



เครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

Palm Fruit Screw Dryer

ชัยวัฒน์ พรหมเพชร

Chaiwat Phrompet

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

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

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ เครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู
ผู้เขียน นายชัยวัฒน์ พรหมเพชร
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ดร.นันทพันธ์ นภัทรานันท์)

(ดร.ฐานันต์ศักดิ์ เทพญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ

(ดร.นันทพันธ์ นภัทรานันท์)

.....

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกูร)

(รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกูร)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(ดร.นันทพันธ์ นภทรานันท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายชัยวัฒน์ พรหมเพชร)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายชัยวัฒน์ พรหมเพชร)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	เครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู
ผู้เขียน	นายชัยวัฒน์ พรหมเพชร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

การอบผลปาล์มเป็นกระบวนการต้นทางที่มีผลต่อคุณภาพน้ำมันปาล์มผลปาล์มที่อบไม่สุก (อุณหภูมิไม่สูงพอ) ทำให้ไม่อาจยับยั้งปฏิกิริยาเอนไซม์ที่จะสร้างกรดไขมันอิสระได้ ซึ่งมีผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ซึ่งสามารถอบผลปาล์มได้อย่างต่อเนื่องทำให้ผลปาล์มที่ได้มีอุณหภูมิผลปาล์มสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการอบ ผลปาล์มนิ่ม (แรงกดที่ผิวต่ำ) และลดการใช้พลังงาน

การศึกษาเบื้องต้นโดยการอบผลปาล์มในตู้อบไฟฟ้าจนผลปาล์มมีอุณหภูมิภายในเป็น 60, 80, 100, 120°C เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) และการลดแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวพบว่า เมื่ออบผลปาล์มให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิผลปาล์ม 100°C โดยลดลงจาก 22 N (ที่อุณหภูมิบรรยากาศ) เหลือ 13 N หรือลดลงเหลือ 60% ของแรงกดเริ่มต้น และแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นต่อไปอีก โดยที่อุณหภูมิในผลปาล์ม 120°C แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวจะเพิ่มขึ้นเป็น 27 N มากกว่าแรงกดเริ่มต้นเนื่องจากผลปาล์มใหม่ เมื่อนำผลปาล์มไปบีบคูปริมาณน้ำมันที่ได้และปริมาณของ FFA พบว่า FFA จะเพิ่มขึ้นเมื่อทิ้งผลปาล์มไว้ในบรรยากาศนานขึ้น โดย FFA เริ่มต้นที่ 28.47 wt.% เพิ่มขึ้นเป็น 29.14 wt.% เมื่อตั้งทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง เมื่ออบผลปาล์มจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น FFA จะลดลง โดยที่อุณหภูมิ 60-120°C (ลงอุณหภูมิไว้ 1-2 ชั่วโมง) น้ำมันที่บีบได้จะมี FFA ร้อยละ 4.13 wt.% หากอบนานกว่านี้ จะทำให้ FFA สูงขึ้นเล็กน้อย

เครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ โครงสร้างของตัวเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ระบบส่งอากาศร้อน และระบบส่งกำลัง โดยภายในห้องอบมีสกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.255 เมตร ยาว 3.10 เมตร เพื่อลำเลียงผลปาล์มร่วงไปพร้อมกับการอบความเร็วรอบของการหมุนของสกรูเป็น 0.5 รอบ/นาทีที่เครื่องอบสามารถอบผลปาล์มได้แบบต่อเนื่อง โบล์เวททำหน้าที่หมุนเวียนลมร้อนในระบบโดยเป่าลมผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าลักษณะการ

ไพลของลมร้อนเป็นแบบสวนทางกับการเคลื่อนที่ของผลปาล์ม มีลมร้อนบางส่วนระบายออกและมีช่องเติมอากาศเข้าเพื่อชดเชยภายในระบบ

การทดลองอบผลปาล์มด้วยเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบด้วยวิธี Response Surface Methodology (RSM) และออกแบบแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) โดยมีตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิลมร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และอัตราระบายอากาศที่ขอบเขตของตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิลมร้อน 90-130°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 20-40 kg/hr และอัตราระบายอากาศที่ 0-20% ที่ส่งผลต่อ Response ทั้ง 4 ตัว คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว (F_{palm}) ปริมาณน้ำมันที่ได้ (Yield) และปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) โดยมีการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายอากาศที่ 10% มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.16 kWh/kg_{ปาล์มสด} หรือ 0.57 MJ/kg_{ปาล์มสด} ผลของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวที่อุณหภูมิลมร้อน 110°C และอัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 12.70 N ผลของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ที่อุณหภูมิลมร้อน 130°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr มีค่าสูงสุดเท่ากับ 218.50 ml หรือ 200.15 g/kg และผลของปริมาณกรดไขมันอิสระ ที่อุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายอากาศที่ 10% มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.94 wt.% ซึ่งยังไม่เกินระดับมาตรฐานกำหนด คือ 5 wt.% ดังนั้นสภาวะเงื่อนไขที่ อุณหภูมิลมร้อน ในช่วง 110-130°C อัตราการป้อนผลปาล์ม ในช่วง 30-40 kg/hr และระบายอากาศที่ ในช่วง 10-20% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

Thesis Title	Palm Fruit Screw Dryer
Author	Mr. Chaiwat Phrompet
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2012

ABSTRACT

Drying of palm fruit is the first process that affects the quality of palm oil. A fruit that is not ripe could not inhibit enzyme reactions which produce free fatty acids and affects the production of biodiesel. This research is the design and construction of palm fruit screw dryer. The machine can be baked palm fruit continuously resulting to uniform temperature fruit, shorten drying time, soften fruit surface, and reduce power consumption.

The preliminary study by drying palm fruit in the oven until fruit is heated within a 60, 80, 100, 120°C inner temperature to study the effect of temperature to the free fatty acid (FFA) reduction and fruit surface softening. It was found that when baking fruit to higher temperatures, the fruit skin continuously softer. The force apply to the fruit skin until it start collapse reduced about 60% from 22 N at ambient temperature to 13 N at 100°C inner fruit temperature. As higher inner fruit temperature, the fruit skin was harder. At 120°C inner fruit temperature, force 27 N need for collapse the skin resulting to the fruit was over dried. For the FFA found that FFA increases when leaving fruit a long time in the ambient. The FFA was increased from 28.47% wt. to 29.14% wt. as 8 hours left in room temperature. The FFA in pressed oil reduced as the inner fruit temperature increase. The oil had FFA about 4.13% wt. at inner fruit temperature at 60-120°C (kept constant temperature for 1-2 hours).

The screw dryer consisted of three main components that are screw dryer and structure, air circulation component and electrical heater, and transmission system and driving motor. The screw has inside diameter of 0.255 meters and length 3.10 meters. The screw transported palm fruit and bake it in the same time. Rotation speed of the screw was 0.5 rpm. The screw dryer could dry the palm fruit continuously. Blower was used to circulate working air pass through electricity heater. The flow of hot air is counter to the movement of palm fruit. A part of the hot air was vented to surrounding and fresh air was taken for makeup air flow.

Drying palm fruit with screw dryer was aim to find the optimal conditions for the machine with Response Surface Methodology (RSM).The experimentation was designed with the Central Composite Design (CCD) method. The independent variable were working air temperature (90-130°C), palm fruit feed rate (20-40 kg/hr) and moist air venting rate (0-20%).There were 4 dependent response surfaces that were specific energy consumption, the skin collapse force, the amount of pressed oil(yield), and free fatty acid. The experimental was done with 18 trials and showed that the minimum specific energy consumption was 0.16 kWh/kg_(FFB) or 0.57 MJ/kg_(FFB) as 110°C working air temperature, 40 kg/hr palm fruit feed rate and 10% venting air. The minimum skin collapse force occurred at 110°C working air temperature, 30 kg/hr palm fruit feed rate. That force was 12.70 N. The maximum yield of pressed oil was 218.50 ml or 200.15 g/kg_(FFB) which occurred at 130°C working air temperature and 30 kg/hr palm fruit feed rate. The level of FFA for all experimental did not exceed the standard limit at 5 wt.%. The lowest FFA was 3.94 wt.% at condition of 110°C working air temperature, 40 kg/hr palm fruit feed rate and 10% venting air. It could be state that working air temperature at 110-130°C, palm fruit feed rate at 30-40 kg/hr and amount of venting air 10-20% were the most optimal conditions for drying palm fruit with this screw dryer.

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับความช่วยเหลือและการสนับสนุนในด้านต่างๆ จากบุคคลหลายท่านด้วยกัน ณ โอกาสนี้จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อท่านทั้งหลาย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.นันทพันธ์ นภทรานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกูร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุลิต กรรมการผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์ กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะ ในการทำวิจัย และการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณนิยม พรหมรัตน์ และครูปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และช่วยเหลือในการจัดทำอุปกรณ์การทดลอง

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย

นอกจากนี้ ผู้เขียนขออุทิศวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้กับ บิดาของผู้เขียน คือ คุณพ่อ ไชยศ พรหมเพชร และมารดาของผู้เขียน คือ คุณแม่ ชูลีพรหมเพชร ผู้เขียนขอขอบคุณ กำลังใจจากครอบครัวและเครือข่ายทุกคนที่ไม่ได้กล่าวถึง และขอขอบคุณกำลังใจจาก พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้

ชัยวัฒน์ พรหมเพชร

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	x
รายการตาราง	xiii
รายการภาพประกอบ	xiv
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	xvii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย	5
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	6
2.1 ปาล์มน้ำมัน	6
2.1.1 ประวัติและความเป็นมา	6
2.1.2 ลักษณะทั่วไปของปาล์มน้ำมัน	8
2.1.3 ผลและเมล็ดปาล์มน้ำมัน	8
2.1.4 ขนาดของทลายและองค์ประกอบทะลายปาล์มสด	10
2.1.5 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม	12
2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	13
2.2.1 การนึ่งปาล์ม	15
2.2.2 การแยกผลปาล์มออกทะลาย	15
2.2.3 การย่อยผลปาล์มดิบ	15
2.2.4 การสกัดน้ำมัน	15
2.2.5 การกรอง	16
2.2.6 การกำจัดน้ำ	16
2.3 สัดส่วนผลผลิตในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	18
2.4 คุณภาพน้ำมันปาล์มดิบและปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม	20
2.5 กระบวนการอบปาล์มและความชื้นที่ส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันปาล์ม	22
2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับสกรูขนถ่ายวัสดุ	23
2.6.1 ประวัติและความเป็นมา	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 หลักการทำงานและการใช้งานของสกรูขนถ่ายวัสดุ	25
2.6.3 ประเภทของใบเกลียวสกรู	26
2.6.4 การขยายตัวของสกรูขนถ่ายในการลำเลียงวัสดุร้อน	30
2.6.5 การหาขนาดสกรูขนถ่ายวัสดุ	30
2.6.6 การคำนวณหาอัตรากรขนถ่ายวัสดุ	33
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
2.7.1 การศึกษาเกี่ยวกับปาล์มน้ำมัน	39
2.7.2 การประยุกต์ใช้งานสกรู	41
2.7.3 แบบเครื่องอบแห้งทั่วไป	42
บทที่ 3 การทดลองอบปาล์มด้วยตู้อบไฟฟ้า	44
3.1 บทนำ	44
3.2 เครื่องมือวัดและวิธีการทดลอง	44
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	44
3.2.2 วิธีการทดลอง	46
3.3 ผลการทดลองและวิจารณ์	49
3.4 สรุปผลการทดลอง	53
บทที่ 4 การออกแบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	54
4.1 แนวคิดและหลักการทำงานเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	54
4.2 ส่วนประกอบของระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	55
4.3 การวางแผนการทดลอง	57
4.4 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์	61
4.5 ขั้นตอนการทดลองและเก็บข้อมูล	62
บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผล	65
5.1 ผลการทดลองอบผลปาล์ม	65
5.1.1 ผลของความชื้นผลปาล์ม	65
5.1.2 ผลของอุณหภูมิภายในผลปาล์ม	66
5.1.3 ผลของอุณหภูมิอากาศร้อน	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลการหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์	68
5.2.1 ผลการหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ ของความถี่เปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ	68
5.2.2 การศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ ของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว	73
5.2.3 การศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ ของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้	76
5.2.4 การศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ ของปริมาณกรดไขมันอิสระ	80
5.3 ผลของการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบ	86
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	88
6.1 บทสรุป	88
6.2 ข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก	95
ก การคำนวณและออกแบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	96
ข แบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	105
ค ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลอง	117
ง ตารางการแจกแจงแบบเอฟ	120
จ ค่าสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์	122
ฉ ข้อมูลจากผลการทดลอง	135
ช กราฟผลอุณหภูมิอากาศร้อน	145
ฌ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์	155
ประวัติผู้เขียน	161

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ระดับคุณภาพของน้ำมันดิบ	20
2-2	เปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระและไตรกลีเซอไรด์ในทะเลาะปาล์มน้ำมันที่สุกพอดี เมื่อได้รับการกระทบกระเทือนระดับต่างๆ	21
2-3	สัญลักษณ์แสดงคุณสมบัติวัสดุ	31
2-4	แฟกเตอร์ระยะพิตช์ใบสกรู	37
4-1	เงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรอิสระ	57
4-2	ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ	59
4-3	แผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ	59
4-4	ช่องทางเปิดระบายอากาศออกตามอัตราการบินผลปาล์ม	60
5-1	ข้อมูลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ	69
5-2	ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.2	70
5-3	ข้อมูลของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ	74
5-4	ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.4	75
5-5	ข้อมูลของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ	78
5-6	ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.6	79
5-7	ข้อมูลของปริมาณกรดไขมันอิสระตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ	82
5-8	ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.8	83
5.9	การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบ	87

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1-1	ปริมาณการใช้ ดีเซลหมุนเร็ว บี 5 กับดีเซลหมุนเร็ว	2
1-2	รูปแบบการย่างผลปาล์มในโรงงานแบบหีบรวม	4
2-1	ลักษณะของต้นปาล์มน้ำมัน	8
2-2	ส่วนต่างๆ ของผลปาล์ม	9
2-3	ทะลายปาล์มน้ำมัน	10
2-4	สัดส่วนโดยประมาณของทะลายปาล์มสด	11
2-5	ทะลายปาล์มน้ำมันที่ยังไม่สุก และทะลายปาล์มน้ำมันที่สุกพอดี	11
2-6	แบบจำลอง โครงสร้างการจับตัวกันระหว่างกลีเซอไรด์กับกรดไขมันภายในโมเลกุลของน้ำมันพืช	12
2-7	สูตร โครงสร้าง Triglyceride	12
2-8	ตัวอย่างแสดงโมเลกุลของกรดไขมันอิ่มตัว และไม่อิ่มตัว	13
2-9	แผนภูมิแสดงกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบรวมเมล็ดใน	14
2-10	กระบวนการหีบน้ำมันปาล์มดิบด้วยกระบวนการหีบน้ำมันแบบมาตรฐาน	17
2-11	สัดส่วนผลผลิตในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	19
2-12	สกรูแบบระหัดเกลียวสำหรับขนถ่ายของเหลวและปฏิกูล	24
2-13	ส่วนประกอบของสกรูขนถ่ายวัสดุ	24
2-14	ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุบนใบเกลียว	25
2-15	ลักษณะใบเกลียวซ้ายและขวา	26
2-16	ลักษณะต่างๆ ของใบสกรู	28
2-17	ใบสกรูแบบมีระยะพิตช์และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดร่วมกัน	29
2-18	ลักษณะหน้าตัดของสกรูขนถ่ายวัสดุ	32
2-19	ขนาดก้นวัสดุใหญ่ที่สุดและขนาดของสกรูที่เหมาะสม	33
2-20	หน้าตัดของรางสกรูสำหรับการขนถ่ายวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อน	33
2-21	หลักการคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุ	35
2-22	แฟกเตอร์ความเต็มราง (k)	35
2-23	ความเร็วรอบสูงสุดของสกรูขนถ่ายวัสดุ	36

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2-24	แฟกเตอร์ชนิดของใบสกรู	37
2-25	แฟกเตอร์จำนวนใบพัด	37
3-1	ตู้ือบไฟฟ้า	44
3-2	เครื่องชั่งคิจิตอล	45
3-3	เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบคิจิตอล	45
3-4	เครื่องวัดแรงดึงและแรงกด	46
3-5	ชุดบีบน้ำมันด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกส์	46
3-6	ตัวอย่างผลปาล์มร่วงจากหลายเดียวกัน	47
3-7	การชั่งน้ำหนักตัวอย่างผลปาล์มก่อนเข้าสู่ตู้ือบไฟฟ้า	47
3-8	การวัดอุณหภูมิและแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว	47
3-9	การวัดอุณหภูมิและชั่งน้ำหนักของผลปาล์ม	48
3-10	ขั้นตอนการบีบน้ำมัน	48
3-11	การอุ่นและชั่งน้ำหนักวัดปริมาณน้ำมันปาล์ม	49
3-12	ปริมาณน้ำมันจากการบีบที่ได้	50
3-13	สีของน้ำมันที่บีบได้	50
3-14	ความชื้นของผลปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ	51
3-15	แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว	51
3-16	ร้อยละของ FFA น้ำมันที่บีบได้	52
4-1	โครงสร้างการทำงานของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	55
4-2	ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	56
4-3	ตำแหน่งวาล์วและมูมเปิด-ปิดของเครื่องระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	60
4-4	ขั้นตอนการทดลอง	63
4-5	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง	64

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5-1	ผลของความชื้นผลปาล์ม	66
5-2	ผลของอุณหภูมิภายในผลปาล์ม	67
5-3	พื้นผิวตอบสนองของความชื้นเปลือกพลังงานจำเพาะที่ค่าของอุณหภูมิลมร้อน กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน	71
5-4	พื้นผิวตอบสนองของความชื้นเปลือกพลังงานจำเพาะที่ค่าของอุณหภูมิลมร้อน และเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศที่ต่างๆ กัน	72
5-5	พื้นผิวตอบสนองของความชื้นเปลือกพลังงานจำเพาะที่ค่าของเปอร์เซ็นต์ ระบายอากาศที่กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน	72
5-6	พื้นผิวตอบสนองของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวที่ค่าของอุณหภูมิลมร้อน กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน	76
5-7	พื้นผิวตอบสนองของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ที่ค่าของอุณหภูมิลมร้อน กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน	80
5-8	พื้นผิวตอบสนองของปริมาณกรดไขมันอิสระที่ค่าของอุณหภูมิลมร้อนกับ อัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน	84
5-9	พื้นผิวตอบสนองของปริมาณกรดไขมันอิสระที่ค่าของอุณหภูมิลมร้อนและ เปอร์เซ็นต์ระบายอากาศที่ต่างๆ กัน	85
5-10	พื้นผิวตอบสนองของปริมาณกรดไขมันอิสระที่ค่าของเปอร์เซ็นต์ ระบายอากาศที่กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน	85

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

M_d (%)	คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง
M_w (%)	คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก
w (kg)	คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุขึ้น
d (kg)	คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง
v (m/s)	คือ ความเร็วเฉลี่ยในการขนถ่ายวัสดุ
P (m)	คือ ระยะพิทช์สกรู
N (รอบ/นาที)	คือ ความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายวัสดุ
V (m ³ /s)	คือ อัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงปริมาตร
m_s (kg/นาที)	คือ อัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวล
A (m ²)	คือ พื้นที่หน้าตัดของใบสกรูขนถ่ายวัสดุ
ρ_b (kg/m ³)	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ
D (m)	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู
d (m)	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาสกรู
ρ_p (kg/m ³)	คือ ผลปาล์มมีความหนาแน่น
mc_i (%)	คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลปาล์ม
mc_f (%)	คือ ความชื้นสุดท้ายของผลปาล์ม
T_o (°C)	คือ อุณหภูมิสุดท้ายของผลปาล์ม
T_i (°C)	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลปาล์ม
Q_{evap}	คือ ความร้อนในการระเหยน้ำ
Q_{palm}	คือ ความร้อนสะสมในผลปาล์ม
Q_{air}	คือ ความร้อนที่เพิ่มให้แก่วัสดุ
m_p (kg/hr)	คือ อัตราการอบผลปาล์ม
M_i (%)	คือ น้ำหนักผลปาล์มก่อนอบ
M_f (%)	คือ น้ำหนักผลปาล์มหลังอบ
h_{fg} (kJ/kg°C)	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ
$C_{p(palm)}$ (kJ/kg°C)	คือ ความร้อนจำเพาะของปาล์ม
$C_{p(air)}$ (kJ/kg°C)	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

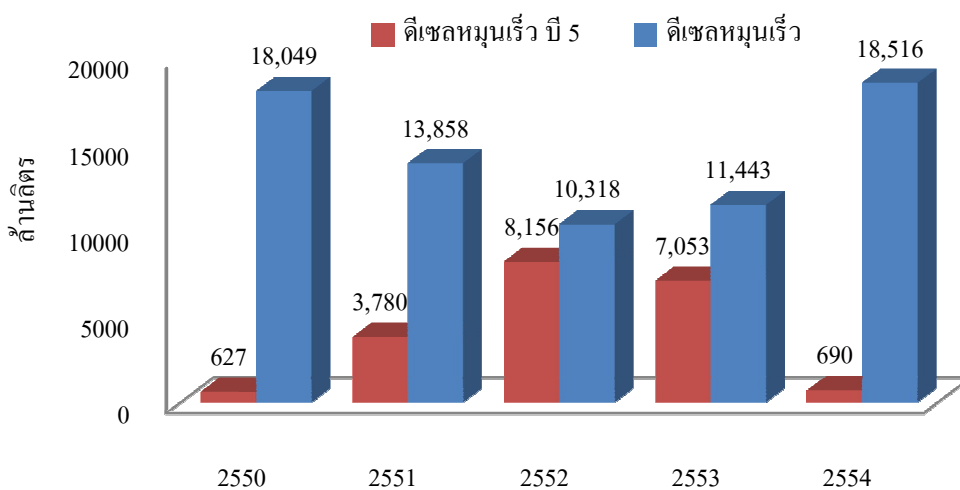
T_f (°C)	คือ อุณหภูมิอากาศหลังอบที่
L (m)	คือ ความยาวสกรูขนถ่ายวัสดุ
N (Hz)	คือ ความเร็วรอบของเพลาสกรู
D (m)	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู
H (m)	คือ ระยะทางตามแนวตั้ง
P_m (w)	คือ กำลังขับที่ใช้ขนถ่ายสกรู
P_f (w)	คือ กำลังสำหรับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
F_f	คือ เฟกเตอร์ใบสกรู
F_p	คือ เฟกเตอร์ใบพัด
F_m	คือ เฟกเตอร์วัสดุ
F_0	คือ เฟกเตอร์กำลังขับ
η	คือ ประสิทธิภาพการส่งกำลังขับ
kg/hr	คือ กิโลกรัมต่อชั่วโมง
Yield (ml)	คือ ปริมาณน้ำมันที่ได้
SEC (kWh/kg _{ปาล์มสด})	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ
FFA (wt.%)	คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระ
F_{palm} (N)	คือ แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว
T (°C)	คือ อุณหภูมิลมร้อน
m (kg/hr)	คือ อัตราการป้อนผลปาล์ม
v (%)	คือ ระบายอากาศทิ้ง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

สถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทย ในปี 2554 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์รวมทั้งสิ้น 1,856 พันบาร์เรลเทียบเท่าน้ำมันดิบ มีมูลค่ารวม 1,914,199 ล้านบาท โดยมูลค่าการใช้พลังงานทุกชนิดเพิ่มขึ้น การนำเข้าพลังงานมีมูลค่ารวม 1,247,217 ล้านบาท โดยนำเข้าในรูปของน้ำมันดิบมีสัดส่วนมูลค่าสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 79 และน้ำมันสำเร็จรูปคิดเป็นร้อยละ 8 ของข้อมูลนำเข้าทั้งหมด (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) จากตัวเลขดังกล่าวนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้พลังงานที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศช่วยลดมูลค่าการนำเข้าพลังงานลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่ใช้ในการขนส่ง ซึ่งสามารถทดแทนได้ด้วยการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สำคัญอีกประเภทหนึ่ง ที่รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมอย่างจริงจัง เพื่อทดแทนการนำเข้า โดยได้กำหนดให้ใช้ผสมในน้ำมันดีเซลจำนวน 2% ตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2551 เป็นต้นไป จากรายงานน้ำมันเชื้อเพลิงในปี 2554 มีการใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (รวมน้ำมันปาล์มดีเซลและน้ำมันดีเซลหมุนเร็วปี 2 ปี 3 และปี 5) รวมทั้งสิ้น 19,206 ล้านลิตรหรือเฉลี่ย 330,959 บาร์เรลต่อวัน เพิ่มขึ้นจากปีก่อนอัตราร้อยละ 3.8 สำหรับสัดส่วนการใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (รวมน้ำมันปาล์มดีเซลและน้ำมันดีเซลหมุนเร็วปี 2 และปี 5) มีดังนี้คือ เป็นการใช้ในสาขาการขนส่งมากที่สุดคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 71.1 รองลงมาใช้ในสาขาการเกษตร สาขาอุตสาหกรรม การผลิต และสาขาอื่น ๆ เป็นสัดส่วนร้อยละ 21.8 6.2 และ 0.9 ตามลำดับ เป็นการใช้ในเขตกรุงเทพมหานครสัดส่วนร้อยละ 30.2 และส่วนภูมิภาคสัดส่วนร้อยละ 69.8 ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554)



รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้ ดีเซลหมุนเร็ว ปี 5 กับดีเซลหมุนเร็ว

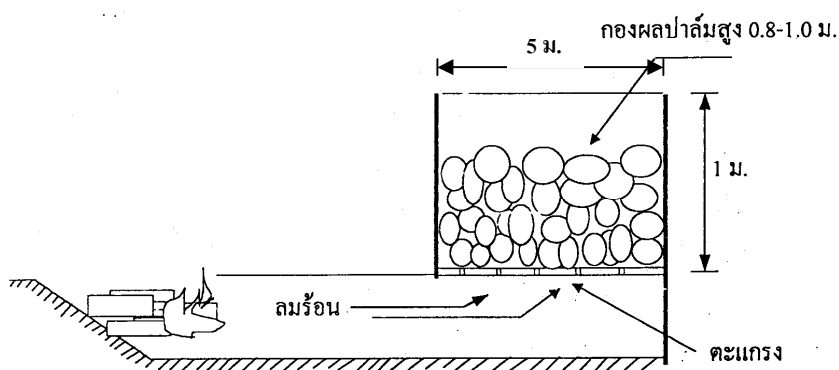
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2554)

ปัญหาน้ำมันปิโตรเลียมที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและภาวะราคาน้ำมันสูงขึ้น ทำให้ประชาชนมีภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน โดยเฉพาะค่าน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นทุกปี รัฐบาลจึงหาทางออกโดยการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนเช่น น้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นน้ำมันจากพืชที่รัฐบาลได้กำหนดยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนเป็นวาระแห่งชาติ โดยกระทรวงพลังงานมีเป้าหมายให้ใช้ไบโอดีเซล 3% ของการใช้น้ำมันดีเซลทั้งหมดในปี 2554 หรือการใช้วันละ 2.4 ล้านลิตร นอกจากนี้ กระทรวงพลังงานโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้ดำเนินโครงการส่งเสริมการผลิตการใช้ไบโอดีเซลในระดับชุมชน เพื่อให้ชุมชนสามารถผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบในท้องถิ่นได้แก่ น้ำมันพืชใช้แล้ว พืชน้ำมันเช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันถั่วเหลือง และอื่นๆ ที่มีอยู่ในชุมชน เพื่อนำมาใช้สำหรับกิจการภายในชุมชนเอง หรือหากมีเหลือสามารถขายเพื่อนำรายได้เข้าสู่ชุมชนต่อไป ตั้งแต่ต้นปี 2554 ได้มีการปรับสัดส่วนไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซลหมุนเร็วหลายครั้ง โดยในช่วงต้นปี เกิดปัญหาน้ำมันปาล์มดิบขาดแคลน ส่งผลให้ตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2554 มีการปรับลดสัดส่วนไบโอดีเซล บี 100 ในน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว จากเดิมที่มีการผสมร้อยละ 3 และร้อยละ 5 ให้เหลือเพียงร้อยละ 2 หลังจากปัญหาเริ่มคลี่คลายเนื่องจากมีผลผลิตปาล์มน้ำมันออกสู่ตลาดมากขึ้น ทำให้ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2554 กำหนดให้ผู้ผลิตสามารถปรับสัดส่วนไบโอดีเซลได้ตั้งแต้อ้อยละ 3-5 และหลังจากนั้นปริมาณผลผลิตปาล์มน้ำมันได้ออกสู่ตลาดมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2554 มีการปรับเพิ่มสัดส่วนไบโอดีเซลตั้งแต้อ้อยละ 4-5 จนถึงสิ้นเดือนตุลาคม 2554 ทั้งนี้ รัฐบาลได้มีนโยบายกำหนดมาตรฐาน

คุณภาพน้ำมันดีเซลหมุนเร็วในระยะต่อไปตามช่วงฤดูกาล โดยกำหนดให้สัดส่วนไบโอดีเซล ในช่วงเดือนมีนาคม - ตุลาคม ซึ่งมีผลผลิตปาล์มน้ำมันมากให้มีสัดส่วนไบโอดีเซลร้อยละ 4-5 และ ในช่วงเดือนพฤศจิกายน - กุมภาพันธ์ซึ่งมีผลผลิตปาล์มน้ำมันน้อยให้มีสัดส่วนไบโอดีเซลร้อยละ 3-5 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556)

อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มในประเทศไทย สามารถแบ่งตามกระบวนการผลิตออก ได้เป็น 2 ประเภท คือ หีบแบบแยกเมล็ดในปาล์ม หรือการหีบแบบเปียก และ หีบแบบรวมเมล็ดในปาล์มหรือการหีบแบบแห้ง โดยการหีบแบบแยกเมล็ดในปาล์มนั้นส่วนใหญ่จะเป็นโรงงานขนาดใหญ่มีกำลังการผลิตสูง และจะใช้ผลปาล์มทั้งทะลายในการผลิตน้ำมันปาล์ม ได้ผลผลิตเป็นน้ำมันจากเปลือกและน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม การหีบแบบรวมเมล็ดในปาล์มนั้นจะใช้กับผลปาล์มร่วงหรือผลปาล์มสับ เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาไลโปไลซิสและไล่น้ำออกจากผลปาล์ม ก่อนที่นำผลปาล์มที่ได้ไปหีบในขั้นตอนต่อไป ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์มดิบ การให้ความร้อนกับผลปาล์ม แบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ ย่างหรือทอด การสกัดแบบนี้เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้น้ำ ไม่เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิต อาจเรียกว่า การสกัดแบบแห้ง (พูนสุข และ สุชีระ, 2537) การอบผลปาล์มเป็นกระบวนการต้นทางที่ควบคุมคุณภาพน้ำมันปาล์ม และเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่จะสร้างกรดไขมันอิสระ การอบแห้งในปัจจุบันจะอบโดยบรรจุผลปาล์มในกระเบาะซีเมนต์ที่ปูพื้นด้วยตะแกรงเหล็ก ด้านล่างมีช่องให้ลมร้อนไหลขึ้นผ่านตะแกรงเหล็กได้ ลมร้อนที่ไ้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ไม้ยางพารา หรือน้ำมันเตา (รูปที่ 1.2) ซึ่งการอบเช่นนี้ทำให้ช่วงแรกของการอบไอน้ำจะกลั่นตัวที่ชั้นบนของกองผลปาล์มซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้ไม่อาจยับยั้งปฏิกิริยาเอนไซม์ได้นอกจากนั้นยังพบว่าผลปาล์มทั้งกองมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ โดยผลปาล์มชั้นล่างอาจจะไหม้เกินไป ผลปาล์มที่ไหม้จะแข็งและทำให้สกรูหีบสีกหรือได้ง่าย ผลปาล์มชั้นบนที่สุกไม่สนิท จะมีน้ำปน ทำให้ได้น้ำมันปาล์มด้อยคุณภาพ กรรมวิธีการแบบนี้ ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก อีกทั้งแรงต้านทานของกองปาล์มทำให้ต้องใช้ พัดลมเป่าอัดลมร้อนเข้าได้กระเบาะอบ ทำให้อากาศร้อนมีโอกาสรั่วไหลออกจากระบบได้ง่าย ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานและเพิ่มต้นทุน นอกจากนี้ การอบชั้นหนาเกินไปทำให้ผลปาล์มสุกไม่สม่ำเสมอและมีผลต่อคุณภาพดังกล่าวข้างต้น ในช่วงท้ายของการอบ เมื่อผลปาล์มใกล้แห้งจะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนออกไปมากโดยลมที่ปล่อยทิ้งจากระบบอาจมีอุณหภูมิถึง 70°C ระบบแบบนี้มีเตาเผาเชื้อเพลิงซึ่งมักจะอยู่ระดับใต้พื้นทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เพราะจำกัดอากาศเข้าสันดาป ส่งผลให้เกิดเขม่ามากซึ่งจะเกาะกับผลปาล์มชั้นล่าง (บัญญัติ, 2544)

การอบผลปาล์มไม่สุกทำให้ไม่อาจยับยั้งปฏิกิริยาเอนไซม์ที่จะสร้างกรดไขมันอิสระซึ่งมีผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และการใช้พลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาออกแบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ซึ่งสามารถอบผลปาล์มต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิผลปาล์มสม่ำเสมอและช่วยลดระยะเวลาในการอบ เพื่อช่วยลดปัญหาการอบผลปาล์มดังกล่าวข้างต้น และพัฒนาระบบการอบผลปาล์มที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นกระบวนการต้นทางที่ควบคุมคุณภาพน้ำมันปาล์ม



รูปที่ 1.2 รูปแบบการย่างผลปาล์มในโรงงานแบบหีบรวม (บัญญัติ, 2544)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบผลปาล์ม ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน อัตราการป้อนผลปาล์มและอัตราการระบายอากาศทิ้ง

1.2.2 ศึกษาและพัฒนาเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูขนาดเล็กเพื่อใช้ในชุมชน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของผลปาล์มในเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

1.3.2 สามารถสร้างและพัฒนาเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู เพื่อใช้ร่วมกับระบบผลิตไบโอดีเซลชุมชน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอบผลปาล์ม และสามารถสร้างพัฒนาเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ขนาด 20 kg/hr โดยมีขอบเขตของการวิจัยคือ

1.4.1 ศึกษาอุณหภูมิลมร้อน อัตราการระบายอากาศทิ้งและอัตราการอบผลปาล์ม โดยเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

1.4.2 ศึกษาการสิ้นเปลืองการใช้พลังงาน แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ปริมาณน้ำมันที่บีบได้ ปริมาณกรดไขมันอิสระและต้นทุนการอบผลปาล์ม

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

เนื้อหาของบทนี้ถูกแบ่งเป็นส่วนสำคัญหลายส่วน ส่วนที่หนึ่งจะกล่าวถึง ปาล์ม น้ำมัน ส่วนที่สองกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ส่วนที่สามสัดส่วนผลผลิตในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ส่วนที่สี่คุณภาพน้ำมันปาล์มดิบและปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างกรดไขมันอิสระในผลปาล์มน้ำมัน ส่วนที่ห้ากระบวนการอบผลปาล์มและความชื้นที่ส่งผลต่อการศึกษาคุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบ ส่วนที่หกทฤษฎีเกี่ยวกับสกรูขนถ่ายวัสดุและส่วนที่เจ็ดงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งการตรวจเอกสารทั้งหมดในบทนี้ จะทำให้ทราบความรู้ที่มีอยู่ในปัจจุบัน และช่องว่างความรู้ที่ยังไม่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอบปาล์มน้ำมัน โดยช่องว่างความรู้ที่ยังไม่ได้ศึกษาจะถูกทดสอบและพัฒนาต่อในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

2.1 ปาล์มน้ำมัน

2.1.1 ประวัติและความเป็นมา

นับเป็นเวลาเกือบ 40 ปีมาแล้วที่คนไทยได้ทำความรู้จักปาล์มน้ำมัน โดยครั้งแรกที่นำมาปลูกเป็นการค้าในเชิงธุรกิจอย่างจริงจังที่จังหวัดกระบี่ ในปี พ.ศ. 2511 การปลูกครั้งในนั้นมี การลงทุนสร้างโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วย ปัจจุบันปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ได้รับความนิยมมากขึ้นหลายเท่าตัว ด้วยสาเหตุที่ว่าผลปาล์มมีราคาสูงและน้ำมันปาล์มสามารถนำไปทำน้ำมันชีวภาพที่ เรียกว่า “ไบโอดีเซล” จากปัญหาน้ำมันปิโตรเลียมที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาสูงขึ้น ปาล์มน้ำมันจึงเป็นพืชที่มีศักยภาพมากที่สุดของประเทศไทย (ชนินทร์, 2550) การกำหนด ยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนเป็นวาระแห่งชาติ ซึ่งรัฐบาลโดยกระทรวงพลังงานมีเป้าหมายส่งเสริม การใช้ไบโอดีเซล 3% ของการใช้น้ำมันดีเซล ในปี พ.ศ. 2544 โดยกลุ่มเป้าหมายแรกคือกลุ่ม รถบรรทุก โดยกำหนดให้ผสมไบโอดีเซล 2% ในน้ำมันดีเซล ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้ำมันปาล์ม ประมาณวันละ 1.6 ล้านลิตร โดยจะบังคับใช้ในพื้นที่เฉพาะปี พ.ศ. 2549 - 2553 จากนั้นในปี พ.ศ. 2554 เป็นต้นไป จะบังคับใช้ทั่วประเทศ (พรชัย, 2549) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการ หนึ่งในการผลิตไบโอดีเซลคือต้องใช้พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันถึง 7 ล้านไร่ ดังนั้นกลยุทธ์ในการขยาย พื้นที่ปลูกน้ำมันปาล์ม นับว่าเป็นปัจจัยสำคัญอย่างมากในการผลักดันโครงการไบโอดีเซลจากปาล์ม

น้ำมัน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 รัฐบาลส่งเสริมให้ขยายพื้นที่ปลูกและสนับสนุนให้ปลูกปาล์มน้ำมันพันธุ์ดี เพื่อทดแทนปาล์มน้ำมันที่ไม่ดีที่มีอายุมากกว่า 20 ปี ประกอบกับราคาผลปาล์มน้ำมันอยู่ในเกณฑ์สูง จึงใจให้เกษตรกรดูแลรักษา ส่งผลให้ภาพรวมผลผลิตปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันรัฐบาลมียุทธศาสตร์อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันปี พ.ศ. 2547 - 2572 เพื่อมุ่งสู่การเป็นผู้ผลิตและส่งออกน้ำมันปาล์มเคียงคู่ผู้นำในระดับโลกอย่างประเทศมาเลเซียและอินโดนีเซีย รวมทั้งนโยบายกำหนดให้ปาล์มน้ำมันเป็นแหล่งพลังงานทดแทนของประเทศ (พรชัย, 2549)

สถานการณ์ปาล์มน้ำมัน ปี 2554 ผลผลิตน้ำมันปาล์มของโลกเพิ่มขึ้น 6.29% ต่อปี โดยปี 2553/54 ผลิตน้ำมันปาล์มได้ 47.93 ล้านตัน โดยอินโดนีเซียเป็นผู้นำในการผลิต 23.60 ล้านตัน รองลงมาคือมาเลเซีย 18.22 ล้านตัน ทั้ง 2 ประเทศมีส่วนการผลิตได้ร้อยละ 87.25 ของผลผลิตน้ำมันปาล์มโลก สำหรับไทยผลิตได้ 1.29 ล้านตัน คิดเป็น 2.69% ของผลผลิตน้ำมันปาล์มโลก ส่วนประเทศไทยมีเนื้อที่ให้ผลและผลผลิต 9.37% และ 7.80% ต่อปี ตามลำดับ โดยปี 2554 เนื้อที่ให้ผล 3.75 ล้านไร่ ผลผลิต 9.88 ล้านตัน เทียบกับปี 2553 เนื้อที่ให้ผลผลิตและผลผลิตเพิ่มขึ้น 5.63% และ 20.19% ตามลำดับ สำหรับผลผลิตต่อไร่ ปี 2550 - 2554 ลดลง 1.43% ต่อปี เนื่องจากความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะภาวะฝนทิ้งช่วงปลายปี 2552 ต่อเนื่องถึงเดือนพฤษภาคม 2553 และภาวะน้ำท่วมช่วงปลายปี 2553 และ 2554 การใช้น้ำมันปาล์มในประเทศเพิ่มขึ้นทั้งเพื่อการบริโภคและผลิตไบโอดีเซล 0.49% และ 48.26% ต่อปี ตามลำดับ โดยปี 2554 ใช้น้ำมันปาล์มเพื่อการบริโภค 901,847 ตัน ลดลงจาก 911,339 ตัน ในปี 2553 ร้อยละ 1.04 และผลิตไบโอดีเซล 379,657 ตัน ลดลงจาก 380,000 ตัน ในปี 2553 ร้อยละ 0.09 เนื่องจากกระทรวงพลังงาน มีนโยบายกำหนดอัตราผสมน้ำมันไบโอดีเซลเชิงยึดหยุ่น ส่งผลให้ในปี 2554 การใช้น้ำมันปาล์มรวมทั้งหมด 1,281,504 ตัน ลดลงจาก 1,291,339 ตัน ในปี 2553 คิดเป็นร้อยละ 0.76 การส่งออกน้ำมันปาล์มดิบลดลงร้อยละ 3.96 ต่อปี โดยปี 2554 ส่งออกน้ำมันปาล์ม 375,232 ตัน เทียบกับ 65,942 ตัน ในปี 2553 เพิ่มขึ้นเกือบ 6 เท่า เนื่องจากราคาส่งออกสูงกว่าราคาในประเทศ ประกอบกับสต็อกน้ำมันปาล์มคงเหลืออยู่ในเกณฑ์สูงเป็นสาเหตุจูงใจให้โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มส่งออกเพิ่มขึ้น การนำเข้าไทยสามารถผลิตน้ำมันปาล์มได้เพียงพอกับการต้องการใช้ ยกเว้นในปีที่ภูมิอากาศแปรปรวนและผลผลิตขาดแคลน โดยปี 2551 มีการนำเข้า 28,385 ตัน และในปี 2554 นำเข้าในช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคม ปริมาณ 59,668 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555)

2.1.2 ลักษณะทั่วไปของปาล์มน้ำมัน

ลักษณะทั่วไปของปาล์มน้ำมันมีชื่อสามัญเรียกว่า ปาล์มน้ำมันและชื่อทางพฤกษศาสตร์เรียกว่า อีเลอิตส กินีนิซีต (Elaeis guineensis) โดยมีถิ่นกำเนิดที่แอฟริกา สายพันธุ์ปลูกเป็นการค้าคือลูกผสมเทเนอรา (คูรา x ฟิสิเฟอรา) มีความสูง ของต้น 15-18 เมตร ขนาดลำต้น 45-60 เซนติเมตร สีผลสุกจะมีสีแดงอมม่วง-ส้ม ช่วงเวลาการเก็บ 7-10 วัน น้ำหนักทะลาย 10-30 กิโลกรัม จำนวนผล/ทะลาย 1,000-3,000 ผล รูปร่างของผลกลม-รูปไข่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผล 2-5 เซนติเมตร น้ำหนักผล 3-8% เนื้อปาล์มชั้นนอก 60-96% น้ำมัน/เนื้อชั้นนอก 20-50% น้ำมัน/ทะลาย 22-24% ผลผลิตน้ำมัน 640-800 กิโลกรัม/ไร่ ความหนาแน่นของประชากร 22-45 ต้น/ไร่ อายุการเก็บเกี่ยวตลอดการปลูก 20-30 ปี ดังรูปที่ 2.1 (ชนินทร์, 2550)

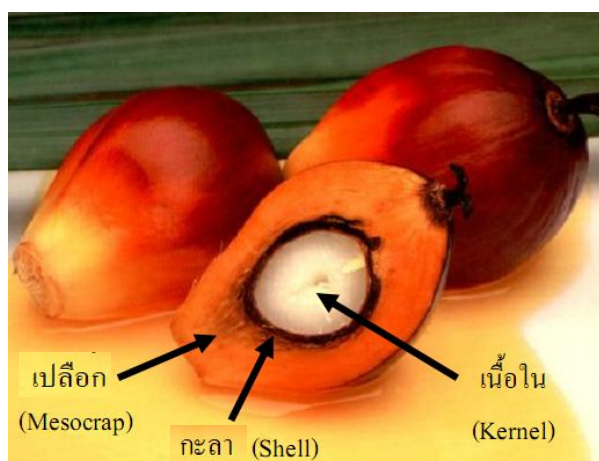


รูปที่ 2.1 ลักษณะของต้นปาล์มน้ำมัน

2.1.3 ผลและเมล็ดปาล์มน้ำมัน

ผลปาล์มน้ำมันก็คือดอกตัวเมียที่ได้รับการผสมพันธุ์จากเกสรตัวผู้โดยจะเริ่มมีการเจริญเติบโตโดยใช้เวลาจนถึงวันเก็บเกี่ยวเมื่อผลสุกอย่างน้อย 5-6 เดือน หลังการผสมเกสร ผลปาล์มน้ำมันเป็นแบบ sessile drupe อยู่รวมกันโดยมีแกนก้านผล (peduncle) เมล็ดแข็ง ทะลายปาล์ม น้ำมัน 1 ทะลาย จะมีขนาดประมาณ 35x45 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับอายุและสายพันธุ์รวมทั้งความสมบูรณ์ของต้น แต่ละทะลายจะมีผลปาล์มน้ำมันหลายพันผล ในสวนปาล์มทั่วไปพบว่า 1 ทะลาย จะมีขนาดผลปาล์มน้ำมันประมาณ 500-4,000 ผล จะมีน้ำหนักประมาณ 10-30 กิโลกรัม ผลปาล์ม น้ำมัน รูปร่างคล้ายไข่ โดยปกติมีขนาดประมาณ 2-5 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 30 กรัม/ผล ซึ่งผลปาล์มน้ำมันที่อยู่ข้างในจะมีขนาดเล็กกว่าพวกที่อยู่รอบนอก

