,754,123.09	48,611,549.04	32,142,574.05	30,010,082.79	6,002,016.56	24,008,066.23	26,140,557.49
2031	82,530,713.80	49,681,003.12	32,849,710.68	30,717,219.42	6,143,443.88	24,573,775.53	26,706,266.79
2032	84,346,389.50	50,773,985.19	33,572,404.31	31,439,913.05	6,287,982.61	25,151,930.44	27,284,421.70
2033	86,202,010.07	51,891,012.87	34,310,997.21	32,178,505.95	6,435,701.19	25,742,804.76	27,875,296.02
NPV (TCI เท่ากับ 48,707,999.59 บาท)							66,628,484.26

5.2 การคำนวณกระแสเงินสดใน 1 ปีของโรงงานสกัดน้ำมันสุญุดำขนาด 30,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อ
กิโลกรัม

กำหนดให้

มูลค่าซากโรงงาน 7,000,000 บาท ค่าเสื่อมราคา 3,720,994.33 บาทต่อปี

ตารางผนวกที่ 16 การคำนวณกระแสเงินสดรายปี และมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานสกัดน้ำมันสุญุดำขนาด 30,000 กิโลกรัมต่อวัน

ปีของการ ผลิต	ยอดขาย	ค่าใช้จ่ายในการ ผลิต	รายได้ก่อนหักค่า เสื่อมราคา	รายได้หลังหักค่า เสื่อมราคา	ภาษี	รายได้หลังหัก ภาษี	กระแสเงินสด
2014	171,127,225.44	98,722,930.62	72,404,294.82	68,683,300.49	13,736,660.10	54,946,640.39	58,667,634.73
2015	174,892,024.40	93,567,914.42	81,324,109.98	77,603,115.64	15,520,623.13	62,082,492.52	65,803,486.85
2016	178,739,648.94	95,626,408.54	83,113,240.40	79,392,246.06	15,878,449.21	63,513,796.85	67,234,791.19
2017	182,671,921.22	97,730,189.53	84,941,731.69	81,220,737.35	16,244,147.47	64,976,589.88	68,697,584.22
2018	186,690,703.48	99,880,253.70	86,810,449.78	83,089,455.45	16,617,891.09	66,471,564.36	70,192,558.69
2019	190,797,898.96	102,077,619.28	88,720,279.68	84,999,285.34	16,999,857.07	67,999,428.28	71,720,422.61
2020	194,995,452.74	104,323,326.90	90,672,125.83	86,951,131.50	17,390,226.30	69,560,905.20	73,281,899.53
2021	199,285,352.70	106,618,440.10	92,666,912.60	88,945,918.27	17,789,183.65	71,156,734.61	74,877,728.95

ตารางผนวกที่ จ16 (ต่อ)

ปีของการ ผลิต	ยอดขาย	ค่าใช้จ่ายในการ ผลิต	รายได้ก่อนหักค่า เสื่อมราคา	รายได้หลังหักค่า เสื่อมราคา	ภาษี	รายได้หลังหัก ภาษี	กระแสเงินสด
2022	203,669,630.46	108,964,045.78	94,705,584.68	90,984,590.34	18,196,918.07	72,787,672.27	76,508,666.61
2023	208,150,362.33	111,361,254.79	96,789,107.54	93,068,113.21	18,613,622.64	74,454,490.56	78,175,484.90
2024	212,729,670.30	113,811,202.39	98,918,467.91	95,197,473.57	19,039,494.71	76,157,978.86	79,878,973.19
2025	217,409,723.04	116,315,048.84	101,094,674.20	97,373,679.87	19,474,735.97	77,898,943.89	81,619,938.23
2026	222,192,736.95	118,873,979.92	103,318,757.03	99,597,762.70	19,919,552.54	79,678,210.16	83,399,204.49
2027	227,080,977.16	121,489,207.48	105,591,769.69	101,870,775.35	20,374,155.07	81,496,620.28	85,217,614.62
2028	232,076,758.66	124,161,970.04	107,914,788.62	104,193,794.29	20,838,758.86	83,355,035.43	87,076,029.76
2029	237,182,447.35	126,893,533.38	110,288,913.97	106,567,919.64	21,313,583.93	85,254,335.71	88,975,330.04
2030	242,400,461.19	129,685,191.12	112,715,270.08	108,994,275.74	21,798,855.15	87,195,420.59	90,916,414.93
2031	247,733,271.34	132,538,265.32	115,195,006.02	111,474,011.68	22,294,802.34	89,179,209.35	92,900,203.68
2032	253,183,403.31	135,454,107.16	117,729,296.15	114,008,301.82	22,801,660.36	91,206,641.45	94,927,635.79
2033	258,753,438.18	138,434,097.51	120,319,340.67	116,598,346.33	23,319,669.27	93,278,677.07	96,999,671.40
NPV (TCI เท่ากับ 92,969,798.40บาท)							307,979,124.87