ส่วนประกอบของผลปาล์มน้ำมัน แสดงในรูปที่ 2.2 มีชั้นนอกสุดที่เป็นผิวเปลือก (exocarp) มีสีแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธุ์ แต่พันธุ์ที่ใช้ปลูกในประเทศไทยมีชั้นของผิวนอกเป็นสีแดง ซึ่งเป็นการพัฒนาจากสีดำเรื่อยมา ชั้นถัดไปเป็นชั้นที่เรียกว่าชั้น mesocarp เป็นชั้นที่มีน้ำมันและไฟเบอร์เป็นองค์ประกอบ ถัดเข้าไปเป็นชั้นของเมล็ดที่เรียกว่า seed โดยเป็นของกะลา (shell) และชั้นในสุดเป็นเนื้อปาล์มน้ำมันที่เป็น endosperm ของเมล็ดปาล์มที่เรียกว่า kernel ชั้นในสุดที่เป็น kernel นี้มีน้ำมันอยู่มากเช่นกัน ในชั้นของ mesocarp ยังมีลักษณะอีกอย่างก็คือ ส่วนที่เรียกว่าวงเส้นใย (fiber ring) ซึ่งพบในปาล์มน้ำมันพันธุ์เทนอรา ที่ปลูกเป็นการค้าในแถบประเทศไทยและมาเลเซีย น้ำมันในส่วนของชั้น mesocarp เรียก palm oil จัดเป็นน้ำมันคุณภาพสูง ปริมาณของน้ำมันในชั้นนี้จะประมาณ 45-55% เมื่อคืดต่อน้ำหนักผลทั้งลูก มีสีเหลือง จนถึงสีส้มแดง จุดหลอมตัว 25-50°C น้ำมันในชั้นนี้เป็นน้ำมันที่เป็นพวกไม่อิ่มตัวมาก เมล็ดปาล์มน้ำมันเป็นส่วนที่อยู่ในผล เมล็ดปาล์มน้ำมันจัดเป็นพวกเมล็ดแข็งชั้นนอกสุดของกะลาเรียกว่า shell ถัดไปเป็นชั้นของเนื้อมีสีขาว ชั้นเนื้อในของเมล็ดปาล์มมีส่วนประกอบของน้ำมันอยู่จำนวนมาก โดยที่จะมีคุณสมบัติแตกต่างจากน้ำมันในส่วน of mesocarp น้ำมันในส่วนเนื้อในปาล์มน้ำมันเรียกว่า palm kernel oil น้ำมันในชั้น kernel ของปาล์มน้ำมัน มีลักษณะคล้ายกับน้ำมันมะพร้าว ไม่มีสีหรือมีสีขาวอมเหลือง จัดเป็นน้ำมันมีพวกอิ่มตัว saturated โดยปกติน้ำมันที่สกัดได้จากส่วนของเนื้อในจะแข็งตัวง่าย ๆ ที่อยู่ในอุณหภูมิปกติ (ชรินทร์, 2550)



รูปที่ 2.2 ส่วนต่างๆ ของผลปาล์ม
ที่มา: ชรินทร์ (2550)

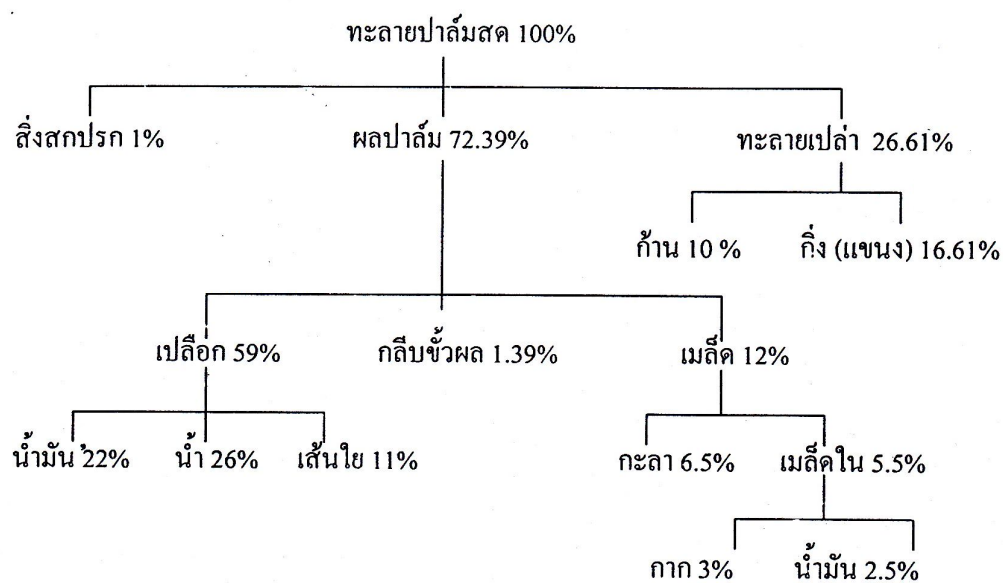
2.1.4 ขนาดของทะลายและองค์ประกอบทะลายปาล์มสด

ในขณะที่ปาล์มน้ำมันมีการเจริญเติบโตที่ช่อดอกนั้น ถ้าหากสมบูรณ์ ก็สามารถทำให้ทะลายปาล์มนั้นมีน้ำหนักสูง น้ำหนักของทะลายปาล์มน้ำมันเรียกว่าทะลายสดปาล์มน้ำมัน (FFB: fresh fruit bunch) นั้นจะมีขนาดตั้งแต่ไม่กี่กิโลกรัม/ทะลาย จนถึง 30 กิโลกรัม/ ซึ่งลักษณะทะลายทะลายสดปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ชนินทร, 2550)



รูปที่ 2.3 ทะลายปาล์มน้ำมัน
ที่มา: ชนินทร (2550)

องค์ประกอบของทะลายปาล์มสดแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่า มีส่วนที่เป็นวัสดุเหลือใช้คือ ทะลายเปล่า 26.61% โดยแบ่งเป็นก้าน 10% และกิ่ง (แขนง) 16.61% ส่วนผลปาล์มมี 72.39% โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ กลีบข้าวผล 1.39% (ปกติแล้วกลีบข้าวผลจะถูกแยกออกจากภายหลังอบแห้งแล้ว) เหลือผลปาล์ม 71% เป็นเปลือก 59% ประกอบด้วย น้ำมัน 22% น้ำ 26% และเส้นใย 11% และส่วนเมล็ด 12% ประกอบด้วย กะลา 6.5% เมล็ดใน 5.5% (แบ่งเป็น กาก 3% และน้ำมัน 2.5%) (ผาสุก กุลละวณิช และคณะ, 2531)



รูปที่ 2.4 สัดส่วนโดยประมาณของทะลายปาล์มสด

ที่มา: ผาสุก กุลละวณิช และคณะ (2531)

กระบวนการสุกของปาล์มน้ำมันในทะลายจะสุกจากปลายของทะลายไปข้างล่าง เมื่อผลปาล์มน้ำมันสุกจะเปลี่ยนสีเปลือกจากสีดำ หรือสีม่วงดำเป็นสีแดงหรือสีส้มแดงเกือบทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ชนินทร์, 2550)

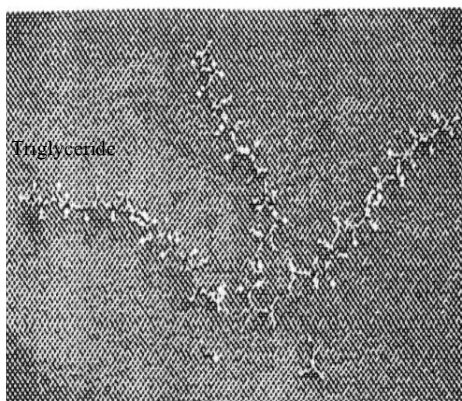


รูปที่ 2.5 ทะลายปาล์มน้ำมันที่ยังไม่สุก และทะลายปาล์มน้ำมันที่สุกพอดี

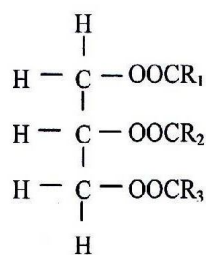
ที่มา: ชนินทร์ (2550)

2.1.5 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มมีลักษณะของโมเลกุลเหมือนกับน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง ไขมันหมู เป็นต้น สิ่งเหล่านี้เป็นสารอินทรีย์จำพวกหนึ่ง ประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล (Glycerol) หรือ กลีเซอริน (Glycerin) กับกรดอินทรีย์ หรือกรดไขมัน (Fatty acid) เชื่อมต่อเข้าด้วยกันหรือที่เรียกว่าไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ดังรูปที่ 2.6 และมีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างการจับตัวกันระหว่างกลีเซอไรด์กับกรดไขมันภายในโมเลกุลของน้ำมันพืช (Connemann and Fischer, 1998)

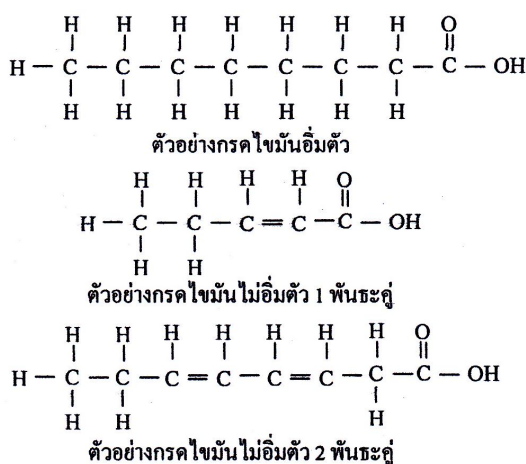


Triglyceride

รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้าง Triglyceride

จากรูป 2.7 อักษร R หรือหมู่ R ในสูตรของโมเลกุลน้ำมันแทนไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาว หมายความว่าโมเลกุลของ R ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) ซึ่งอะตอมต่อกันเป็นแถวโซ่ แต่ละโซ่มีจำนวน C มีอะตอมเป็นเลขคี่เสมอ ทั่วไปมีจำนวนคาร์บอน 11-19 ตัว นอกจากนี้โซ่คาร์บอนอาจเรียกว่ากรดไขมันอิ่มตัวหรือกรดไขมันไม่อิ่มตัวก็ได้ โซ่คาร์บอนอิ่มตัว

ประกอบด้วยพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนเป็นพันธะเดี่ยวหมด ส่วนโซ่คาร์บอนไม่อิ่มตัวจะประกอบด้วยพันธะเดี่ยวและมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน อยู่ 1 พันธะ หรือ 2 พันธะ หรือ 3 พันธะ ดังรูปที่ 2.8 กรดไขมันทั้งชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่ม ของกรดอินทรีย์ในโมเลกุลน้ำมันมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมัน น้ำมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากจะมีจุดหลอมเหลวต่ำส่วนน้ำมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวมากจะมีจุดหลอมเหลวสูง (กิตติศักดิ์, 2549)

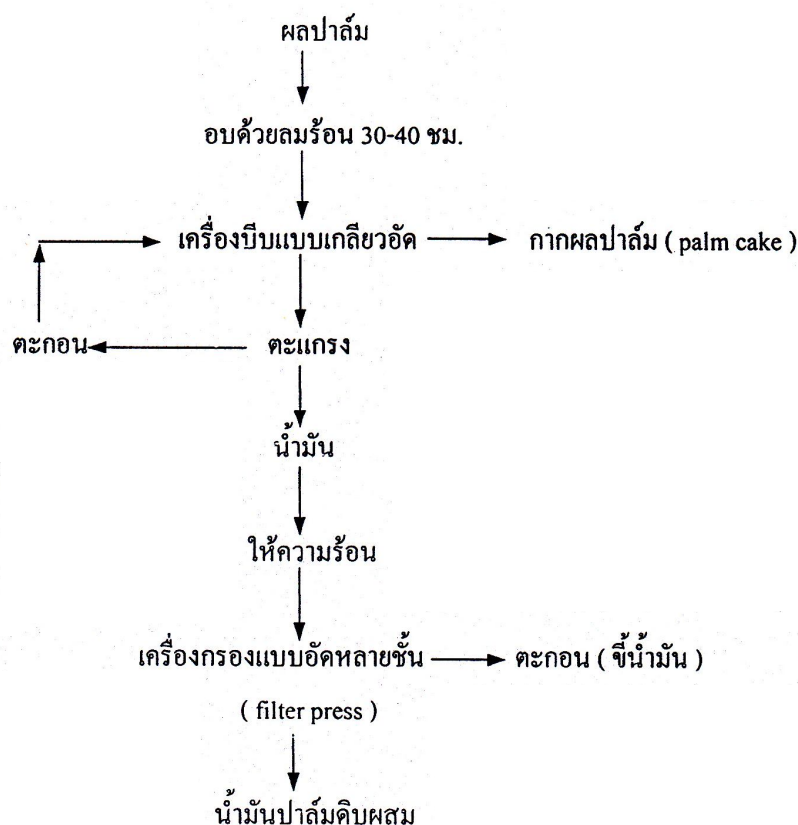


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างแสดงโมเลกุลของกรดไขมันอิ่มตัว และไม่อิ่มตัว (สัทย์ชัย, 2529)

2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ทะลายปาล์มน้ำมันจะประกอบด้วยผลปาล์มน้ำมันจำนวนมากติดอยู่กับก้านทะลาย ผลปาล์มน้ำมันประกอบด้วยน้ำมัน 2 ชนิด คือ น้ำมันที่สกัดได้จากเปลือกนอกของผลปาล์มที่เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil, CPO) และน้ำมันที่สกัดได้จากเนื้อของเมล็ดในปาล์ม ที่เรียกว่า น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (crude palm kernel oil, CPKO) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีราคาซื้อขายสูงกว่าน้ำมันปาล์มดิบจากเปลือก เนื่องจากน้ำมันมีความสะอาดกว่าและลดขั้นตอนในการทำให้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โรงงานที่ผลิตน้ำมันปาล์มในประเทศ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ โรงงานขนาดเล็ก ทำการผลิตโดยสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องสกัดแบบเกลียวอัด จะได้น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์มปนกัน เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม (mixed crude palm oil, MCPO) ซึ่งเป็นประเภทเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัย โดยกระบวนการหีบน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นการทำงานผลปาล์มที่ใช้ลมร้อนจากเตาฟืนในการอบผลปาล์มในกะบะ ใช้อุณหภูมิประมาณ 120-180

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-40 ชั่วโมง ผลปาล์มอบจะถูกส่งไปยังเครื่องอัดแบบเกลียวที่ใช้ความดันสูง น้ำมันที่ได้เป็นน้ำมันผสมของน้ำมันจากส่วนเปลือกและจากเมล็ดใน น้ำมันจะผ่านการกรองด้วยตะแกรง และเครื่องกรองแบบอัดหลายชั้น (filter press) ตามลำดับ เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่หลงเหลืออยู่ ผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมันจะได้กากปาล์ม ซึ่งเป็นส่วนผสมของเส้นใย กะลาและเมล็ดใน (พูนสุข, 2537) ซึ่งการบวนการนี้มีข้อเสียหลายประการคือ น้ำมันปาล์มดิบที่รวบรวมเมื่อนำมากลั่นบริสุทธิ์จะพบปัญหาเรื่อง การฟอกสียากเนื่องจากผลปาล์มถูกย่างด้วยความร้อนสูง น้ำมันจะสกปรกเนื่องจากมีเขม่าควันมาจากการย่างผลปาล์ม และมีกรดไขมันอิสระสูงกว่าปกติ (ผาสุก, 1985) แต่ในกรณีที่นำน้ำมันปาล์มชนิดนี้มาผลิตเป็นไบโอดีเซลจะช่วยลดต้นทุนของวัตถุดิบ เนื่องจากไม่ต้องผ่านขั้นตอนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์และยังเป็นทางเลือกหนึ่งให้กับผู้ผลิตในการจำหน่ายให้แก่ โรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มให้บริสุทธิ์ และ โรงงานผลิตอาหารสัตว์ ที่จะรับซื้อในราคาต่ำกว่าโรงงานแบบหีบแยก (กฤษ, 2551)



รูปที่ 2.9 แผนภูมิแสดงกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบรวมเมล็ดใน (พูนสุข และคณะ, 2537)

ส่วนโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยกระบวนการหีบน้ำมันแบบมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทำการผลิตโดยการสกัดน้ำมันจากผลปาล์มด้วยเครื่องสกัดแบบเกลียวอัดชนิดเกลียวคู่ ทำให้สามารถแยกน้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในออกจากกันได้ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มประเภทนี้ มีการบวนการผลิตดังนี้

2.2.1 การนึ่งปาล์ม (sterilization)

หลังการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มสดจำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการผลิตภายใน 72 ชั่วโมง มิฉะนั้นปริมาณกรดไขมันอิสระจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำมันที่สกัดได้มีคุณภาพและปริมาณต่ำลงเมื่อส่งเข้าโรงงานจะทำการนึ่งทะลายปาล์มสด เพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์ที่เร่งการเกิดกรดไขมันอิสระ นอกจากนั้นแล้ว การนึ่งผลปาล์มจะช่วยให้ผลปาล์มหลุดออกจากก้านทะลายปาล์มได้ง่ายขึ้น และเนื้อปาล์มนุ่ม ง่ายต่อการบีบน้ำมันออกด้วย (วิชัย, 2003)

2.2.2 การแยกผลปาล์มออกทะลาย (bunch stripping)

ทะลายปาล์มที่นึ่งแล้วจะถูกส่งมาเข้าเครื่องเหวี่ยงแยก เพื่อให้ผลปาล์มแยกออกจากทะลายเปล่า ทะลายเปล่าที่ถูกแยกออกจะถูกส่งไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนผลปาล์มที่แยกออกจากทะลายแล้วจะถูกส่งมาตีย่อยให้นุ่ม เพื่อให้ผลปาล์มพร้อมต่อการสกัดน้ำมัน

2.2.3 การย่อยผลปาล์มดิบ (digestion)

ผลปาล์มจะถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม ซึ่งมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกข้างในมีใบกวนผลปาล์มเพื่อให้เส้นใยลึกละเอียดออกจากเมล็ด ซึ่งการย่อยผลปาล์มจะช่วยให้เซลล์น้ำมันแตกตัวออกมาเพื่อง่ายต่อการหีบน้ำมัน การย่อยผลปาล์มใช้เวลาประมาณ 15 ถึง 20 นาที (ผาสุข, 1985)

2.2.4 การสกัดน้ำมัน (pressing)

ผลปาล์มที่ถูกย่อยแล้ว จะถูกส่งเข้าไปในเครื่องสกัดเกลียวอัดชนิดเกลียวคู่ เพื่อสกัดน้ำมันออกจากเปลือกนอกของผลปาล์ม ในการสกัดเครื่องสกัดเกลียวอัดจะถูกปรับระยะห่างของเกลียวให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถสกัดน้ำมันออกมาให้ได้มากที่สุด โดยให้กะลาของเมล็ดในปาล์มแตกน้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มที่มีคุณภาพมาตรฐาน หลังจากนั้นผลปาล์มที่ถูกหีบน้ำมันจากเส้นใย จะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการแยกเส้นใย เพื่อแยกเส้นใยมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วน

เมล็ดในปาล์มจะถูกอบให้แห้ง แล้วถูกส่งเข้าสู่กระบวนการอบกะเทาะและแยกเนื้อเมล็ดในปาล์ม เพื่อสกัดน้ำมันเมล็ดในด้วยเครื่องสกัดเกลียวอัด (ผาสุข, 1985; วิชัย, 2003)

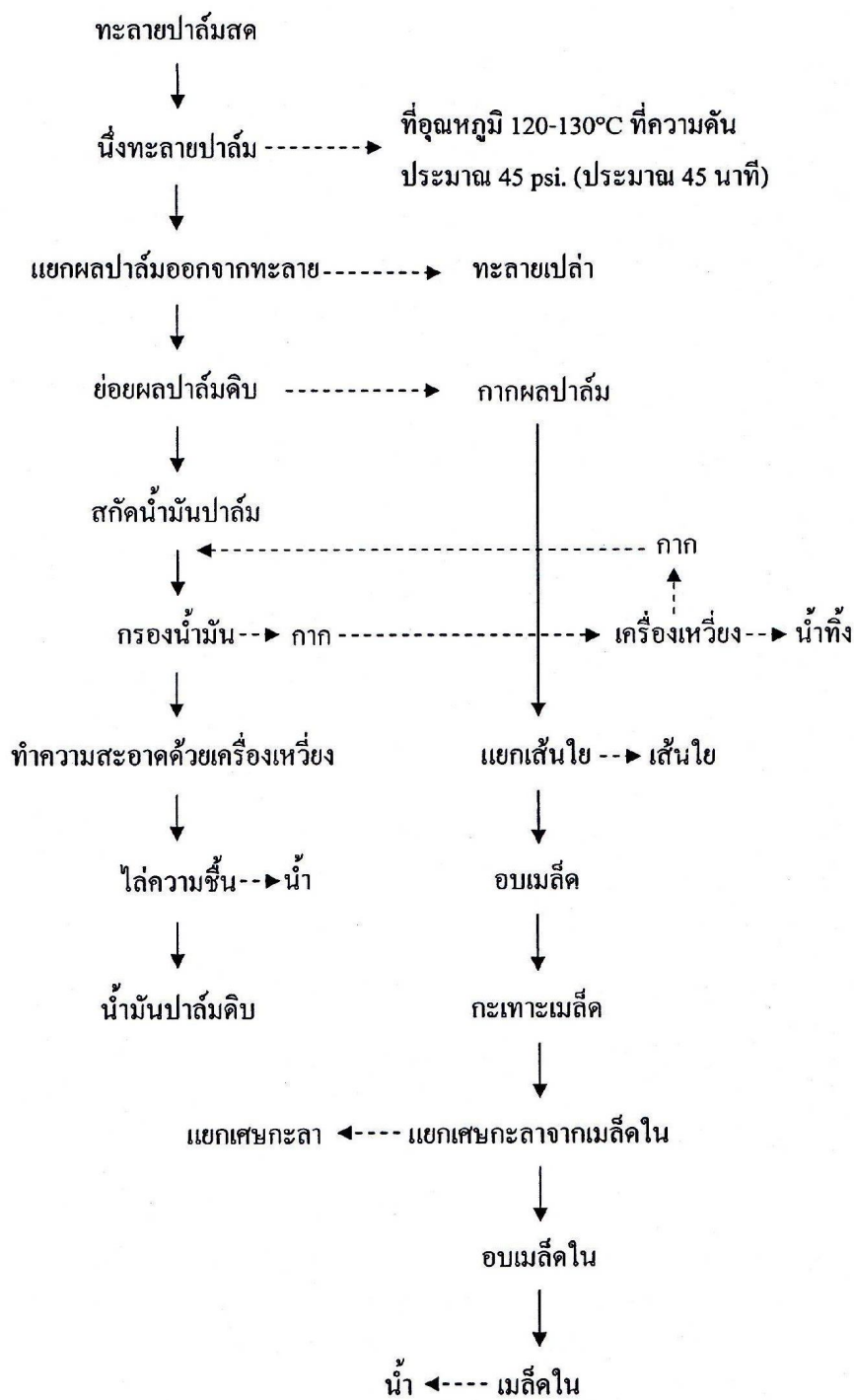
2.2.5 การกรอง (filtration)

น้ำมันปาล์มที่สกัดได้จะมีเศษเส้นใยปาล์มปะปนมาด้วย โดยน้ำมันปาล์มจะถูกส่งเข้าสู่ตะแกรงสั่นเพื่อแยกเศษของแข็งออกจากน้ำมัน แล้วจึงนำไปเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำมันให้สะอาดขึ้น (วิชัย, 2003)

2.2.6 การกำจัดน้ำ (drying)

น้ำมันที่ผ่านการกรองจะถูกส่งผ่านเข้าเครื่องระเหยภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศเพื่อกำจัดความชื้นในน้ำมัน เพื่อให้มีอายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น (ผาสุข, 1985; วิชัย, 2003)

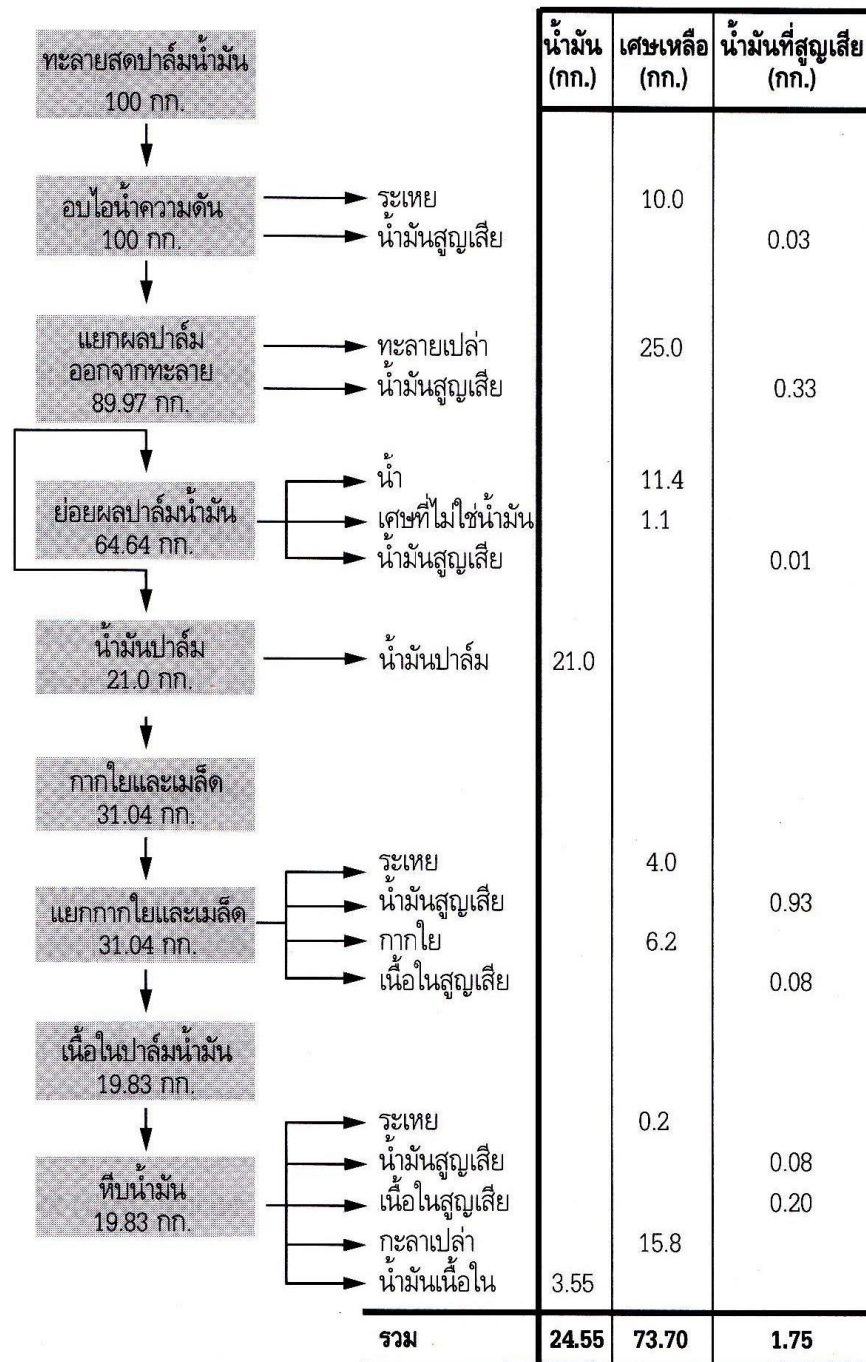
ส่วนกากผลปาล์มจะถูกนำมาแยกเอาเส้นใยออกจากเมล็ดด้วยเครื่องแยกเส้นใย ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้แรงลมเป่าให้เส้นใยลอยไปตามท่อเข้าสู่ตาของหม้อกำเนิดไอน้ำ เมล็ดที่แยกเส้นใยแล้วจะถูกนำมาอบให้แห้งและจัดให้สะอาดแล้วจึงนำเข้าเครื่องกะเทาะเมล็ด เพื่อเอากะลาออกจากเมล็ดใน กะลาที่บดเมล็ดในจะถูกแยกด้วยไฮโดรไซโคลอน จากนั้นจะนำมาอบเพื่อไล่ความชื้นไม่เกิน 7% ต่อจากนั้นจึงนำเมล็ดในมาหีบ จะได้น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (ผาสุข, 1985)



รูปที่ 2.10 กระบวนการหีบน้ำมันปาล์มดิบด้วยกระบวนการหีบน้ำมันแบบมาตรฐาน (ผาสุข, 1985)

2.3 สัดส่วนผลผลิตในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันจะให้ผลผลิตหลักก็คือน้ำมันปาล์ม (palm oil) และน้ำมันเนื้อใน (palm kernel oil) และการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมันออกจากต้นที่เรียกว่าทะลายสดปาล์มน้ำมัน (FFB: fresh fruit bunch) จะมีสิ่งอื่นๆ ที่ไม่ใช่ไขมันปนอยู่ไม่ว่าจะเป็นทะลายเปล่า กากใย กะลาเปล่า หรือสิ่งเจือปนรวมทั้งน้ำในส่วนต่างๆ ด้วย สัดส่วนของไขมันและส่วนอื่นๆ นี้ในความเป็นจริงก็อาจเป็นค่าๆ หนึ่ง แต่เมื่อเข้ากระบวนการสกัดในโรงงานก็อาจไม่ได้ตามนั้น จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของโรงงาน สัดส่วนของไขมัน และส่วนต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในทะลายสดปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 มีดังนี้ กำหนดให้ทะลายปาล์มสดน้ำมันมาเข้าโรงงาน 100 กิโลกรัม (100%) เมื่อผ่านกระบวนการอบไอน้ำความดันจะปลดปล่อยน้ำออกไป 10 กิโลกรัม (10%) ในขั้นตอนนี้น้ำมันจากปาล์มน้ำมันจะสูญเสียไปประมาณ 0.03 กิโลกรัม (0.03%) เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะเหลือน้ำหนักรวม 89.97 กิโลกรัม หรือหายไป 10.03 กิโลกรัม (10.03%) ขั้นตอนการแยกผลปาล์มน้ำมัน จะแยกทะลายเปล่าออกไป คิดเป็นน้ำหนัก 25 กิโลกรัม (25%) ในขั้นตอนนี้มี การสูญเสียไขมันจากผลปาล์มน้ำมันไปอีก 0.33 กิโลกรัม (0.33%) ขั้นตอนนี้จะได้สัดส่วนผลปาล์มน้ำมัน 64.64 กิโลกรัม ขั้นตอนต่อไปการย่อยผลปาล์มน้ำมัน ในขั้นตอนนี้จะแยกน้ำออกไปอีก 11.4 กิโลกรัม (11.4%) เศษต่างๆ ที่ไม่ใช่ไขมัน 1.1 กิโลกรัม (1.1%) น้ำมันสูญเสียไปอีก 0.01 กิโลกรัม (0.01%) ซึ่งจะเหลือน้ำมันเพียง 21 กิโลกรัม (21%) กระบวนการกะเทาะและแยกส่วนระหว่างกะลากับเนื้อในนั้น จะเริ่มจากการที่มีส่วนของกากใยและเมล็ด 31.04 กิโลกรัม ในส่วนต่างๆ นี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการการแยกกากใยและเมล็ด ซึ่งจะระเหยน้ำออกไปอีก 4 กิโลกรัม (4%) น้ำมันสูญเสียอีก 0.93 กิโลกรัม (0.93%) กากใย 6.2 กิโลกรัม (6.2%) และเนื้อในสูญเสียอีก 0.08 กิโลกรัม (0.08%) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนี้จะเหลือเมล็ดปาล์มน้ำมันเพียง 19.83 กิโลกรัม (19.83%) ต่อจากนั้นก็จะเป็นกระบวนการหีบน้ำมันจากเนื้อในเพื่อให้ได้น้ำมันเนื้อในการหีบน้ำมัน จะระเหยน้ำออกไปอีก 0.2 กิโลกรัม (0.2%) น้ำมันในชั้นเนื้อจะสูญเสียไปอีก 0.08 กิโลกรัม (0.08%) ส่วนของเนื้อในสูญเสียไป 0.2 กิโลกรัม (0.2%) กะลาเปล่า 15.8 กิโลกรัม (15.8%) เสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะได้น้ำมันเนื้อใน 3.55 กิโลกรัม (3.55%) จากกระบวนการทั้งการสกัดน้ำมันจากส่วนของเปลือกและการสกัดน้ำมันจากส่วนของเนื้อใน จะได้น้ำมันที่เป็นน้ำมันปาล์มประมาณ 21% ของน้ำหนักทะลายสดปาล์มน้ำมัน และน้ำมันเนื้อใน 3.55% ซึ่งรวมแล้วก็เท่ากับว่าทะลายสดปาล์มน้ำมัน 100 กิโลกรัม จะได้น้ำหนักรวม 24.55% (พรชัย, 2549)



รูปที่ 2.11 สัดส่วนผลผลิตในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (พรชัย, 2549)

2.4 คุณภาพน้ำมันปาล์มดิบและปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างกรดไขมันอิสระในผลปาล์มน้ำมัน

คุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil) ที่สกัดได้จากทะลายปาล์มสด ขึ้นอยู่กับกรดไขมันอิสระ (FFA) ความชื้นและสิ่งเจือปน จำแนกได้ดังตารางที่ 2.1 กรดไขมันอิสระที่เกินมาตรฐานจะทำให้คุณภาพของน้ำมันต่ำลง ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมัน เช่น จุดหลอมเหลว จุดตกผลึก และจำเป็นจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมันในขั้นตอนของการกลั่นใส ทำให้ปริมาณของน้ำมันกลั่นใสลดลงมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น (สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2540; บัญญัติ, 2544)

ตารางที่ 2.1 ระดับคุณภาพของน้ำมันดิบ (Amott, 1963)

รายการ	ระดับคุณภาพ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	พอใช้	เลว
กรดไขมันอิสระ	น้อยกว่า 2.0	2.0-2.7	2.8-3.7	3.5-5.0	เกิน 5.0
ความชื้น	น้อยกว่า 0.1	0.1-0.19	0.2-0.39	0.4-0.6	เกิน 0.6
สิ่งเจือปน	น้อยกว่า 0.005	0.001-0.005	0.001-0.025	0.025-0.05	เกิน 0.05

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสร้างกรดไขมันอิสระในผลปาล์มน้ำมันมีดังนี้คือ (สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2540; บัญญัติ, 2544)

- 1) การได้รับการกระทบกระเทือนทางกายภาพในขณะที่เก็บเกี่ยวและขนส่ง ผลปาล์มที่ได้รับแรงกระทบจะทำให้เซลล์ในชั้นของเปลือกช้ำและถูกทำลาย มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (hydrolysis) ของน้ำมันและสร้างกรดไขมันอิสระขึ้น (ตารางที่ 4.2) และโดยปกติกรดไขมันอิสระนี้จะถูกสร้างขึ้นจากทะลายที่สุกมากเกินไประยะแล้ว ดังนั้นหลังเก็บเกี่ยวแล้วควรรีบส่งเข้าโรงงานสกัดน้ำมัน
- 2) การเก็บเกี่ยวทะลายที่สุกเกินไป ผนังเซลล์ของถุงน้ำมันของทะลายปาล์มที่สุกเกินไปจะเปราะและแตกง่ายเมื่อเก็บเกี่ยวและได้รับแรงกระทบกระเทือนทำให้เซลล์ถูกทำลายได้ง่ายกว่าผลที่สุกพอดี ทำให้สร้างกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น
- 3) การเนาของผล ผลปาล์มที่รับการกระทบกระเทือนจนบอบช้ำจะมีแผล และจะมีเชื้อจุลินทรีย์เข้าทำลายทำให้เกิดการเน่าของผลปาล์ม และกรดไขมันอิสระจะถูกสร้างจากกระบวนการนี้

4) ระยะเวลาจากการเก็บเกี่ยวจนถึงโรงงานสกัด หลังจากการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมันจะบอบช้ำ ทำให้มีการสร้างกรดไขมันอิสระ การสร้างจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงส่งเข้าโรงงาน

มาตรการการลดการสร้างกรดไขมันอิสระของทะลายปาล์มสด เพื่อที่จะลดการสร้างกรดไขมันอิสระจากปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสร้างกรดไขมันอิสระดังกล่าวแล้ว ควรดำเนินการดังนี้ (สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2540; บุญญิติ, 2544)

- 1) การเก็บเกี่ยวต้องระมัดระวังการกระทบกระแทกทะลายปาล์มน้ำมัน ไม่ให้เกิดการบอบช้ำหรือถ้าหลีกเลี่ยงไม่ได้ต้องกระทำอย่างระมัดระวังให้มีการบอบช้ำของทะลายน้อยที่สุด
- 2) มีมาตรฐานและดัชนีการเก็บเกี่ยวที่ถูกต้อง คือ ต้องเก็บทะลายปาล์มที่สุกพอดีมีผลร่วงที่พื้นดิน 10 ผล และสีของเปลือกมีสีส้มสด เมื่อเก็บเกี่ยวในฤดูร้อน ส่วนเก็บเกี่ยวในฤดูฝนผลร่วงอาจมากกว่า 10 ผล และเปลือกของผลจะมีสีส้มแต่สีเข้มมากกว่าฤดูร้อน
- 3) การขนส่ง หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วควรรีบขนส่งเข้าโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มทันทีหรืออย่างน้อยภายใน 24 ชั่วโมง

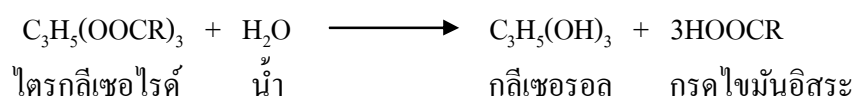
ตารางที่ 2.2 เปอร์เซนต์กรดไขมันอิสระและไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) ในทะลายปาล์มน้ำมันที่สุกพอดี เมื่อได้รับการกระทบกระเทือนระดับต่างๆ (Azis Ariffin and Tan, 1989)

ระดับความเสียหาย	กรดไขมันอิสระ (%)	ไตรกลีเซอไรด์ (%)
ปกติ	0.025	99.8
บอบช้ำปานกลาง	4.7	91.4
บอบช้ำมาก	15.2	84.7
มาตรฐานน้ำมันปาล์มดิบ	3-5	93-97

2.5 กระบวนการอบผลปาล์มและความชื้นที่ส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบ

กระบวนการอบผลปาล์ม ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิในการอบให้ไม่ต่ำกว่า 60°C เพื่อไล่ความชื้นและเป็นการทำลายเอนไซม์ไลเปสในผลปาล์ม ต้องมีการควบคุมปริมาณผลปาล์มที่นำเข้าอบในแต่ละครั้ง เพื่อให้อัตราการอบต่อเวลาคู่ต่อการทำการอบในแต่ละครั้ง และผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการอบมีคุณภาพน้ำมันที่ดี (ไกรวุฒิ, 2534)

ความชื้นที่ส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบ ความชื้นเป็นต้นเหตุทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมัน ก่อให้เกิดกรดไขมันอิสระขึ้นดังปฏิกิริยา



ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้เกิดสารที่มีกลีเซอไรด์บางส่วน (Partial glycerides) ซึ่งจะมีผลต่อการตกผลึกและความคงตัวในเนื้อเดียวกันของน้ำมันด้วย แต่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจเกิดสมดุลได้ถ้าหากว่าไม่มีน้ำมากเกินไปหรือไม่ถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอกอื่นๆ เช่น อุณหภูมิหรือสิ่งเร้าอื่นๆ กรดไขมันที่มีน้ำหนักต่ำๆ จะมีความไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่ายกว่ากรดไขมันโมเลกุลใหญ่ (ไกรวุฒิ, 2534) นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความชื้นสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเป็นตัวลดความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ พบว่าความชื้นที่มากกว่า 0.15% ที่ 40°C สามารถลดปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่มีผลน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 50°C เพราะว่าอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การแตกตัวของอากาศลงไปสู่น้ำมันมีมากขึ้นแต่ถ้าความชื้นมากกว่า 0.35% จะไม่มีความสามารถในการป้องกันการออกซิเดชันจากออกซิเจนได้ทั้งที่สองอุณหภูมิ พบว่าความชื้น 0.15-0.25% เป็นปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Chong and Gapor, 1983)

ความชื้นของวัสดุเป็นตัวบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือวัสดุแห้ง การบอกค่าความชื้นโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ (ธีระยุทธ, 2543)

1) ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุขึ้น ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนี้

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (2.1)$$

2) ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง อาจหาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนี้

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ M_d คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)

M_w คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)

w คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุขึ้น (kg)

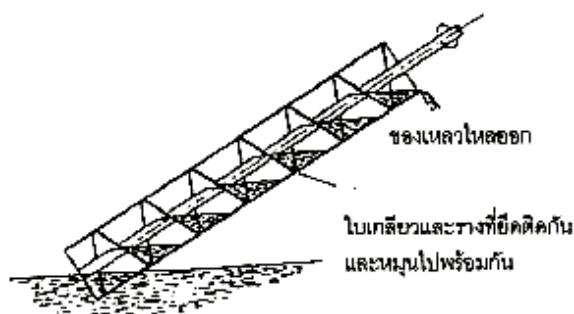
d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (kg)

2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับสกรูขนถ่ายวัสดุ

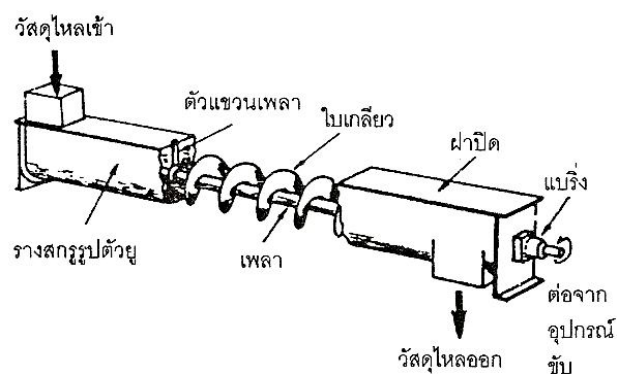
2.6.1 ประวัติและความเป็นมา

สกรูขนถ่ายวัสดุ (screw conveyors) เป็นอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่มีการใช้งานมานานกว่า 2000 ปีแล้ว โดยมีชื่อเรียกทั่วไปว่า ระหัดเกลียว (Archimedean screws) ใช้สำหรับขนถ่ายของเหลวและสิ่งปฏิกูล ประกอบด้วย รวงสกรู และใบเกลียวก้นหอยที่ยึดติดกัน และหมุนไปพร้อมๆ กัน ปลายด้านล่างจะจุ่มอยู่ในน้ำ การหมุนจะทำให้น้ำซึ่งอยู่ระหว่างช่องว่างของเกลียวเคลื่อนตัวขึ้น และเลื่อนไหลไปบนใบเกลียวดังแสดงในรูปที่ 2.12 ถึงแม้ว่าสกรูขนถ่ายวัสดุจะมีประสิทธิภาพทางกลสูง แต่จะมีขีดจำกัดในเรื่องของมุมเอียงที่ใช้ในการขนถ่ายวัสดุ ซึ่งถ้ามุมเอียงใน

การขนถ่ายวัสดุมากเกินไปจะทำให้วัสดุไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตามใบเกลียวของสกรูได้ ดังนั้นขนาดของใบเกลียว ระยะพิตช์ และมุมเอียงในการขนถ่ายวัสดุจะเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการขนถ่ายวัสดุ ปัจจุบันจะนิยมทำให้ใบเกลียวของสกรูขนถ่ายวัสดุหมุนอยู่ภายในรางที่อยู่กับที่ และจะนิยมใช้กับการขนถ่ายวัสดุปริมาณมวล สำหรับการใช้งานของสกรูขนถ่ายในอุตสาหกรรม เริ่มแรกมีการใช้ใบพัดไม้ขีดเข้ากับเพลากลวง โดยใบพัดยึดต่อเรียงกันเป็นลักษณะคล้ายใบเกลียว เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ขนถ่ายในแนวระดับสำหรับการขนถ่ายข้าวโพดและแป้ง ต่อมาได้มีการสร้างใบเกลียวแบบต่อเนื่องด้วยเหล็ก ซึ่งมีความแข็งแรงมากขึ้นแต่ยังคงใช้หลักการเทคนิคการขนถ่ายวัสดุแบบเดิมอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (พรชัย, 2543; ชรรยง และ พันคำ, 2547)



รูปที่ 2.12 สกรูแบบระหัดเกลียวสำหรับขนถ่ายของเหลวและปฏิกูล (พรชัย, 2543)

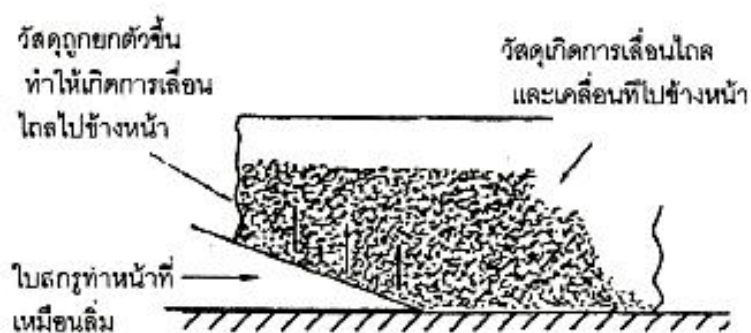


รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของสกรูขนถ่ายวัสดุ (พรชัย, 2543)

2.6.2 หลักการทำงานและการใช้งานของสกรูขนถ่ายวัสดุ

สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นอุปกรณ์ในการขนถ่ายวัสดุที่เหมาะสมสำหรับขนถ่ายวัสดุที่มีคุณสมบัติในการไหลดี คุณสมบัติการไหลดีนี้มีความสำคัญมากต่อการทำงานของสกรูขนถ่ายวัสดุ เนื่องจากใบเกลียวของสกรูที่ติดตั้งอยู่กับเพลลา หรือท่อตรงหมุนอยู่ภายในราง หรือท่อที่อยู่กับที่ ผลักดันวัสดุไปตามส่วนล่างของรางดังแสดงในรูปที่ 2.14 การหมุนของใบเกลียวจะทำให้เกิดการยกวัสดุขึ้นเหมือนลักษณะของลิ้ม การเคลื่อนที่ขึ้นของวัสดุจะทำให้วัสดุเกิดการเลื่อนไหลไปข้างหน้าได้ และการหมุนของใบเกลียวจะทำงานเสมือนลิ้มที่ทำหน้าที่ผลักดัน และตัดเฉือนวัสดุจากการหมุนของใบเกลียวทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างต่อเนื่อง

ตัวรางของสกรูขนถ่ายวัสดุโดยทั่วไป สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือรางแบบกลม และรางแบบตัวยู ซึ่งรางแบบกลมจะเป็นสกรูที่ใช้ความเร็วรอบสูง เป็นแบบที่เคลื่อนที่ได้ สามารถนำไปใช้ในสถานที่ต่างๆ ได้ และยังใช้สำหรับการขนถ่ายวัสดุตามแนวดิ่ง โดยวัสดุจะต้องมีน้ำหนักเบาและคุณสมบัติในการไหลได้ดี ส่วนรางแบบตัวยูจะใช้ความเร็วต่ำกว่าและเป็นแบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ สกรูขนถ่ายเป็นอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่สามารถจ่ายวัสดุและรับวัสดุได้หลายตำแหน่งโดยการใช้อัลลิเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของวัสดุ และยังเป็นอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่สามารถควบคุมปริมาณการขนถ่ายวัสดุได้เป็นอย่างดี (พรชัย, 2543; ชรรยง และพันคำ, 2547)



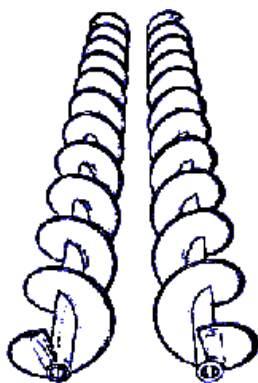
รูปที่ 2.14 ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุบนใบเกลียว (พรชัย, 2543)

2.6.3 ประเภทของใบเกลียวสกรู

ใบเกลียว (screw flight) ของสกรูขนถ่ายวัสดุโดยทั่วไปจะมีขนาดเท่ากับระยะพิตช์ของใบเกลียว และมีกรรมวิธีในการผลิต 2 แบบ ดังนี้

1) ทำจากแผ่นเหล็กตัดเป็นวงกลมที่มีรูกลมตรงกลางจากนั้นตัดแผ่นวงกลมเพื่อนำมาเชื่อมต่อกันเป็นลักษณะเกลียวแล้วนำไปเชื่อมติดกับเพลลาอีกทีหนึ่งซึ่งเป็นเกลียวที่มีความหนาของใบเกลียวเท่ากันตลอด

2) ผลิตจากแท่งโลหะนำมารีดขึ้นรูปจนมีลักษณะเป็นสกรูดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งสกรูเกลียวขวาจะมีใบเกลียวหมุนวนตามเข็มนาฬิกา และสกรูเกลียวซ้ายจะมีใบเกลียวหมุนวนทวนเข็มนาฬิกา (พรชัย, 2543)



รูป 2.15 ลักษณะใบเกลียวซ้ายและขวา (พรชัย, 2543)

ใบเกลียวของสกรูลักษณะต่างๆ และรูปแบบการใช้งานของใบสกรูมีมากมาย ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งาน รูปที่ 2.16 เป็นลักษณะรูปร่างขอบใบสกรูประเภทต่างๆ และการใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ยรรยง และ พันคำ, 2547)

1) ใบสกรูแบบตัด (Cut Flight) (รูป 2.16 (a)) มีรอยตัดบากใบสกรูที่เส้นรอบวงของทั้งแบบ Helicoid หรือแบบ Sectional รอยบากนี้จะช่วยเสริมประสิทธิภาพการขนถ่ายที่มีการผสมให้เข้ากันปานกลาง ใบสกรูแบบนี้ใช้กับวัสดุ เบบ ละเอียด เมล็ด หรือเป็นสะเก็ด

2) ใบสกรูแบบตัดและพับ (Cut and Folded Flight) (รูป 2.16 (b)) จะมีส่วนที่ถูกพับซึ่งจะเป็นส่วนที่ใช้เป็นใบพัดสำหรับยกเพื่อผลในการคลุกเคล้า กวนและการทำให้ฟูด้วยอากาศ (Aeration) ซึ่งเป็นผลดีในการผสม ใบสกรูแบบนี้จะใช้กับวัสดุ น้ำหนักเบา และน้ำหนักปานกลาง ละเอียดเมล็ด

3) ไบสกรูแบบตัดและมีใบพัด (Cut Flight with Paddles) (รูป 2.16 (c)) ติดอยู่เป็นช่วงๆ และเป็นตัววางการไหลของวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกวนและคลุกเคล้าของไบสกรูแบบตัด

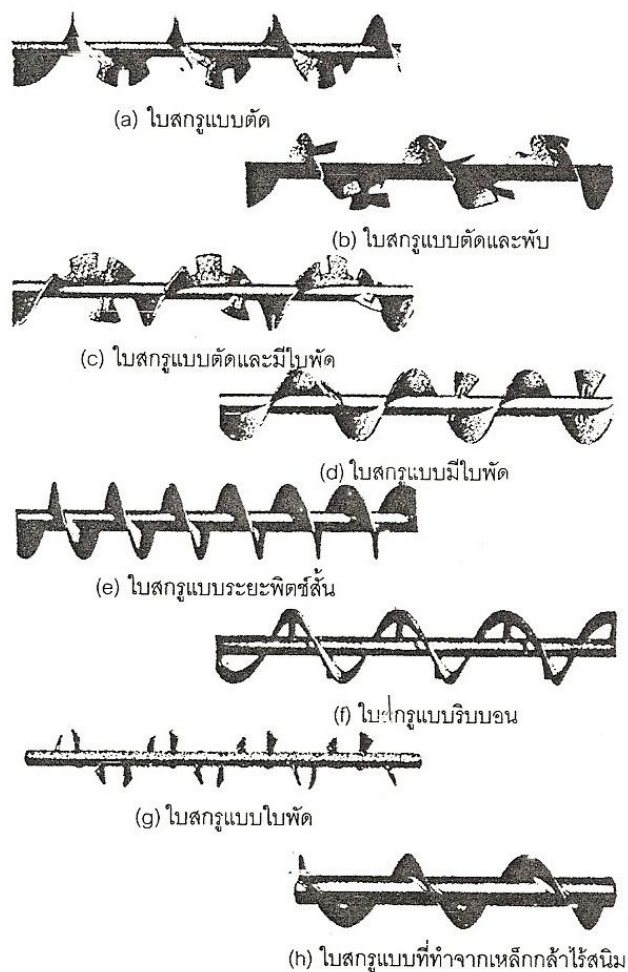
4) ไบสกรูแบบมีใบพัด (Conveyor Screws with Paddles) (รูป 2.16 (d)) มีใบพัดติดอยู่เป็นช่วงๆ และเป็นตัววางการไหลไปข้างหน้าเป็นบางส่วน เพื่อการผสมอย่างพอสสมควร หรือการกวนวัสดุในขณะที่ขนถ่ายใบพัดปรับได้และอาจจะปรับมุมต่างๆ สำหรับระดับการกวนมากน้อยตามต้องการ ไบสกรูแบบนี้จะใช้กับวัสดุน้ำหนักเบา หรือปานกลาง ละเอียด เมล็ดหรือเกล็ด

5) ไบสกรูแบบระยะพิตช์สั้น (Short Pitch Conveyor Screws) (รูป 2.16 (e)) โครงสร้างจะเป็นแบบท้าวๆ ไป ยกเว้นระยะพิตช์ของไบสกรูจะสั้น เหมาะที่จะใช้ขนถ่ายในแนวเอียงมากกว่า 20 องศา รวมทั้งขนถ่ายในแนวดิ่งและใช้เป็น สกรูป้อนวัสดุ สกรูขนถ่ายแบบนี้ยังเป็นตัวหน่วงการไหลของวัสดุด้วย

6) ไบสกรูแบบริบบอน (Ribbon Flight) (รูป 2.16 (f)) ประกอบด้วยไบสกรูทำจากเส้นเหล็กแบน ยึดอยู่กับท่อด้วยหูรองรับ (Supporting Lugs) ไบสกรูแบบนี้ใช้สำหรับขนถ่ายวัสดุเหนียว หรือ วัสดุที่มักเหนียวยึดไบสกรูให้ติดกับท่อ

7) ไบสกรูแบบใบพัด (Paddles) (รูป 2.16 (g)) ติดตั้งอยู่บนก้านโลหะสอดทะลุผ่านท่อปฏิบัติการขนถ่ายสามารถควบคุมได้โดยการปรับมุมของใบพาย ไบสกรูแบบนี้ใช้สำหรับการผสม (Mixing) การผสมผสาน (Blending) หรือการกวนแห้งหรือวัสดุของไหล (Fluid Materials)

8) ไบสกรูแบบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) (รูป 2.16 (h)) ใช้งานที่ต้องการ โดยเฉพาะความเร็วของผิวหน้ามีหลายระดับตามต้องการตั้งแต่ผิวด้าน ไปจนถึงผิวมันวาวเล็กน้อย หรือผิวมันวาวคล้ายกระจก โดยการขัดสกรูขนถ่ายแบบนี้เหมาะสมกับงานสุขอนามัยในการขนถ่ายอาหาร ยาเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง สำหรับความต้านทานต่อการผุกร่อนและการใช้งานที่มีความร้อนปานกลางจนถึงสูงสุด



รูปที่ 2.16 ลักษณะต่างๆ ของไบสกกรู (พรชัย, 2543)

สำหรับไบสกกรูปแบบมีระยะพิตซ์และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลายขนาดร่วมกัน เพื่อวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และมีรายละเอียดของการทำงาน ดังต่อไปนี้ (ยรรยง และพันคำ, 2547)

1) ไบสกกรูปแบบเรียว (Tapering Flight) (รูป 2.17 (a)) มักใช้เป็นสกรูป้อนวัสดุ สำหรับการขนถ่ายวัสดุก้อนเปราะร่วนจากถังเก็บแบบ Bins หรือ Hoppers และยังใช้ดูดวัสดุจาก ช่วงป้อนวัสดุได้ตลอดช่วงความยาวอย่างสม่ำเสมอ

2) ไบสกกรูปแบบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็นระดับ (Stepped Diameter Conveyor Screws) (รูป 2.17 (b)) ประกอบด้วยไบสกกรูที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน ไบสกกรู แต่ละช่วงจะมีระยะพิตซ์สม่ำเสมอติดตั้งเรียงตามกันบนท่อท่อเดียว หรือเพลาดียวมักใช้เป็นสกรู

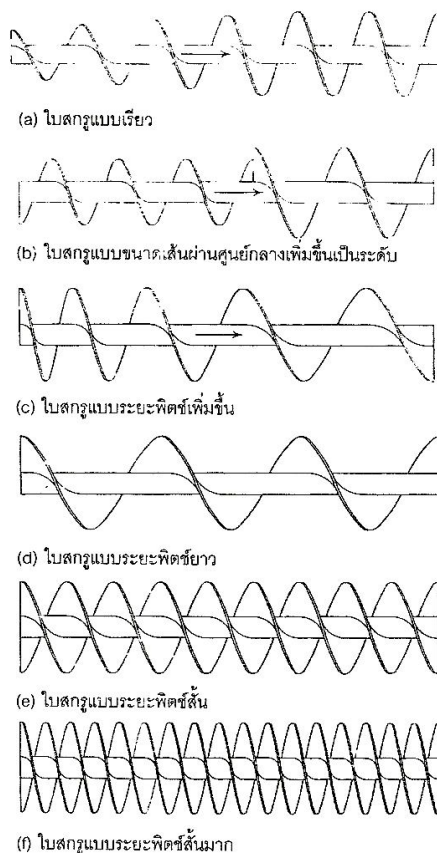
ป้อนวัสดุโดยด้านเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กจะติดตั้งอยู่ใต้ถังเก็บ (Bins or Hoppers) เพื่อควบคุมการไหลของวัสดุ

3) ไบสกรูแบบระยะพิตช์เพิ่มขึ้น (Stepped Pitch Conveyor Screws) (รูป 2.17 (c)) มีไบสกรูใบเดี่ยวหรือเป็นกลุ่ม ระยะพิตช์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ใช้เป็นสกรูป้อนวัสดุโดยให้ดูวัสดุละเอียดไหลอิสระสม่ำเสมอจากช่องป้อนวัสดุได้ตลอดช่วงความยาวอย่างสม่ำเสมอ

4) ไบสกรูแบบระยะพิตช์ยาว (Long Pitch Conveyor Screws) (รูป 2.17 (d)) ใช้เป็นเครื่องกวน (Agitators) สำหรับของไหลหรือใช้ขนถ่ายวัสดุไหลอิสระด้วยความเร็วสูง

5) ไบสกรูแบบระยะพิตช์สั้น (Double Flight Conveyor Screws) (รูป 2.17 (e)) มีระยะพิตช์สม่ำเสมอ ช่วยให้การไหลเชิงซ้ราบเรียบ และปล่อยวัสดุออกได้แน่นอน

6) ไบสกรูแบบระยะพิตช์สั้นมาก (Double Flight Short Pitch Conveyor Screws) (รูป 2.17 (f)) มีความแม่นยำแน่นอนมากกว่าในการป้อน และการไหลภายในสกรูป้อนวัสดุ และมีผลต่อการยับยั้งปฏิกิริยาไหลพุ่งของวัสดุเหลว



รูปที่ 2.17 ไบสกรูแบบมีระยะพิตช์และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดร่วมกัน (พรชัย, 2543)

2.6.4 การขยายตัวของสกรูขนถ่ายในการลำเลียงวัสดุร้อน

สกรูขนถ่ายที่จะใช้ในการขนถ่ายวัสดุร้อน จำเป็นต้องรู้ว่าความยาวของสกรูขนถ่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของรางและใบสกรูเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความยาวเริ่มต้น การแก้ปัญหาทำให้จัดหาฐานรองรับสำหรับรางซึ่งจะยอมให้ฐานรองรับที่ปลายรางเคลื่อนตัวได้ ในระหว่างที่รางขยายตัว และการหดตัวภายหลังการขนถ่ายวัสดุร้อนสิ้นสุดลง ปลายด้านข้างของสกรูขนถ่ายโดยปกติแล้วจะคงที่ตายตัวและจะยอมให้ส่วนที่เหลืออยู่ของรางขยายตัวหรือหดตัวได้ ในกรณีที่มีการป้อนวัสดุ หรือรางส่ง วัสดุออกอยู่ในช่วงกลาง ซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อนั้นจึงต้องใช้รางแบบขยายตัวได้

2.6.5 การหาขนาดสกรูขนถ่ายวัสดุ

2.6.5.1 การพิจารณาออกแบบขนถ่ายวัสดุ

ในการออกแบบอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ จะขึ้นอยู่กับความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่จะขนถ่าย และหลักการทำงานของอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุชนิดต่างๆ ข้อสำคัญในการออกแบบของอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุใดๆ ก็คือ ความรู้ความเข้าใจถึงทิศทางที่วัสดุจะไหลผ่านและผลกระทบอื่นๆ ต่อการไหลของวัสดุ อัตราการขนถ่ายวัสดุปริมาณมวลมากมักจะมีหน่วยเป็นตันต่อชั่วโมง อัตราการขนถ่ายวัสดุสูงสุดมักมากกว่าอัตราการขนถ่ายเฉลี่ยต่อวันหรือต่อชั่วโมง เนื่องจากในบางเวลาอาจมีอัตราการขนถ่ายวัสดุมากหรือน้อยกว่าค่าเฉลี่ยได้เช่น ในตอนเริ่มต้น และช่วงสุดท้ายของการขนถ่ายวัสดุ เป็นต้น นอกจากนี้ยังปรากฏว่าความหนาแน่นของวัสดุในขณะขนถ่ายวัสดุอาจมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากขณะที่วัสดุกำลังเคลื่อนที่ จะมีอากาศเข้าไปผสมกับวัสดุทำให้ปริมาตรของวัสดุเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความหนาแน่นของวัสดุลดลง ซึ่งอัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงปริมาตรจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุขณะขนถ่าย ดังนั้นการกำหนดอัตราการขนถ่ายวัสดุสูงสุดควรกำหนดจากความหนาแน่นของวัสดุในขณะขนถ่าย ในระบบขนถ่ายวัสดุหลายๆ ระบบ การจ่ายวัสดุเข้าไปในอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุอาจจะมีค่าไม่คงที่ได้ เช่น ประสิทธิภาพด้านล่างของถังเก็บวัสดุ วัสดุจะไหลจากด้านล่างของถังเก็บวัสดุอย่างสม่ำเสมอไม่ตลอดเวลา ทำให้เกิดความไม่แน่นอน จึงทำให้อัตราการขนถ่ายวัสดุมีค่าไม่คงที่ (พรชัย, 2543; ธรรม และ พันคำ, 2547)

2.6.5.2 การแบ่งประเภทของวัสดุ

การแบ่งประเภทของวัสดุจะช่วยในการตัดสินใจเลือกสกรูขนถ่ายวัสดุและการกำหนดอัตราการขนถ่ายวัสดุ วัสดุจะถูกแยกออกเป็นสี่ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะสามารถเขียนรหัสของวัสดุตามที่สมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุอเมริกา (Conveyor Equipment Manufactures

Association: CEMA) ได้กำหนดไว้เพื่อความสะดวกในการเลือกอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ และการหาอัตรากรขนถ่ายวัสดุต่อไป การบอกคุณสมบัติของวัสดุของสมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุอเมริกา (CEMA) ในที่นี้จะเริ่มด้วยตัวอักษรบอกขนาดวัสดุ A B C D หรือ E แล้วตามด้วยตัวเลขสองตัว ตัวเลขตัวต่อไปจะเป็นความคมของวัสดุดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์แสดงสมบัติวัสดุ (พรชัย, 2543; ชรรยง และพันคำ, 2547)

ตัวอักษรบอกขนาดวัสดุ	คุณสมบัติการไหล	ความคม
A หมายถึงวัสดุขนาดละเอียดมาก	1 ไหลได้ดีมาก	5 มีความคมน้อย
B หมายถึงวัสดุขนาดละเอียด	2 ไหลได้ดี	6 มีความคมปานกลาง
C หมายถึงวัสดุที่เป็นเมล็ด	3 ไหลได้ปานกลาง	7 มีความคมมาก
D หมายถึงวัสดุที่เป็นก้อน	4 ไหลได้ยาก	-
E หมายถึงวัสดุที่มีขนาดไม่แน่นอน	-	-

ประเภทที่ 1 วัสดุเบา ไหลได้ดี ไม่มีความคม เช่น เมล็ดข้าวสาลี ข้าวไรย์ ผักข้าวโพด กราไฟต์ แปะหมี และอื่นๆ รหัสวัสดุของ CEMA คือ A15, A25, B15, B25, C15, C25

ประเภทที่ 2 วัสดุไม่มีความคม คุณสมบัติในการไหลได้น้อยกว่าวัสดุประเภทที่ 1 (วัสดุก้อนเล็กผสมกับวัสดุละเอียด) เช่น แปะอบขนมปัง ผักข้าวป่น ถ่านหินบดละเอียด ข้าวโพดบด รหัสวัสดุของ CEMA คือ A35, A45, B35, B45, C35, C45, D15, D25, D35, D45, E15, E25, E35

ประเภทที่ 3 คุณสมบัติการไหลคล้ายแบบที่ 2 แต่มีความคมมากกว่า ต้องการความเร็วรอบของสกรูต่ำ เช่น ขี้เถ้าแห้ง ปูนซีเมนต์ เกลือ ถ่านไม้ ซอล์คอบด และอื่นๆ

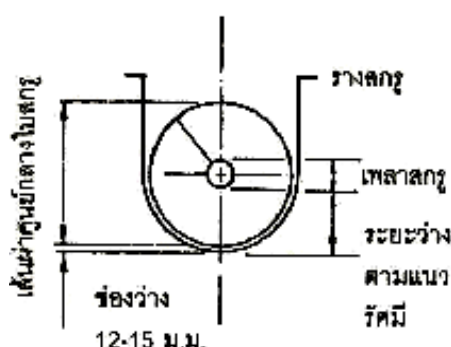
ประเภทที่ 4 วัสดุมีความคม และคุณสมบัติการไหลไม่ดี เช่น ถ่านหิน กากถ่านหิน กากแร่จากเตา อะลูมินา ทราช้าง และอื่นๆ

2.6.5.3 ข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดของวัสดุ

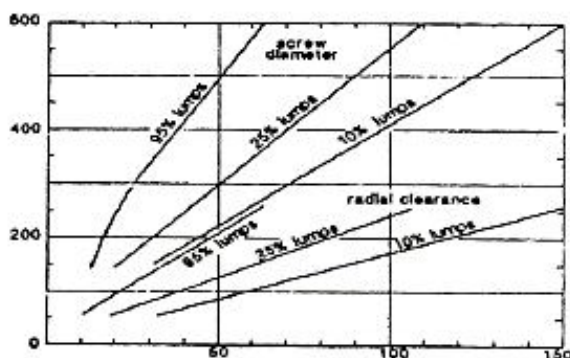
ขนาดของสกรูขนถ่ายวัสดุไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับอัตรากรขนถ่ายวัสดุที่ต้องการเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุที่ขนถ่ายด้วย วัสดุบางชนิดมีก้อนแข็งไม่แตกตัวขณะผ่านสกรูขนถ่ายวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีข้อจำกัดเรื่องขนาดก้อนวัสดุที่จะขนถ่าย ขนาดของก้อนวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังต่อไปนี้

- 1) วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดไม่เกิน 10% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กกว่าครึ่งของวัสดุก้อนใหญ่สุดอีก 90% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 10% lump)
- 2) วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดไม่เกิน 25% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของวัสดุขนาดก้อนใหญ่สุดอีก 75% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 25% lump)
- 3) วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดไม่น้อยกว่า 95% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของวัสดุขนาดก้อนใหญ่สุดอีก 5% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 95% lump)

รูปที่ 2.19 เป็นขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดที่ทางสมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์ลำเลียงของอเมริกา (CEMA) ที่มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู และระยะว่างตามแนวรัศมี (radial clearance) ของสกรูขนถ่ายวัสดุ เช่น วัสดุขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 50 mm ประเภท 25% lump จะต้องใช้สกรูขนถ่ายวัสดุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู 300 mm (ประมาณ 12 นิ้ว) และมีระยะว่างตามแนวรัศมี (radial clearance) 125 mm (ประมาณ 5 นิ้ว) ดังนั้นในกรณีที่สกรูขนถ่ายวัสดุทำการขนถ่ายวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อน จะสามารถใช้รูปที่ 2.19 สำหรับกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรูได้ โดยที่ช่องว่างระหว่างใบสกรูกับรางสกรูจะมีค่าประมาณ 12-15 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.18

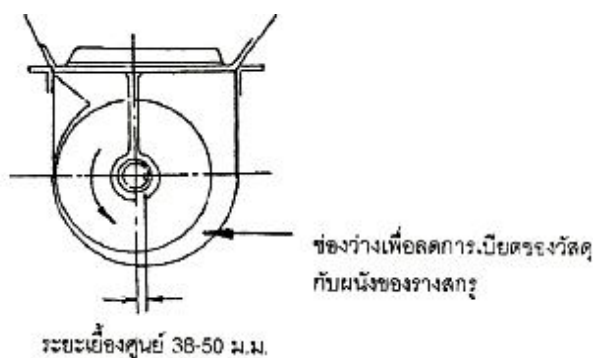


รูปที่ 2.18 ลักษณะหน้าตัดของสกรูขนถ่ายวัสดุ (พรชัย, 2543)



รูปที่ 2.19 ขนาดก้อนวัสดุใหญ่ที่สุดและขนาดของสกรูที่เหมาะสม (พรชัย, 2543)

ในขณะที่สกรูขนถ่ายวัสดุทำการขนถ่ายวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนจากถังเก็บวัสดุ วัสดุที่เป็นก้อนจะถูกเบียดให้ติดกับผนังราง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผนังของรางสกรู ทำให้เกิดการสึกหรอ และอาจทำให้วัสดุถูกเบียดจนติดอยู่กับผนังของรางสกรูด้วย ดังนั้นเพื่อลดการเบียดของวัสดุกับผนังของรางสกรู จึงต้องทำสกรูให้มีระยะเยื้องศูนย์กลางกับรางสกรูขนาดประมาณ 38-50 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 หน้าตัดของรางสกรูสำหรับการขนถ่ายวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อน (พรชัย, 2543)

2.6.6 การคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุ

อัตราการขนถ่ายวัสดุของสกรู จะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) รูปร่างของใบสกรู
- 2) ความเร็วรอบของสกรู
- 3) มุมลาดเอียงในการขนถ่ายวัสดุ
- 4) รูปร่างของถังเก็บวัสดุและรางสกรูขนถ่ายวัสดุ

- 5) คุณสมบัติในการไหลของวัสดุ
- 6) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุบนใบสกรูและราง

ปริมาณวัสดุในรางสกรูจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของสกรูขนถ่ายวัสดุ ซึ่งจะถูกจำกัดไว้ไม่เกิน 45% ของพื้นที่หน้าตัดราง เพื่อป้องกันวัสดุเข้าไปทำความเสียหายกับแบร็งและปริมาณวัสดุบนพื้นที่หน้าตัดจะลดลงอีกถ้าวัสดุมีความคมมากขึ้น การคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุของสกรูขนถ่ายวัสดุสามารถหาได้จากรูปแบบการขนถ่ายวัสดุในรูปที่ 2.21 การหมุนของสกรูในราง จะทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่องในรางของสกรูขนถ่ายวัสดุ วัสดุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วโดยประมาณเท่ากับความเร็วรอบของสกรูที่กำลังหมุนอยู่ในรอบการเคลื่อนที่ของสกรูจะเคลื่อนที่ไปได้หนึ่งเท่าของระยะพิทช์สกรู (p) ทำให้ความเร็วเฉลี่ยในการขนถ่ายวัสดุ (v) และความเร็วรอบของสกรูเป็นดังนี้ (พรชัย, 2543; ยรรยง และ พันคำ, 2547)

$$v = pN \quad (2.3)$$

v = ความเร็วเฉลี่ยในการขนถ่ายวัสดุ (m/s)

P = ระยะพิทช์สกรู (m)

N = ความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายวัสดุ (รอบ/วินาที)

ดังนั้นอัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงปริมาตร จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$V = pNA \quad (2.4)$$

V = อัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงปริมาตร (m^3/s)

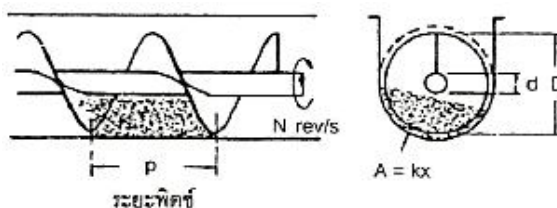
และอัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวล

$$m_s = \rho_b pNA \quad (2.5)$$

m_s = อัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวล (kg/s)

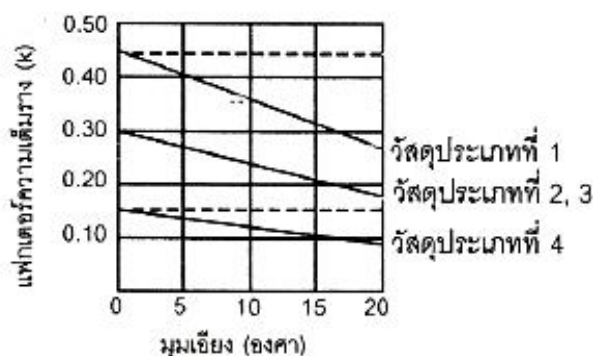
A = พื้นที่หน้าตัดของใบสกรูขนถ่ายวัสดุ (m^2)

ρ_b = ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)



รูปที่ 2.21 หลักการคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุ (พรชัย, 2543)

ในทางปฏิบัติ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากับพื้นที่หน้าตัดของรางสกรูที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงต้องคูณพื้นที่หน้าตัดของสกรูขนถ่ายวัสดุด้วย แฟกเตอร์เต็มราง (k) ซึ่งแฟกเตอร์นี้สามารถดูได้จากรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แฟกเตอร์ความเต็มราง (k) (พรชัย, 2543)

จากที่กล่าวมาแล้วว่าวัสดุจะแบ่งออกเป็นสี่ชนิด สามารถสรุปการนำค่าแฟกเตอร์ความเต็มรางไปใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุได้ดังต่อไปนี้

ประเภทที่ 1 วัสดุเบาไหลได้ดีไม่มีความคม เช่น เมล็ดข้าว แฟกเตอร์ความเต็มราง $k = 0.45$

ประเภทที่ 2 วัสดุไม่มีความคม คุณสมบัติในการไหลได้น้อยกว่าประเภทที่ 1 เช่น ข้าวโพดบด แฟกเตอร์ความเต็มราง $k = 0.30$

ประเภทที่ 3 คุณสมบัติในการไหลคล้ายแบบประเภทที่ 2 แต่มีความคมมากกว่า ต้องการความเร็วรอบของสกรูต่ำ เช่น ปูนซีเมนต์ แฟกเตอร์ความเต็มราง $k = 0.30$

ประเภทที่ 4 วัสดุมีความคมและคุณสมบัติการไหลไม่ดี เช่น กากถ่านหิน แฟกเตอร์ความเต็มราง $k = 0.15$

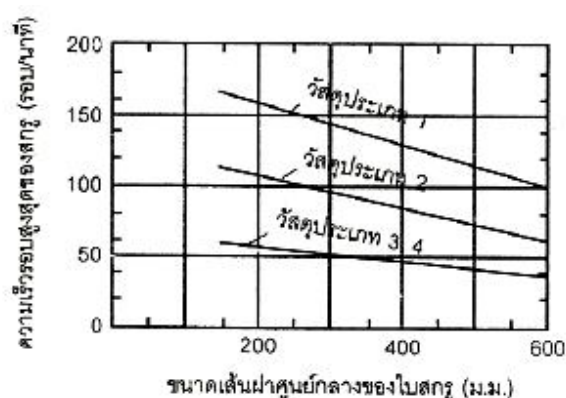
ค่าแฟกเตอร์ความเต็มรานี้ ใช้สำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยสกรูขนถ่ายวัสดุตามแนวระดับเท่านั้น สำหรับการขนถ่ายวัสดุตามแนวเอียง สามารถหาแฟกเตอร์ความเต็มรานี้ได้จากรูปที่ 2.22 ดังนั้นเมื่อแทนค่าพื้นที่หน้าตัดของใบสกรูขนถ่ายวัสดุ และรวมค่าแฟกเตอร์ความเต็มรานี้เข้าไป จะได้เป็นสมการที่ (2.6)

$$m_s = \frac{\rho_b \pi (D^2 - d^2) k p N}{4} \quad (2.6)$$

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาสกรู

จากสมการที่ (2.6) จะสามารถใช้สำหรับการประมาณค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุเท่านั้น เนื่องจากในทางปฏิบัติ การป้อนวัสดุเข้าสู่สกรูขนถ่ายวัสดุนั้นจะมีอัตราการป้อนวัสดุไม่แน่นอน ทำให้แฟกเตอร์ความเต็มรานี้มีค่าไม่แน่นอนตามไปด้วย จึงอาจจะทำให้ไม่สามารถคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุที่แน่นอนได้ในการเลือกและการออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ ความเร็วรอบสูงสุดของสกรูที่สามารถทำงานได้นั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู ปริมาณวัสดุในรางสกรู และคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งสามารถหาค่าความเร็วรอบสูงสุดของสกรูขนถ่ายวัสดุได้จากรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ความเร็วรอบสูงสุดของสกรูขนถ่ายวัสดุ (พรชัย, 2543)

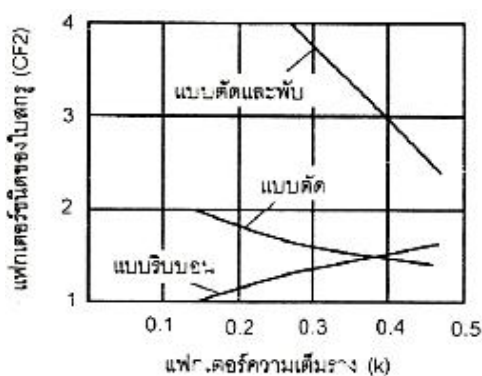
สำหรับระยะพิตช์ใบสกรูก็มีผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุด้วย จากรูปที่ 2.21 เมื่อพิจารณาการหมุนของสกรู 1 รอบวัสดุจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเท่ากับระยะพิตช์ ดังนั้นในกรณีที่สกรู

หมุนไป 1 รอบแต่วัสดุไม่ได้เคลื่อนที่ไปเท่ากับระยะพิตช์ ก็จะต้องคำนึงถึงระยะพิตช์ใบสกรูด้วย แฟกเตอร์ของระยะพิตช์ใบสกรู (CF_1) ได้แสดงในตารางที่ 2.4

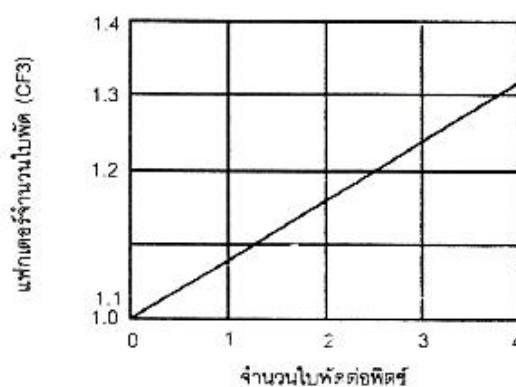
ตารางที่ 2.4 แฟกเตอร์ระยะพิตช์ใบสกรู (พรชัย, 2543)

รายละเอียดของระยะพิตช์	CF_1
ระยะพิตช์ = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู	1.00
ระยะพิตช์ = 2/3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู	1.50
ระยะพิตช์ = 1/2 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู	2.00
ระยะพิตช์ = 3/2 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู	0.67

ชนิดของใบสกรูก็เป็นแฟกเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุเช่นกัน ซึ่งแฟกเตอร์ชนิดของใบสกรูนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของใบสกรู (CF_2) และจำนวนใบพัดสำหรับการกวาดหรือผสมวัสดุต่อระยะพิตช์ (CF_3) โดยแฟกเตอร์ทั้งสองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.24 และรูปที่ 2.25 ตามลำดับ (พรชัย, 2543; ยรรยง และ พันคำ, 2547)



รูปที่ 2.24 แฟกเตอร์ชนิดของใบสกรู



รูปที่ 2.25 แฟกเตอร์จำนวนใบพัด

ดังนั้นการคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุเมื่อรวมเอาแฟกเตอร์ต่างๆ ไว้แล้วจะคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2.7)

$$m_s = \frac{\rho_b \pi (D^2 - d^2) k p N}{4CF_1 CF_2 CF_3} \quad (2.7)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (2.7) เมื่อกำหนดอัตราภาระขนถ่ายวัสดุและขนาดของใบสกรูมาแล้วก็สามารถคำนวณหาความเร็วรอบของสกรูได้จากสมการที่ (2.8)

$$N = \frac{4m_s CF_1 CF_2 CF_3}{\rho_b \pi (D^2 - d^2) k p} \quad (2.8)$$

สำหรับขั้นตอนในการคำนวณออกแบบและเลือกสกรูขนถ่ายวัสดุ ของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุที่จะขนถ่าย และชนิดของใบสกรูที่เหมาะสม พร้อมทั้งแฟกเตอร์ความเต็มราง
- 2) ถ้าวัสดุมีลักษณะเป็นก้อนจะสามารถเลือกขนาดของใบสกรูได้จากรูปที่ 2.19
- 3) หาความเร็วรอบสูงสุดของเพลาสกรูจากรูปที่ 2.23
- 4) หาแฟกเตอร์ของระยะพิตช์ ชนิดของใบสกรูและจำนวนใบพัดสำหรับการกวนหรือผสมวัสดุต่อระยะพิตช์ (แฟกเตอร์ CF_1 , CF_2 และ CF_3 ตามลำดับ) จากตารางที่ 2.4 รูปที่ 2.24 และรูปที่ 2.25
- 5) ทดลองเลือกขนาดของใบสกรู แล้วคำนวณหาอัตราขนถ่ายวัสดุจากสมการที่ (2.7) โดยใช้ความเร็วรอบสูงสุดจากข้อที่ 3 ซึ่งจะต้องได้ค่าอัตราภาระขนถ่ายมากกว่าที่โจทย์กำหนด จากนั้นคำนวณหาความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายวัสดุจากสมการที่ 6 ความเร็วรอบที่คำนวณได้ต้องน้อยกว่าความเร็วรอบสูงสุดจากข้อ 3 ถ้าความเร็วรอบมากกว่าค่าสูงสุดให้เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรูที่โตขึ้น

ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณออกแบบและเลือกสกรูขนถ่ายวัสดุของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู จะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป โดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ผลปาล์มร่วง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การศึกษาเกี่ยวกับการอบปาล์มน้ำมัน การประยุกต์ใช้งานสกรูลำเลียงและเครื่องอบแห้งทั่วไป

2.7.1 การศึกษาเกี่ยวกับการผลปาล์มน้ำมัน

บัญญัติ (2544) ได้ศึกษาพฤติกรรมการแห้งของปาล์ม โดยการบรรจุผลปาล์มในถังอบที่ด้านล่างมีตะแกรงเหล็กให้ลมร้อนไหลผ่านได้ ลมร้อนจะถูกดูดออกทางด้านบนของกองปาล์ม ทำการทดลองทั้งสิ้น 18 การทดลอง โดยแบ่งค่าออกเป็น ความสูงของชั้นผลปาล์ม 3 ค่า (25, 40 และ 55 cm) อุณหภูมิของลมร้อน 3 ค่า (80, 100 และ 120°C) โดยทำการทดลองที่ความเร็วลม 0.8-1.0 m/s พบว่าการทดลองที่ความสูงของชั้นปาล์ม 40 cm และอุณหภูมิลมร้อนที่ 120°C ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอัตราการผลิตสูงสุด คือ 18.75% และ 0.58 kg_{ปาล์ม}/hr ตามลำดับ ซึ่งจะใช้ค่าดังกล่าวนี้ในการออกแบบระบบอบแห้งปาล์ม คือ ออกแบบสำหรับการอบที่ 120°C และความสูงของชั้นปาล์มประมาณ 40 cm ระบบอบแห้งผลปาล์มจะมีระบบการทำงานเป็นแบบกึ่งต่อเนื่องแบบไหลลง โดยความร้อนเข้าใต้กองปาล์มและประกอบไปด้วยถังอบ 2 ชั้น โดยที่ชั้นล่างใช้อบผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงสุดท้ายและชั้นบนทำหน้าที่ คึงความร้อนกลับและอบขึ้นต้นตัวผลิตภัณฑ์เอง ระบบดังกล่าวจะมีชิ้นส่วนจำนวนน้อยและไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ ทำให้ต้นทุนการก่อสร้างและการบำรุงรักษาต่ำ อีกทั้งระบบอบแห้งแบบนี้สามารถปรับปรุงการผลิตได้ตามผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถังอบ และสามารถเลือกการอบแห้งแบบชั้นบาง (thin layer drying) ได้ซึ่งจะทำให้อัตราการแห้งเร็วขึ้นและได้คุณภาพสม่ำเสมอ ระบบอบแห้งปาล์มที่ได้สร้างขึ้น มีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนคือ เตาเผา ไซโคลน ถังอบแห้งและพัดลมดูดอากาศ ส่วนต่างๆ ต่อถึงกันด้วยท่อเหล็กทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 m เตาเผาเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.30 m มีประตูอากาศปฐมภูมิ เข้าทางด้านล่างของตะแกรง และมีท่ออากาศทุติยภูมิอยู่เหนือห้องเผาไหม้ ภายในท่อด้วยอิฐและปูนทนไฟ เชื้อเพลิงใช้ได้ทั้งแก๊สและทะลายปาล์ม และไม้ยางพาราไซโคลนเป็นชนิดประสิทธิภาพสูง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.51 m ถังอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 m โดยแบ่งออกเป็นถังอบชั้นล่างและถังอบชั้นบนซึ่งจะคึงความร้อนกลับจากถังอบชั้นล่าง พัดลมดูดอากาศเป็นชนิดความดันสูงใช้กำลังขับจากมอเตอร์ขนาด 15 kW จากผลการทดลองระบบผลแห้งของปาล์ม ที่ได้สร้างขึ้น โดยทำการทดลองที่ อุณหภูมิลมร้อน 120°C และอัตราการไหลของอากาศ 1.8 m³/s พบว่า ความชื้นผลปาล์มเริ่มต้น 29.9-41% (ฐานแห้ง) ในเวลา 4-4.5 ชั่วโมง ระบบอบแห้งนี้สามารถอบแห้งผลปาล์มได้ปริมาณ 96.5 kg/hr ปริมาณการใช้ยางพารา

เป็นเชื้อเพลิงคือ 80 kg พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิต 0.98 MJ/kg_{ปาล์ม} ผลปาล์มที่ได้มีคุณภาพดี และสม่ำเสมอ

ชนินทร (2550) ได้วิเคราะห์และออกแบบตู้หนึ่งปาล์ม การนึ่งผลปาล์มน้ำมันในแต่ ละครั้ง จะบรรจุกะลายปาล์มน้ำมันในตู้หนึ่ง โดยการนึ่งจะใช้ไอน้ำโดยมีสภาวะต่างๆ ดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ 130-150°C ความดัน 3 บาร์ ระยะเวลาที่ใช้ในการนึ่งต่อรอบ 60 นาที การนึ่งปาล์มสดมี วัตถุประสงค์เป็นเพื่อยับยั้งเอนไซม์ ซึ่งจะหยุดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระอันเป็นผล ให้เกิดการสูญเสีย น้ำ นอกจากนี้การนึ่งผลปาล์มสดยังทำให้ข้าวผลปาล์มนิ่มซึ่งจะทำให้ปาล์มหลุด ร่วงจากทะลายได้ง่าย และทำให้เนื้อเยื่อของผลปาล์มยุ่ย ง่ายต่อการบีบอัดน้ำมัน ในการวิเคราะห์ ออกแบบตู้หนึ่งปาล์มและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแล้วจึงทำการวิเคราะห์ความเค้นขยายตัวจากความ ดันและความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการวิเคราะห์ความเค้นแบบ Von Mises ที่เกิดขึ้นในส่วนของผนังด้านในตู้หนึ่ง มีค่าเท่ากับ 1.23×10^8 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ โดยมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 4.19 ดังนั้นตู้หนึ่งที่ได้ทำการ ออกแบบขึ้นมาจึงสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย สามารถนำไปสร้างเป็นต้นแบบเพื่อใช้งาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัญญาและจำลอง (2548) ได้ศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มในปัจจุบันจะใช้ ความร้อนนึ่งประมาณ 140°C ผลปาล์มเพื่อยับยั้งกรดไขมันอิสระและทำให้บีบน้ำมัน ได้ง่ายขึ้นแต่ จะส่งผลให้วิตามินอีแตกสลายไปบางส่วน บทความนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาถึงกระบวนการ บีบน้ำมันปาล์มให้ความร้อนที่ 70°C 5 นาที เพื่อยับยั้งเอนไซม์และให้ยังคงวิตามินอีไว้ให้มากที่สุด และได้ออกแบบเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตให้เหมาะสมต่อเกษตรกรหรือกลุ่มเกษตรกรสามารถ นำไปบีบน้ำมันปาล์มดิบได้ด้วยตนเอง แล้วนำไปขายต่อให้กับอุตสาหกรรมทำเครื่องสำอาง หรือ อุตสาหกรรมหล่อลื่น โดยใช้วิธีนำผลปาล์มสดมาเข้าเครื่องแยกเปลือกออกจากเมล็ดแล้วนำไปบีบ ด้วยเครื่องบีบน้ำมัน จากการทดลองพบว่าจากผลปาล์มสดปริมาณ 100% โดยน้ำหนัก เมื่อนำไปเข้า กระบวนการบีบน้ำมันที่ด้วยเครื่องสร้างขึ้นปรากฏว่าได้น้ำมันประมาณ 20% โดยน้ำหนัก เมล็ดใน 40% โดยน้ำหนัก และกากที่เหลือจากการบีบน้ำมันแล้วประมาณ 40% โดยน้ำหนัก น้ำมันที่ได้จาก ทะลายปาล์มที่เก็บไว้ 1 วัน มีค่ากรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acids.(as oleic acid)) 4.3% วิตามินอี ยังคงเหลืออยู่ในน้ำมันปาล์มจำนวน 1217.39 PPM. น้ำมันที่ได้จากทะลายปาล์มที่เก็บไว้ 7 วัน มีค่า กรดไขมันอิสระ (FFA) 7.2% วิตามินอียังคงอยู่ในน้ำมันปาล์มจำนวน 1194.28 PPM. ในขณะที่ น้ำมันปาล์มดิบจากโรงผลิตในปัจจุบันมีค่ากรดไขมันอิสระ (FFA) ประมาณ 4-5% และมีวิตามินอี อยู่จำนวน 600-800 PPM.