5.3 การคำนวณกระแสเงินสดใน 1 ปีของโรงงานสกัดน้ำมันสบู่น้ำขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวัน ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 27.17 ลิตรต่อ
กิโลกรัม

กำหนดให้

มูลค่าซากโรงงาน 10,000,000 บาท ค่าเสื่อมราคา 4,901,309.49 บาทต่อปี

ตารางผนวกที่ 17 การคำนวณกระแสเงินสดรายปี และมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงงานสกัดน้ำมันสบู่น้ำขนาด 50,000 กิโลกรัมต่อวัน

ปีของการ ผลิต	ยอดขาย	ค่าใช้จ่ายในการ ผลิต	รายได้ก่อนหักค่า เสื่อมราคา	รายได้หลังหักค่า เสื่อมราคา	ภาษี กำไร	รายได้หลังหัก ภาษี	กระแสเงินสด
2014	285,191,813.71	159,032,375.80	126,159,437.91	121,258,128.42	24,251,625.68	97,006,502.74	101,907,812.23
2015	291,466,033.61	150,441,372.85	141,024,660.76	136,123,351.27	27,224,670.25	108,898,681.02	113,799,990.51
2016	297,878,286.35	153,751,083.05	144,127,203.30	139,225,893.81	27,845,178.76	111,380,715.05	116,282,024.54
2017	304,431,608.65	157,133,606.88	147,298,001.77	142,396,692.28	28,479,338.46	113,917,353.83	118,818,663.32
2018	311,129,104.04	160,590,546.23	150,538,557.81	145,637,248.32	29,127,449.66	116,509,798.66	121,411,108.15
2019	317,973,944.33	164,123,538.25	153,850,406.08	148,949,096.59	29,789,819.32	119,159,277.28	124,060,586.77
2020	324,969,371.11	167,734,256.09	157,235,115.02	152,333,805.53	30,466,761.11	121,867,044.42	126,768,353.91
2021	332,118,697.27	171,424,409.72	160,694,287.55	155,792,978.06	31,158,595.61	124,634,382.45	129,535,691.94

ตารางผนวกที่ ๑17 (ต่อ)

ปีของการ ผลิต	ยอดขาย	ค่าใช้จ่ายในการ ผลิต	รายได้ก่อนหักค่า เสื่อมราคา	รายได้หลังหักค่า เสื่อมราคา	ภาษี	รายได้หลังหัก ภาษี	กระแสเงินสด
2022	339,425,308.61	175,195,746.74	164,229,561.87	159,328,252.38	31,865,650.48	127,462,601.91	132,363,911.40
2023	346,892,665.40	179,050,053.16	167,842,612.24	162,941,302.75	32,588,260.55	130,353,042.20	135,254,351.69
2024	354,524,304.04	182,989,154.33	171,535,149.70	166,633,840.21	33,326,768.04	133,307,072.17	138,208,381.66
2025	362,323,838.73	187,014,915.73	175,308,923.00	170,407,613.51	34,081,522.70	136,326,090.81	141,227,400.30
2026	370,294,963.18	191,129,243.87	179,165,719.30	174,264,409.81	34,852,881.96	139,411,527.85	144,312,837.34
2027	378,441,452.37	195,334,087.24	183,107,365.13	178,206,055.64	35,641,211.13	142,564,844.51	147,466,154.00
2028	386,767,164.32	199,631,437.16	187,135,727.16	182,234,417.67	36,446,883.53	145,787,534.14	150,688,843.63
2029	395,276,041.94	204,023,328.78	191,252,713.16	186,351,403.67	37,270,280.73	149,081,122.94	153,982,432.43
2030	403,972,114.86	208,511,842.01	195,460,272.85	190,558,963.36	38,111,792.67	152,447,170.69	157,348,480.18
2031	412,859,501.39	213,099,102.53	199,760,398.85	194,859,089.36	38,971,817.87	155,887,271.49	160,788,580.98
2032	421,942,410.42	217,787,282.79	204,155,127.63	199,253,818.14	39,850,763.63	159,403,054.51	164,304,364.00
2033	431,225,143.45	222,578,603.01	208,646,540.43	203,745,230.94	40,749,046.19	162,996,184.76	167,897,494.25
NPV (TCI เท่ากับ 118,337,852.18 บาท)							575,523,715.90

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	อรรณวดี สู้่น โทย
เกิดวันที่	6 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2533
สถานที่เกิด	เชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการพัฒนาบัณฑิตและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ADB)