ไกรวุฒิและคณะ (2534) ได้ศึกษาการกำหนดระดับชั้นคุณภาพของผลปาล์มน้ำมัน ทะลายสดจะใช้น้ำหนักของทะลายเป็นเกณฑ์ แบ่งเป็น 4 ระดับ คือ ระดับชั้นที่ 1 น้ำหนักมากกว่า 15 kg ระดับชั้นที่ 2 น้ำหนักมากกว่า 11-15 kg ระดับชั้นที่ 3 น้ำหนักมากกว่า 6-10 kg ระดับชั้นที่ 4 น้ำหนักมากกว่า 3-5 kg การทดลองนี้ต้องทราบปริมาณน้ำมันที่ได้ (Yield) และคุณภาพของน้ำมัน โดยพิจารณาจากกรดไขมันอิสระและค่าไอโอดีน จากการบีบสกัดผลปาล์มน้ำมัน 2 พันธุ์ คือ พันธุ์คูรา และพันธุ์เทนอรา ระดับชั้นต่างๆ ที่เก็บไว้ในระยะเวลา 1-5 วัน จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่า ปาล์มน้ำมันระดับชั้นที่ 1 และ 2 ให้ปริมาณน้ำมัน 20.88 และ 20.76% ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกัน ระดับชั้นที่ 3 ให้ปริมาณน้ำมัน 18.31% ระดับชั้นที่ 4 ให้ปริมาณน้ำมัน 14.30% ปาล์มน้ำมันพันธุ์เทนอราซึ่งเป็นพันธุ์ปลูกให้ปริมาณน้ำมัน 22.73% มากกว่าพันธุ์คูราที่ให้ปริมาณน้ำมัน 14.39% การเก็บผลปาล์มทะลายสดในสภาพที่อากาศถ่ายเทสะดวก 5 วัน จะมีผลทำให้กรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นแต่การเพิ่มขึ้นไม่เกินระดับที่มาตรฐานกำหนดคือ 5% พันธุ์และระดับชั้น ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระ ปาล์มน้ำมันพันธุ์เทนอรา มีค่าไอโอดีนเฉลี่ย 48.34 ส่วนพันธุ์คูรา มีค่าไอโอดีนเฉลี่ย 46.79 ระดับชั้นและระยะเวลาในการเก็บไม่เกิน 5 วัน ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าไอโอดีนของน้ำมัน

2.7.2 การประยุกต์ใช้งานสกรูลำเลียง

Al-Kassir (2005) ได้ศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองของเครื่องอบแห้งสกรูความร้อนสำหรับชีวมวล ในการปัจจุบันการศึกษาถูกพัฒนาสำหรับการคำนวณและการออกแบบของเครื่องอบแห้งสกรูความร้อนสำหรับชีวมวล ข้อมูลที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิปากทางเข้าและอัตราการไหลของแก๊ส และ กากอุ้ง ในการทดลองเพื่อจะวัดอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสกรูความร้อน เมื่อเวลาผ่านไป พบว่า ความสัมพันธ์ในการพัฒนารูปแบบเกี่ยวกับทดลองที่เหมาะสมที่ความยาวเครื่องอบแห้งสกรูความร้อนที่ 3 m เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 m

อนุชาและอัศวิน (2549) การออกแบบอุปกรณ์ป้อนจ่ายแบบใบสกรูจำเป็นที่จะต้องใช้ทั้งทฤษฎีในการคำนวณประกอบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้อง โดยเฉพาะการหาค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุ หรือกำลังงานที่จะต้องใช้ในการขับเคลื่อนใบสกรู ทั้งนี้เนื่องจากมีปัจจัยหลายตัวที่ไม่สามารถคาดคะเนได้ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ และการตกค้างสะสมของเนื้อวัสดุภายในรางขนถ่าย ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับอัตราการขนถ่ายของวัสดุในแนวราบ สำหรับตัวป้อนจ่ายแบบใบสกรูจะประกอบไปด้วย ความหนาแน่นของวัสดุ ความเร็วรอบของใบสกรู ระยะช่องว่างในแนวรัศมีระหว่างใบสกรูกับรางขนถ่าย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาของชุดใบสกรู ระยะพิตซ์ของใบสกรู ทางคณะผู้ทำวิจัยจึงทำการทดลอง และ

วิเคราะห์ เพื่อหาค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุ สำหรับอุปกรณ์ป้อนจ่ายแบบใบสกรูกับวัสดุทางการเกษตรที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ ได้แก่ปลายข้าว และรำละเอียด ซึ่งลักษณะของการติดตั้งชุดอุปกรณ์ป้อนจ่ายแบบใบสกรูจะเป็นการขนถ่ายวัสดุในแนวราบ โดยการสร้างฟังก์ชันในการหาค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุสำหรับอุปกรณ์ป้อนจ่ายแบบใบสกรูจากการใช้วิธีการวิเคราะห์มิติ (Dimensional analysis) เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุกับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ผลที่ได้จากการทดลองวัดค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุจะนำไปแทนในฟังก์ชัน เพื่อหาค่าตัวประกอบของสมการ (Exponents) จึงจะทำให้ได้สมการคาดคะเนอัตราการขนถ่ายวัสดุ สำหรับอุปกรณ์ป้อนจ่ายแบบใบสกรูต่อไป อัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวลสำหรับอุปกรณ์ป้อนจ่ายแบบใบสกรูจะเป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการกำหนดขนาดของกำลังงานที่จะต้องใช้ในการขับเคลื่อนเพลลาของใบสกรู ทำให้ได้ข้อมูลพื้นฐานในการคาดคะเนอัตราการขนถ่าย สำหรับตัวป้อนจ่ายแบบใบสกรู สามารถลดการนำเข้าของอุปกรณ์และเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และเป็นส่งเสริมพัฒนาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุต่อไป

2.7.3 เครื่องอบแห้งทั่วไป

มารีนา (2552) ได้ศึกษาการอบแห้งของสับปะรดแช่อิ่ม ด้วยเครื่องอบแห้งชั้นบางสำหรับทดสอบคุณสมบัติการอบแห้งของสับปะรดแช่อิ่ม โดยทำการอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มที่มีความชื้นเริ่มต้น 70% มาตรฐานแห้ง ควบคุมอุณหภูมิของห้องอบที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C ควบคุมความเร็วของอากาศภายในห้องอบที่ 1 m/s ทุกๆ อุณหภูมิ ทำการวัดน้ำหนักสับปะรดแช่อิ่ม อุณหภูมิของอากาศร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนเพื่อหาอัตราการอบแห้งของสับปะรดแช่อิ่ม เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบาง 5 แบบจำลอง ได้แก่ Lewis Model, Henderson and Pabis Model, Logarithmic Model Page Model, และ Wang and Singh Model ผลจากการอบแห้งของสับปะรดแช่อิ่มด้วยเครื่องอบแห้งชั้นบางพบว่าอัตราการอบแห้งเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงและผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อเปรียบเทียบหาสมการที่เหมาะสมพบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มด้วยเครื่องอบแห้งชั้นบาง คือที่อุณหภูมิ 60°C แบบจำลอง Logarithmic Model และ Page Model มีค่า R^2 χ^2 และ RMSE เท่ากับ 0.990, 0.0005 และ 0.0223 และ 0.990, 0.0005 และ 0.0225 ตามลำดับ

ธีรเดช และคณะ (2550) ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบถาดโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าแบบระบบหมุนเวียนอากาศ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย เครื่องอบแห้งประกอบไปด้วยตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นลอนสามเหลี่ยมกระจกปิดชั้นเดียว ห้องอบแห้งที่มีจำนวนถาด 8 ถาด

ขดลวดไฟฟ้าขนาด 600 วัตต์ 3 ขด พัดลม วาล์วปีกผีเสื้อ ตู้ควบคุมและระบบท่อหมุนเวียนอากาศ โดยได้ทำการทดลองอบแห้งสั้บแชกภายใต้สภาพอากาศของจังหวัดพัทลุง ในการศึกษาได้แบ่งการทดลองออกเป็นกรณีต่างๆ 12 กรณี โดยทำการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 50, 60 และ 70°C และการอบแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า และศึกษาอิทธิพลของการหมุนเวียนอากาศ ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งสั้บแชกแบบใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน ที่อุณหภูมิ 50°C เครื่องอบแห้งจะมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถทำอากาศร้อนได้สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยประมาณ 32.9°C ภายใต้ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 500 W/m² โดยมีประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งประมาณ 25% มีการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งเท่ากับ 8.53 MJ/kgH₂O_{evap} ซึ่งเครื่องอบแห้งสั้บแชกนี้สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งสั้บแชกเหลือเพียง 17 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับ การตากกลางแจ้งของชาวบ้านที่ใช้ระยะเวลา 5-7 วัน

จากการตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการอบของผลปาล์มได้พบปัญหาและแนวทางในการอบผลปาล์ม โดยการประยุกต์ใช้สกรูในการอบแห้งยังไม่ค่อยมีใครศึกษามาก่อน ส่วนมากจะเป็นแบบสกรูลำเลียงที่ใช้ในด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเพื่อการลำเลียงวัตถุดิบต่างๆ และแบบเครื่องอบแห้งทั่วไปพบว่ากระบวนการอบไม่ต่อเนื่องและใช้เวลานาน สำหรับงานวิจัยครั้งนี้มีแนวคิดที่จะนำสกรูมาประยุกต์ใช้พัฒนา กับเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูเพื่อให้สามารถอบผลปาล์มได้สุกสม่ำเสมอทั่วกัน มีอุณหภูมิสม่ำเสมอและอบได้อย่างต่อเนื่อง

บทที่ 3

การทดลองอบผลปาล์มด้วยตู้อบไฟฟ้า

3.1 บทนำ

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึง การศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการเกิดกรดไขมันอิสระและแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว โดยการศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) และการลดของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ได้ทำการอบผลปาล์มจนมีอุณหภูมิภายในเป็น 60, 80, 100, และ 120°C แล้วนำไปวัดอุณหภูมิภายในผลปาล์ม ความชื้น ปริมาณกรดไขมันอิสระ ปริมาณน้ำมันที่บีบได้ และแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำไปใช้ในการออกแบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการวิจัยและผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.2 เครื่องมือวัดและวิธีการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการเกิดกรดไขมันอิสระและแรงกดที่ผลปาล์มเริ่มยุบตัว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ตู้อบไฟฟ้า (Memmert model 400) ใช้ในการอบผลปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.1



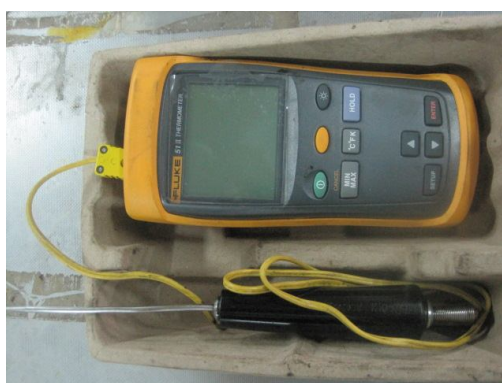
รูปที่ 3.1 ตู้อบไฟฟ้า

2) เครื่องชั่งแบบดิจิทัล (Libror) รุ่น EB-3200H Capacity 3,120 g ความละเอียด 0.01 g เพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนักผลปาล์มมาคำนวณหาปริมาณความชื้นของผลปาล์มก่อนและหลังการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งดิจิทัล

3) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (FLUKE, รุ่น 51II Thermometer, Specification 1-1000°C) ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด k ต่อเข้ากับเทอร์โมมิเตอร์เป็นตัววัดอุณหภูมิภายในผลปาล์มก่อน-หลังการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



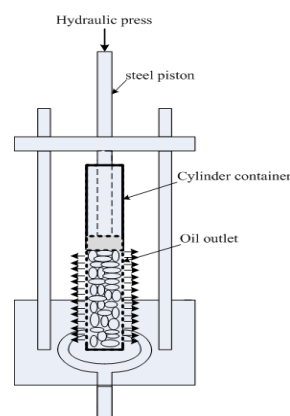
รูปที่ 3.3 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล

4) เครื่องวัดแรงดึงและแรงกด (Force Gauge รุ่น FG-5000A) ช่วงการวัด 0.01 ถึง 49.03 N ใช้วัดแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวก่อนอบและหลังอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดแรงดึงและแรงกด

5) ซูดบีบน้ำมันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ โดยได้สร้างซูดบีบน้ำมันขึ้นเองแล้วนำไปใช้กับเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ เพื่อบีบน้ำมันจากตัวอย่างผลปาล์มที่ผ่านการอบเสร็จแล้ว เพื่อดูปริมาณน้ำมันที่บีบได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ซูดบีบน้ำมันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์

3.2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการเกิด FFA และแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มขูดตัว แบ่งออกเป็น 5 กรณีคือ ที่อุณหภูมิ 30, 60, 80, 100, และ 120°C ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรที่ได้ศึกษามีดังนี้ ปริมาณน้ำมันที่บีบได้ ความชื้น กรดไขมันอิสระ (FFA) และแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มขูดตัว ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการทดลองมีดังต่อไปนี้

- 1) เริ่มจากเตรียมตัวอย่างผลปาล์มร่วนจากหลายเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลปาล์มร่วงจากหลายเดียวกัน

2) นำผลปาล์มร่วงที่เตรียมไว้มาใส่ตะแกรงลวดทำการชั่งน้ำหนักก่อนเข้าสู่อบไฟฟ้าตัวอย่างละ 300 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างผลปาล์มก่อนเข้าสู่อบไฟฟ้า

3) นำผลปาล์มที่เตรียมไว้มาวัดอุณหภูมิภายในผลปาล์ม โดยใช้หัววัดเสียบเข้าไปในผลปาล์มแล้วอ่านค่าด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิดิจิทัล และทำการวัดแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวก่อนการอบและหีบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

วัดอุณหภูมิภายในผลปาล์ม



วัดแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว



รูปที่ 3.8 การวัดอุณหภูมิและแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว

4) นำผลปาล์มเข้าสู่ตู้อบไฟฟ้า แล้วทำการวัดอุณหภูมิของผลปาล์มทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าจะได้อุณหภูมิตามเกณฑ์ที่ศึกษา แล้วมาทำการชั่งน้ำหนักหลังการอบ และทำการบันทึกผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การวัดอุณหภูมิและชั่งน้ำหนักของผลปาล์ม

5) นำผลปาล์มที่ผ่านการอบด้วยตู้อบไฟฟ้าได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการแล้วนำมาบิบน้ำมันด้วยชุดบิบน้ำมันด้วยเครื่องบีบอัดไฮโดรลิกส์ด้วยแรงกดขนาด 2 ตัน ซึ่งขั้นตอนการบิบน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10

ผลปาล์มใส่กระบอกรอก เครื่องอัดไฮโดรลิกส์

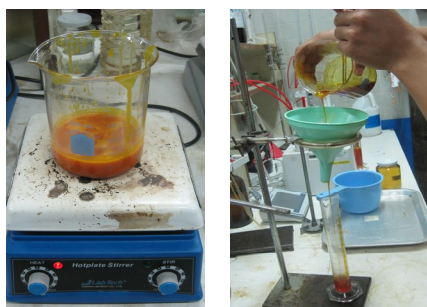


น้ำมันปาล์มดิบ

กากปาล์ม

รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการบิบน้ำมัน

6) นำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการหีบ มาอุ่นให้ความร้อน แล้วทำการชั่งน้ำหนัก วัดปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่บีบได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 แล้วทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่กล่าว มาข้างต้นจนครบทั้ง 5 กรณีศึกษาและบันทึกผลการทดลอง



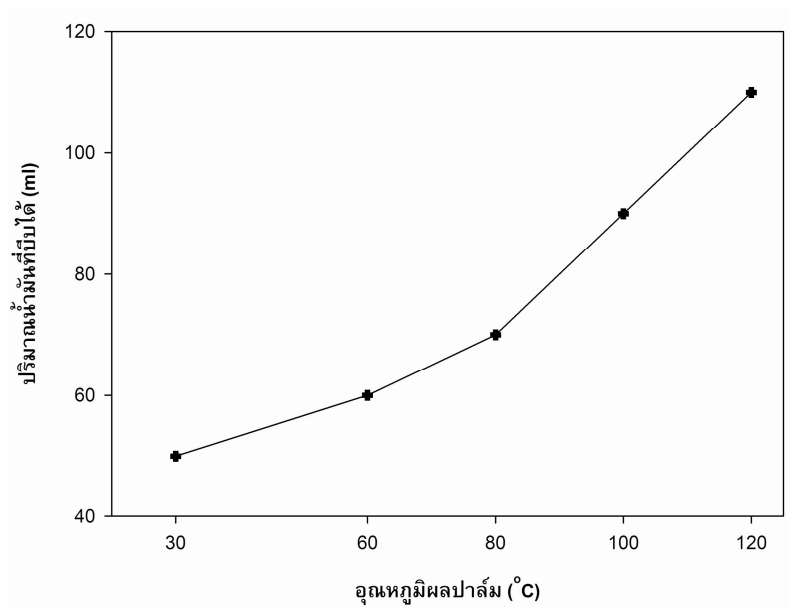
รูปที่ 3.11 การอุ่นและชั่งน้ำหนักวัดปริมาณน้ำมันปาล์ม

7) น้ำมันปาล์มดิบที่บีบได้ในแต่ละเงื่อนไข นำมาทดสอบหาค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรตด้วย NaOH 0.1 molar จนสีเริ่มเปลี่ยน แล้วคำนวณร้อยละของกรดไขมัน Free fatty as Palmitic ดังสมการที่ (3.1) (ปัญญา, 2551)

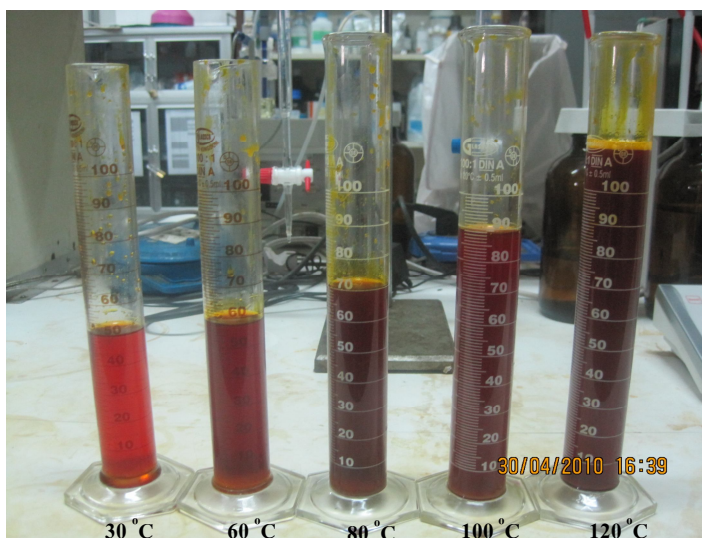
$$FFA (wt.%) = \frac{ml \times N \times 25.6}{g} \quad (3.1)$$

3.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลจากการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำมันที่บีบได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในผลปาล์มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.12 ที่อุณหภูมิต่ำ (ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 30°C) จะได้ปริมาณน้ำมันน้อยที่สุด เนื่องจากผลปาล์มยังไม่ได้รับความร้อน และเมื่อได้รับความร้อนทำให้ปริมาณน้ำมันที่บีบเพิ่มขึ้น แต่ความร้อนที่ให้ควรมิเกิน 120°C เพราะจะทำให้ผลปาล์มไหม้ซึ่งมีผลต่อคุณภาพปริมาณน้ำมัน ดังแสดงใน รูปที่ 3.13 ซึ่งเปรียบเทียบสีของน้ำมันที่อุณหภูมิผลปาล์มต่างๆ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิผลปาล์ม 120°C น้ำมันที่ได้จะมีสีต่างจากที่อุณหภูมิอื่นๆ



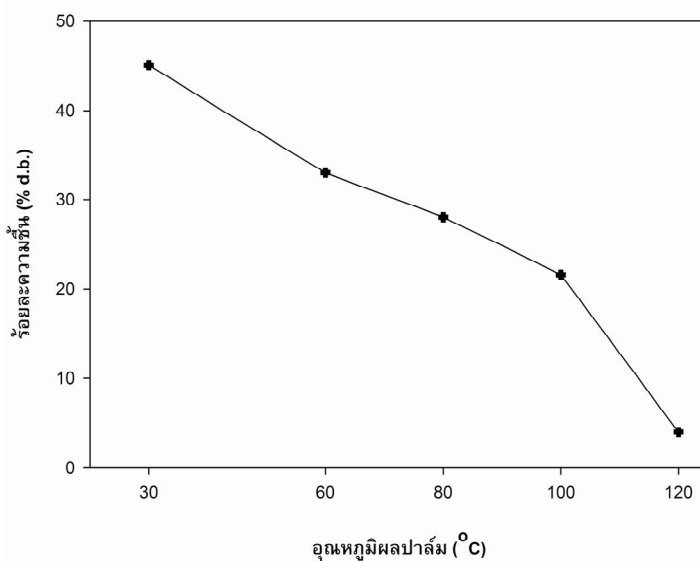
รูปที่ 3.12 ปริมาณน้ำมันจากการบีบที่ได้



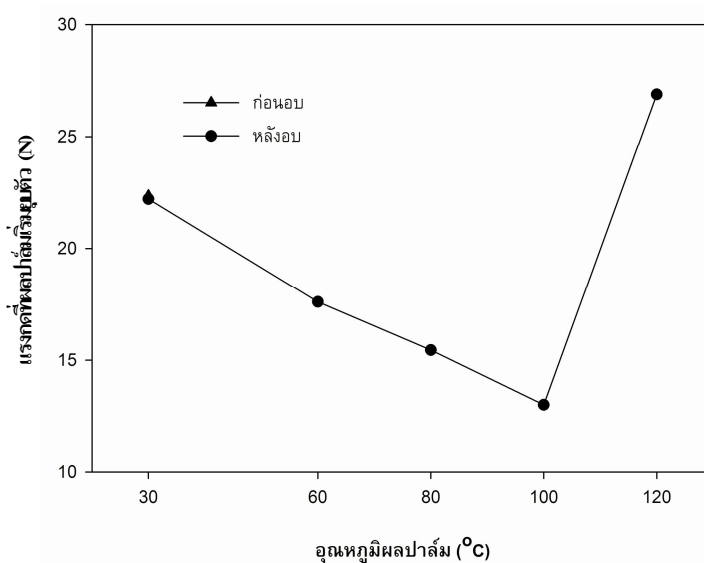
รูปที่ 3.13 สีของน้ำมันที่บีบได้

รูปที่ 3.14 แสดงความชื้นที่เหลือในผลปาล์มเมื่อผลปาล์มมีอุณหภูมิต่างๆ พบว่า ความชื้นในผลปาล์มลดลงอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิในผลปาล์มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออุณหภูมิในผลปาล์มเพิ่มขึ้นจาก 100°C เป็น 120°C ความชื้นในผลปาล์มลดลงถึงร้อยละ 20 จากร้อยละ 23 เหลือเพียงร้อยละ 3 จนส่งผลต่อแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวก่อนอบที่อุณหภูมิบรรยากาศมีค่าเฉลี่ยที่ 22 N เมื่ออุณหภูมิผล

ปาล์มสูงขึ้น แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวและมีค่าต่ำที่สุดที่ 13 N ที่อุณหภูมิผลปาล์ม 100°C ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 60 และหากอุณหภูมิผลปาล์มยังคงสูงขึ้นอีก แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวก็จะสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 120°C แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวเท่ากับ 27 N เนื่องจาก การให้ความร้อนต่อผลปาล์ม มีผลให้ผลปาล์มสุกและนิ่ม ทำให้แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวลดลง แต่ถ้าผลปาล์มได้รับความร้อนต่อและมีอุณหภูมิสูงเกินไปก็มีผลให้ผลปาล์มไหม้ และทำให้แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวเพิ่มขึ้น

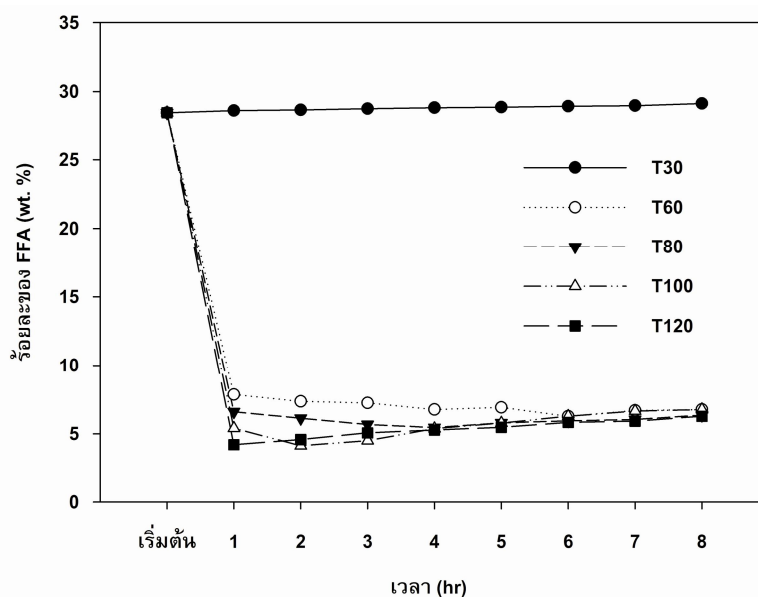


รูปที่ 3.14 ความชื้นของผลปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.15 แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว

ผลของกรดไขมันอิสระ (FFA) พบว่า ร้อยละของ FFA ในน้ำมันที่บีบได้จากผลปาล์มที่ตั้งทิ้งไว้ในบรรยากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากเริ่มต้นที่ 28.47% เป็น 29.14% เมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 การเพิ่มขึ้นของ FFA เนื่องจากกรดไขมันทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ เกิดการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ แต่ในการทดลองนี้ตั้งผลปาล์มทิ้งไว้ในบรรยากาศเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงซึ่ง เป็นระยะเวลาที่สั้น จึงมีผลทำให้ FFA มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ไม่เห็นผลแตกต่างมากนัก และอาจเป็นเพราะว่าการทดลองเก็บผลปาล์มสด ได้กระจายผลปาล์มออกทำให้อากาศถ่ายเทสะดวกไม่มีการหมักบ่ม ผลปาล์มเน่าเสียช้ากว่าปกติ การนำผลปาล์มไปอบ จนอุณหภูมิในผลปาล์มเพิ่มขึ้นเป็น 60, 80, 100, และ 120°C ทำให้ร้อยละของ FFA ลดลงอย่างมาก โดยค่าร้อยละของ FFA ต่ำที่สุดคือ 4.13 wt.% ที่อุณหภูมิในผลปาล์ม 100°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิผลปาล์มเพิ่มขึ้น มีผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลน้ำมันปาล์ม (triglyceride) เกิดการแตกตัวเป็นกลีเซอรอล (glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งในช่วงแรกๆ triglyceride จะแตกตัวเป็น glycerol ในสัดส่วนที่มาก มีผลทำให้สัดส่วนร้อยละของ FFA น้อย แต่หากคงอุณหภูมิในผลปาล์มไว้เป็นเวลานาน จะทำให้ร้อยละของ FFA เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



รูปที่ 3.16 ร้อยละของ FFA น้ำมันที่บีบได้

3.4 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระและการลดของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวสามารถสรุปได้ว่า การอบผลปาล์มจนให้มีอุณหภูมิภายในผลปาล์มเป็น 100°C จะทำให้แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวลดลงต่ำสุดเหลือ 13 N หรือลดลงเหลือ 60% ของแรงกดเริ่มต้น และมีค่าร้อยละของ FFA ในน้ำมันที่บีบได้ต่ำสุดที่ FFA ร้อยละ 4.13 wt.% จึงกล่าวโดยสรุปได้ว่า การอบผลปาล์มให้มีอุณหภูมิ 100°C และคงไว้ 1-2 ชั่วโมง มีผลให้แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวและ FFA ในน้ำมันที่บีบได้ต่ำที่สุด จากข้อสรุปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

4.1 แนวคิดและการทำงานของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

แนวคิดในการออกแบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู เป็นการออกแบบต่อเนื่อง โดยใช้ออบผลปาล์มร่วงในระดับชุมชนหรือครัวเรือน ช่วยให้ผลปาล์มที่ผ่านการอบมีผิวที่นุ่ม และช่วยกระจายอุณหภูมิภายในผลปาล์มอย่างสม่ำเสมอ ส่วนประกอบของระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู โดยพิจารณาออกแบบเป็นส่วนหลักๆ ที่สำคัญออกเป็น 3 ส่วน คือ โครงสร้างของตัวเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ระบบส่งอากาศร้อน และระบบส่งกำลังโดยภายในห้องอบมีสกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.255 เมตร ยาว 310 เมตร เพื่อลำเลียงผลปาล์มร่วงไปพร้อมกับการอบซึ่งระบบจะมีการหมุนเวียนด้วยลมร้อนโดยอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบไม่เกิน 120°C ซึ่งแต่ละส่วนประกอบด้วย

โครงสร้างของตัวเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

- 1) สกรูลำเลียง
- 2) รางของสกรู
- 3) กระบะช่องทางเข้าผลปาล์ม
- 4) ช่องทางออกผลปาล์ม
- 5) ช่องอากาศลมร้อน เข้า-ออก
- 6) โครงเหล็กรับตัวเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

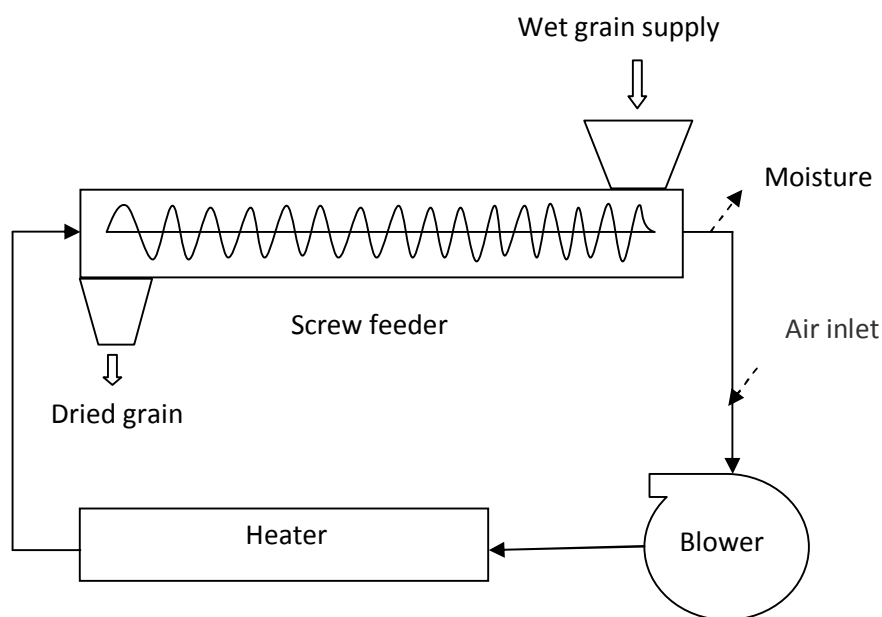
ระบบส่งความร้อน มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

- 1) โบลเวอร์ ใช้เป่าลมร้อนเพื่อส่งไปยังห้องอบ
- 2) ฮีตเตอร์ ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า
- 3) ถังใสฮีตเตอร์
- 4) ผู้ควบคุมระบบความร้อน

ระบบส่งกำลัง มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

- 1) ต้นกำลัง
- 2) ระบบส่งกำลัง
- 3) อุปกรณ์ควบคุม

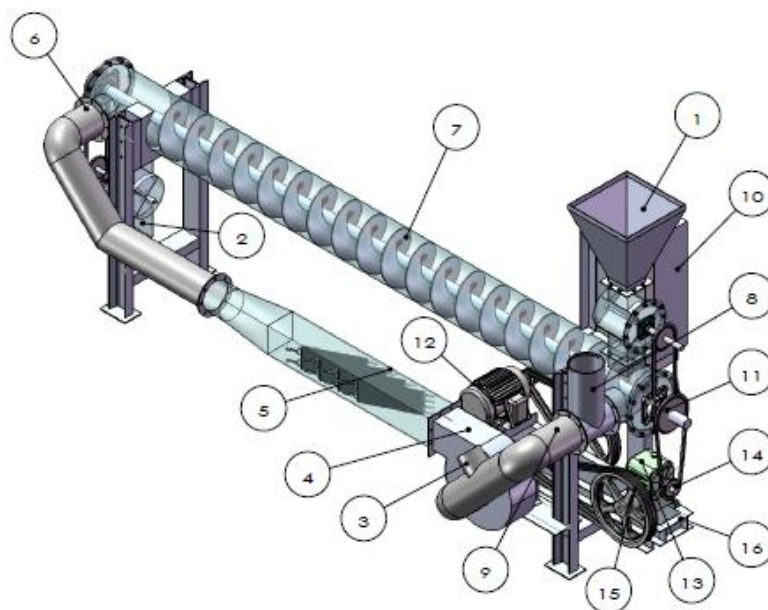
การทำงานของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู เริ่มจากใส่ผลปาล์มลงในกระบะช่องทางเข้า แล้วใช้สกรูลำเลียงผลปาล์มไปสัมผัสกับลมร้อน ที่มีโบลเวอร์เป่าผ่านฮีทเตอร์ ลักษณะการเป่าลมร้อนเป็นแบบสวนทางกับการเคลื่อนที่ของผลปาล์ม โดยมีการหมุนเวียนลมร้อนกลับเข้าภายในห้องอบ มีบางส่วนระบายอากาศขึ้นออกและมีช่องเติมอากาศเข้าเพื่อแลกเปลี่ยนภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการทำงานของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

4.2 ส่วนประกอบของระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

จากการคำนวณและออกแบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู รายละเอียดของการคำนวณต่างๆ ปรากฏอยู่ในภาคผนวก ก. และส่วนประกอบต่างๆ ของระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และรายละเอียดของส่วนต่างๆ ปรากฏอยู่ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

จากรูปที่ 4.2 สามารถอธิบายส่วนประกอบของระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู
ได้ดังนี้

- | | |
|-------------------------------|-----------------------|
| 1. ช่องทางเข้าผลปาล์ม | 7. ห้องอบ |
| 2. ช่องทางออกผลปาล์ม | 8. ช่องทางอากาศออก |
| 3. ช่องทางอากาศเข้า | 9. ทางอากาศหมุนเวียน |
| 4. Blower | 10. ตู้ควบคุมการทำงาน |
| 5. Heater | 11. เพลาสกรู |
| 6. ช่องทางอากาศร้อนเข้าห้องอบ | 12. มอเตอร์ |
| 13. เกียร์ทด | 14. เฟืองโซ่ |
| 15. มู่เลย์และสายพาน | 16. ฐานรองชุดส่งกำลัง |

จากรูปที่ 4.2 ห้องอบประกอบด้วย ท่อเหล็กขนาด 25.5 เซนติเมตร (วัดด้านใน) ยาว 310 เซนติเมตร ใบเกลียวสกรูลำเลียงวัดนอก ขนาด 25 เซนติเมตร (เล็กกว่าท่อ 0.5 เซนติเมตร) เพลาโต 6 เซนติเมตร และระยะพิตช์ของใบเกลียว 10 เซนติเมตร ใช้แผ่นเหล็กหนา 0.5 เซนติเมตร เพลาของใบเกลียวจะใช้ท่อขนาด 2 นิ้ว เพื่อลดน้ำหนักส่วนปลายของเพลาจะใช้เหล็กเพลาตัน ชุดสร้างลมร้อน ประกอบด้วย ฮีตเตอร์ เป็นตัวให้ความร้อน ขนาด 1,000 วัตต์ จำนวน 8 ตัว อยู่ภายใน

ท่อสี่เหลี่ยม ขนาด 18x20 เซนติเมตร วางฮีตเตอร์เอียงทำมุมกับท่อประมาณ 45 องศา โบลเวอร์ ขนาดมอเตอร์ 1 แรงม้า 1 เฟส ท่อส่งอากาศร้อน ใช้ท่อกลมขนาด 6 นิ้ว ชุดทางเข้า-ออก ผลปาล์ม เป็นชุดใบกวาดผลปาล์มเข้าท่ออบและชุดใบกวาดผลปาล์มออกจากท่ออบ เพื่อต้องการไม่ให้อากาศ ร้อนไหลออกมา ชุดใบกวาดประกอบด้วย ท่อขนาด 20 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร ใบกวาดใช้ เหล็กเชื่อมติดกับเพลานขนาด 1 นิ้ว จำนวน 4 ใบ ความเร็วรอบในการกวาด 0.5 รอบต่อนาที การ อบแห้งผลปาล์มต้องการให้ผลปาล์มอยู่ในท่ออบเป็นเวลานานจึงออกแบบให้ สกรูเกลียวหมุนด้วยความเร็วประมาณ 0.5 รอบต่อนาที ชุดส่งกำลังประกอบด้วย มอเตอร์ 3 แรงม้า 3 เฟส ความเร็วรอบ 1,440 รอบต่อนาที เกียร์ทด เบอร์ 80 อัตราทด 1:60 รอบมูเลย์ ร่อง B 2 ร่อง ขนาด 14 นิ้ว จำนวน 2 อัน มูเลย์ ร่อง B2 ร่อง ขนาด 3 นิ้ว จำนวน 2 อัน เฟืองโซ่ เบอร์ 50 จำนวนฟัน 34 ฟัน 1 อัน เฟืองโซ่ เบอร์ 50 จำนวนฟัน 22 ฟัน 1 อัน ชุดควบคุมการทำงาน ประกอบด้วย สวิตช์ เปิด-ปิด มอเตอร์ขับเคลื่อน สวิตช์ เปิด-ปิด โบลเวอร์ เป่าอากาศร้อน สวิตช์เปิด-ปิด ฮีตเตอร์ 3 อันๆ ละ 1,000 วัตต์ โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิในการควบคุมการ เปิด-ปิด ฮีตเตอร์ โดยใช้ เบรกเกอร์ 1 ตัว ควบคุม ฮีตเตอร์ 1 อัน ซึ่งมี ฮีตเตอร์ 5 อัน ซึ่งรูปส่วนประกอบต่างๆ ปรากฏอยู่ในภาคผนวก ข.

4.3 การวางแผนการทดลอง

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู โดยค่า Response ที่สนใจศึกษามี 4 ตัว คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว (F_{palm}) ปริมาณน้ำมันที่ได้ (Yield) และปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) โดยการใช้วิธี Response Surface Methodology, RSM และออกแบบแผนการทดลองแบบ Central Composite Design, CCD เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และรูปแบบสมการการทำนายความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรอิสระ คือ อุณหภูมิลมร้อน (T) อัตราการป้อนผลปาล์ม (m) และเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้ง (v) ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	ขอบเขตของตัวแปรอิสระ	หน่วย
อุณหภูมิลมร้อน	$(90 \leq T \leq 130)$	°C
อัตราการป้อนผลปาล์ม	$(20 \leq m \leq 40)$	kg/hr
เปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้ง	$(0 \leq v \leq 20)$	%

การออกแบบแผนการทดลองแบบ Central Composite Design, (CCD) เป็นเทคนิคหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์หาพื้นผิวตอบสนอง โดยทั่วไปการวางแผนการทดลองแบบ CCD ประกอบด้วย 2^k factorial ในแนวแกนหรือรูปดาว ในกรณีที่มีการทดลองมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร 2^k factorial จะประกอบด้วย (-1,-1), (+1,-1), (-1,+1), (+1,+1) 2^k factorial ในแนวแกนหรือรูปดาวจะประกอบด้วย (- α ,0), (+ α ,0), (0,- α), (0,+ α) และที่จุดศูนย์กลางจะมีการกระทำซ้ำ 4-6 การทดลองของแต่ละตัวแปรอิสระ ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ดังนั้นจะประกอบด้วย 5 ระดับของแต่ละปัจจัย คือ (-1.68, -1, 0, +1, +1.68) หรือสามารถหาจุดแกนของระดับในแต่ละตัวแปรอิสระที่ทำการทดลองได้จากสมการที่ 4.14 (Theppaya and Prasertsan, 2004)

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (4.14)$$

โดย α คือจุดแกน, k คือจำนวนตัวแปรอิสระ

การออกแบบแผนการทดลองแบบ CCD 3 ตัวแปรอิสระมี 5 ระดับของตัวแปร โดยการใช้โปรแกรม essential experimental design and essential regression version 2.209 จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอบแบบสกรูสำหรับอบผลปาล์ม และหารูปแบบสมการการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่สนใจ คือ อุณหภูมิลมร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศที่ส่งผลต่อ Response ทั้ง 4 ตัว คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว (F_{palm}) ปริมาณน้ำมันที่ได้ (Yield) และปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) ซึ่งได้สรุปช่วงและระดับของตัวแปรอิสระที่จะทำการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.5 และได้แสดงแผนการทดลองที่สถานะต่างๆ ตามช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และได้แสดงการปรับช่องทางเปิดระบายอากาศออกตามอัตราการป้อนผลปาล์มตามแผนการทดลองทั้ง 18 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.2 ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	หน่วย	ระดับของตัวแปรอิสระ				
		-1.68	-1	0	1	1.68
อุณหภูมิความร้อน (T)	°C	90	98	110	122	130
อัตราการป้อนผลปาล์ม (m)	kg/hr	20	24	30	36	40
เปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้ง (v)	%	0	4	10	16	20

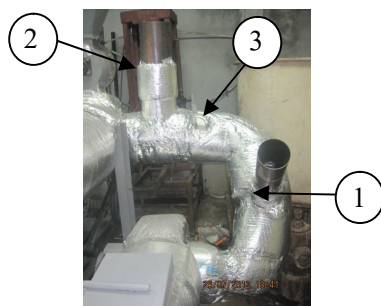
ตารางที่ 4.3 แผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ

การทดลองที่	T: อุณหภูมิความร้อน (°C)	m: อัตราการป้อนผลปาล์ม (kg/hr)	v: ระบายอากาศทิ้ง (%)
1	-1.68 (90)	0 (30)	0 (10)
2	0 (110)	-1.68 (20)	0 (10)
3	0 (110)	0 (30)	0 (10)
4	0 (110)	0 (30)	1.68 (20)
5	0 (110)	0 (30)	0 (10)
6	-1 (98)	1 (36)	1 (16)
7	0 (110)	0 (30)	0 (10)
8	-1 (98)	1 (36)	-1 (4)
9	0 (110)	1.68 (40)	0 (10)
10	1 (122)	1 (36)	-1 (4)
11	1 (122)	1 (36)	1 (16)
12	-1 (98)	-1 (24)	-1 (4)
13	0 (110)	0 (30)	-1.68 (0)
14	1 (122)	-1 (24)	-1 (4)
15	1 (122)	-1 (24)	1 (16)
16	-1 (98)	-1 (24)	1 (16)
17	0 (110)	0 (30)	0 (10)
18	1.68 (130)	0 (30)	0 (10)

ตารางที่ 4.4 ช่องทางเปิดระบายอากาศออกตามอัตราการป้อนผลปาล์ม

การทดลองที่	T: อุณหภูมิ ลมร้อน (°C)	m: อัตราการป้อนผลปาล์ม (kg/hr)	v: ระบายอากาศทิ้ง (%)	มูม เปิด-ปิด (องศา)		
				วาล์ว ตัวที่ 1 (อากาศเข้า)	วาล์ว ตัวที่ 2 (อากาศออก)	วาล์ว ตัวที่ 3 (อากาศหมุนเวียน)
1	90	30	10	90	90	30
2	98	24	4	90	90	35
3	98	24	16	90	90	30
4	98	36	4	90	90	30
5	98	36	16	90	90	25
6	110	20	10	90	90	40
7	110	30	10	90	90	30
8	110	30	10	90	90	30
9	110	30	10	90	90	30
10	110	30	10	90	90	30
11	110	30	20	90	90	25
12	110	30	0	0	0	90
13	110	40	10	90	90	20
14	122	24	4	90	90	35
15	122	24	16	90	90	30
16	122	36	4	90	90	30
17	122	36	16	90	90	25
18	130	30	10	90	90	30

หมายเหตุ: มูม 90 องศา วาล์วเปิด มูม 0 องศา วาล์วปิด และตำแหน่งวาล์ว ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งวาล์ว และมูม เปิด-ปิด ของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

4.4 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์

วิธี response surface methodology, RSM เป็นวิธีหนึ่งในการหารูปแบบสมการของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระ โดยใช้วิธี multiple regression ในการวิเคราะห์หารูปแบบ second-order model ดังแสดงในสมการที่ 4.15 (Ghadge และคณะ, 2006)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.15)$$

โดยที่ y คือค่าผลตอบสนอง k คือจำนวนตัวแปรอิสระ, β_0 , β_i , β_{ii} , β_{ij} คือค่าคงที่ สัมประสิทธิ์ของพจน์ ตัวแปรกำลังหนึ่ง ตัวแปรกำลังสอง และตัวแปรร่วม ตามลำดับ

ผลการทดลองที่ได้ สามารถนำไปหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระที่ศึกษา ซึ่งสมการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระทั้ง 4 ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี multiple regression ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หลังจากได้สมการทำนายความสัมพันธ์แล้ว จึงพิจารณาสมการโดยตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งสังเกตได้จากค่า P -value ถ้า P -value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อสมการ ให้เหลือเพียงพจน์ที่มีค่า P -value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าพจน์ดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ และได้สมการความสัมพันธ์ที่ได้มาทดสอบค่า F -test เพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการความสัมพันธ์ โดยจะตัดสินใจเพื่อปฏิเสธสมมติฐานหลัก ถ้าค่าสถิติเอฟที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่า $F_{critical}$ หรือ $F_0 > F_{\alpha, i, n-1}$ โดยที่ α คือ 0.05 (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%), i คือจำนวนพจน์ทั้งหมดของสมการความสัมพันธ์ ยกเว้น β_0 และ n คือจำนวนการทดลอง โดยค่า $F_{critical}$ ได้จากการเปิดตารางเอฟ (ได้แสดงตารางเอฟในภาคผนวก ง) และรูปแบบสมการที่ได้จะนำไปสร้างกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) ของผลตอบสนองกับเงื่อนไขการทดลองในช่วงการแปรค่าตัวแปรอิสระ (กฤษ, 2551)

4.5 ขั้นตอนการทดลองและเก็บข้อมูล

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดระหว่างการทดลองในการทดลองนี้ คือ ความชื้น อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ปริมาณน้ำมันที่บีบได้ ปริมาณ FFA และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เตรียมตัวอย่างผลปาล์ม

1.1) สุ่มเก็บตัวอย่างผลปาล์มร่วงในกองปริมาณ 500 กรัม และนำไปอบด้วยเตาอบไฟฟ้า (Memmert model 400) ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 120°C ใช้เวลาอบประมาณ 48 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักผลปาล์มที่อบลดลงต่ำกว่า 0.01 กรัมต่อชั่วโมง ซึ่งโดยตาชั่งดิจิทัล (LIBROR รุ่น EB-3200H Capacity 3,120 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม) เพื่อหาความชื้นเริ่มต้นของผลปาล์มก่อนอบ

1.2) ชั่งน้ำหนักผลปาล์มที่ใช้ทดลองกับเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

1.3) ทำการสุ่มวัดอุณหภูมิและแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวในกองปาล์มที่ชั่งเตรียมไว้ และบันทึกผลก่อนทำการอบด้วยเครื่องอบ

2) เตรียมความพร้อมของเครื่องอบ

2.1) ทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล เข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิและเชื่อมต่อเข้ากับ คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงและบันทึกผลการวัดอุณหภูมิ

2.2) เปิดสวิตช์ควบคุมไฟฟ้า พร้อมกับเปิดสวิตช์โบลเวอร์ แล้วทำการปรับช่องทางการไหลของอากาศให้ได้เปอร์เซ็นต์ระบายอากาศที่ตามที่ต้องการ

2.3) ทำการอุ่นเครื่องอบ โดย เปิดสวิตช์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature indicating controller) แล้วตั้งค่าอุณหภูมิตามการทดลอง แล้ว เปิด-ปิดสวิตช์ฮีตเตอร์ปรับอุณหภูมิตามต้องการ จนกว่าอุณหภูมิเครื่องอบคงที่

2.4) เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ เปิดสวิตช์มอเตอร์ชุดอุปกรณ์ลำเลียงผลปาล์มที่ความเร็วรอบเพลาสกรู 0.5 rpm/min

3) นำตัวอย่างผลปาล์มที่เตรียมไว้มาเริ่มอบ โดยบรรจุลงถึงพักเมล็ดส่วนบน บริเวณเครื่องอบจนหมด พร้อมทั้งจดบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบผลปาล์มก่อนอบ

4) ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างผลปาล์มที่ผ่านการอบจากด้านล่างเป็น 4 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 1 กิโลกรัม ใส่ภาชนะที่เก็บความร้อนได้เพื่อนำตัวอย่างไปบีบดูปริมาณน้ำมัน

5) ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างผลปาล์มที่ผ่านการอบตัวอย่างละ 500 กรัม เพื่อมาตรวจสอบหาปริมาณความชื้นสุดท้ายหลังอบ ดังขั้นตอนที่ 1.1

6) ทำการสุ่มวัดอุณหภูมิและแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว หลังอบดั่งขั้นตอนที่ 1.3 พร้อมทั้งจดบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบผลปาล์มหลังอบ

7) นำผลปาล์มที่ผ่านการอบแล้วที่ได้ลักษณะเก็บความร้อนไว้ไปบีบหาปริมาณน้ำมัน โดยชุดบีบน้ำมันด้วยเครื่องบีบอัดไฮดรอลิกส์ด้วยแรงกดขนาด 2 ตัน

8) นำน้ำมันปาล์มดิบที่บีบได้ มาทดสอบหาค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรต ด้วย NaOH 0.1 molar จนสีเริ่มเปลี่ยน แล้วคำนวณร้อยละของกรดไขมัน Free fatty as Palmitic ดังสมการที่ (4.16)

$$FFA (wt.%) = \frac{ml \times N \times 25.6}{g} \quad (4.16)$$

กำหนดให้

FFA คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมัน (wt.%)

ml คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต (ml)

N คือ ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (molar)

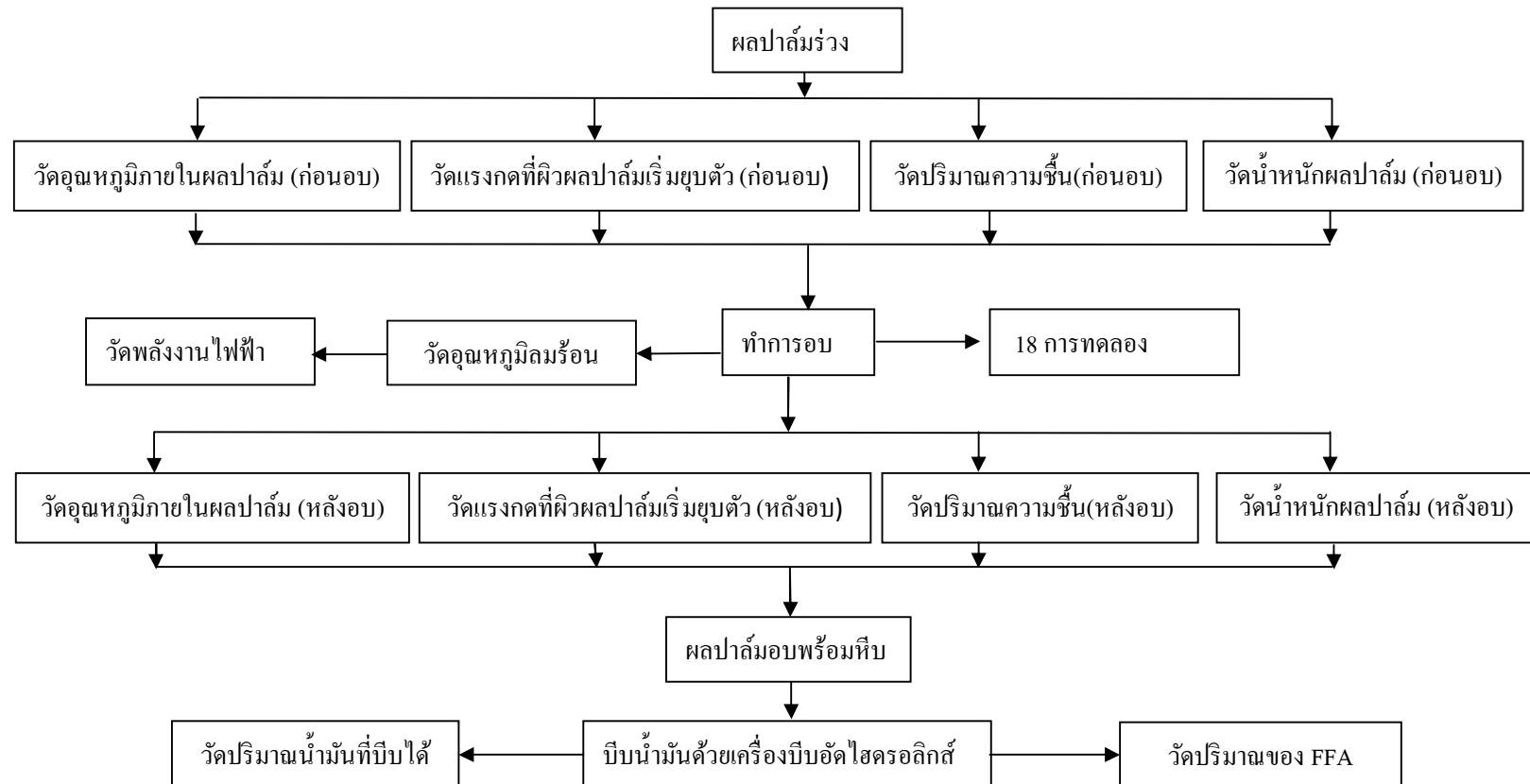
g คือ น้ำหนักน้ำมัน (g)

9) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-9 จนครบทั้ง 18 การทดลอง ตามเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 4.7 ข้างต้น

10) นำข้อมูลที่เก็บจากการทดลองมาวิเคราะห์ผล โดยขั้นตอนการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 4.4-4.5



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 4.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง

บทที่ 5

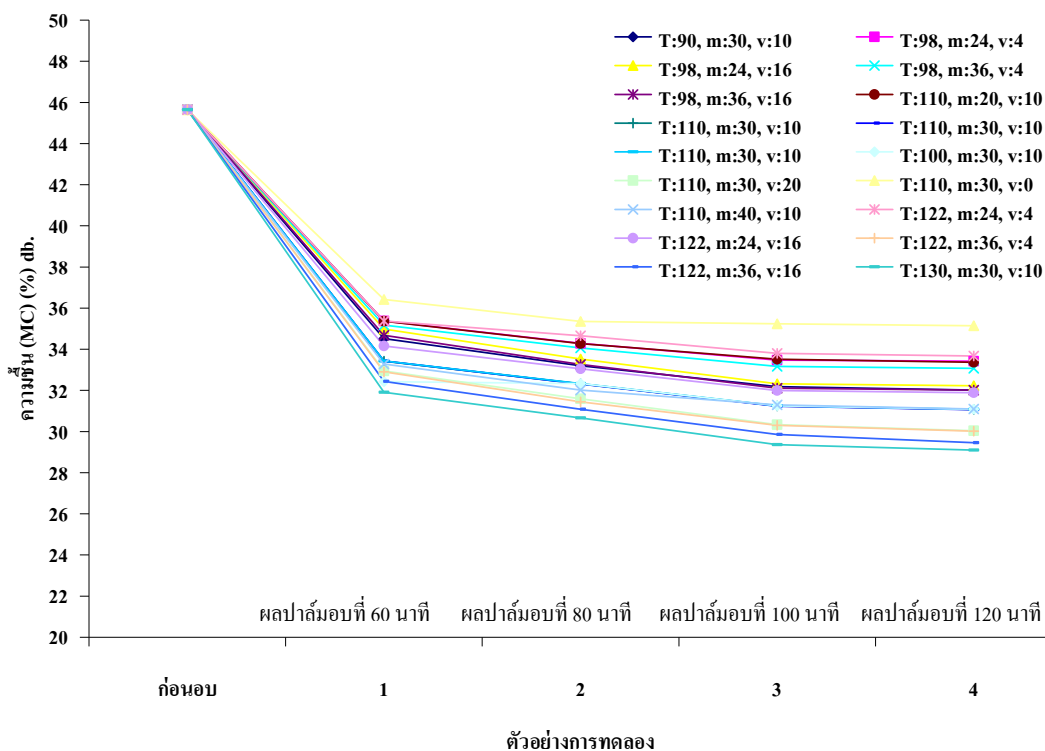
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

5.1 ผลการทดลองอบผลปาล์ม

การทดลองเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูตามแผนการทดลองข้างต้น ซึ่งข้อมูลพื้นฐานที่ระหว่างการทดลอง คือ ความชื้น อุณหภูมิผลปาล์ม แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ปริมาณน้ำมันที่หีบได้ ปริมาณร้อยละ FFA และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ โดยผลรายละเอียดการทดลองแสดงในตารางที่ 1-18 ภาคผนวก ฉ. และสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงค่าต่างๆ ทั้ง 18 การทดลองเปรียบเทียบกัน ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของความชื้นผลปาล์ม

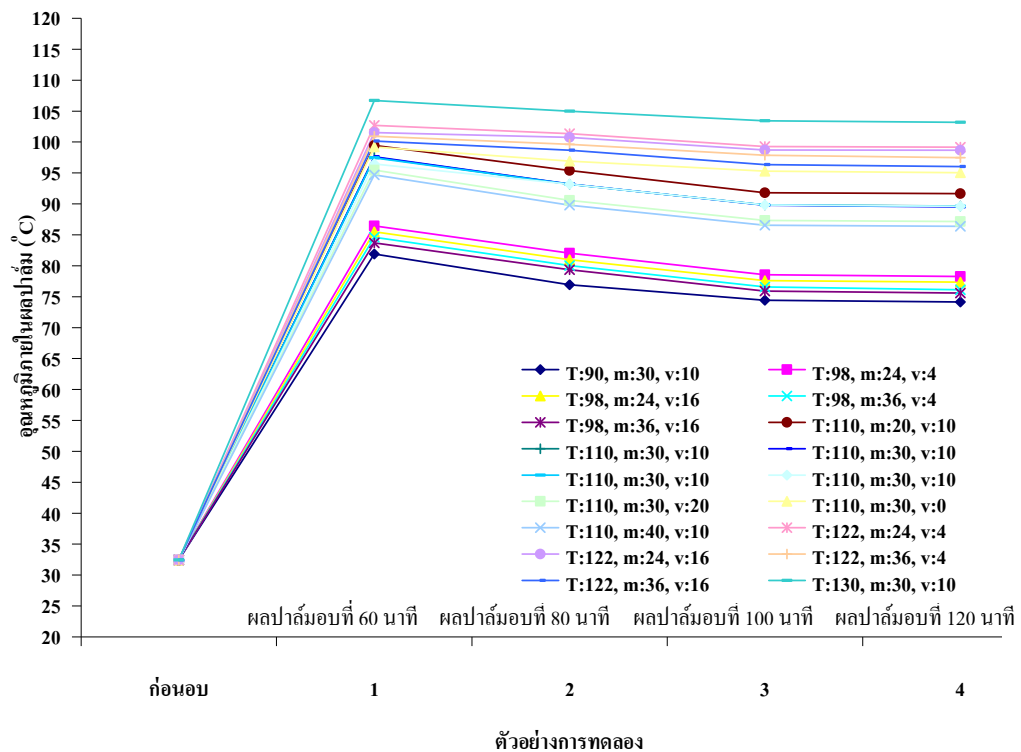
รูปที่ 5.1 แสดงผลความชื้นที่เหลือในผลปาล์มทั้ง 18 การทดลอง พบว่า ความชื้นในผลปาล์มเริ่มต้น (ก่อนอบ) เฉลี่ยเท่ากับ 45.65%db และเมื่อทำการอบผลปาล์ม และสุ่มตัวอย่างที่ 4 ตัวอย่าง (ช่วงเวลาที่ผลปาล์มออกจากเครื่องอบห่างกันตัวอย่างละ 20 นาที) พบว่า ความชื้นในผลปาล์มลดลงเป็นแนวโน้มลักษณะเดียวกันทั้ง 18 การทดลอง โดยที่สภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr และไม่ระบายอากาศทิ้ง มีความชื้นในผลปาล์มลดลงน้อยที่สุดเหลือความชื้นหลังอบเฉลี่ยเท่ากับ 35.54%db ซึ่งลดลงจากเริ่มต้น 10.11%db และที่สภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิร้อน 130°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 10% มีความชื้นในผลปาล์มลดลงมากที่สุด โดยหลังอบมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 30.26%db ลดลงจากเริ่มต้น 15.39%db ความชื้นของผลปาล์มที่ลดลงน้อย เป็นผลมาจากช่วงเวลาในการอบสั้น โดยผลปาล์มอยู่ในเครื่องอบเพียง 60 นาที



รูปที่ 5.1 ผลของความชื้นผลปาล์ม

5.1.2 ผลของอุณหภูมิภายในผลปาล์ม

รูปที่ 5.2 แสดงผลของอุณหภูมิภายในผลปาล์มทั้ง 18 การทดลอง พบว่า อุณหภูมิภายในผลปาล์มเริ่มต้น (ก่อนอบ) เฉลี่ยเท่ากับ 32.44°C และเมื่ออบผลปาล์ม ทำให้อุณหภูมิภายในผลปาล์มเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 81.90-106.70°C ในตัวอย่างที่ 1 จากนั้นอุณหภูมิลดลงเล็กน้อยในตัวอย่างที่ 2-4 และมีแนวโน้มเดียวกันทุกๆ การทดลอง สาเหตุที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากในช่วงแรกที่ผลปาล์มเริ่มเข้าเครื่องอบ อุณหภูมิของเครื่องอบสูงและความร้อนสะสมในเครื่องอบมาก (มีการอุ่นเครื่องอบจนอากาศมีอุณหภูมิที่กำหนดจึงจะเริ่มใส่ผลปาล์ม) ผลปาล์มในช่วงแรกจึงได้รับความร้อนมากทำให้มีอุณหภูมิสูง เมื่อผลปาล์มเข้าเครื่องอบมากขึ้นความร้อนสะสมในเครื่องอบลดลงผลปาล์มจึงได้รับความร้อนน้อยลง อุณหภูมิจึงลดลงเล็กน้อยในตัวอย่างที่ 2 และระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวในช่วงตัวอย่างที่ 3 และ 4 อุณหภูมิในผลปาล์มจึงคงที่



รูปที่ 5.2 ผลของอุณหภูมิภายในผลปาล์ม

5.1.3 ผลอุณหภูมิอากาศร้อน

อุณหภูมิอากาศร้อนในระหว่างการทดลอง แสดงในรูปที่ ข.1-ข.18 ปรากฏอยู่ในภาคผนวก ข. โดยมีแนวโน้มลักษณะของกราฟอุณหภูมิลมร้อนเป็นไปแบบเดียวกัน เมื่อเริ่มอุ่นเครื่องอบจนอุณหภูมิลมร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ คงที่ คือเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิที่ตำแหน่งอุณหภูมิต่างๆ (T₁) กับตำแหน่งอุณหภูมิต่างๆ (T₂) โดยเฉลี่ยผลต่างไม่เกิน 5°C (เนื่องจากเกิดสูญเสียความร้อนภายในระบบส่วนของโครงสร้างหลักของตัวเครื่อง โดยเฉพาะส่วนเพลลาของสกรู ซึ่งเป็นส่วนไม่สามารถหุ้มฉนวนได้) เมื่อใส่ผลปาล์มอย่างต่อเนื่อง พบว่า ช่วงแรกคือตั้งแต่ นาทีที่ 0-60 อุณหภูมิลมร้อนลดลงเรื่อยๆ จนถึงในนาทีที่ 60 เพราะอากาศร้อนภายในระบบถ่ายเทความร้อนและสะสมความร้อนภายในผลปาล์มที่ใส่ลงไป หลังจากนั้นที่ 60 อุณหภูมิลมร้อนจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงในนาทีที่ 120 เพราะผลปาล์มออกจากเครื่องอบทำให้มีผลปาล์มในเครื่องอบน้อยลง โดยเวลาช่วง 0-120 นาที เป็นช่วงเวลาของการอบผลปาล์ม ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนผลปาล์ม ทำให้อุณหภูมิลมร้อนในการอบลดต่ำลง

5.2 ผลการหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์

5.2.1 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ผลจากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะ แสดงผลการทดลองในตารางที่ 5.1 และสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับตัวแปรอิสระตามสมการ quadratic polynomial โดยใช้วิธี multiple regression ดังแสดงในสมการที่ 5.1

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับตัวแปรอิสระก่อนพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ (ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ในภาคผนวก จ)

$$SEC = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (Tm) + \beta_6 (Tv) + \beta_7 (m^2) + \beta_8 (mv) + \beta_9 (v^2) \quad (5.1)$$

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับตัวแปรอิสระหลังจากพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ (ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ในภาคผนวก จ)

$$SEC = \beta_0 + \beta_1 (m) + \beta_2 (T^2) + \beta_3 (Tm) + \beta_4 (Tv) + \beta_5 (m^2) \quad (5.2)$$

สมการที่ 5.1 จะต้องพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ก่อน โดยตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งสังเกตได้จากค่า P-value ถ้า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อสมการ ให้เหลือเพียงพจน์ที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หลังจากพิจารณาค่า P-value จึงได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5.2 และได้ผลแสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการในตารางที่ 5.2 โดยสมการทำนายค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ มีค่า coefficient of multiple determination, $R^2 = 0.978$ และมีค่า $R^2_{\text{adjusted}} = 0.969$ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ มีค่า P-value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าตัวแปรอิสระดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ได้ และได้นำสมการทำนายความสัมพันธ์ได้มาทดสอบค่า F-test ผลปรากฏว่า ค่า $F_0 = 106.78$ (จากสมการ) มีค่ามากกว่า $F_{\text{critical}} = 3.11$ (จากตาราง $f_{0.05,5,12}$ ในภาคผนวก ง) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิลมร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และเปอร์เซ็นต์

ระบายน้ที่ที่ผลต่อการลดลงของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และเมื่อนำสมการทำนายความสัมพันธ์ของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับตัวแปรอิสระที่ศึกษา ไปสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิร้อนกับอัตราการป้อนผลปาล์ม อุณหภูมิร้อนกับเปอร์เซ็นต์ระบายน้ที่ และอัตราการป้อนผลปาล์มกับเปอร์เซ็นต์ระบายน้ที่ที่ส่งผลต่อการลดลงของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ดังแสดงในรูปแบบที่ 5.3, 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ

การทดลองที่	(T) อุณหภูมิร้อน (°C)	(m) อัตราการป้อน (kg/hr)	(V) ระบายน้ที่ (%)	(SEC) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg _{ปาล์ม})
1	-1.68 (90)	0 (30)	0 (10)	0.18
2	-1 (98)	-1 (24)	-1 (4)	0.24
3	-1 (98)	-1 (24)	1 (16)	0.25
4	-1 (98)	1 (36)	-1 (4)	0.17
5	-1 (98)	1 (36)	1 (16)	0.17
6	0 (110)	-1.68 (20)	0 (10)	0.31
7	0 (110)	0 (30)	0 (10)	0.21
8	0 (110)	0 (30)	0 (10)	0.22
9	0 (110)	0 (30)	0 (10)	0.21
10	0 (110)	0 (30)	0 (10)	0.22
11	0 (110)	0 (30)	1.68 (20)	0.23
12	0 (110)	0 (30)	-1.68 (0)	0.19
13	0 (110)	1.68 (40)	0 (10)	0.16
14	1 (122)	-1 (24)	-1 (4)	0.30
15	1 (122)	-1 (24)	1 (16)	0.32
16	1 (122)	1 (36)	-1 (4)	0.21
17	1 (122)	1 (36)	1 (16)	0.21
18	1.68 (130)	0 (30)	0 (10)	0.27

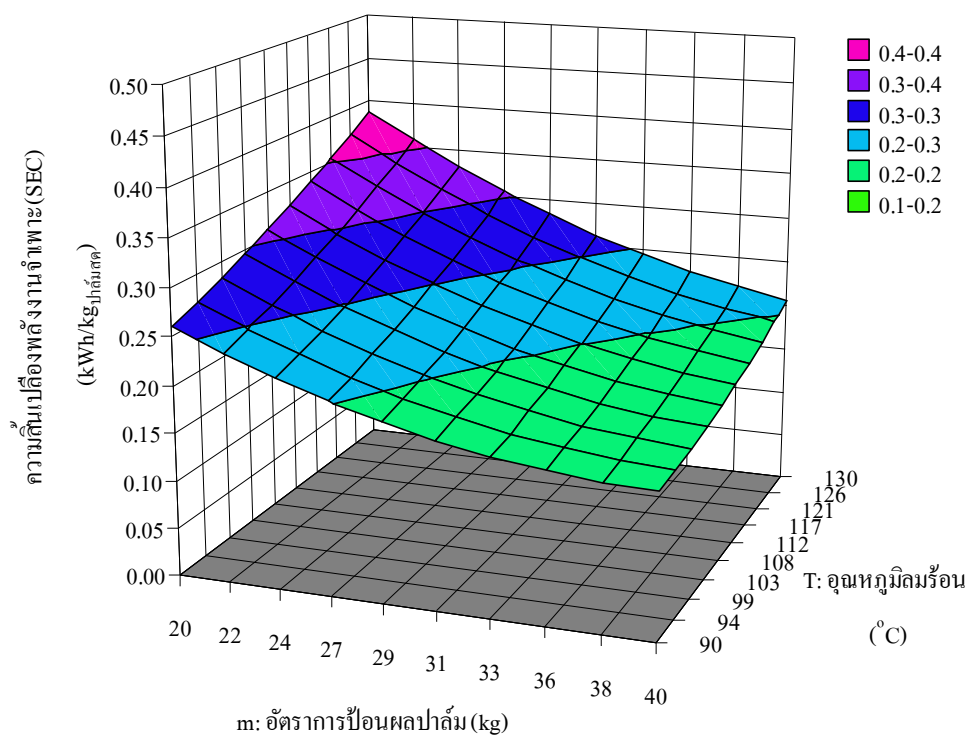
ตารางที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.2

Terms	Regression coefficients	Standard error	P-value
Intercept			
β_0	0.38200	0.084480	0.00070
Linear			
β_1	-0.01252	0.005600	0.04519
Quadratic			
β_2	0.00002	0.000005	0.00176
β_5	0.00025	0.000064	0.00221
Interaction			
β_3	-0.00008	0.000040	0.04765
β_4	0.00001	0.000003	0.00454

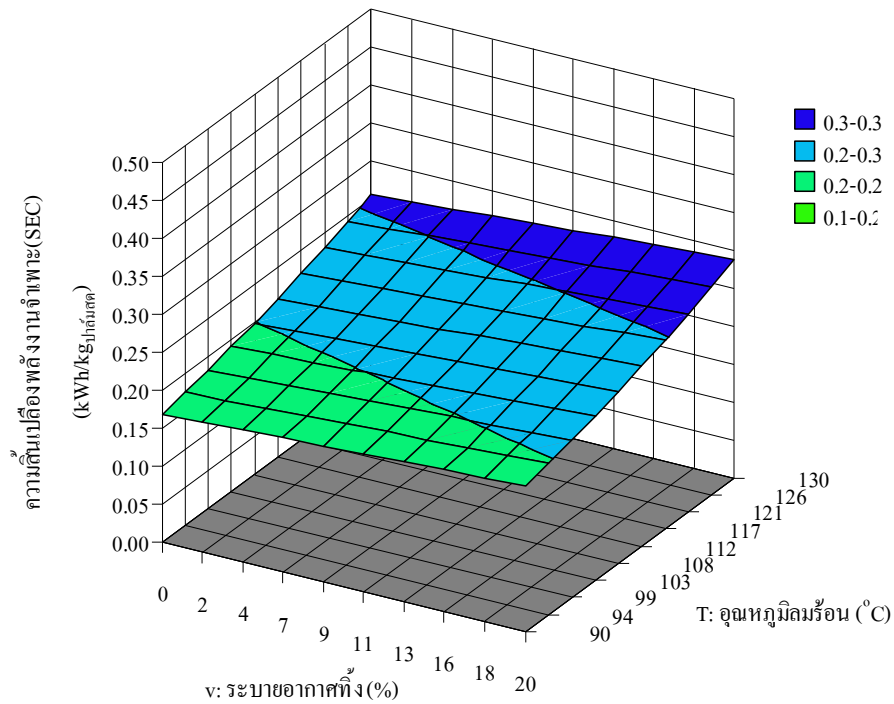
$$R^2 = 0.978, R^2_{\text{adjusted}} = 0.969, P\text{-value} < 0.05$$

สถานะที่เหมาะสมที่สุดของการลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คืออุณหภูมิหม้อน้ำร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายน้ำอากาศทิ้ง 10% เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ $0.16 \text{ kWh/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ หรือ $0.57 \text{ MJ/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ และสถานะเงื่อนไขอุณหภูมิหม้อน้ำร้อน 122°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 24 kg/hr และระบายน้ำอากาศทิ้ง 16% ได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดเท่ากับ $0.32 \text{ kWh/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ หรือ $1.16 \text{ MJ/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ เนื่องจากเงื่อนไขที่ได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด เป็นเงื่อนไขที่ระบายน้ำอากาศทิ้งมากที่สุดเท่ากับ 10% จึงส่งผลทำให้ปริมาณน้ำที่ระเหยมากขึ้นด้วยและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ จากรูปที่ 5.3 เป็นผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่าของอุณหภูมิหม้อน้ำร้อนกับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน พบว่าอุณหภูมิหม้อน้ำร้อนช่วง $90\text{-}130^{\circ}\text{C}$ และอัตราการป้อนผลปาล์มช่วง $24\text{-}40 \text{ kg/hr}$ ได้ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในช่วงที่ต่ำ ส่วนอัตราการป้อนผลปาล์มช่วง $20\text{-}24 \text{ kg/hr}$ ได้ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในช่วงที่เพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 5.4 เป็นผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่าของอุณหภูมิหม้อน้ำร้อน

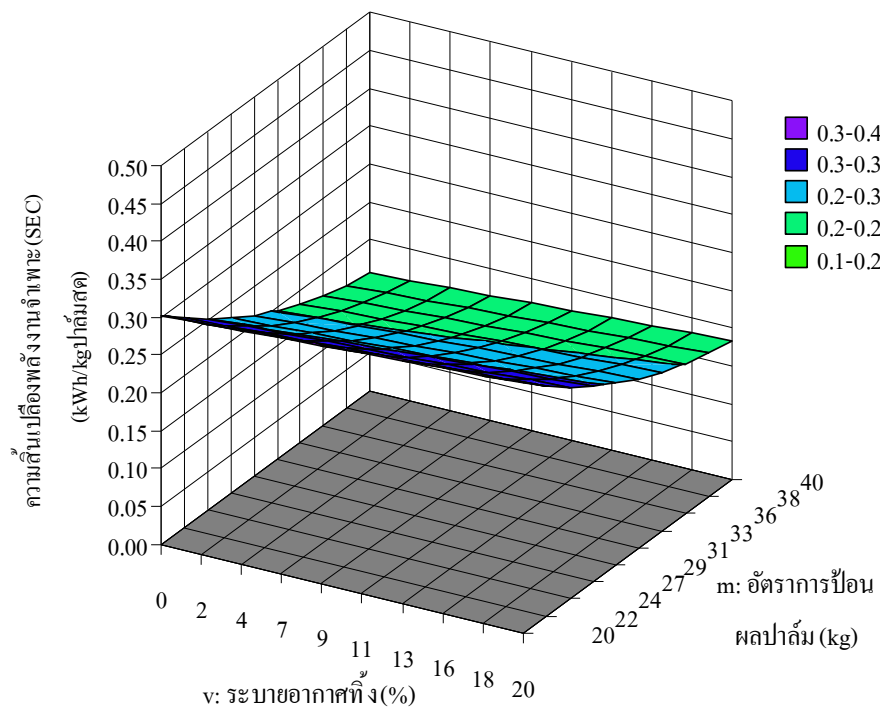
ร้อนและเปอร์เซ็นต์ระเหยอากาศที่ต่างกัน พบว่าอุณหภูมิความร้อนช่วง $90-110^{\circ}\text{C}$ และระเหยอากาศช่วง 0-20% ได้ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในช่วงที่ต่ำ ส่วนอุณหภูมิความร้อนช่วง $110-130^{\circ}\text{C}$ และระเหยอากาศที่ช่วง 0-20% ได้ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในช่วงที่เพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 5.5 เป็นผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่าของเปอร์เซ็นต์ระเหยอากาศที่กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆกัน พบว่าพบว่าการป้อนผลปาล์มช่วง 30-40 kg/hr และระเหยอากาศที่ช่วง 0-20% ได้ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในช่วงที่ต่ำ ส่วนอัตราการป้อนผลปาล์มช่วง 20-30 kg/hr และระเหยอากาศที่ช่วง 0-20% ได้ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในช่วงที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจากรูปที่ 5.3-5.5 เป็นผลจากการสร้างพื้นผิวผลตอบแทน (response surface) กล่าวพบว่าตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิความร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และเปอร์เซ็นต์ระเหยอากาศที่ ซึ่งผลต่อการเพิ่มและลดลงของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ



รูปที่ 5.3 พื้นผิวผลตอบแทนของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่าของอุณหภูมิความร้อนกับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆกัน



รูปที่ 5.4 พื้นผิวตอบสนองของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่าของ อุณหภูมิความร้อนและเปอร์เซ็นต์ระบายน้ำอากาศที่ต่างกัน



รูปที่ 5.5 พื้นผิวตอบสนองของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่าของ เปอร์เซ็นต์ระบายน้ำอากาศที่กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน

5.2.2 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว

ผลจากการวิเคราะห์หาแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว (F_{palm}) แสดงในตารางที่ 5.3 และสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวกับตัวแปรอิสระตามสมการ quadratic polynomial โดยใช้วิธี multiple regression ดังแสดงในสมการที่ 5.3

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว (F_{palm}) กับตัวแปรอิสระก่อนพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ (ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ในภาคผนวก จ)

$$F_{palm} = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (Tm) + \beta_6 (Tv) + \beta_7 (m^2) + \beta_8 (mv) + \beta_9 (v^2) \quad (5.3)$$

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว (F_{palm}) กับตัวแปรอิสระหลังจากพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ (ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ในภาคผนวก จ)

$$F_{palm} = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (T^2) + \beta_4 (m^2) \quad (5.4)$$

สมการที่ 5.3 จะต้องพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ก่อน โดยตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งสังเกตได้จากค่า P-value ถ้า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อสมการ ให้เหลือเพียงพจน์ที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หลังจากพิจารณาค่า P-value จึงได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5.4 และได้ผลแสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการในตารางที่ 5.4 โดยสมการทำนายค่าแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว มีค่า coefficient of multiple determination, $R^2 = 0.792$ และมีค่า $R^2_{adjusted} = 0.727$ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระมีค่า P-value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าตัวแปรอิสระดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ได้ แต่พบว่าไม่มีค่าสัมประสิทธิ์ของเปอร์เซ็นต์ระบายน้ำอากาศที่แสดงว่าระบายน้ำอากาศที่ 0-20% ไม่มีนัยสำคัญต่อสมการทำนายค่าของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวและได้นำสมการทำนายความสัมพันธ์ได้มาทดสอบค่า F-test ผลปรากฏว่า ค่า $F_0 = 12.34$ (จากสมการ) มีค่ามากกว่า $F_{critical} = 2.18$ (จากตาราง $f_{0.05,4,13}$ ในภาคผนวก ง) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิลมร้อน และอัตราการป้อนผลปาล์ม ที่ผลต่อการลดลงของแรงกดที่ผิวผล

ปาล์มเริ่มยุบตัวและเมื่อนำสมการทำนายความสัมพันธ์ของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวกับตัวแปรอิสระที่ศึกษาไปสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนกับอัตราการป้อนผลปาล์ม ที่ส่งผลต่อการลดลงแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ

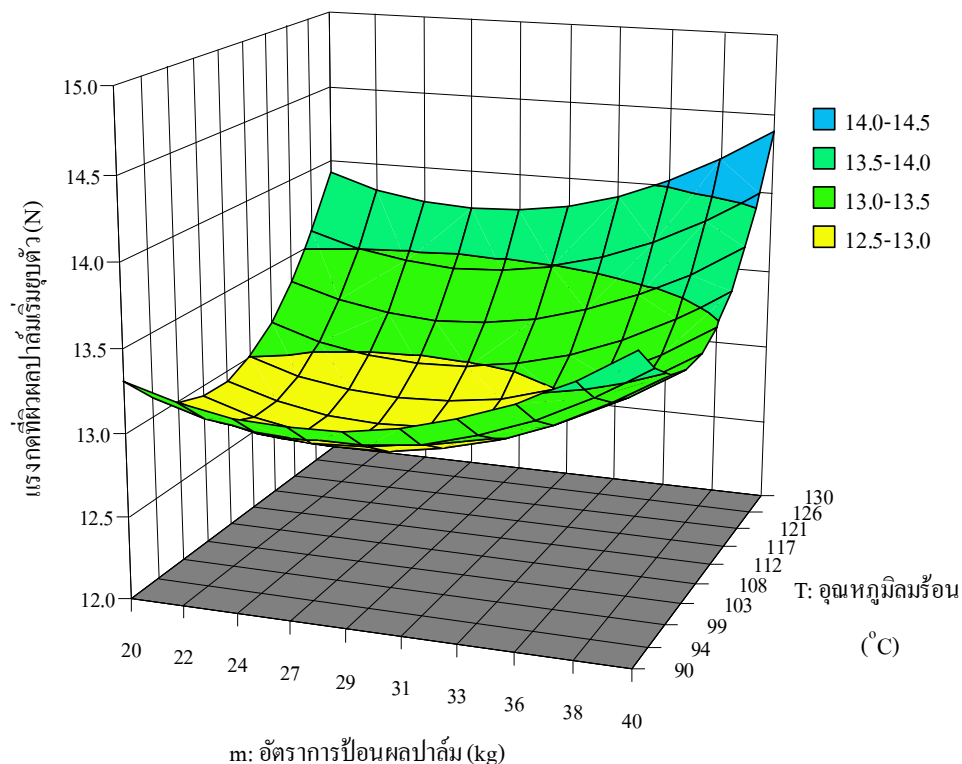
การทดลองที่	(T) อุณหภูมิความร้อน (°C)	(m) อัตราการป้อน (kg/hr)	(V) ระบายอากาศทิ้ง (%)	(F _{palm}) แรงกดที่ผิวผล ปาล์มเริ่มยุบตัว (N)
1	-1.68 (90)	0 (30)	0 (10)	13.10
2	-1 (98)	-1 (24)	-1 (4)	13.05
3	-1 (98)	-1 (24)	1 (16)	13.00
4	-1 (98)	1 (36)	-1 (4)	13.04
5	-1 (98)	1 (36)	1 (16)	13.03
6	0 (110)	-1.68 (20)	0 (10)	12.82
7	0 (110)	0 (30)	0 (10)	12.72
8	0 (110)	0 (30)	0 (10)	12.70
9	0 (110)	0 (30)	0 (10)	12.74
10	0 (110)	0 (30)	0 (10)	12.75
11	0 (110)	0 (30)	1.68 (20)	13.06
12	0 (110)	0 (30)	-1.68 (0)	13.09
13	0 (110)	1.68 (40)	0 (10)	13.68
14	1 (122)	-1 (24)	-1 (4)	13.13
15	1 (122)	-1 (24)	1 (16)	13.20
16	1 (122)	1 (36)	-1 (4)	13.37
17	1 (122)	1 (36)	1 (16)	13.41
18	1.68 (130)	0 (30)	0 (10)	13.98

ตารางที่ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.4

Terms	Regression coefficients	Standard error	P-value
Intercept			
β_0	33.2700	4.4330	0.000004
Linear			
β_1	-0.3400	0.0743	0.000517
β_2	-0.1930	0.0814	0.033410
Quadratic			
β_3	0.0016	0.0003	0.000354
β_4	0.0036	0.0013	0.018950

$$R^2 = 0.792, R^2_{\text{adjusted}} = 0.727, P\text{-value} < 0.05$$

สถานะที่เหมาะสมที่สุดของการลดของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว คือ อุณหภูมิ ลมร้อน 98-110°C และอัตราการป้อนผลปาล์ม 20-30 kg/hr โดยได้ค่าแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ต่ำสุดเท่ากับ 12.70 N เนื่องจากการให้ความร้อนต่อผลปาล์ม มีผลให้ผลปาล์มสุกและนิ่ม ทำให้แรง กดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวลดลง แต่ถ้าผลปาล์มได้รับความร้อนต่อและมีอุณหภูมิสูงเกินไปก็จะมีผล ให้ผลปาล์มไหม้และทำให้แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 5.6 โดยที่ อุณหภูมิลมร้อนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 130°C และอัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr พบว่า แรงกดที่ผิวผล ปาล์มเริ่มยุบตัวมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 13.98 N เช่นกัน ดังนั้นจากการสังเกตแท็บสีของกราฟจะได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนในการอบมากขึ้นก็จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงกดที่ผิวผลปาล์ม เริ่มยุบตัวด้วย



รูปที่ 5.6 พื้นผิวตอบสนองของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวที่ค่าของอุณหภูมิผลปาล์มร้อน กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน

5.2.3 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้

ผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ แสดงในตารางที่ 5.5 และสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ กับตัวแปรอิสระตามสมการ quadratic polynomial โดยใช้วิธี multiple regression ดังแสดงในสมการที่ 5.5

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ (Yield) กับตัวแปรอิสระก่อนพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ (ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ในภาคผนวก จ)

$$Yield = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (Tm) + \beta_6 (Tv) + \beta_7 (m^2) + \beta_8 (mv) + \beta_9 (v^2) \quad (5.5)$$

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ (Yield) กับตัวแปรอิสระหลังจากพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ (ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ในภาคผนวก จ)

$$Yield = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (T^2) + \beta_3 (m^2) \quad (5.6)$$

สมการที่ 5.5 จะต้องพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ก่อน โดยตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งสังเกตได้จากค่า P-value ถ้า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อสมการ ให้เหลือเพียงพจน์ที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หลังจากพิจารณาค่า P-value จึงได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5.6 และได้ผลแสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการในตารางที่ 5.6 โดยสมการทำนายค่าปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ มีค่า coefficient of multiple determination, $R^2 = 0.966$ และมีค่า $R^2_{\text{adjusted}} = 0.959$ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระมีค่า P-value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าตัวแปรอิสระดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ได้ แต่พบว่าไม่มีค่าสัมประสิทธิ์ของเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศที่แสดงว่าระบายอากาศที่ 0-20% ไม่มีนัยสำคัญต่อสมการทำนายค่าของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ และได้นำสมการทำนายความสัมพันธ์ได้มาทดสอบค่า F-test ผลปรากฏว่า ค่า $F_0 = 132.88$ (จากสมการ) มีค่ามากกว่า $F_{\text{critical}} = 3.34$ (จากตาราง $f_{0.05,3,14}$ ในภาคผนวก ง) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิลมร้อน และอัตราการป้อนผลปาล์ม ที่ผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ และเมื่อนำสมการทำนายความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้กับตัวแปรอิสระที่ศึกษาไปสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิลมร้อนกับอัตราการป้อนผลปาล์ม ที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ

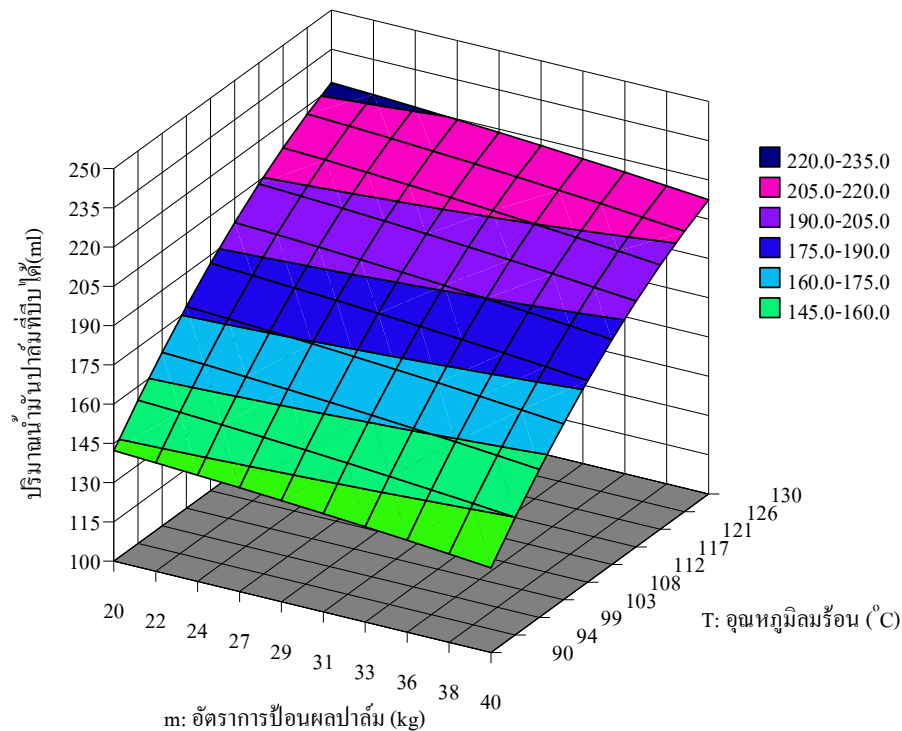
การทดลอง ที่	(T) อุณหภูมิความร้อน (°C)	(m) อัตราการป้อน (kg/hr)	(V) ระบายอากาศทิ้ง (%)	(Yield) ปริมาณน้ำมัน ปาล์มที่บีบได้ (ml)
1	-1.68 (90)	0 (30)	0 (10)	146.98
2	-1 (98)	-1 (24)	-1 (4)	157.85
3	-1 (98)	-1 (24)	1 (16)	155.88
4	-1 (98)	1 (36)	-1 (4)	154.05
5	-1 (98)	1 (36)	1 (16)	152.00
6	0 (110)	-1.68 (20)	0 (10)	193.73
7	0 (110)	0 (30)	0 (10)	189.23
8	0 (110)	0 (30)	0 (10)	189.08
9	0 (110)	0 (30)	0 (10)	188.70
10	0 (110)	0 (30)	0 (10)	189.00
11	0 (110)	0 (30)	1.68 (20)	185.58
12	0 (110)	0 (30)	-1.68 (0)	194.78
13	0 (110)	1.68 (40)	0 (10)	183.33
14	1 (122)	-1 (24)	-1 (4)	210.40
15	1 (122)	-1 (24)	1 (16)	208.45
16	1 (122)	1 (36)	-1 (4)	203.93
17	1 (122)	1 (36)	1 (16)	201.70
18	1.68 (130)	0 (30)	0 (10)	218.50

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.6

Terms	Regression coefficients	Standard error	P-value
Intercept			
β_0	-294.7274	101.5345	0.0116
Linear			
β_1	6.9136	1.8545	0.0022
Quadratic			
β_2	-0.0224	0.0084	0.0186
β_3	-0.0081	0.0033	0.0298

$R^2 = 0.966$, $R^2_{\text{adjusted}} = 0.959$, P-value < 0.05

พื้นผิวผลตอบสนอง รูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิความร้อนกับอัตราการป้อน ผลปาล์มส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ โดยปริมาณน้ำมันที่บีบได้เพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิในผลปาล์มสูงขึ้น ซึ่งจากสภาวะเงื่อนไขที่ อุณหภูมิความร้อน 130°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr ทำให้ค่าปริมาณน้ำมันที่บีบได้สูงสุดเท่ากับ 218.50 ml แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C จะได้ ปริมาณน้ำมันที่บีบได้ลดน้อยลง เนื่องจากผลปาล์มไม่ได้รับความร้อนที่เพียงพอที่จะทำให้ผลปาล์ม ปาล์มสุกนึ่งได้ ต่อมาเมื่อได้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C ส่งผลต่อเส้นใยของผลปาล์มให้ผล ปาล์มสุกนึ่งมากขึ้น ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันที่บีบได้เพิ่มขึ้นส่วนผลอัตราการป้อนผลปาล์มที่มีผลต่อ การเพิ่มของปริมาณน้ำมัน พบว่า ที่อัตราการป้อนผลปาล์มน้อย จะได้ปริมาณน้ำมันที่บีบได้มาก ส่วนที่อัตราการป้อนผลปาล์มที่มาก จะได้ปริมาณน้ำมันที่บีบได้น้อย เนื่องจากอัตราการป้อนผล ปาล์มมีผลต่ออุณหภูมิภายในผลปาล์ม โดยที่อัตราการป้อนที่น้อยจะทำให้อุณหภูมิผลปาล์มเพิ่มขึ้น และที่อัตราการป้อนที่มากทำให้อุณหภูมิจากภายในผลปาล์มน้อยลง จึงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณ น้ำมันที่บีบได้



รูปที่ 5.7 พื้นผิวตอบสนองของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ที่ค่าของอุณหภูมิความร้อนกับ อัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน

5.2.4 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของปริมาณกรดไขมันอิสระ

ผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ แสดงในตารางที่ 5.7 และสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระกับตัวแปรอิสระตามสมการ quadratic polynomial โดยใช้วิธี multiple regression ดังแสดงในสมการที่ 5.7

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) กับตัวแปรอิสระก่อนพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ (ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ในภาคผนวก จ)

$$FFA = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (Tm) + \beta_6 (Tv) + \beta_7 (m^2) + \beta_8 (mv) + \beta_9 (v^2) \quad (5.7)$$

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) กับตัวแปรอิสระหลังจากพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ (ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ในภาคผนวก จ)

$$FFA = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (v^2) \quad (5.8)$$

สมการที่ 5.7 จะต้องพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ก่อน โดยตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งสังเกตได้จากค่า P-value ถ้า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อสมการ ให้เหลือเพียงพจน์ที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หลังจากพิจารณาค่า P-value จึงได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5.8 และได้ผลแสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการในตารางที่ 5.8 โดยสมการทำนายค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ มีค่า coefficient of multiple determination, $R^2 = 0.921$ และมีค่า $R^2_{\text{adjusted}} = 0.888$ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระมีค่า P-value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าตัวแปรอิสระดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ได้ และได้นำสมการทำนายความสัมพันธ์ได้มาทดสอบค่า F-test ผลปรากฏว่า ค่า $F_0 = 27.99$ (จากสมการ) มีค่ามากกว่า $F_{\text{critical}} = 3.11$ (จากตาราง $f_{0.05,5,12}$ ในภาคผนวก ง) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิลมร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และเปอร์เซ็นต์ระบายนอากาศทิ้ง ที่ผลต่อการลดลงของปริมาณกรดไขมันอิสระ และเมื่อนำสมการทำนายความสัมพันธ์ของปริมาณกรดไขมันอิสระ กับตัวแปรอิสระที่ศึกษา ไปสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิลมร้อนกับอัตราการป้อนผลปาล์ม อุณหภูมิลมร้อนกับเปอร์เซ็นต์ระบายนอากาศทิ้ง และอัตราการป้อนผลปาล์มกับเปอร์เซ็นต์ระบายนอากาศทิ้งที่ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณกรดไขมันอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลของปริมาณกรดไขมันอิสระตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ

การทดลองที่	(T) อุณหภูมิความร้อน (°C)	(m) อัตราการป้อน (kg/h)	(V) ระบายอากาศทิ้ง (%)	(FFA) ปริมาณ กรดไขมันอิสระ (% wt.)
1	-1.68 (90)	0 (30)	0 (10)	6.24
2	-1 (98)	-1 (24)	-1 (4)	5.78
3	-1 (98)	-1 (24)	1 (16)	5.75
4	-1 (98)	1 (36)	-1 (4)	5.18
5	-1 (98)	1 (36)	1 (16)	5.15
6	0 (110)	-1.68 (20)	0 (10)	5.27
7	0 (110)	0 (30)	0 (10)	4.22
8	0 (110)	0 (30)	0 (10)	4.23
9	0 (110)	0 (30)	0 (10)	4.22
10	0 (110)	0 (30)	0 (10)	4.22
11	0 (110)	0 (30)	1.68 (20)	5.13
12	0 (110)	0 (30)	-1.68 (0)	4.73
13	0 (110)	1.68 (40)	0 (10)	3.94
14	1 (122)	-1 (24)	-1 (4)	4.63
15	1 (122)	-1 (24)	1 (16)	4.32
16	1 (122)	1 (36)	-1 (4)	4.02
17	1 (122)	1 (36)	1 (16)	4.13
18	1.68 (130)	0 (30)	0 (10)	4.89

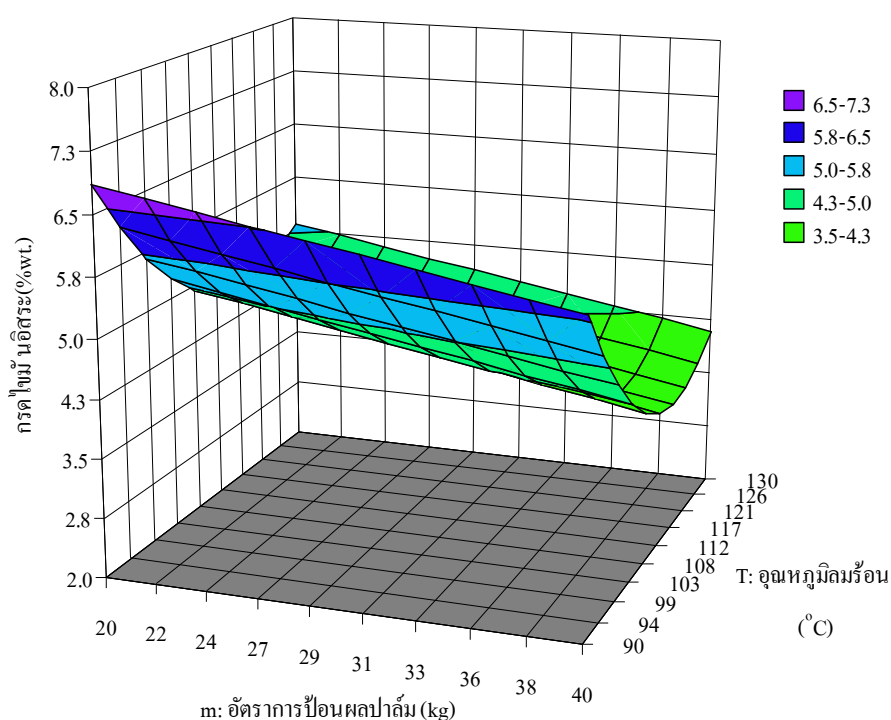
ตารางที่ 5.8 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพัทธ์ของสมการที่ 5.8

Terms	Regression coefficients	Standard error	P-value
Intercept			
β_0	45.17000	6.42560	0.000002
Linear			
β_1	-0.66400	0.11663	0.000017
β_2	-0.04926	0.01251	0.000470
β_3	-0.93160	0.04416	0.025680
Quadratic			
β_4	0.00282	0.00053	0.000033
β_5	0.00503	0.00212	0.014160

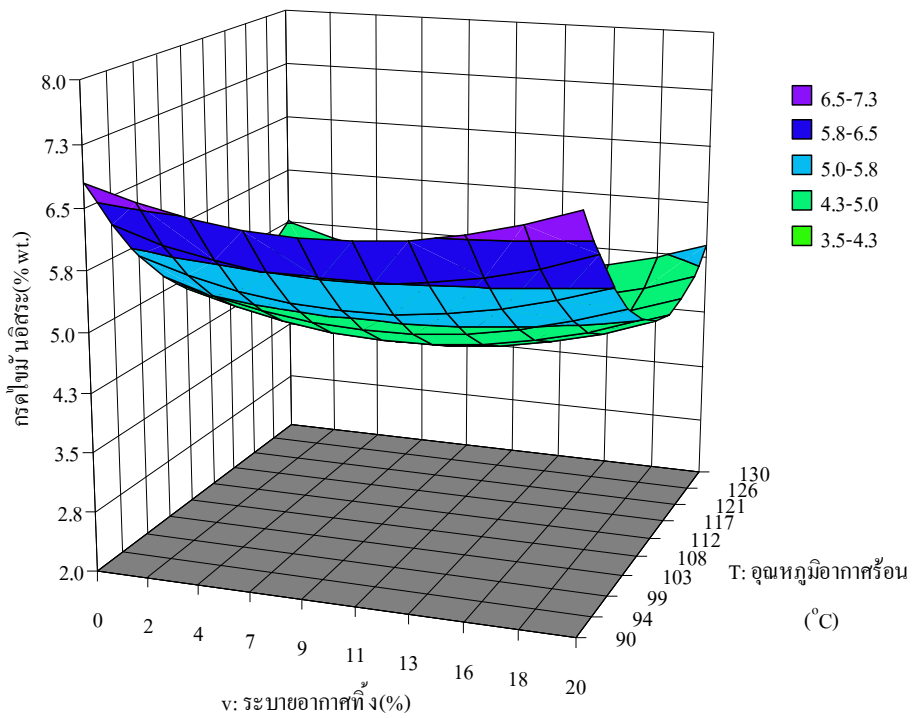
$$R^2 = 0.921, R^2_{\text{adjusted}} = 0.888, P\text{-value} < 0.05$$

พื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) แสดงปริมาณกรดไขมันอิสระ พบว่า ที่สภาวะเงื่อนไข อุณหภูมิความร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg และระบายอากาศถึง 10% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยได้ค่าปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำสุดเท่ากับ 3.94 % wt. เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิผลปาล์มเพิ่มขึ้น มีผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลน้ำมันปาล์ม (triglyceride) เกิดการแตกตัวเป็นกลีเซอรอล (glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งในช่วงแรกๆ triglyceride จะแตกตัวเป็น glycerol ในสัดส่วนที่มาก มีผลทำให้สัดส่วนร้อยละของ FFA น้อย แต่หากคงอุณหภูมิในผลปาล์มไว้เป็นระยะเวลาานาน จะทำให้ร้อยละของ FFA เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยจากการสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) รูปที่ 5.8 พบว่า อุณหภูมิความร้อนช่วง 108-128°C และอัตราการป้อนผลปาล์มช่วง 33-40 kg/hr ได้ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงที่ต่ำ ส่วนอุณหภูมิความร้อนช่วง 90-106°C อัตราการป้อนผลปาล์มช่วง 20-40 kg/hr ได้ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงที่เพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 5.9 เป็นผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่ค่าของอุณหภูมิความร้อนและเปอร์เซ็นต์ ระบายอากาศถึงต่างๆ กัน พบว่า อุณหภูมิความร้อนช่วง 108-128°C และระบายอากาศถึงช่วง 1-17% ได้ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงที่ต่ำ ส่วนอุณหภูมิ

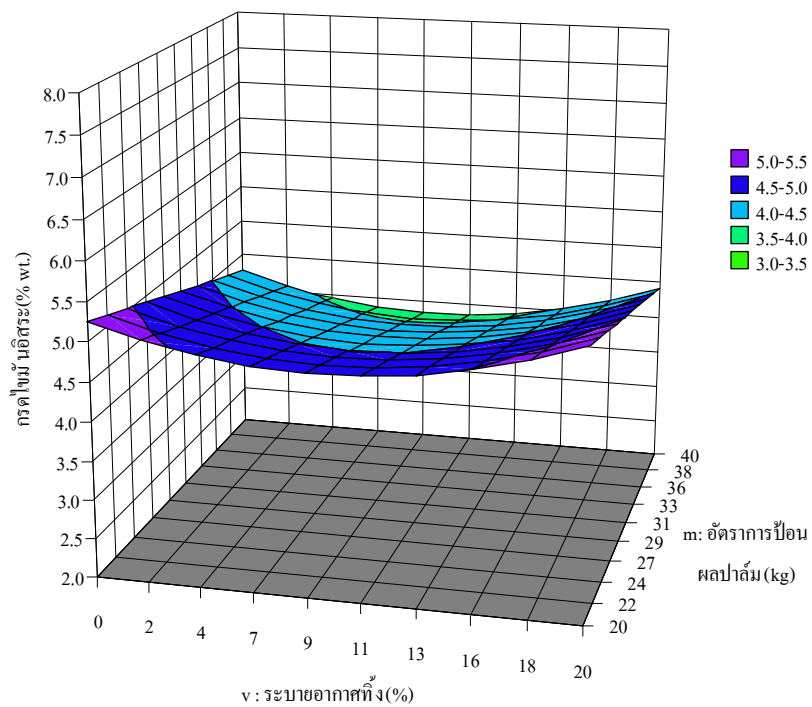
ร้อนช่วง $90-108^{\circ}\text{C}$ และระบายอากาศทิ้งช่วง $0-20\%$ ได้ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงที่เพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 5.10 เป็นผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่ค่าของเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้งกับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน พบว่า อัตราการป้อนผลปาล์มช่วง $37-40\text{ kg/hr}$ และระบายอากาศทิ้งช่วง $3-16\%$ ได้ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงที่ต่ำ ส่วนอัตราการป้อนผลปาล์มช่วง $20-37\text{ kg/hr}$ และระบายอากาศทิ้งช่วง $0-20\%$ ได้ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจากรูปที่ 5.8-5.10 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิความร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้ง ที่ผลต่อการเพิ่มและลดลงของปริมาณกรดไขมันอิสระ



รูปที่ 5.8 พื้นผิวตอบสนองของปริมาณกรดไขมันอิสระที่ค่าของอุณหภูมิความร้อน
กับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน



รูปที่ 5.9 พื้นผิวตอบสนองของปริมาณกรดไขมันอิสระที่ค่าของอุณหภูมิลมร้อนและเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้งต่างๆ กัน



รูปที่ 5.10 พื้นผิวตอบสนองของปริมาณกรดไขมันอิสระที่ค่าของเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้งกับอัตราการป้อนผลปาล์มต่างๆ กัน

5.3 การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบ

การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูสามารถแบ่งออกเป็น คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ต้นทุนการอบ โดยได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณในสมการดังปรากฏอยู่ในภาคผนวก ก. ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 5.9 พบว่า ทั้ง 18 ทดลองตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ $0.26 \text{ kg}_w/\text{kWh}$ ตามสภาวะเงื่อนไขที่อุณหภูมิความร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr และไม่ระบายอากาศทิ้ง ส่วนสภาวะเงื่อนไขที่อุณหภูมิความร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 20% ได้อัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงสุดเท่ากับ $0.5 \text{ kg}_w/\text{kWh}$ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้งมีผลต่ออัตราการระเหยน้ำจำเพาะ เมื่อระบายอากาศทิ้งมากก็จะทำให้น้ำในผลปาล์มก็ระเหยออกไปมาก แต่ถ้าระบายอากาศทิ้งน้อยจะส่งผลให้น้ำในผลปาล์มก็ระเหยออกไปได้น้อยเช่นกัน ซึ่งได้ส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่า ที่สภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 10% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ $0.16 \text{ kWh/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ หรือ $0.57 \text{ MJ/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ และสภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 122°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 24 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 16% ได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดเท่ากับ $0.32 \text{ kWh/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ หรือ $1.16 \text{ MJ/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ ส่วนผลของต้นทุนการอบ พบว่า สภาวะเงื่อนไขที่อุณหภูมิความร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 10% ได้ต้นทุนการอบต่ำสุด เท่ากับ $0.63 \text{ บาท/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ หรือ 630 บาท/ตัน และสภาวะเงื่อนไขที่อุณหภูมิความร้อน 122°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 24 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 16% ได้ต้นทุนการอบสูงสุด เท่ากับ $1.28 \text{ บาท/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ หรือ $1,280 \text{ บาท/ตัน}$ เนื่องจาก อุณหภูมิความร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และระบายอากาศทิ้ง ส่งผลต่อการเพิ่มลดของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและต้นทุนการผลิต โดยอุณหภูมิความร้อนช่วง $90\text{-}122^\circ\text{C}$ อัตราการป้อนผลปาล์มในช่วง $30\text{-}40 \text{ kg/hr}$ และระบายอากาศทิ้งช่วง 4-16% เป็นช่วงที่ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและต้นทุนการผลิตลดต่ำลง และเมื่อลดอัตราการป้อนผลปาล์มในช่วง $20\text{-}24 \text{ kg/hr}$ ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

ตารางที่ 5.9 การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบ

การทดลองที่	มวลก่อนอบ (kg _{ปาล์มสด})	มวลหลังอบ (kg)	ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (kWh)	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ (บาท)	อัตราการระเหยน้ำเฉพาะ (kg _{น้ำ} /kWh)	ความสิ้นเปลืองพลังงานเฉพาะ (kWh/kg _{ปาล์มสด})	ต้นทุนการอบ (บาท/kg _{ปาล์มสด})
1	30	27.7	2.3	5.2	20.80	0.44	0.18	0.69
2	24	22.0	2.0	5.9	23.60	0.34	0.24	0.98
3	24	21.8	2.2	6.1	24.40	0.36	0.25	1.02
4	36	33.9	2.1	6.0	24.00	0.35	0.16	0.67
5	36	33.7	2.3	6.2	24.80	0.37	0.17	0.69
6	20	18.0	2.0	6.3	25.20	0.32	0.31	1.26
7	30	27.0	3.0	6.4	25.60	0.47	0.21	0.85
8	30	27.0	3.0	6.4	25.60	0.47	0.22	0.85
9	30	27.0	3.0	6.4	25.60	0.47	0.21	0.85
10	30	27.0	3.0	6.4	25.60	0.47	0.22	0.85
11	30	26.6	3.4	6.8	27.20	0.50	0.23	0.91
12	30	28.5	1.5	5.8	23.20	0.26	0.19	0.77
13	40	37.0	3.0	6.3	25.20	0.48	0.16	0.63
14	24	22.0	2.0	7.1	28.40	0.28	0.30	1.18
15	24	21.6	2.4	7.7	30.80	0.31	0.32	1.28
16	36	32.6	3.4	7.5	30.00	0.45	0.21	0.83
17	36	32.2	3.8	7.8	31.20	0.49	0.22	0.87
18	30	26.5	3.5	8.0	32.00	0.44	0.27	1.07

หมายเหตุ: ค่าไฟฟ้าคิดที่ 4 บาท/Unit

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1.1 เครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู เป็นการออกแบบต่อเนื่องโดยใช้อบผลปาล์มร่วนในระดับชุมชน ช่วยให้ผลปาล์มที่ผ่านการอบมีผิวที่นุ่ม และช่วยกระจายอุณหภูมิภายในผลปาล์มอย่างสม่ำเสมอ ส่วนประกอบของระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ โครงสร้างของตัวเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ระบบส่งอากาศร้อน และระบบส่งกำลัง โดยภายในห้องอบมีสกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.255 เมตร ยาว 310 เมตร เพื่อลำเลียงผลปาล์มร่วนไปพร้อมกับการอบที่ความเร็วรอบ 0.5 รอบ/นาที ซึ่งหลักการทำงานเริ่มจากใส่ผลปาล์มลงในกระบะช่องทางเข้า แล้วใช้สกรูลำเลียงผลปาล์มไปสัมผัสกับลมร้อน ที่มีใบลวอร์เป่าผ่านฮีตเตอร์ ลักษณะการเป่าลมร้อนเป็นแบบสวนทางกับการเคลื่อนที่ของผลปาล์ม โดยมีการหมุนเวียนลมร้อนกลับเข้าภายในห้องอบ มีบางส่วนระบายอากาศขึ้นออกและมีช่องเติมอากาศเข้าเพื่อแลกเปลี่ยนภายในระบบ

6.1.2 ผลการทดลองอบผลปาล์ม ซึ่งข้อมูลที่บันทึกระหว่างการทดลอง คือ ความชื้น อุณหภูมิผลปาล์ม และอุณหภูมิอากาศร้อน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ผลของความชื้นในผลปาล์ม พบว่า ที่สภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr และไม่ระบายอากาศทิ้ง มีความชื้นในผลปาล์มลดลงน้อยที่สุดเหลือความชื้นหลังอบเฉลี่ยเท่ากับ 35.54%db ซึ่งลดลงจากเริ่มต้น 10.11%db และที่สภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 130°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 10% มีความชื้นในผลปาล์มลดลงมากที่สุด โดยหลังอบมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 30.26%db ลดลงจากเริ่มต้น 15.39%db

ผลของอุณหภูมิผลปาล์ม พบว่า อุณหภูมิภายในผลปาล์มเริ่มต้น (ก่อนอบ) เฉลี่ยเท่ากับ 32.44°C และเมื่ออบผลปาล์ม ทำให้อุณหภูมิภายในผลปาล์มเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น $81.90-106.70^{\circ}\text{C}$ ในตัวอย่างที่ 1 จากนั้นอุณหภูมิลดลงเล็กน้อยในตัวอย่างที่ 2-4 และมีแนวโน้มเดียวกันทุกๆ การทดลอง

ผลของอุณหภูมิอากาศร้อน พบว่าช่วงแรกคือ ตั้งแต่เวลาที่ 0-60 อุณหภูมิลมร้อนลดลงเรื่อยๆ จนถึงในเวลาที่ 60 หลังจากเวลาที่ 60 อุณหภูมิลมร้อนจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงในเวลาที่ 120 โดยเวลาช่วง 0-120 นาที เป็นช่วงเวลาของการอบผลปาล์ม ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนผลปาล์ม ทำให้อุณหภูมิลมร้อนในการอบลดต่ำลง

6.1.3 ผลการหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู โดยการใช้วิธี response surface methodology, RSM และออกแบบแผนการทดลองแบบ Central Composite Design, CCD เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และรูปแบบสมการการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ คือ อุณหภูมิลมร้อน (T) อัตราการป้อนผลปาล์ม (m) และเปอร์เซ็นต์ระบายน้ำอากาศทิ้ง (v) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คือ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลมร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และระบายน้ำอากาศทิ้ง โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายน้ำอากาศทิ้ง 10% ได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ $0.16\text{ kWh/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ หรือ $0.57\text{ MJ/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ และเงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 122°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 24 kg/hr และระบายน้ำอากาศทิ้ง 16% ได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดเท่ากับ $0.32\text{ kWh/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$ หรือ $1.16\text{ MJ/kg}_{\text{ปาล์มสด}}$

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการลดแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว คือ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลมร้อนและอัตราการป้อนผลปาล์ม แต่พบว่าไม่มีค่าสัมประสิทธิ์ของเปอร์เซ็นต์ระบายน้ำอากาศทิ้ง แสดงว่า ระบายน้ำอากาศทิ้งที่ $0-20\%$ ไม่มีผลต่อแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวหรืออาจจะมีผลน้อยมากจึงไม่แสดงผลในค่าสัมประสิทธิ์ของเปอร์เซ็นต์ระบายน้ำอากาศทิ้ง โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 110°C และอัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr ได้ค่าแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวต่ำสุดเท่ากับ 12.70 N และเงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 130°C และอัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr ได้ค่าแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 13.98 N

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันที่บีบได้ คือ ระบายอากาศทิ้งที่ 0-20% ไม่มีนัยสำคัญต่อสมการทำนายค่าของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ พบว่า อุณหภูมิความร้อนกับอัตราการป้อนผลปาล์มส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ โดยปริมาณน้ำมันที่บีบได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในผลปาล์มสูงขึ้นซึ่งจากสภาวะเงื่อนไขที่อุณหภูมิความร้อน 130°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr ทำให้ค่าปริมาณน้ำมันที่บีบได้สูงสุดเท่ากับ 218.50 ml และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C จะได้ปริมาณน้ำมันที่บีบได้ลดน้อยลง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 90°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr ได้ค่าปริมาณน้ำมันที่บีบได้ต่ำสุดเท่ากับ 146.98 ml

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการลดของปริมาณกรดไขมันอิสระ คือ ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิความร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และระบายอากาศทิ้ง โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 10% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยได้ค่าปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำสุดเท่ากับ 3.94 % wt. และที่เงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 90°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 10% ได้ค่าปริมาณกรดไขมันอิสระสูงสุดเท่ากับ 6.24 % wt.

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู จากผลการศึกษาของ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 10% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่ 0.16 kWh/kg_{ปาล์มสด} หรือ 0.57MJ/kg_{ปาล์มสด} ผลของแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว พบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 110°C และอัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว โดยได้ค่าแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัวต่ำสุดเท่ากับ 12.70 N ผลการของปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ พบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 130°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 30 kg/hr ทำให้ค่าปริมาณน้ำมันที่บีบได้สูงสุดเท่ากับ 218.50 ml หรือ 200.15 g/kg และผลการศึกษาของปริมาณกรดไขมันอิสระ พบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิความร้อน 110°C อัตราการป้อนผลปาล์ม 40 kg/hr และระบายอากาศทิ้ง 10% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยได้ค่าปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำสุดเท่ากับ 3.94 % wt. ซึ่งยังไม่เกินระดับมาตรฐานกำหนด คือ 5 % wt. ดังนั้น สภาวะเงื่อนไขที่ อุณหภูมิความร้อนในช่วง 110-130°C อัตราการป้อนผลปาล์มในช่วง 30-40 kg/hr และระบายอากาศทิ้งในช่วง 10-20% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระคืออุณหภูมิความร้อน อัตราการป้อนผลปาล์ม และเปอร์เซ็นต์ระเหยอากาศทิ้ง ซึ่งส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ปริมาณน้ำมันที่ได้ และปริมาณกรดไขมันอิสระ ปริมาณเหล่านี้แสดงถึงประสิทธิภาพของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู ซึ่งจากการทดลองควรปรับปรุงเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูดียิ่งขึ้น ดังนี้

6.2.1 ควรปรับปรุงโครงสร้างของตัวเครื่องอบ เนื่องจากโครงสร้างของตัวเครื่องที่สร้างขึ้นเป็น โครงสร้างเหล็กทั้งหมด ซึ่งเมื่อทำการทดลองเกิดการสูญเสียความร้อนแก่ระบบมาก ต้องมีการหุ้มฉนวนตัวเครื่องเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้น้อยที่สุด

6.2.2 ควรปรับปรุงช่องทางเข้าของท่ออากาศร้อนแก่ระบบ เนื่องจากทางเข้าเดิมที่สร้างขึ้นมีช่องทางเข้าทางข้างของห้องอบ โดยต้องฉากันและใกล้เคียงช่องทางออกผลปาล์มทำให้เกิดการสูญเสียของอากาศลมร้อนภายในระบบ

6.2.3 ควรปรับช่องทางเข้ากับช่องทางออกของผลปาล์มของห้องอบ เนื่องจากการสูญเสียอากาศลมร้อนภายในระบบสู่ภายนอก ควรมีการออกแบบช่องทางเข้า ช่องทางออกของผลปาล์มให้มีสูญเสียลมร้อนให้น้อยที่สุด

6.2.4 ในระบบการทดลองของเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรูนี้ ได้มีการใช้พลังงานจากไฟฟ้าเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ระบบ ดังนั้น เมื่อนำไปใช้งานจริงควรปรับเปลี่ยนไปใช้พลังงานจากชีวมวลเป็นแหล่งให้ความร้อนแทน เพื่อลดต้นทุนในการอบในด้านพลังงานลง

บรรณานุกรม

- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2556. สถานการณ์พลังงานในปี 2554 และแนวโน้มปี 2555 (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.eppo.go.th>. [2 กุมภาพันธ์ 2556]
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2009. แผนปฏิบัติการการพัฒนาและส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.dede.go.th>. [25 สิงหาคม 2552]
- พูนสุข ประเสริฐสรรพ และ สุธีระ ประเสริฐสรรพ. 2537. การศึกษาและวิเคราะห์สถานภาพและศักยภาพของการใช้ประโยชน์จากของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, สำนักงานวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
- บัญญัติ นิยมวาส. 2544. การพัฒนาระบบอบแห้งผลปาล์ม.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 133 หน้า.
- ชนินทร พรนภดล. 2550. การวิเคราะห์และออกแบบตู้หนึ่งปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 252 หน้า.
- พรชัย เหลืองอากาศ. 2549. คัมภีร์ปาล์มน้ำมัน พืชเศรษฐกิจเพื่อบริโภคและอุปโภค. ครั้งที่ 1. มติชน, กรุงเทพฯ.
- สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2556. สถานการณ์สินค้าเกษตร ที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2555: ปาล์มน้ำมัน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook49.html> [4 กุมภาพันธ์ 2556]
- ผาสุข กุลละวณิชย์. 2531. โครงการแปรรูปผลิตภัณฑ์และพัฒนาด้านการตลาด ของโรงงานหีบน้ำมันปาล์มขนาดเล็ก ตามพระราชดำริ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 175 หน้า
- กิตติศักดิ์ ทวีสิน โสภากา. 2549. การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มหีบรวม โดยใช้กระบวนการผลิตแบบ Esterification และ Transesterification .วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 89 หน้า.
- สัณฑ์ชัย กลิ่นพิบูล. 2529. โครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมปาล์มขนาดเล็กตามพระราชดำริ, ชมรมเพื่อพัฒนาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กฤษ สมนึก. 2550. การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องของกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.148 หน้า

- วิชัย ปานสมุทร, วิทยา พงศ์พฤกษ์ และชวัน อินทร์รัมย์. 2003. พลังงานชีวมวลทางด้านการเกษตร และอุตสาหกรรมจากพืชปาล์มน้ำมัน. ส่วนพัฒนาพลังงานที่ 2 สำนักงานพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กันยายน 2546. หน้า 7-117.
- สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2540. โครงการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตผลปาล์มโดยใช้ช่อดอกหลายปาล์มน้ำมันและวัสดุเหลือใช้จากการสกัดน้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง. สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ไกรวุฒิ ศิริอนันตภักดิ์. 2534. การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบที่ได้บีบผลปาล์มทั้งผล. วิทยานิพนธ์อุตสาหกรรมเกษตรมหาบัณฑิต สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธีระยุทธ หลีจิตร. 2543. การจำลองแบบเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบไหลสวนทาง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรชัย จงจิตรไพศาล. 2543. เทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ: สกรูขนถ่ายวัสดุ ภาควิชาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ยรรยง ศรีสม และพันคำ ศรีอุทัย. 2547. สกรูลำเลียงสำหรับรถบรรทุกเมล็ดธัญพืช, ภาควิชาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, เทคนิค เครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม ปีที่ 21 ฉบับที่ 239.
- ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ และจำลอง ปราบแก้ว. 2548. เครื่องบีบน้ำมันปาล์มขนาดเล็กสำหรับกลุ่มเกษตร. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19. 19-21 ตุลาคม สงขลา.
- อนุชา หิรัญวัฒน์ และอัศวินยอดรักย์. 2549. การวิเคราะห์หาอัตราการขนถ่ายในแนวราบของอุปกรณ์ป้อนจ่ายวัสดุแบบใบสกรู. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 กุมภาพันธ์ – กรกฎาคม.
- มารีนา มะหนิ ชนะ จันทรน้ำ ภรพนา บัวเพชร และปิติ พานิชายุนนท์. 2552. แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งสับประรดแช่แข็งด้วยเครื่องอบแห้งชั้นบาง. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5. มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก.
- ธีรเดช ใหญ่บ่ก มารีนา มะหนิ จอมภพ แววศักดิ์ นพนันท์ นานคงแนบ และภรพนา บัวเพชร. 2550. การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบถาดโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าแบบหมุนเวียนอากาศ. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3. 23-25 พฤษภาคม โรงแรมใบหยกสกาย กรุงเทพฯ.

- Arnott. G.W., The Usiayan oil palm and analysis of its products. Uin Agriculture and Cooperation. Fed of Malaya Bull:1963.113
- Al-Kassir, A. 2005.Theoretical and experimental study of a direct contact thermal screw dryer for biomass residues. Applied Thermal Engineering 25, 2816–2826.
- Azis Ariffin, A. and Tan, Y.I. 1989. The effect of handing of FFB on the formation of FFA and the subsequent quality of crude palm oil. In Proceeding. PORIM International Palm Oil Development Conference. 5-9 Sept. Malaysia 1989.9
- Chong, C.L. and A. Gapor. 1983. Effect of Moisture and Trace Metals on oil Quality, pp.46-66. In Proceedings of Workshop on Quality in the Palm oil Industry, Palm oil Research institute of Malaysia, Kuala lumpur, Malaysia.
- Connemann, J. and Fischer, J. 1998 Biodiesel in Europe 1998. July 19-22. 1998
- Kleinbaum, G.D.,Kupper, L.L. and Muller, E.K. 1988. Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods.Vol.2. U.S.A: Duxbury Press.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
(การคำนวณและออกแบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู)

การคำนวณและออกแบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

1) สมมติฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบระบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

$$\text{อัตราการอบผลปาล์ม} = m_p = 20 \text{ kg/hr}$$

$$\text{ผลปาล์มมีความหนาแน่น} = \rho_p = 621.5 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{ความชื้นเริ่มต้นของผลปาล์ม} = mc_i = 50\% \text{ (ฐานเปียก)}$$

$$\text{ความชื้นสุดท้ายของผลปาล์ม} = mc_f = 10\% \text{ (ฐานเปียก)}$$

$$\text{อุณหภูมิสุดท้ายของผลปาล์ม} = T_o = 100^\circ\text{C}$$

$$\text{อุณหภูมิเริ่มต้นของผลปาล์ม} = T_i = 30^\circ\text{C}$$

2) การหาขนาดของใบสกรูและความเร็วรอบในการอบผลปาล์ม

จากสมมติฐานเบื้องต้น อัตราการอบผลปาล์ม 20 kg/hr ผลปาล์มมีความหนาแน่น (ρ_p) 621.5 kg/m³ กำหนดให้มุมเอียงที่ 0°C ผลปาล์มจัดอยู่ในประเภทที่ 1 มีรหัสวัสดุ คือ C25 ค่า $k = 0.45$ ขนาดของผลปาล์มใหญ่สุดเท่ากับ 30 mm ขนาดใบสกรู 250 mm มีระยะวางตามแนวรัศมี 80 mm และระยะวางใบสกรูกับราง 5 mm สามารถคำนวณหาขนาดเพลต สกรู ได้ดังนี้ [(ขนาดในสกรู/2)-(ระยะวางตามแนวรัศมี-ระยะวางใบสกรูกับราง)]x2 (จากบทที่ 2) ดังนั้นเมื่อแทนค่าจะได้ขนาดเพลตสกรู 50 mm ประมาณ 2 นิ้ว เนื่องจากชนิดของใบสกรูที่เลือกเป็นแบบระยะพิตช์ สั้นมาตรฐาน กำหนดให้ค่าแฟกเตอร์ $CF_1 = CF_2 = CF_3 = 1$ ดังนั้น หาความเร็วรอบในการอบผลปาล์มได้จากสมการที่ (ก.1) (พรชัย, 2543)

$$N = \frac{4m_s CF_1 CF_2 CF_3}{\rho_b \pi (D^2 - d^2) k p} \quad (\text{ก.1})$$

แทนค่าในสมการ (ก.1)

$$\begin{aligned} N &= \frac{4(20 \text{ kg/hr})(1)(1)(1)}{(621.5 \text{ kg/m}^3)(\pi)(0.25^2 - 0.05^2) \text{ m}^2 (0.45)(0.1) \text{ m}} \\ &= 15.18 \text{ รอบ/hr หรือ } 0.25 \text{ รอบ/นาที} \end{aligned}$$

ความเร็วรอบที่คำนวณได้ 15.18 รอบ/hr หรือ 0.25 รอบ/นาที และปรับให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริงดังนั้นใช้ความเร็วรอบที่ 0.5 รอบ/นาที (เนื่องต้องการให้ผลปาล์มเคลื่อนที่ในหนึ่งชั่วโมง) จากจากนั้นนำค่าความเร็วรอบ (N) มาคำนวณหาอัตราการอบผลปาล์มได้จากสมการที่ (ก.2)

$$m_s = \frac{\rho_b \pi (D^2 - d^2) k p N}{4 C F_1 C F_2 C F_3} \quad (\text{ก.2})$$

แทนค่าในสมการ (ก.2)

$$\begin{aligned} m_s &= \frac{(621.5 \text{ kg/m}^3)(\pi)(0.25^2 - 0.05^2) \text{ m}^2 (0.45)(0.1) \text{ m}(0.5)}{(4)(1)(1)(1)} \\ &= 0.66 \text{ kg/นาที หรือ } 39.53 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการอบผลปาล์มอยู่ที่ 40 kg/hr และเมื่อกำหนดให้ความยาวของสกรู 3 m สามารถหาเวลาในการเคลื่อนที่ผลปาล์มได้จากสมการ (ก.3)

$$\text{เวลาในการเคลื่อนที่ผลปาล์ม} = \left[\frac{\text{ความยาวสกรู/ระยะพิตซ์}}{\text{ความเร็วรอบ}} \right] \quad (\text{ก.3})$$

ดังนั้น ความยาวขนาดของใบสกรู 250 mm ระยะพิตซ์ 100 mm ความเร็วรอบ 0.5 รอบ/นาที อัตราการอบผลปาล์ม 40 kg/hr (คิดที่ผลปาล์มเต็มราง) และเวลาในการเคลื่อนที่ผลปาล์ม 60 นาที

3) การคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบผลปาล์ม

เริ่มจากกำหนดให้อุณหภูมิเข้าเครื่องอบที่ 120°C ผลปาล์มมีความชื้นเริ่มต้น 50% (ฐานเปียก) ต้องการลดความชื้นให้เหลือ 10% (ฐานเปียก) ความยาวของสกรู 3 m ขนาดของใบสกรู 250 mm ระยะพิตซ์ 100 mm ความเร็วรอบ 0.5 รอบ/นาที

หามวลของน้ำที่ต้องการระเหย จากสมการ (ก.4)

$$m_w = (M_i - M_f) \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ	m_w	คือ มวลของน้ำที่ต้องการระเหย
	M_i	คือ มวลของผลปาล์มก่อนอบ (kg)
	M_f	คือ มวลของผลปาล์มหลังอบ (kg)
ซึ่งค่า	M_f	ได้มาจากสมการการคำนวณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)

$$MC_w = \frac{m_w - m_d}{m_w} \quad (ก.5)$$

เมื่อ	MC_w	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก
	m_w	คือ น้ำหนักของวัสดุชื้น (kg)
	m_d	คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (kg)

โดยกำหนด น้ำหนักผลปาล์มสดที่ 20 kg/hr (คิดที่ผลปาล์มครึ่งราง) ความชื้น 50% (ฐานเปียก) แทนค่าในสมการที่ (ก.5) จะได้น้ำหนักของผลปาล์มแห้ง 10 kg/hr เมื่อได้น้ำหนักของผลปาล์มแห้งนำไปแทนค่าในสมการที่ (ก.5) อีกครั้งเพื่อหาค่า m_w น้ำหนักของผลปาล์ม ที่ความชื้น 10% (มาตรฐานเปียก) ได้ m_w เท่ากับ 11.11 kg/hr สามารถหามวลของน้ำที่ต้องการระเหยได้

$$\begin{aligned} m_w &= (20 - 11.11) \text{kg} \\ &= 8.89 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

ดังนั้น มวลของน้ำที่ต้องการระเหย = 8.89 kg/hr จากนั้นหาอัตราการไหลของมวลอากาศเชิงมวล ที่อุณหภูมิอากาศก่อนอบ (T_d) 120°C อุณหภูมิอากาศหลังอบ (T_f) 50°C และค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (C_p) = 1.014 kJ/kg°C (120°C) สามารถหาได้จากสมการ

$$m_w h_{fg} = m_a c_p (T_d - T_f) \quad (ก.6)$$

แทนค่าต่างๆ ได้ $m_a = 284 \text{ kg/hr}$ หรือ 0.08 kg/s

หาอัตราการไหลของอากาศเชิงปริมาตรที่ 120°C มีความหนาแน่น 0.8826 kg/m^3
จากสมการ (ก.7)

$$m_a = \rho Q \quad (\text{ก.7})$$

จากสมการ (ก.7) อัตราการไหลของอากาศเชิงปริมาตร

$$Q = m_a / \rho = 0.08 / 0.8826 = 0.09 \text{ m}^3 / \text{s}$$

ดังนั้น หาปริมาณความเร็วลมร้อนสำหรับอบ จากสมการ

$$Q = vA \quad (\text{ก.8})$$

จากสมการ (ก.8) ปริมาณความเร็วลมร้อนสำหรับอบ

$$\begin{aligned} v &= Q / A = 4(0.09) / \pi(0.255^2) \\ &= 1.76 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณความเร็วลมร้อนสำหรับอบ ประมาณ 2 m/s

4) การประเมินความร้อนที่ใช้ในการอบผลปาล์ม

ความร้อนที่ใช้อบผลปาล์ม โดยไม่คิดความร้อนสะสมในโครงสร้างของตัวเครื่องอบแบบสกรู และในการออกแบบได้มีการหุ้มฉนวนตัวเครื่องอบเพื่อให้ความร้อนที่สูญเสียให้กับบรรยากาศน้อยที่สุด จึงไม่คิดความร้อนในส่วนนี้ ดังนั้น ความร้อนที่ใช้อบผลปาล์มสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{ความร้อนที่ใช้อบผลปาล์ม} \quad Q = Q_{\text{evap}} + Q_{\text{palm}} + Q_{\text{air}} \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อ Q_{evap} คือ ความร้อนในการระเหยน้ำ $= (M_i - M_f)h_{fg}$

Q_{palm} คือ ความร้อนสะสมในผลปาล์ม $= m_p C_{p(\text{palm})}(T_o - T_i)$

Q_{air} คือ ความร้อนที่เพิ่มให้แก่ระบบ $= 0.1m_a C_{p(\text{air})}(T_f - T_i)$

(เป็นความร้อนที่เพิ่มให้แก่ระบบ โดยกำหนดให้อากาศที่ออกจากระบบไป 10%)

และ m_p คือ อัตราการอบผลปาล์ม 20 kg/hr

M_i คือ น้ำหนักผลปาล์มก่อนอบ 20 kg (ที่ 50% ฐานเปียก)

M_f คือ น้ำหนักผลปาล์มหลังอบ 11.11 kg (ที่ 10% ฐานเปียก)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ 2,270.2 kJ/kg°C

$C_{p(palm)}$ คือ ความร้อนจำเพาะของปาล์ม 0.862 kJ/kg°C

$C_{p(air)}$ คือ ความร้อนของอากาศ 1.0057 kJ/kg°C (ที่อุณหภูมิ 50°C)

T_o คือ อุณหภูมิสุดท้ายของผลปาล์ม 100°C

T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลปาล์ม 30°C

T_f คือ อุณหภูมิอากาศหลังอบที่ 50°C

แทนค่าต่างๆ ได้

$$\begin{aligned} Q &= [(20 - 11.11) * 2,270.2] + [20 * (0.862 * (100 - 30))] + [0.1 * 288 * 1.0057 * (50 - 30)] \\ &= [20,182.08 + 1,206.80 + 579.28] \text{ kJ/hr} \\ &= 21,968.16 \text{ kJ/hr หรือ } 6.10 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้น พลังงานความร้อนที่ใช้ออบผลปาล์ม เท่ากับ 6.10 kW

5) การหาขนาดต้นกำลังขับเคลื่อนของผลปาล์ม

การคำนวณหาต้นกำลังขับเคลื่อนของสกรูขนถ่ายเป็นเรื่องที่ยุ่งยากมาก เนื่องจากค่าที่ถูกต้องจริงๆ ในการขนถ่ายวัสดุปริมาณมวลแต่ละชนิดไม่สามารถหาได้ ซึ่งสมการต่อไปนี้เป็นสมการจากการแนะนำของมาตรฐานของประเทศอังกฤษ (BS) และสมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุของอเมริกา (CEMA) ต้นกำลังขับเคลื่อนของสกรูขนถ่ายวัสดุ โดยทั่วไปแล้วแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

$$1) \text{ ต้นกำลังขับเคลื่อนสำหรับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน} \quad P_f = 75.7LND^{1.7} \quad (\text{ก.10})$$

$$2) \text{ ต้นกำลังขับเคลื่อนที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ} \quad P_m = F_f F_p F_m m_s \rho_b L \quad (\text{ก.11})$$

$$3) \text{ ต้นกำลังขับเคลื่อนสำหรับยกวัสดุขึ้นตามแนวตั้ง} \quad P_v = m_s g H \quad (\text{ก.12})$$

$$\text{ดังนั้น สามารถหาต้นกำลังขับเคลื่อนได้จาก สมการ} \quad P = \frac{(P_f + P_m + P_v)F_0}{\eta} \quad (\text{ก.13})$$

เมื่อ L = ความยาวสกรูขนถ่ายวัสดุ (m)

N = ความเร็วรอบของเพลาสกรู (Hz)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู (m)

F_f = แฟกเตอร์ใบสกรู (ตารางที่ ก.1)

F_p = แฟกเตอร์ใบพัด (ตารางที่ ก.2)

F_m = แฟกเตอร์วัสดุ (ตารางที่ ก.3)

ρ_b = ความหนาแน่นวัสดุ (kg/m^3)

H = ระยะทางตามแนวคิ่ง (m)

F_0 = แฟกเตอร์กำลังขับ ถ้า $P_f + P_m$ มีค่ามากกว่า 4 kW ให้ใช้ค่า $F_0 = 1$

η = ประสิทธิภาพการส่งกำลังขับ (โดยทั่วไปมีค่า 0.85-0.95)

m_s = อัตราการอบผลปาล์มเชิงมวล (kg/hr)

ตารางที่ ก.1 แฟกเตอร์ชนิดใบสกรู F_f (ยรรยง และพินคำ, 2547)

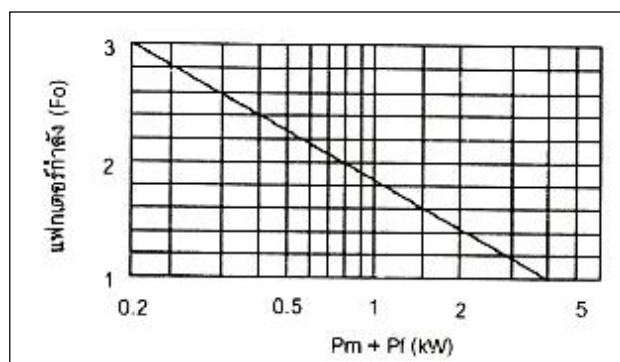
ชนิดใบสกรู	แฟกเตอร์ชนิดใบสกรูตามขนาดของแฟกเตอร์ความเต็มรวง			
	15%	30%	45%	95%
ใบสกรูมาตรฐาน	1.00	1.00	1.00	1.00
ใบตัด	1.10	1.15	1.20	1.30
ใบตัดและพับ	-	1.50	1.70	2.20
ใบแบบริบบอน	1.05	1.14	1.12	-

ตารางที่ ก.2 แฟกเตอร์ใบพัด F_p (ยรรยง และพินคำ, 2543)

จำนวนใบพัดต่อระยะพิตช์	0	1	2	3	4
แฟกเตอร์ใบพัด F_p	1.00	1.29	1.58	1.87	2.16

ตารางที่ ก.3 ค่าประมาณของแฟกเตอร์วัสดุ (ยรรยง และพินคำ, 2547)

ประเภทของวัสดุ	ค่าแฟกเตอร์วัสดุ (F_m)
ประเภทที่ 1	0.5-1.0
ประเภทที่ 2	1.0-2.0
ประเภทที่ 3	2.0-3.0
ประเภทที่ 4	3.0-4.0



รูปที่ ก.1 แฟกเตอร์กำลังขับ (F_0) (ยรรยง และพินคำ, 2547)

จากข้อมูลข้างต้น อัตราการอบผลปาล์ม 40 kg/hr (คิดที่ผลปาล์มเต็มร่าง) ผลปาล์ม มีความหนาแน่น 621.5 kg/m³ กำหนดให้ความยาวสกรู 3 m และขนาดของใบสกรู 250 mm ความเร็วรอบของเพลาสกรู 0.5 รอบ/นาที และจากตารางที่ ก.1-ก.3 ตามลำดับจะได้ $F_f = 1.0$, $F_p = 1.0$, $F_m = 0.2$ นำมาแทนค่าในสมการ (ก.10)-(ก.13) เนื่องจากมุมเอียง 0°C ทำให้ไม่มีกำลังขับตามแนวคิง

แทนค่าสมการ (ก.10)

$$\begin{aligned} \text{กำลังขับสำหรับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน } P_f &= 75.7(3m)(0.5/60s)(0.25m)^{1.7} \\ &= 23.71 \text{ watt} \end{aligned}$$

แทนค่าสมการ (ก.11)

$$\begin{aligned} \text{กำลังขับที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ } P_m &= (1)(1)(1)(40/3600kg/s)(621.5kg/m^3)(3m) \\ &= 20.71 \text{ watt} \end{aligned}$$

เนื่องจาก ค่า $P_f + P_m$ มีค่าน้อยกว่า 0.2 kW จากรูปที่ ก.1 จะได้แฟกเตอร์กำลังขับ $F_0 = 3$ โดยกำหนดให้ ประสิทธิภาพการส่งกำลังขับ เท่ากับ 0.85 (จากบทที่ 2) สามารถหากำลังขับรวมสกรูอบผลปาล์มได้

$$\begin{aligned} \text{กำลังขับรวมสกรูอบผลปาล์ม } P &= \frac{(23.71+20.71)(3)}{(0.85)} \\ &= 156.78 \text{ watt หรือ } 0.21 \text{ Hp} \end{aligned}$$

เนื่องจากกำลังขั้วรวมที่คำนวณได้ สามารถนำไปเลือกใช้ขนาดของมอเตอร์ แต่จากที่คำนวณได้ ประมาณ 0.5 Hp ในทางใช้งานจริงได้กำหนดขนาดของมอเตอร์ไว้ที่ 3 Hp

การคำนวณต้นทุนการอบ

คิดจากค่าไฟฟ้าที่ใช้จ่ายต่อน้ำหนักผลปาล์มที่อบ

$$\text{ต้นทุนการอบ} = \frac{\text{ค่าไฟฟ้าที่ใช้}}{\text{น้ำหนักผลปาล์มที่อบ}} \quad (\text{บาท/kg}_{\text{ปาล์มสด}}) \quad (\text{ก.14})$$

การคำนวณอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER)

คิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลปาล์มต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

$$\text{อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลปาล์ม}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด}} \quad (\text{kg}_{\text{น้ำ}}/\text{kWh}) \quad (\text{ก.15})$$

การคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

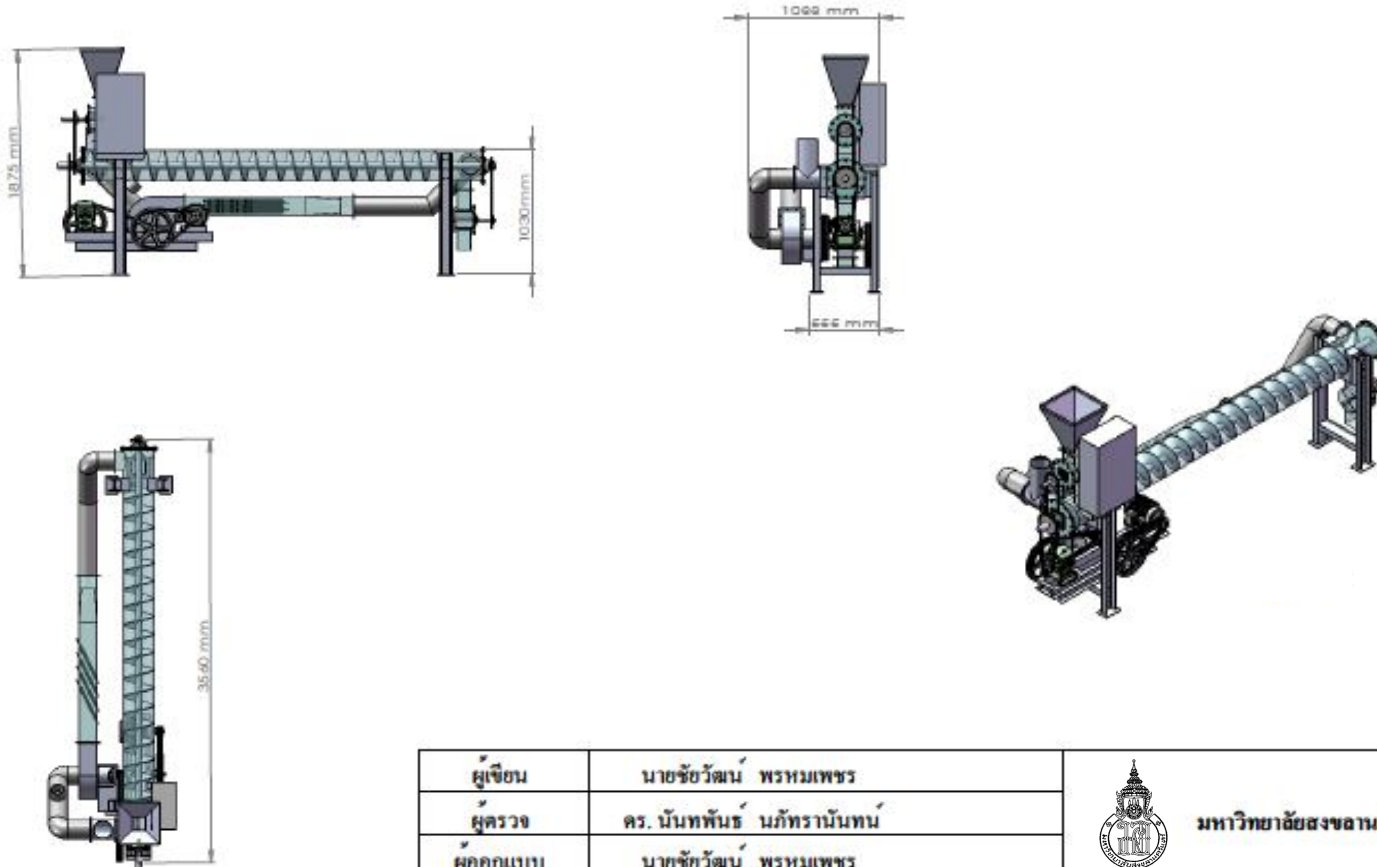
เป็นส่วนกลับของ SMER กล่าวคือ เป็นพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย


$$\text{ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด}}{\text{น้ำหนักผลปาล์มที่อบ}} \quad (\text{kWh/kg}_{\text{ปาล์มสด}}) \quad (\text{ก.16})$$

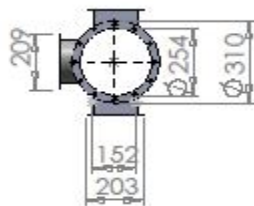
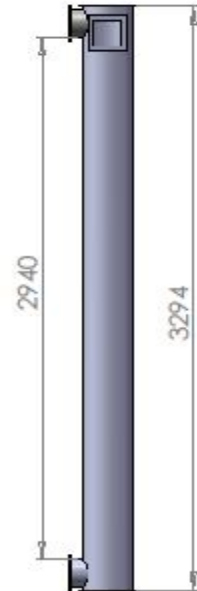
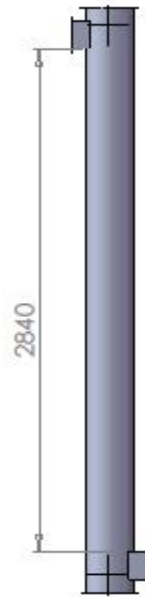
ภาคผนวก ข
(แบบเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู)


ตารางที่ ข.1 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดทดลองเครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู

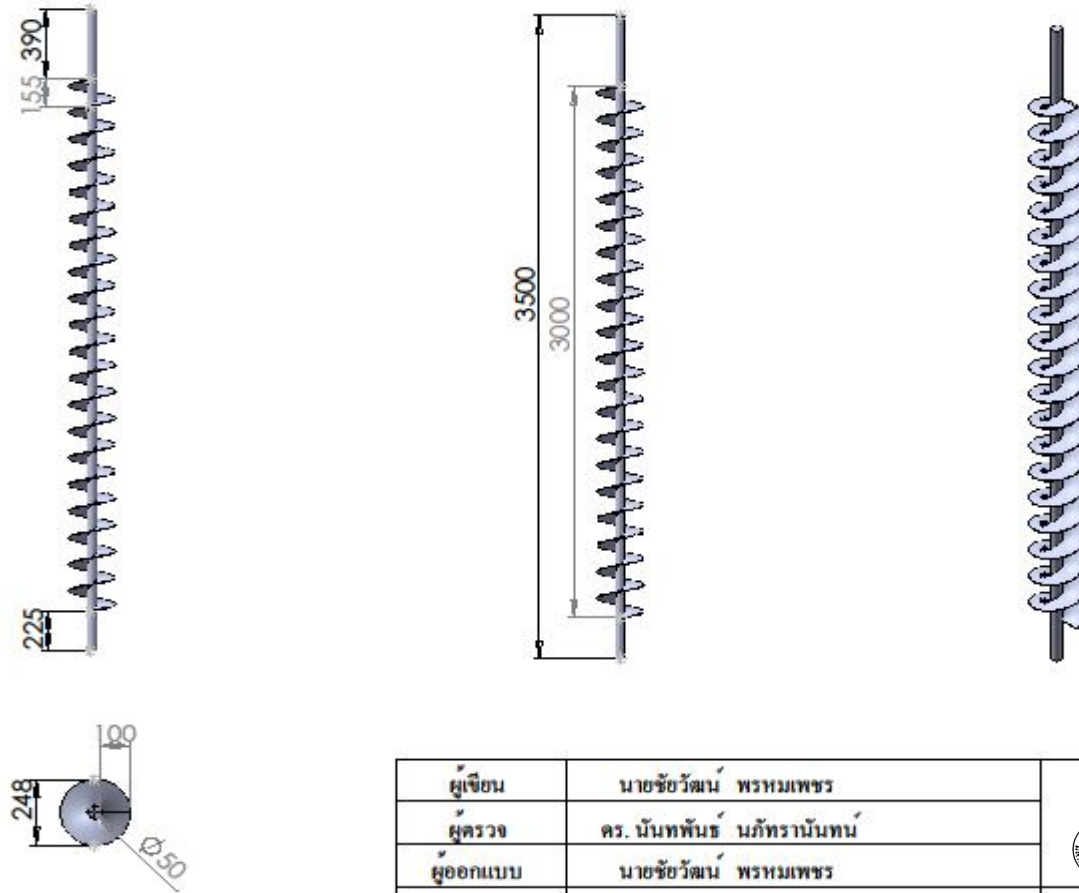
ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย	ขนาด	หมายเหตุ
1.	เครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	1	เครื่อง	ตามแบบ	หมายเลข ข.1
	- ท่อเหล็กทรงกลม	1	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.2
	- ชุดสกรูลำเลียง	1	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.3
	- ฝาปิดด้านข้าง	2	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.4
	- ชุดประกอบฐานรองเครื่องอบ	2	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.5
	- ทางเข้าผลปาล์ม	1	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.6
	- ทางออกผลปาล์ม	1	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.7
	- ชุดใบกวาดผลปาล์มทาง เข้า-ออก	2	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.8
	- Bearing	2	ตัว	รุ่น UCF210 (50 mm)	-
2.	ชุดสร้างลมร้อน				
	- Heater (CAL-P1071L-300MM)	8	อัน	1000W	-
	- โบลเวอร์	1	อัน	มอเตอร์ 1 HP	-
	- ก่อตั้งใต้ Heater	1	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.9
	- ท่อส่งอากาศร้อน	2	ชิ้น	ตามแบบ	หมายเลข ข.10
3.	ชุดส่งกำลัง				
	- มอเตอร์	1	อัน	3 HP, 1450 rpm	-
	- เกียร์ทด	1	อัน	เบอร์ 80, 1:60	-
	- เฟืองโซ่	1	อัน	เบอร์ 50, 34 ฟัน	-
	- เฟืองโซ่	1	อัน	เบอร์ 50, 22 ฟัน	-
	- เฟืองโซ่	3	อัน	เบอร์ 50, 34 ฟัน	-
	- มู่เล่	2	อัน	ร่อง B, 14 นิ้ว	-
	- มู่เล่	2	อัน	ร่อง B, 3 นิ้ว	-
4.	ชุดควบคุมการทำงาน	1	อัน	50x35x15 cm.	-




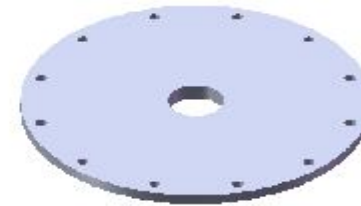
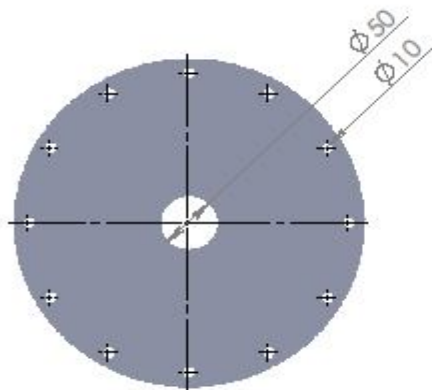
ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภัทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ
1 : 10	เครื่องอบผลปาล์มแบบสกรู	ข. 1




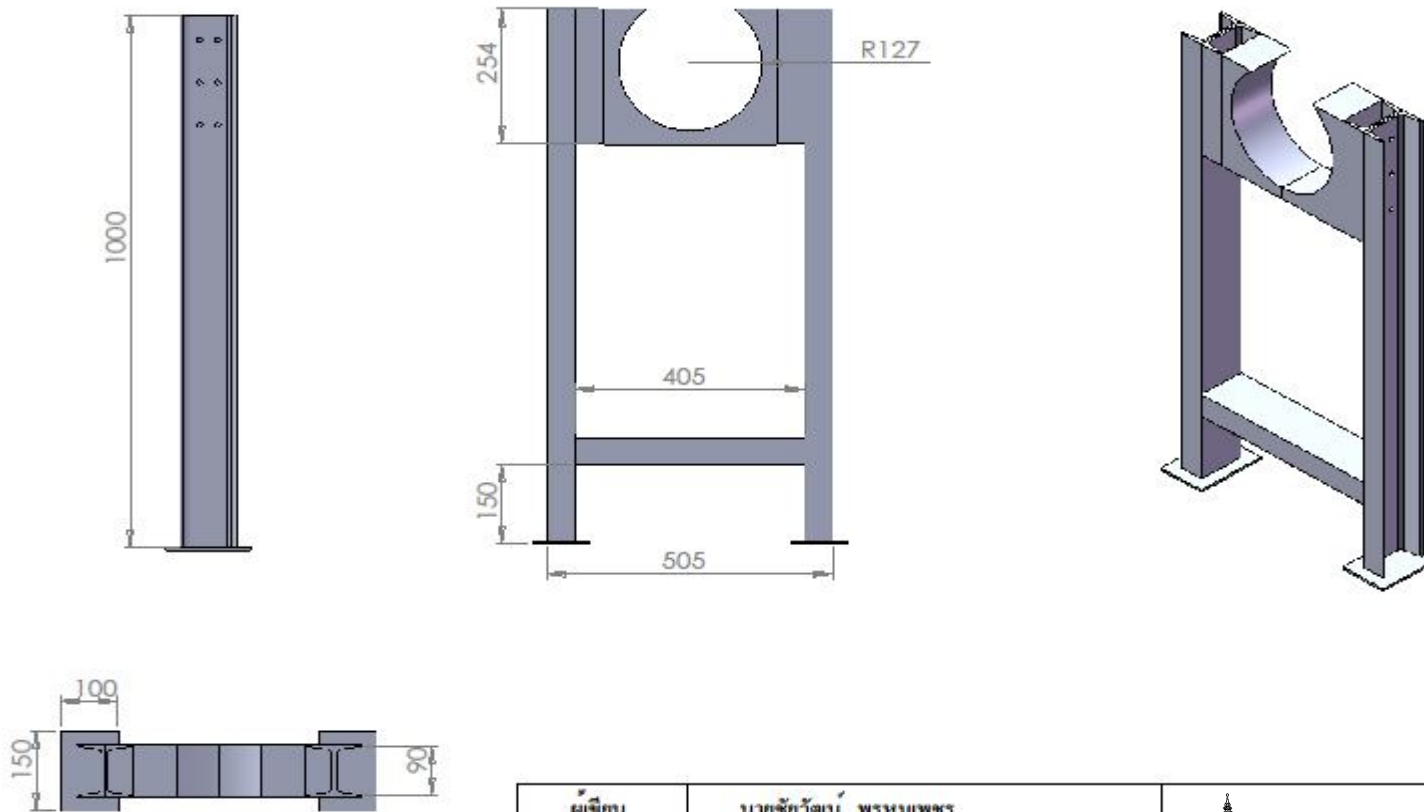
ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภัทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	หมายเลขแบบ ข. 2
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน ท่อเหล็กรางกลม	
1 : 25		




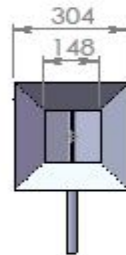
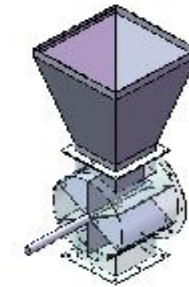
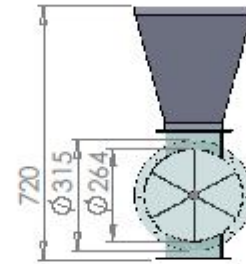
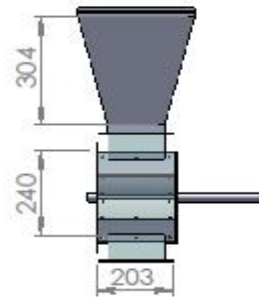
ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภีทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน ชุดสกรูลำเลียง	หมายเลขแบบ ข. 3
1 : 25		




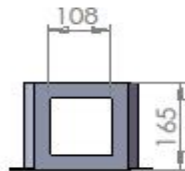
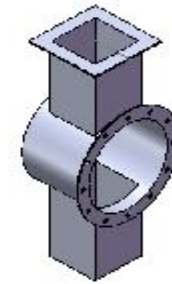
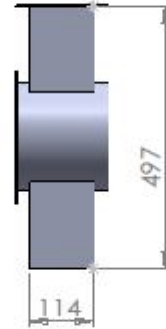
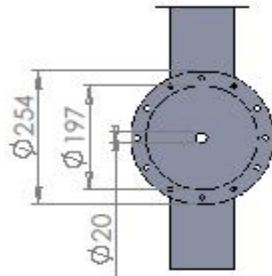
ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นกัทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน ฝาปิดคานข้าง	หมายเลขแบบ ข. 4
1 : 5		




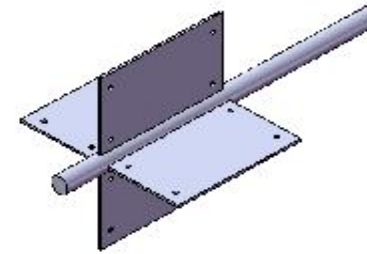
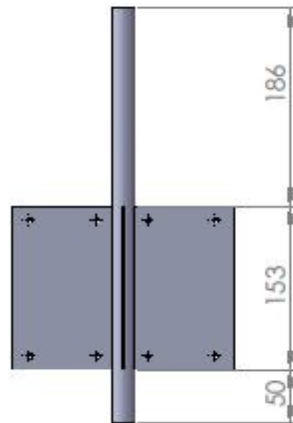
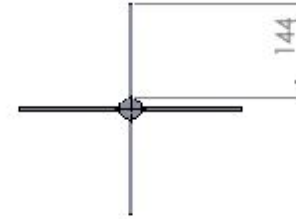
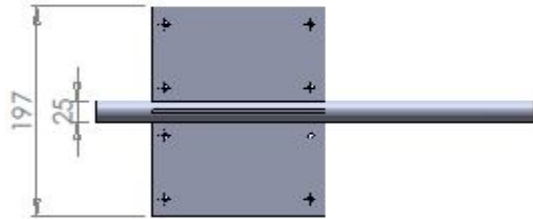
ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภีทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน ชุดประกอบฐานรองเครื่องอบ	หมายเลขแบบ ช. 5




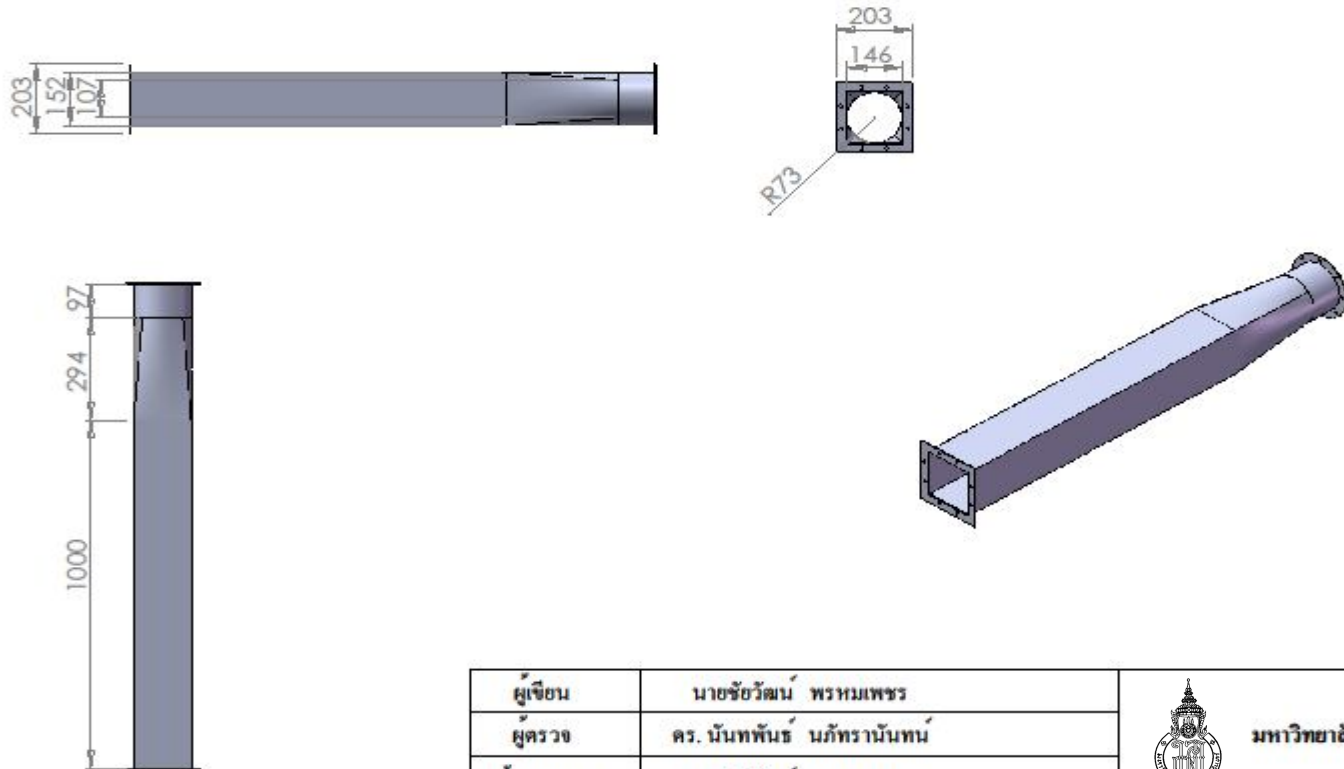
ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภัทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	หมายเลขแบบ ข. 6
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน ช่องทางเข้าผลปาล์ม	
1 : 15		




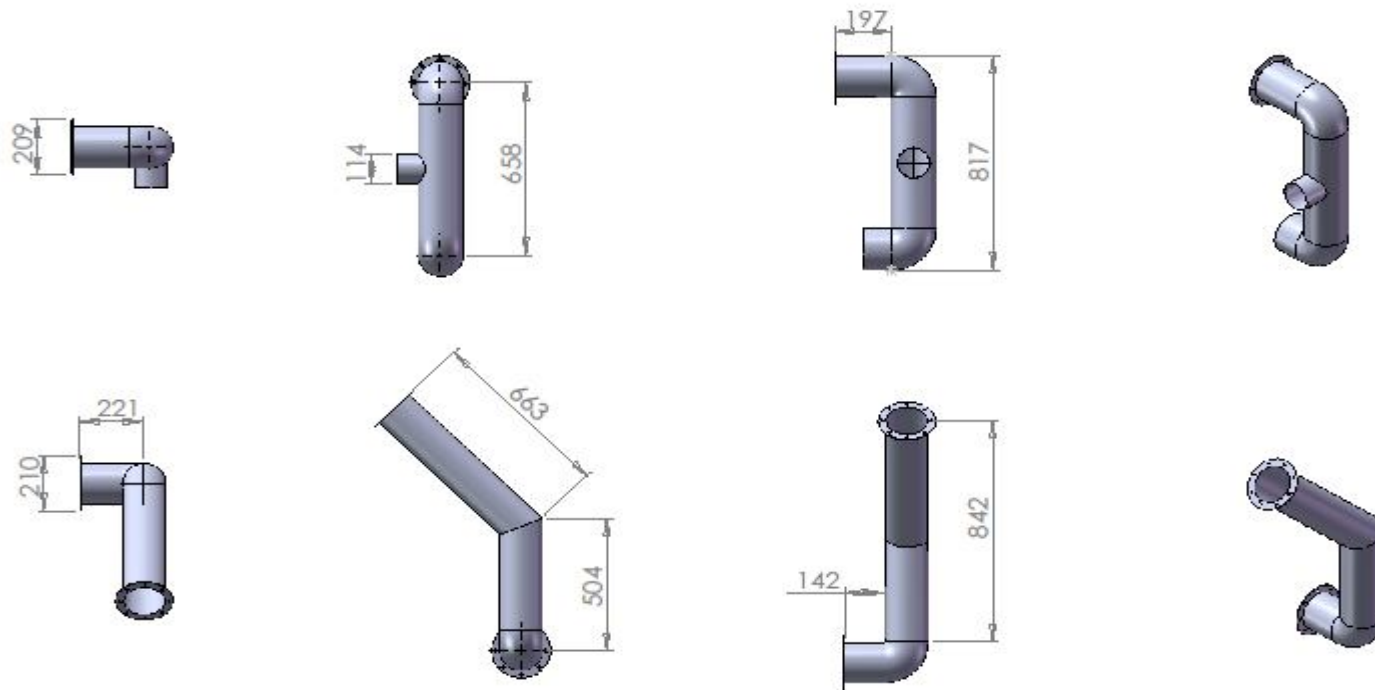
ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภัทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน ช่องทางออกผลปาล์ม	หมายเลขแบบ ข. 7
1 : 10		




ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภีทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ
1 : 5	โอบกวดคผลปาล์มทาง เข้า-ออก	ข. 8



ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน 1 : 15 กล่องใส่ฮีตเตอร์	หมายเลขแบบ ข. 9



ผู้เขียน	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ตรวจ	ดร. นันทพันธ์ นภัทรานันท์	
ผู้ออกแบบ	นายชัชวัฒน์ พรหมเพชร	
มาตราส่วน 1 : 20	ชื่อชิ้นงาน ท่อส่งอากาศร้อน	หมายเลขแบบ ข. 10

ภาคผนวก ค
(ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลอง)

ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

1.) กำหนดตัวแปรอิสระ

ตัวแปรที่จะทำการศึกษามีทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิลมร้อน (T) อัตราการป้อนผลปาล์ม (m) และเปอร์เซ็นต์ระบายนอากาศทิ้ง (v) เพื่อวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง แรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว ปริมาณน้ำมันที่บีบได้ ปริมาณกรดไขมันอิสระ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

2.) กำหนดช่วงของตัวแปรอิสระ

การกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระมีความสำคัญมากต่อสถานะที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบสนองที่ทำการศึกษา ซึ่งช่วงของตัวแปรอิสระไม่ควรกว้างเกินไปจนไม่สามารถระบุสถานะที่เหมาะสมได้อย่างชัดเจน จึงกำหนดช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระใน โปรแกรม essential experimental design and essential regression version 2.209 ดังแสดงในรูปที่ ก.1 และได้แสดงผลของช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระในตารางที่ ก.1

Factor Name	Units	Low Value	High Value
T		98	122
m		24	36
v		4	16

Input fields for 'v': [v] [] [4] [16]

Buttons: [< Back <] [OK]

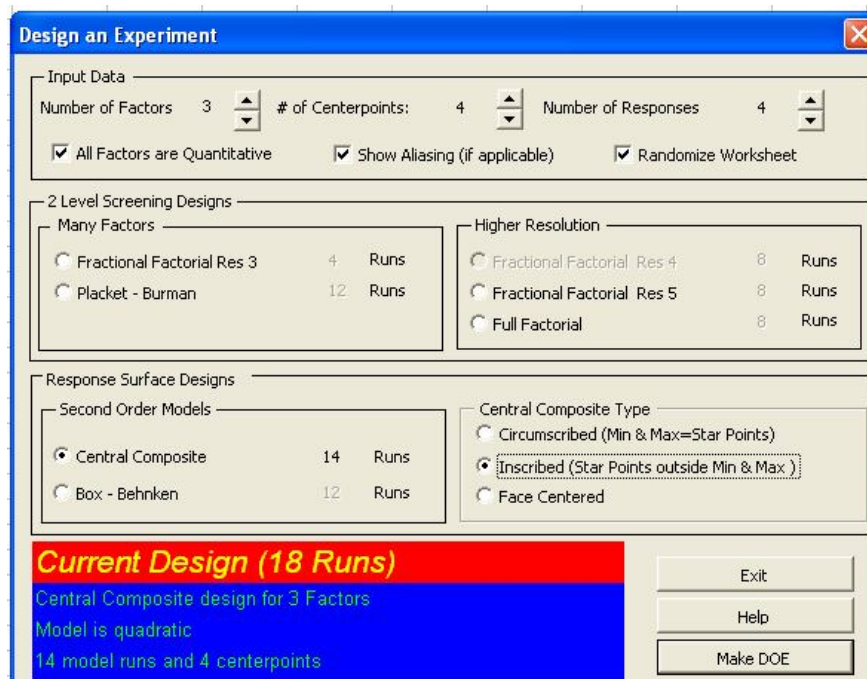
รูปที่ ก.1 ช่วงกาแปรค่าของตัวแปรอิสระ

ตารางที่ ค.1 ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	หน่วย	ระดับของตัวแปรอิสระ				
		-1.68	-1	0	1	1.68
อุณหภูมิความร้อน (T)	°C	90	98	110	122	130
อัตราการป้อนผลปาล์ม (m)	kg/hr	20	24	30	36	40
เปอร์เซ็นต์ระบายอากาศทิ้ง(v)	%	0	4	10	16	20

3.) เลือกวิธีวิเคราะห์การวางแผนการทดลอง

การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) โดยมี 3 ตัวแปรอิสระที่ 5 ระดับของตัวแปรอิสระ และมีตัวแปรผลตอบสนอง 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 วิธีวิเคราะห์การวางแผนการทดลอง

ภาคผนวก ง
(ตารางการแจกแจงแบบเอฟ)

ตารางที่ ง.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ $f_{0.05, v_1, v_2}$ ของการแจกแจงแบบเอฟ (Kleinbaum และคณะ, 1988)

		DEGREES OF FREEDOM FOR NUMERATOR																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	40	50	100	150
DEGREES OF FREEDOM FOR DENOMINATOR	1	161	200	216	226	230	234	237	239	241	242	243	244	245	246	246	247	247	248	248	249	250	251	252	253	253	254
	2	16.9	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
	3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.78	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70	8.69	8.68	8.67	8.67	8.66	8.65	8.62	8.60	8.58	8.54	8.54
	4	7.71	6.94	6.59	6.29	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86	5.84	5.83	5.82	5.81	5.80	5.77	5.75	5.72	5.70	5.66	5.65
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.60	4.59	4.58	4.57	4.56	4.52	4.50	4.46	4.44	4.41	4.39
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94	3.92	3.91	3.90	3.88	3.87	3.83	3.81	3.77	3.75	3.71	3.70
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51	3.48	3.48	3.47	3.46	3.44	3.40	3.38	3.34	3.32	3.27	3.26
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22	3.20	3.18	3.17	3.16	3.15	3.11	3.08	3.04	3.02	2.97	2.96
	9	5.12	4.25	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01	2.99	2.97	2.96	2.95	2.94	2.89	2.86	2.83	2.80	2.76	2.74
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85	2.83	2.81	2.80	2.79	2.77	2.73	2.70	2.66	2.64	2.61	2.59
	11	4.84	3.98	3.59	3.35	3.20	3.09	3.01	2.94	2.89	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72	2.70	2.69	2.67	2.66	2.64	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.43
	12	4.76	3.89	3.48	3.25	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.76	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62	2.60	2.58	2.57	2.56	2.54	2.50	2.47	2.43	2.40	2.35	2.33
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.02	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53	2.51	2.50	2.48	2.47	2.46	2.41	2.38	2.34	2.31	2.26	2.24
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46	2.44	2.43	2.41	2.40	2.39	2.34	2.31	2.27	2.24	2.19	2.17
	15	4.54	3.68	3.28	3.05	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.46	2.42	2.40	2.38	2.37	2.35	2.34	2.33	2.28	2.25	2.20	2.16	2.12	2.10
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.86	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.40	2.37	2.35	2.33	2.32	2.30	2.29	2.28	2.23	2.19	2.15	2.12	2.07	2.05
	17	4.45	3.59	3.20	2.97	2.81	2.70	2.61	2.54	2.49	2.44	2.41	2.38	2.35	2.33	2.31	2.29	2.27	2.26	2.24	2.23	2.18	2.15	2.10	2.06	2.02	2.00
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.65	2.56	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.31	2.29	2.27	2.25	2.23	2.22	2.20	2.19	2.14	2.11	2.06	2.04	1.99	1.96
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.62	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.23	2.21	2.20	2.18	2.17	2.16	2.11	2.07	2.03	2.00	1.94	1.91
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.25	2.22	2.20	2.18	2.17	2.15	2.14	2.12	2.07	2.04	1.99	1.97	1.91	1.88
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.22	2.20	2.18	2.16	2.14	2.12	2.11	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.88	1.84	
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.20	2.17	2.15	2.13	2.11	2.10	2.08	2.07	2.02	1.98	1.94	1.91	1.85	1.82	
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.18	2.15	2.13	2.11	2.09	2.08	2.06	2.05	2.00	1.96	1.91	1.88	1.82	1.78	
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.15	2.13	2.11	2.09	2.07	2.05	2.04	2.03	1.97	1.94	1.89	1.86	1.80	1.77	
25	4.24	3.39	2.99	2.75	2.60	2.48	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.14	2.11	2.09	2.07	2.05	2.04	2.02	2.01	1.96	1.92	1.87	1.84	1.78	1.75	
26	4.23	3.37	2.96	2.74	2.58	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.12	2.09	2.07	2.05	2.03	2.02	2.00	1.99	1.94	1.90	1.85	1.82	1.76	1.74	
27	4.21	3.35	2.94	2.71	2.56	2.44	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.09	2.06	2.04	2.02	2.00	1.99	1.97	1.96	1.91	1.87	1.82	1.79	1.73	1.71	
28	4.18	3.33	2.92	2.70	2.54	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.08	2.05	2.03	2.01	1.99	1.97	1.96	1.94	1.89	1.85	1.81	1.77	1.71	1.69	
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.17	2.13	2.09	2.06	2.04	2.01	1.99	1.98	1.96	1.95	1.93	1.88	1.84	1.79	1.76	1.70	1.67	
32	4.15	3.29	2.90	2.67	2.51	2.40	2.31	2.24	2.19	2.14	2.10	2.07	2.04	2.01	1.99	1.97	1.95	1.94	1.92	1.91	1.85	1.82	1.77	1.74	1.67	1.64	
34	4.13	3.28	2.88	2.65	2.49	2.38	2.29	2.23	2.17	2.12	2.08	2.05	2.02	1.99	1.97	1.95	1.93	1.92	1.90	1.89	1.83	1.80	1.75	1.71	1.65	1.62	
36	4.11	3.26	2.87	2.63	2.48	2.36	2.28	2.21	2.15	2.11	2.07	2.03	2.00	1.96	1.95	1.93	1.92	1.90	1.88	1.87	1.81	1.78	1.73	1.69	1.63	1.59	
38	4.10	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.26	2.19	2.14	2.09	2.05	2.02	1.99	1.96	1.94	1.92	1.90	1.88	1.87	1.85	1.80	1.76	1.71	1.68	1.61	1.57	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.97	1.95	1.92	1.90	1.89	1.87	1.85	1.84	1.78	1.74	1.69	1.66	1.59	1.56	
42	4.07	3.22	2.83	2.59	2.44	2.32	2.24	2.17	2.11	2.06	2.03	1.99	1.96	1.94	1.91	1.89	1.87	1.86	1.84	1.83	1.77	1.73	1.68	1.65	1.57	1.53	
44	4.06	3.21	2.82	2.58	2.43	2.31	2.23	2.16	2.10	2.05	2.01	1.98	1.95	1.92	1.90	1.88	1.86	1.84	1.83	1.81	1.76	1.72	1.67	1.63	1.56	1.52	
46	4.05	3.20	2.81	2.57	2.42	2.30	2.22	2.15	2.09	2.04	2.00	1.97	1.94	1.91	1.89	1.87	1.85	1.83	1.82	1.80	1.75	1.71	1.66	1.62	1.55	1.51	
48	4.04	3.19	2.80	2.57	2.41	2.29	2.21	2.14	2.08	2.03	1.99	1.96	1.93	1.90	1.88	1.86	1.84	1.82	1.81	1.79	1.74	1.70	1.64	1.61	1.54	1.49	
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.99	1.96	1.92	1.89	1.87	1.85	1.83	1.81	1.80	1.78	1.73	1.69	1.63	1.60	1.52	1.48	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.89	1.86	1.84	1.82	1.80	1.78	1.76	1.75	1.69	1.65	1.60	1.56	1.49	1.45	
70	3.93	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97	1.93	1.89	1.86	1.84	1.81	1.79	1.77	1.75	1.74	1.72	1.66	1.62	1.57	1.53	1.45	1.40	
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.96	1.91	1.88	1.84	1.82	1.79	1.77	1.75	1.73	1.72	1.70	1.64	1.60	1.54	1.51	1.43	1.38	
90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94	1.89	1.86	1.83	1.80	1.78	1.76	1.74	1.72	1.70	1.69	1.63	1.58	1.53	1.49	1.41	1.36	
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.89	1.85	1.82	1.79	1.77	1.75	1.73	1.71	1.69	1.68	1.62	1.57	1.52	1.48	1.39	1.34	
125	3.92	3.07	2.68	2.44	2.29	2.17	2.08	2.01	1.96	1.91	1.87	1.83	1.80	1.77	1.75	1.73	1.71	1.69	1.67	1.66	1.60	1.55	1.49	1.46	1.36	1.31	
150	3.90	3.06	2.66	2.43	2.27	2.16	2.07	2.00	1.94	1.89	1.85	1.82	1.79	1.76	1.73	1.71	1.69	1.67	1.65	1.64	1.58	1.54	1.48	1.44	1.34	1.29	
200	3.89	3.04	2.65	2.42	2.26	2.14	2.06	1.98	1.93	1.88	1.84	1.80	1.77	1.74	1.72	1.69	1.67	1.65	1.64	1.62	1.56	1.52	1.46	1.41	1.32	1.28	
300	3.87	3.03	2.63	2.40	2.24	2.13	2.04	1.97	1.91	1.86	1.82	1.78	1.75	1.72	1.70	1.68	1.66	1.64	1.62	1.61	1.54	1.50	1.43	1.39	1.30	1.26	

ภาคผนวก จ
(คำสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์)

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะกับตัวแปรอิสระ
ก่อนพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์

$$SEC = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (Tm) + \beta_6 (Tv) + \beta_7 (m^2) + \beta_8 (mv) + \beta_9 (v^2) \quad (จ.1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ จ.1

<i>Summary</i>	
R	0.991
R ²	0.983
R ² adjusted	0.963
Standard Error	0.009
# Points	18
PRESS	0.00
R ² for Prediction	0.885
Durbin-Watson d	1.721
First Order Autocorrelation	0.090
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	4.042
Precision Index	36.442

ANOVA						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regression	0.0383	98	0.00426	50.7430	0.000004	9
Residual	0.0007	2	0.00008			8
LOF Error	0.0006	1 (85)	0.00011	3.4285	0.169709	5
Pure Error	0.0001	0 (15)	0.00003			3
Total	0.0390	100				17

Term	P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF	
β_0	0.69609	0.04118	0.28642	0.0356044	1.35667	2.4303	
β_1	-0.00509	0.25905	0.00419	-0.0147490	0.00467	-1.2149	411.2248
β_2	-0.01470	0.05724	0.00663	-0.0299804	0.00067	-2.2193	257.1421
β_3	-0.00079	0.89591	0.00583	-0.0142316	0.01276	-0.1350	199.1344
β_4	0.00004	0.04965	0.00002	0.0000001	0.00018	2.3105	363.8786
β_5	-0.00007	0.16124	0.00004	-0.0001732	0.00003	-1.5437	187.1410
β_6	0.00003	0.46239	0.00004	-0.0000690	0.00014	0.7719	149.2015
β_7	0.00026	0.00619	0.00007	0.0000985	0.00043	3.6830	109.0189
β_8	-0.00007	0.46239	0.00009	-0.0002769	0.00014	-0.7719	48.4245
β_9	0.00002	0.80752	0.00007	-0.0001470	0.00028	0.2518	13.0717

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะกับตัวแปรอิสระ
หลังจากพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์

$$SEC = \beta_0 + \beta_1 (m) + \beta_2 (T^2) + \beta_3 (Tm) + \beta_4 (Tv) + \beta_5 (m^2) \quad (จ.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ จ.2

<i>Summary</i>	
R	0.989
R ²	0.978
R ² adjusted	0.969
Standard Error	0.008
# Points	18
PRESS	0.00
R ² for Prediction	0.939
Durbin-Watson d	1.769
First Order Autocorrelation	0.029
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	3.729
Precision Index	47.287

ANOVA

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regression	0.0381	98	0.00763	106.7802	0.000000002	5
Residual	0.0009	2	0.00007			12
LOF Error	0.0008	2 (88)	0.00008	2.5243	0.240974101	9
Pure Error	0.0001	0 (12)	0.00003			3
Total	0.0390	100				17

Term		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
β_0	0.3820	0.0007	0.084483	0.197888	0.566033	4.5212	-
β_1	-0.0125	0.0452	0.005603	-0.024733	-0.000316	-2.2352	216.0988
β_2	0.0000	0.0018	0.000005	0.000010	0.000033	3.9997	38.9376
β_3	-0.0001	0.0476	0.000039	-0.000172	-0.000001	-2.2057	166.6908
β_4	0.0000	0.0045	0.000003	0.000004	0.000020	3.4809	1.0327
β_5	0.0002	0.0022	0.000064	0.000108	0.000385	3.8742	101.4537

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว กับตัวแปรอิสระ
ก่อนพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์

$$F_{palm} = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (Tm) + \beta_6 (Tv) + \beta_7 (m^2) + \beta_8 (mv) + \beta_9 (v^2) \quad (จ.3)$$

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ จ.3

Summary	
R	0.924
R ²	0.854
R ² adjusted	0.689
Standard Error	0.189
# Points	18
PRESS	2.15
R ² for Prediction	-0.105
Durbin-Watson d	2.903
First Order Autocorrelation	-0.482
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	1.440
Precision Index	61.327

ANOVA						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regression	1.6631	85	0.1848	5.1894	0.0149	9
Residual	0.2849	15	0.0356			8
LOF Error	0.2834	15 (99)	0.0567	115.2836	0.0013	5
Pure Error	0.0015	0 (1)	0.0005			3
Total	1.9480	100				17

Term		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
β_0	38.18923	0.0002	5.8998	24.5843	51.79417	6.4730	-
β_1	-0.39334	0.0019	0.0863	-0.5923	-0.1944	-4.5585	411.2248
β_2	-0.30613	0.0551	0.1365	-0.6208	0.0086	-2.2433	257.1421
β_3	-0.08150	0.5165	0.1201	-0.3584	0.1954	-0.6786	199.1344
β_4	0.00174	0.0015	0.0004	0.0009	0.0026	4.7264	363.8786
β_5	0.00075	0.4437	0.0009	-0.0014	0.0029	0.8056	187.1410
β_6	0.00030	0.7583	0.0009	-0.0018	0.0024	0.3185	149.2015
β_7	0.00412	0.0234	0.0015	0.0007	0.0075	2.7942	109.0189
β_8	0.00003	0.9855	0.0019	-0.0042	0.0043	0.0187	48.4245
β_9	0.00240	0.1421	0.0015	-0.0010	0.0058	1.6282	13.0717

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ผิวผลปาล์มเริ่มยุบตัว (F_{palm}) กับตัวแปรอิสระหลังจากพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์

$$F_{palm} = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (T^2) + \beta_4 (m^2) \quad (จ.4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ จ.4

Summary	
R	0.890
R2	0.792
R2 adjusted	0.727
Standard Error	0.177
# Points	18
PRESS	1.15
R2 for Prediction	0.408
Durbin-Watson d	3.166
First Order Autocorrelation	-0.616
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	1.349
Precision Index	13.385

ANOVA

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regression	1.5420	79	0.3855	12.3432	0.0002	4
Residual	0.4060	21	0.0312			13
LOF Error	0.2385	12 (59)	0.0596	3.2045	0.0678	4
Pure Error	0.1675	9 (41)	0.0186			9
Total	1.9480	100				17

Term		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
β_0	33.2703	0.000004	4.4330	23.6935	42.8471	7.5052	-
β_1	-0.3403	0.000517	0.0743	-0.5009	-0.1798	-4.5792	347.8698
β_2	-0.1935	0.033406	0.0814	-0.3693	-0.0177	-2.3784	104.2010
β_3	0.0016	0.000354	0.0003	0.0009	0.0023	4.7889	347.9007
β_4	0.0036	0.018945	0.0013	0.0007	0.0065	2.6788	104.2319

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้ (Yield) กับตัวแปรอิสระก่อนพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์

$$Yield = \beta_0 + \beta_1(T) + \beta_2(m) + \beta_3(v) + \beta_4(T^2) + \beta_5(Tm) + \beta_6(Tv) + \beta_7(m^2) + \beta_8(mv) + \beta_9(v^2) \quad (จ.5)$$

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ จ.5

Summary	
R	0.987
R ²	0.975
R ² adjusted	0.947
Standard Error	5.096
# Points	18
PRESS	1570.550
R ² for Prediction	0.810
Durbin-Watson d	1.622
First Order Autocorrelation	0.102
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	2.760
Precision Index	481.441

ANOVA						
Source	SS	SS%	MS	F	F Signif	df
Regression	8061.00	97	895.660	34.490	0.0000187	9
Residual	207.74	3	25.970			8
LOF Error	207.59	3 (100)	41.520	834.385	0.0000654	5
Pure Error	0.15	0 (0)	0.049			3
Total	8268.70	100				17

Term		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
β_0	-390.7131	0.0398	159.3170	-758.099	-23.3273	-2.4524	-
β_1	7.8071	0.0101	2.3301	2.43380	13.1803	3.3505	411.2248
β_2	3.2268	0.4067	3.6851	-5.2710	11.7247	0.8756	257.1421
β_3	0.3301	0.9214	3.2429	-7.1481	7.80830	0.1018	199.1344
β_4	-0.0251	0.0354	0.0099	-0.0481	-0.0022	-2.5280	363.8786
β_5	-0.0096	0.7107	0.0250	-0.0673	0.04810	-0.3844	187.1410
β_6	-0.0003	0.9914	0.0250	-0.0580	0.05740	-0.0111	149.2015
β_7	-0.0437	0.3036	0.0398	-0.1355	0.04800	-1.0994	109.0189
β_8	-0.0013	0.9807	0.0500	-0.1167	0.11420	-0.0250	48.42450
β_9	-0.0275	0.5084	0.0398	-0.1193	0.06420	-0.6923	13.07170

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันปาล์มที่บีบได้กับตัวแปรอิสระ
หลังจากพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์

$$Yield = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (T^2) + \beta_3 (m^2) \quad (จ.6)$$

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ จ.1

<i>Summary</i>	
R	0.983
R ²	0.966
R ² adjusted	0.959
Standard Error	4.476
# Points	18
PRESS	736.09
R ² for Prediction	0.911
Durbin-Watson d	2.059
First Order Autocorrelation	-0.091
Collinearity	0.003
Coefficient of Variation	2.425
Precision Index	70.140

ANOVA

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regression	7988.159	97	2662.720	132.883	0.0000000002	3
Residual	280.532	3	20.038			14
LOF Error	227.785	3 (81)	45.557	7.773	0.0043669825	5
Pure Error	52.747	1 (19)	5.861			9
Total	8268.691	100				17

Term		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
β_0	-294.7274	0.0116	101.5345	-512.4973	-76.9576	-2.9027	-
β_1	6.9136	0.0022	1.8545	2.9361	10.8910	3.7280	337.5589
β_2	-0.0224	0.0186	0.0084	-0.0405	-0.0044	-2.6627	337.5592
β_3	-0.0081	0.0298	0.0033	-0.0153	-0.0009	-2.4184	1.0003

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) กับตัวแปรอิสระ
ก่อนพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์

$$FFA = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (Tm) + \beta_6 (Tv) + \beta_7 (m^2) + \beta_8 (mv) + \beta_9 (v^2) \quad (จ.7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ จ.7

Summary	
R	0.969
R ²	0.939
R ² adjusted	0.869
Standard Error	0.248
# Points	18
PRESS	3.750
R ² for Prediction	0.533
Durbin-Watson d	1.843
First Order Autocorrelation	0.057
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	5.208
Precision Index	629.931

ANOVA						
Source	SS	SS%	MS	F	F Signif	df
Regression	7.53418	94	0.83713	13.57026	0.00060	9
Residual	0.49351	6	0.06169			8
LOF Error	0.49343	6 (100)	0.09869	3947.47634	0.00001	5
Pure Error	0.00008	0 (0)	0.00003			3
Total	8.02769	100				17

Term		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
β_0	52.4775	0.0001	7.7652	34.5709	70.3841	6.7580	-
β_1	-0.7229	0.0002	0.1136	-0.9848	-0.4610	-6.3654	411.2248
β_2	-0.3112	0.1214	0.1796	-0.7254	0.1030	-1.7327	257.1421
β_3	-0.1373	0.4103	0.1581	-0.5018	0.2272	-0.8686	199.1344
β_4	0.0029	0.0003	0.0005	0.0018	0.0041	6.0607	363.8786
β_5	0.0010	0.4179	0.0012	-0.0018	0.0039	0.8541	187.1410
β_6	0.0001	0.9340	0.0012	-0.0027	0.0029	0.0854	149.2015
β_7	0.0023	0.2642	0.0019	-0.0021	0.0068	1.2008	109.0189
β_8	0.0008	0.7622	0.0024	-0.0049	0.0064	0.3132	48.4245
β_9	0.0055	0.0216	0.0019	0.0010	0.0100	2.8461	13.0717

สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) กับตัวแปรอิสระ
หลังจากพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์

$$FFA = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (m) + \beta_3 (v) + \beta_4 (T^2) + \beta_5 (v^2) \quad (จ.8)$$

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่ จ.8

Summary	
R	0.9597
R ²	0.9210
R ² adjusted	0.8881
Standard Error	0.2298
# Points	18
PRESS	1.9584
R ² for Prediction	0.7560
Durbin-Watson d	1.5976
First Order Autocorrelation	0.1949
Collinearity	0.0002
Coefficient of Variation	4.8192
Precision Index	878.1894

ANOVA

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regression	7.39373	92	1.47875	27.99055	0.000003	5
Residual	0.63396	8	0.05283			12
LOF Error	0.63389	8 (100)	0.07043	2817.27746	0.000010	9
Pure Error	0.00008	0 (0)	0.00003			3
Total	8.02769	100				17

Term		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
β_0	45.1653	0.000002	5.3256	33.5617	56.7688	8.4807	
β_1	-0.6638	0.000017	0.0967	-0.8744	-0.4532	-6.8669	347.8698
β_2	-0.0493	0.000470	0.0104	-0.0718	-0.0267	-4.7525	1.0000
β_3	-0.0932	0.025678	0.0366	-0.1729	-0.0134	-2.5455	12.4668
β_4	0.0028	0.000033	0.0004	0.0019	0.0038	6.4197	347.9007
β_5	0.0050	0.014163	0.0018	0.0012	0.0089	2.8672	12.4977

ภาคผนวก ฉ
(ข้อมูลจากผลการทดลอง)

ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองที่ 1 อุณหภูมิลมร้อน90°Cอัตราการป้อน30kg/hrและระบายอากาศที่10%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	34.52	81.90	13.47	150.90	6.84
2	33.20	76.92	12.99	146.30	6.45
3	32.18	74.42	12.98	145.50	5.84
4	32.02	74.14	12.97	145.20	6.75
Average	32.98	76.85	13.10	146.98	6.47

ตารางที่ จ.2 ผลการทดลองที่ 2 อุณหภูมิลมร้อน98°Cอัตราการป้อน24kg/hr และระบายอากาศที่4%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	35.37	86.46	13.31	160.80	5.98
2	34.29	82.02	13.03	158.20	5.88
3	33.47	78.54	12.95	156.40	5.73
4	33.42	78.28	12.90	156.00	5.62
Average	34.14	81.33	13.05	157.85	5.80

ตารางที่ น.3 ผลการทดลองที่ 3 อุณหภูมิลมร้อน 98°C อัตราการป้อน 24kg/hr และระบายอากาศที่ 16%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม ($^{\circ}\text{C}$)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	34.98	85.50	12.86	158.20	5.83
2	33.53	80.98	12.28	156.10	5.68
3	32.32	77.58	12.43	154.70	5.74
4	32.23	77.34	12.19	154.50	5.75
Average	33.27	80.35	12.44	155.88	5.75

ตารางที่ น.4 ผลการทดลองที่ 4 อุณหภูมิลมร้อน 98°C อัตราการป้อน 36kg/hr และระบายอากาศที่ 4%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม ($^{\circ}\text{C}$)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	35.17	84.60	13.41	156.80	5.63
2	34.07	80.02	13.27	154.70	5.55
3	33.17	76.56	12.79	152.50	4.88
4	33.07	76.12	12.67	152.20	4.74
Average	33.87	79.33	13.04	154.05	5.20

ตารางที่ น.5 ผลการทดลองที่ 5 อุณหภูมิลมร้อน 98°C อัตราการป้อน 36kg/hr และระบายอากาศที่ 16%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม ($^{\circ}\text{C}$)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	34.68	83.68	12.44	154.20	5.32
2	33.26	79.36	12.66	152.80	5.40
3	32.11	75.90	12.53	150.60	5.07
4	32.02	75.58	12.47	150.40	4.82
Average	33.02	78.63	12.53	152.00	5.15

ตารางที่ น.6 ผลการทดลองที่6 อุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อน 20kg/hr และระบายอากาศที่ 10%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม ($^{\circ}\text{C}$)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.36	28.61	62.40	27.17
1	35.36	99.44	12.85	200.00	5.83
2	34.28	95.38	12.82	195.60	5.63
3	33.52	91.80	12.80	189.90	5.40
4	33.37	91.66	12.80	189.40	5.40
Average	34.13	94.57	12.82	193.73	5.57

ตารางที่ น.7 ผลการทดลองที่7 อุณหภูมิลมร้อน110°Cอัตราการป้อน30kg/hrและระบายอากาศทิ้ง10%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	33.42	97.54	13.85	195.00	4.66
2	32.32	93.18	13.82	190.60	4.53
3	31.24	89.81	13.80	185.80	3.84
4	31.07	89.66	13.80	185.50	3.84
Average	32.01	92.55	13.82	189.23	4.22

ตารางที่ น.8 ผลการทดลองที่8 อุณหภูมิลมร้อน110°Cอัตราการป้อน30kg/hrและระบายอากาศทิ้ง10%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.23	28.61	62.40	27.17
1	33.43	97.63	13.94	195.00	4.67
2	32.31	93.20	13.80	190.60	4.41
3	31.23	89.79	13.60	185.50	3.99
4	31.06	89.50	13.47	185.20	3.86
Average	32.01	92.53	13.70	189.08	4.23

ตารางที่ ๙.9 ผลการทดลองที่ 9 อุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อน 30kg/hr และระบายน้ำที่ 10%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	33.43	97.44	13.31	195.00	4.79
2	32.33	93.19	13.21	189.80	4.48
3	31.25	89.82	13.16	185.20	3.85
4	31.08	89.62	13.11	184.80	3.76
Average	32.02	92.52	13.20	188.70	4.22

ตารางที่ ๙.10 ผลการทดลองที่ 10 อุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อน 30kg/hr และระบายน้ำที่ 10%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	32.43	96.44	13.11	195.50	4.79
2	32.33	93.19	13.21	189.80	4.48
3	31.25	89.82	13.16	185.20	3.85
4	31.08	89.62	13.11	184.80	3.76
Average	31.77	92.27	13.15	188.83	4.22

ตารางที่ 11 ผลการทดลองที่ 11 อุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 20%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ นํ้ามันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	32.94	95.48	13.79	190.40	5.97
2	31.59	90.58	13.59	188.50	5.29
3	30.33	87.34	13.51	182.30	4.95
4	30.04	87.14	13.34	181.10	4.69
Average	31.23	90.14	13.56	185.58	5.23

ตารางที่ 12 ผลการทดลองที่ 12 อุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 0%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ นํ้ามันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	36.42	99.20	13.15	201.00	4.99
2	35.35	96.90	13.10	196.60	4.73
3	35.24	95.30	13.04	190.90	4.62
4	35.14	95.04	13.08	190.60	4.59
Average	35.54	96.61	13.09	194.78	4.73

ตารางที่ 13 ผลการทดลองที่ 13 อุณหภูมิลมร้อน 110°C อัตราการป้อน 40 kg/hr และระบายนํ้าที่ 10%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ นํ้ามันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	33.28	94.70	14.14	189.40	4.03
2	32.01	89.78	13.56	186.50	4.12
3	31.30	86.56	13.55	179.30	3.85
4	31.10	86.36	13.46	178.10	3.77
Average	31.92	89.35	13.68	183.33	3.94

ตารางที่ 14 ผลการทดลองที่ 14 อุณหภูมิลมร้อน 122°C อัตราการป้อน 24 kg/hr และระบายนํ้าที่ 4%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ นํ้ามันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	35.37	102.70	13.31	214.70	4.44
2	34.66	101.36	13.05	210.00	4.78
3	33.80	99.26	13.02	208.70	4.69
4	33.67	99.16	13.15	208.20	4.61
Average	34.38	100.62	13.13	210.40	4.63

ตารางที่ 15 ผลการทดลองที่ 15 อุณหภูมิลมร้อน 122°C อัตราการป้อน 24 kg/hr และระบายนํ้าที่ 16%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ นํ้ามันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	34.16	101.54	12.64	212.30	4.46
2	33.05	100.76	12.43	208.80	4.40
3	31.99	98.70	12.16	206.60	4.32
4	31.89	98.66	12.23	206.10	4.08
Average	32.77	99.92	12.37	208.45	4.32

ตารางที่ 16 ผลการทดลองที่ 16 อุณหภูมิลมร้อน 122°C อัตราการป้อน 36 kg/hr และระบายนํ้าที่ 4%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ นํ้ามันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	32.90	100.92	13.15	207.80	4.44
2	31.44	99.64	13.37	205.60	3.99
3	30.30	97.86	13.26	202.20	3.82
4	30.02	97.46	13.02	200.10	3.82
Average	31.17	98.97	13.20	203.93	4.02

ตารางที่ 17 ผลการทดลองที่ 17 อุณหภูมิลมร้อน 122°C อัตราการป้อน 36 kg/hr และระบายน้ำที่ 16%

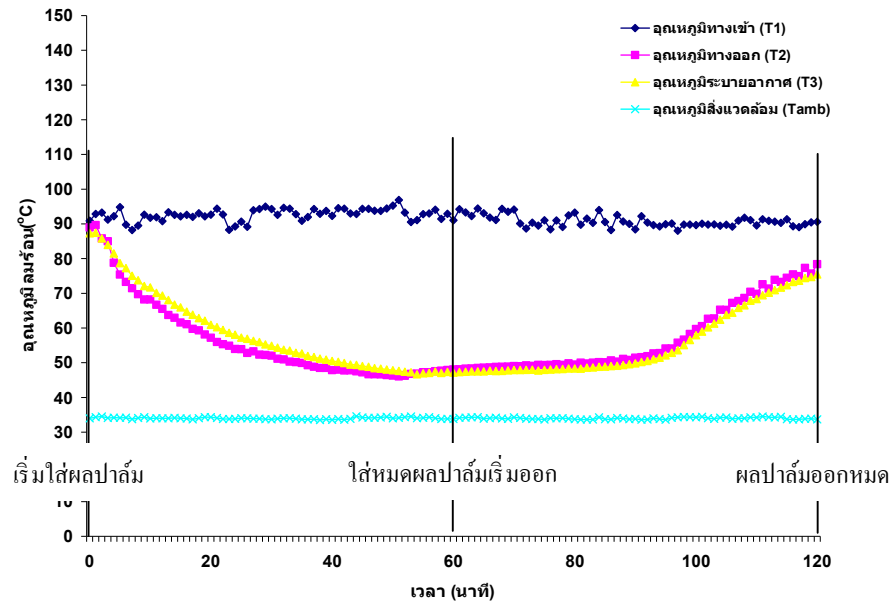
ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	32.44	100.16	13.57	206.10	4.35
2	31.08	98.66	13.57	203.20	4.27
3	29.86	96.36	13.21	199.50	3.98
4	29.46	96.02	13.28	198.00	3.90
Average	30.71	97.80	13.41	201.70	4.13

ตารางที่ 18 ผลการทดลองที่ 18 อุณหภูมิลมร้อน 130°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายน้ำที่ 10%

ตัวอย่าง การ ทดลอง	ความ ชื้น (%db)	อุณหภูมิ ภายในผลปาล์ม (°C)	ความแข็ง ที่ผิวผลปาล์ม (N)	ปริมาณ น้ำมันที่หีบได้ (ml)	ปริมาณ ร้อยละ FFA (% wt.)
ก่อนอบ	45.65	32.44	28.61	62.40	27.17
1	31.91	106.70	14.09	220.70	5.29
2	30.66	104.98	14.03	219.20	5.00
3	29.36	103.43	13.95	217.20	4.69
4	29.10	103.18	13.84	216.90	4.59
Average	30.26	104.57	13.98	218.50	4.89

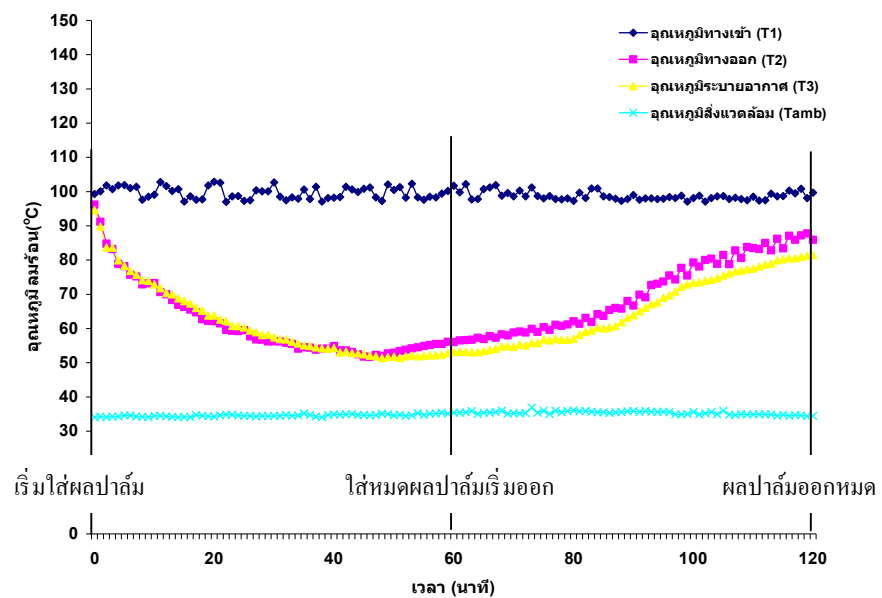
ภาคผนวก ช
(กราฟผลอุณหภูมิอากาศร้อน)

ผลการทดลองที่ 1 อุณหภูมิร้อนที่ 90°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายน้ำที่ 10%



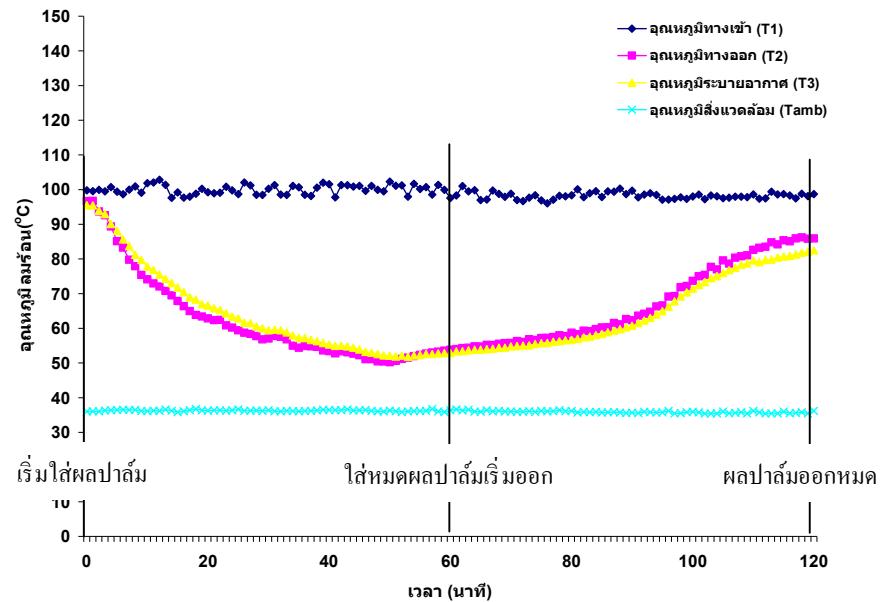
รูปที่ ช.1 ความสัมพันธ์อุณหภูมิร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 1

ผลการทดลองที่ 2 อุณหภูมิร้อนที่ 98°C อัตราการป้อน 24 kg/hr และระบายน้ำที่ 4%



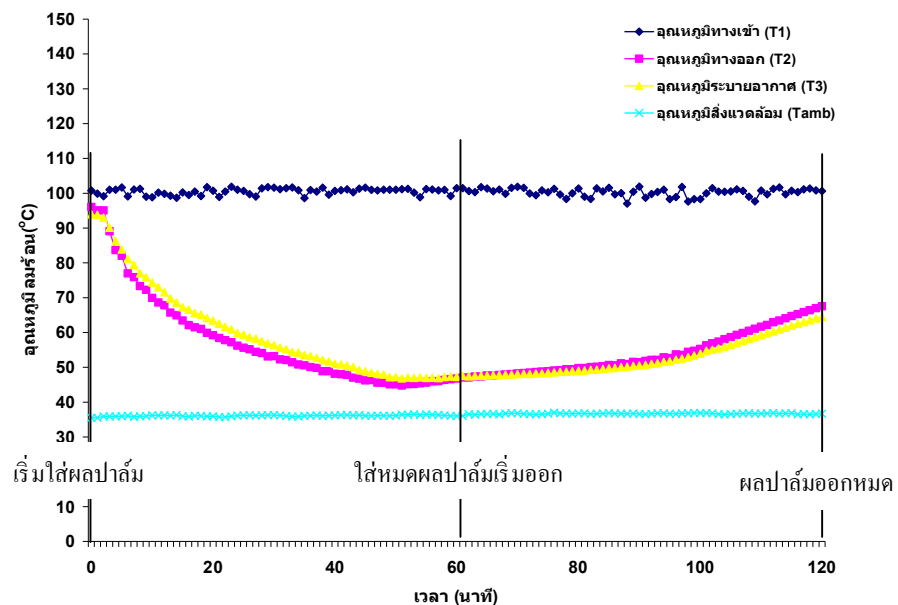
รูปที่ ช.2 ความสัมพันธ์อุณหภูมิร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 2

ผลการทดลองที่ 3 อุณหภูมิร้อนที่ 98°C อัตราการป้อน 24 kg/hr และระบายน้ำที่ 16%



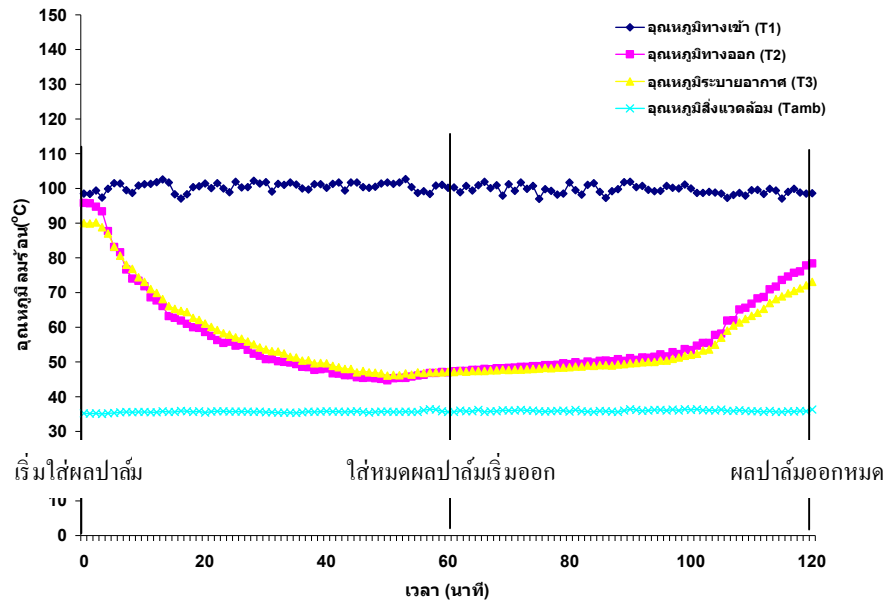
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์อุณหภูมิร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 3

ผลการทดลองที่ 4 อุณหภูมิร้อนที่ 98°C อัตราการป้อน 36 kg/hr และระบายน้ำที่ 4%



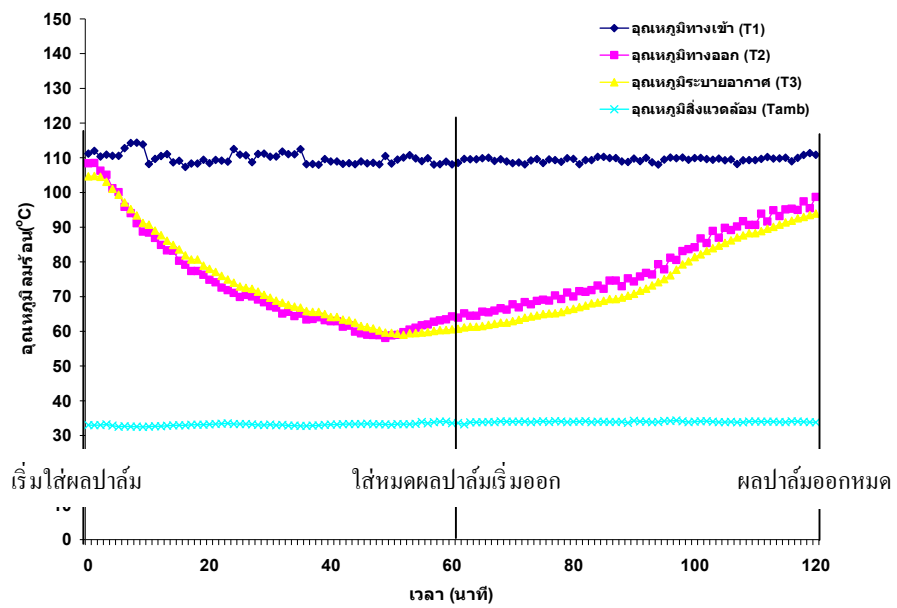
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์อุณหภูมิร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 4

ผลการทดลองที่ 5 อุณหภูมิลมร้อนที่ 98°C อัตราการป้อน 36 kg/hr และระบายน้ำที่ 16%



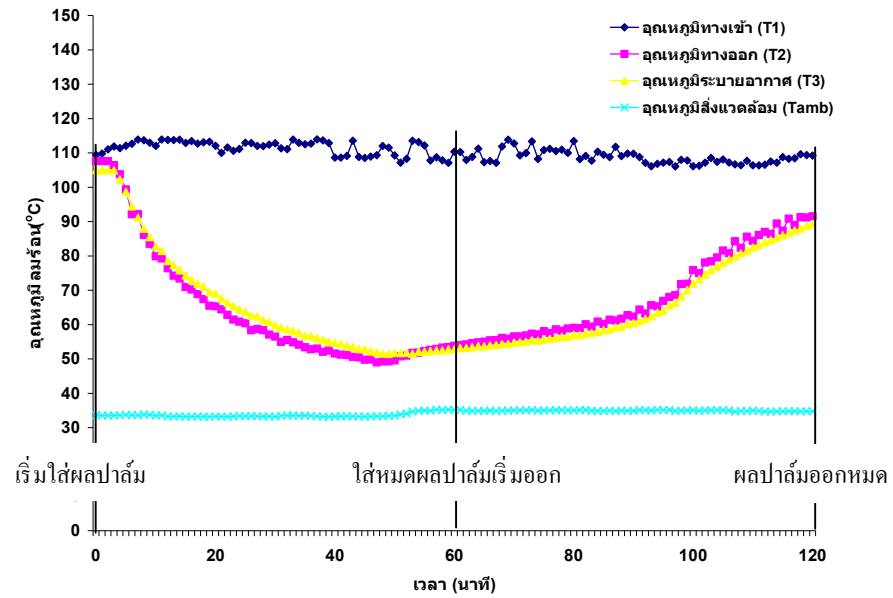
รูปที่ ช.5 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 5

ผลการทดลองที่ 6 อุณหภูมิลมร้อนที่ 110°C อัตราการป้อน 20 kg/hr และระบายน้ำที่ 10%



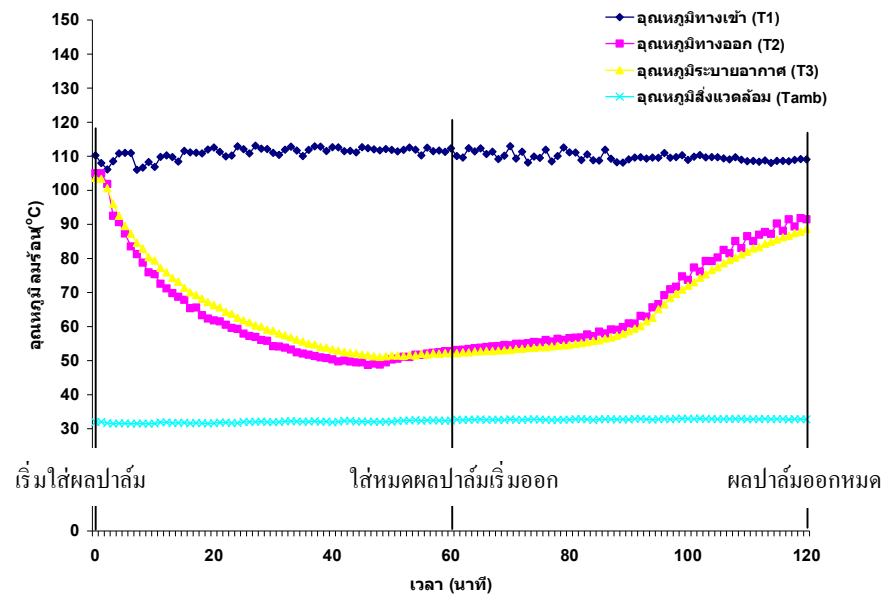
รูปที่ ช.6 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 6

ผลการทดลองที่ 7 อุณหภูมิลมร้อนที่ 110°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 10%



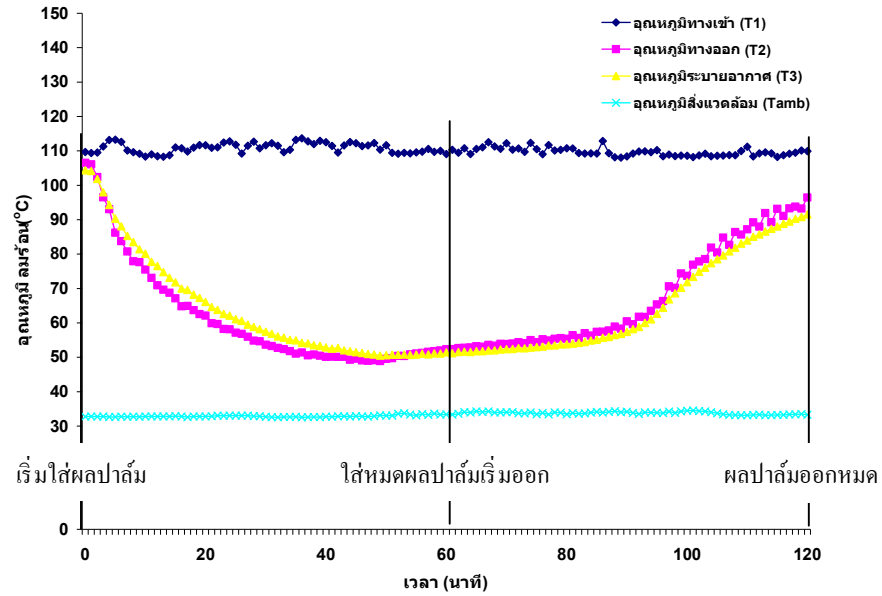
รูปที่ ๗.๗ ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 7

ผลการทดลองที่ 8 อุณหภูมิลมร้อนที่ 110°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 10%



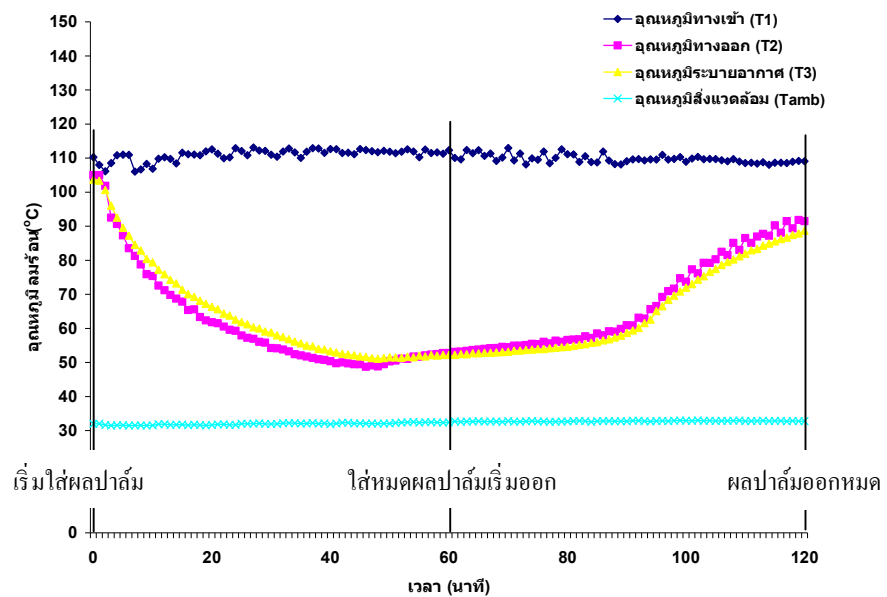
รูปที่ ๗.๘ ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 8

ผลการทดลองที่ 9 อุณหภูมิลมร้อนที่ 110°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 10%



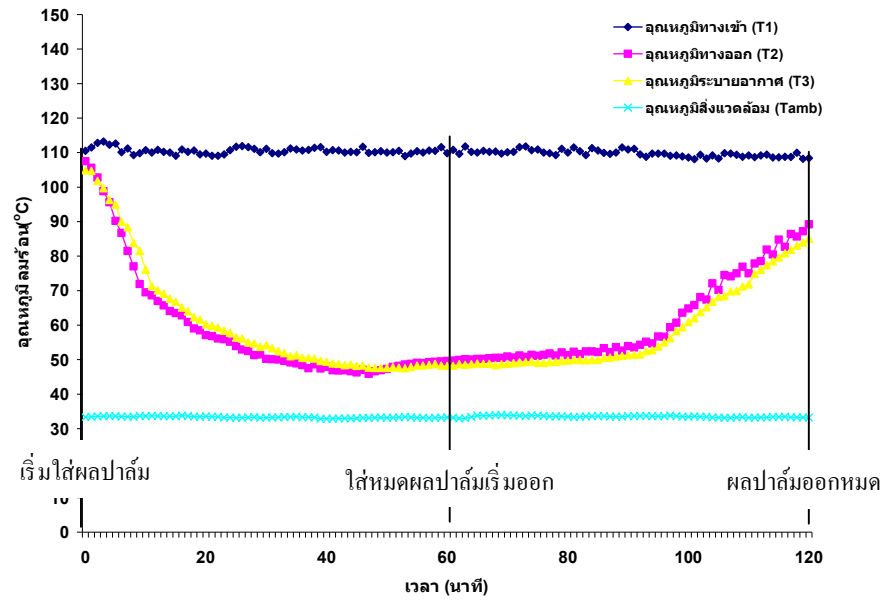
รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 9

ผลการทดลองที่ 10 อุณหภูมิลมร้อนที่ 110°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 10%



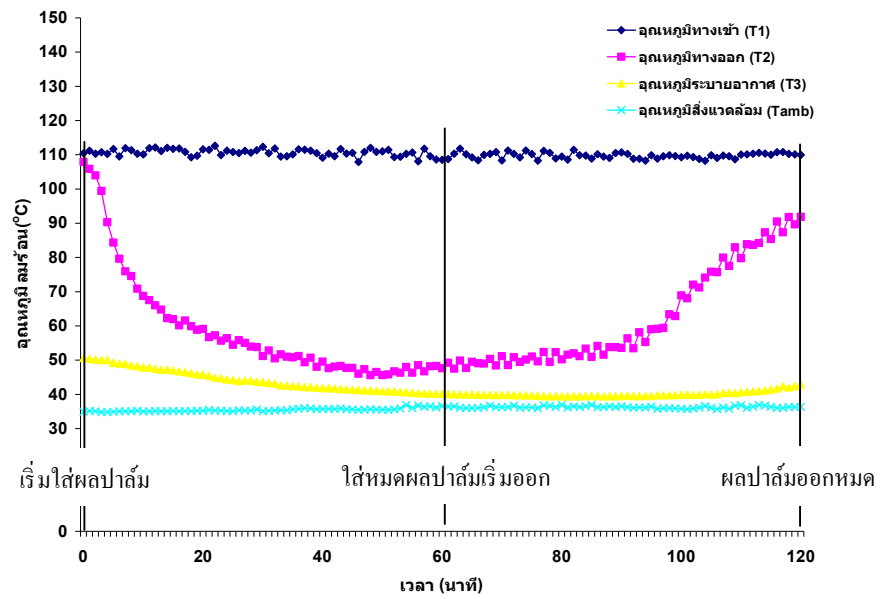
รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 10

ผลการทดลองที่ 11 อุณหภูมิลมร้อนที่ 110°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 20%



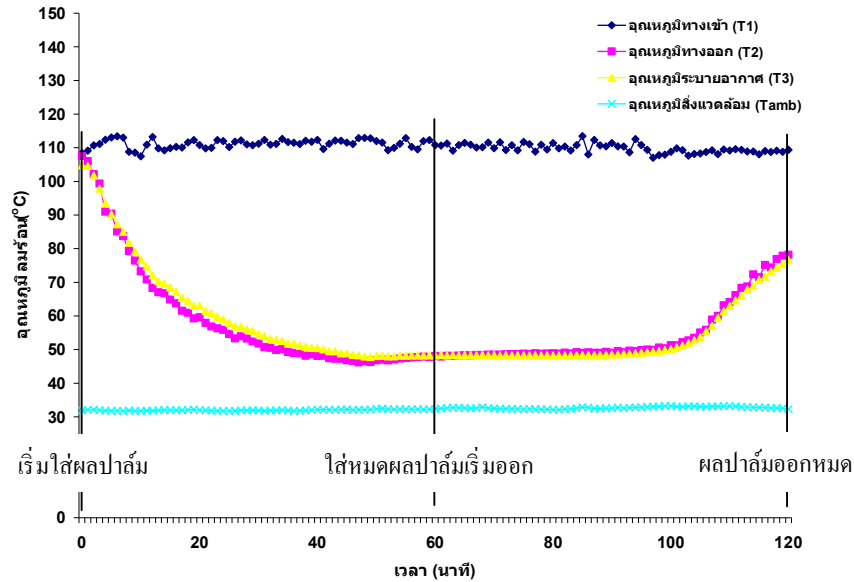
รูปที่ ๑.11 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 11

ผลการทดลองที่ 12 อุณหภูมิลมร้อนที่ 110°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 0%



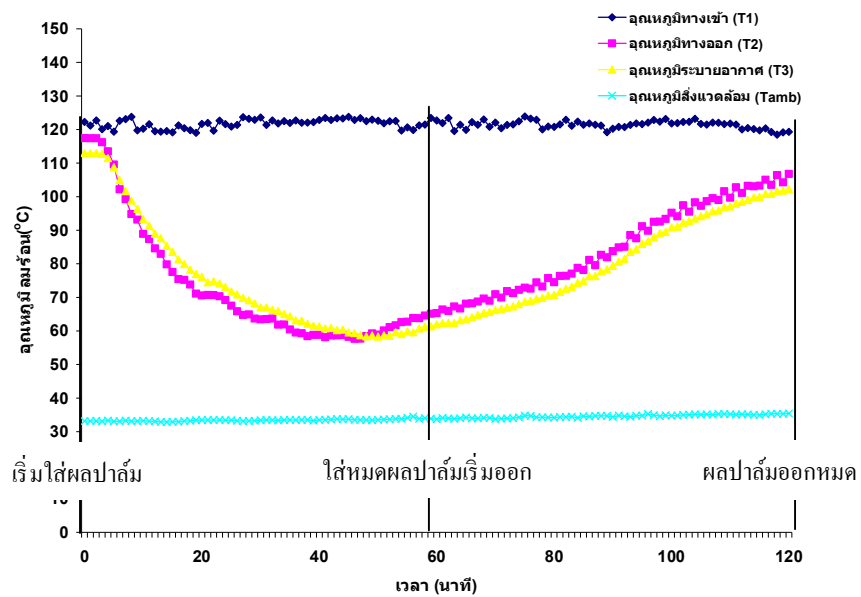
รูปที่ ๑.12 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 12

ผลการทดลองที่ 13 อุณหภูมิลมร้อนที่ 110°C อัตราการป้อน 40 kg/hr และระบายน้ำที่ 10%



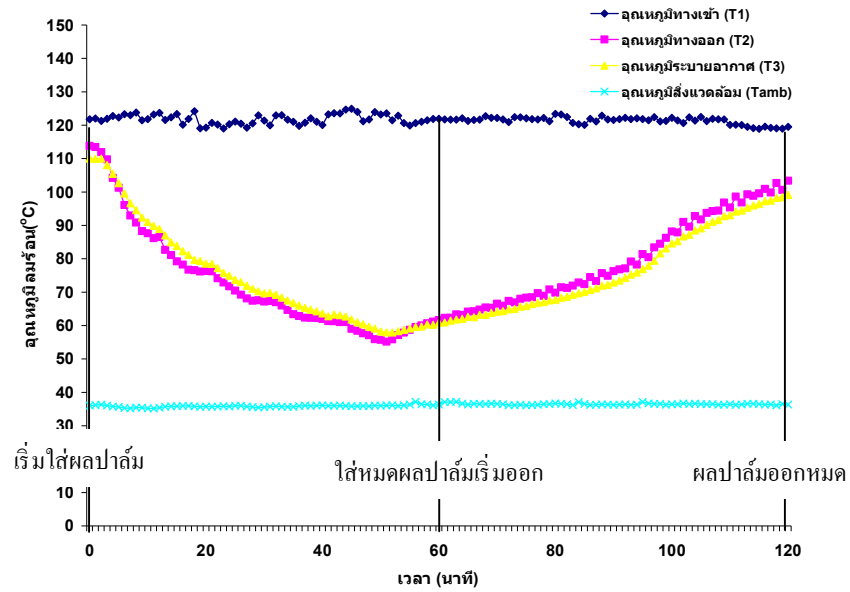
รูปที่ ๑๓.13 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 13

ผลการทดลองที่ 14 อุณหภูมิลมร้อนที่ 122°C อัตราการป้อน 24 kg/hr และระบายน้ำที่ 4%



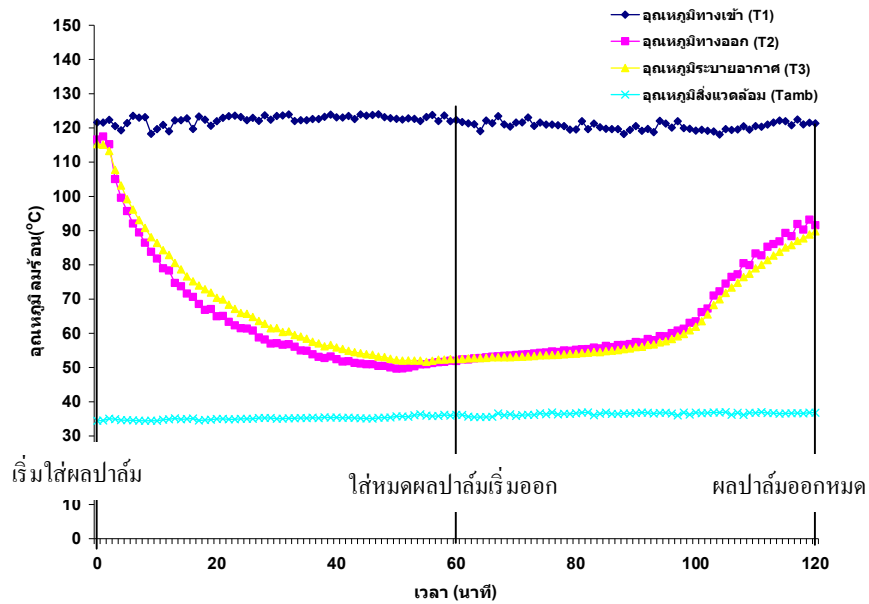
รูปที่ ๑๓.14 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 14

ผลการทดลองที่ 15 อุณหภูมิลมร้อนที่ 122°C อัตราการป้อน 24 kg/hr และระบายนํ้าที่ 16%



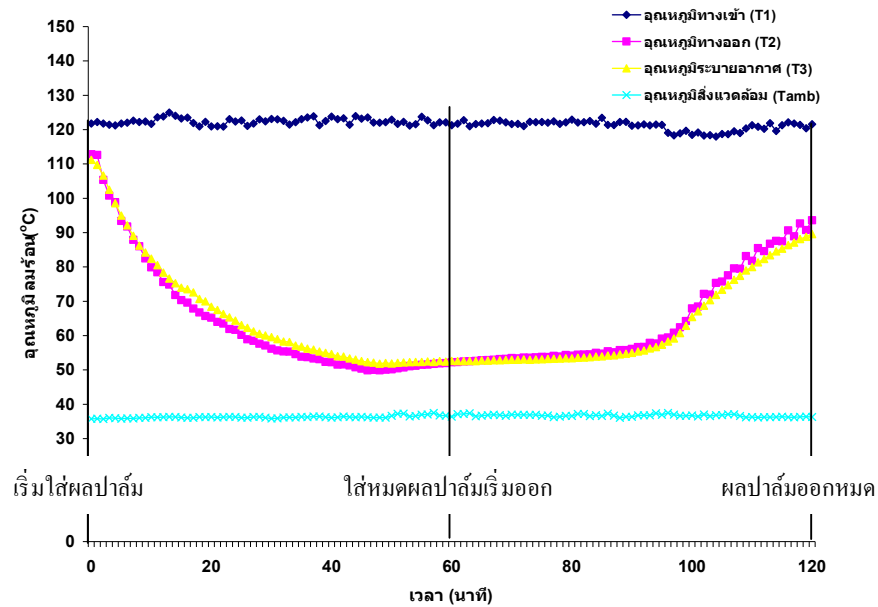
รูปที่ ๑๕.15 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 15

ผลการทดลองที่ 16 อุณหภูมิลมร้อนที่ 122°C อัตราการป้อน 36 kg/hr และระบายนํ้าที่ 4%



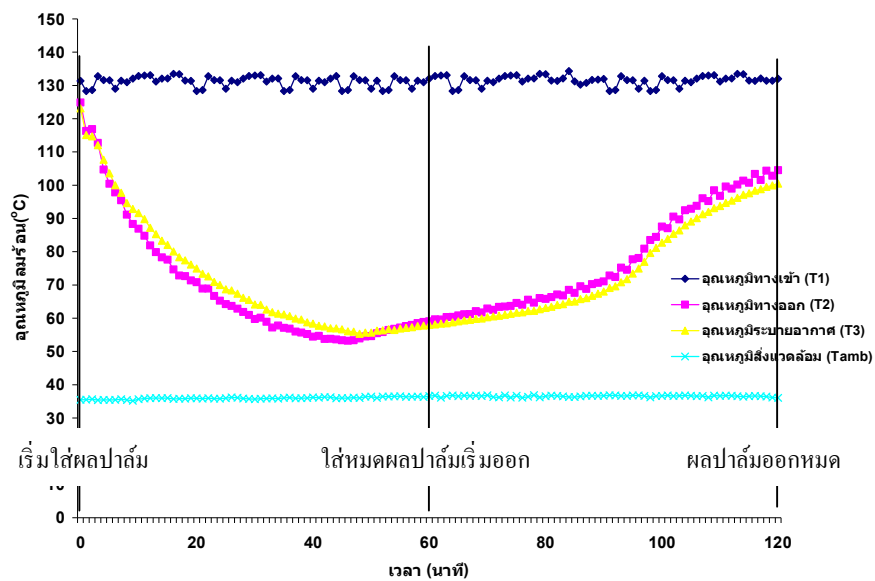
รูปที่ ๑๕.16 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 16

ผลการทดลองที่ 17 อุณหภูมิลมร้อนที่ 122°C อัตราการป้อน 36 kg/hr และระบายนํ้าที่ 16%



รูปที่ ๑๗.17 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 17

ผลการทดลองที่ 18 อุณหภูมิลมร้อนที่ 130°C อัตราการป้อน 30 kg/hr และระบายนํ้าที่ 10%



รูปที่ ๑๗.18 ความสัมพันธ์อุณหภูมิลมร้อนกับเวลา ของการทดลองที่ 18

ภาคผนวก ฅ
(ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์)

ผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการเกิดกรดไขมันอิสระและความแข็ง ของผิวผลปาล์ม

The effects of palm fruit temperature on the free fatty acid occurring and the surface hardness

ชัยวัฒน์ พรหมเพชร¹, นันทพันธ์ นภัทรานันท์¹ และ กำพล ประทีปชัยกุล¹

¹สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ. สงขลา 90112 โทรศัพท์: 086 9632 232, โทรสาร: 074 212 893
E-mail: nunthaphan@me.psu.ac.th, wat_tsu@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) และการลดความแข็งของผิวผลปาล์ม โดยทำการอบผลปาล์มจนมีอุณหภูมิภายในเป็น 60, 80, 100, และ 120 °C แล้วนำไปวัดความแข็งที่ผิวและบีบดูปริมาณน้ำมันที่ได้และปริมาณของ FFA จากการทดลองพบว่า เมื่ออบผลปาล์มให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความแข็งของผิวผลปาล์มจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิผลปาล์ม 100 °C โดยลดลงจาก 22 N (ที่อุณหภูมิบรรยากาศ) เหลือ 13 N หรือลดลงเหลือ 60 % ของความแข็งเริ่มต้น และความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นต่อไปอีก โดยที่อุณหภูมิในผลปาล์ม 120 °C ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเป็น 27 N มากกว่าความแข็งเริ่มต้นเนื่องจากผลปาล์มใหม่ สำหรับการเกิด FFA พบว่า FFA จะเพิ่มขึ้นเมื่อทั้งผลปาล์มไว้ในบรรยากาศนานขึ้น โดย FFA เริ่มต้นที่ 28.47 wt.% เพิ่มเป็น 29.14 wt.% เมื่อตั้งทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง เมื่ออบผลปาล์มจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น FFA จะลดลง โดยที่อุณหภูมิ 60-120 °C (คงอุณหภูมิไว้ 1-2 ชั่วโมง) น้ำมันที่บีบได้จะมี FFA ร้อยละ 4.13 wt.% หากอบนานกว่านี้ จะทำให้ FFA สูงขึ้นเล็กน้อย จึงกล่าวโดยสรุปได้ว่า การอบผลปาล์มให้มีอุณหภูมิ 100 °C และคงไว้ 1-2 ชั่วโมง มีผลให้ความแข็งของผิวผลปาล์มและ FFA ในน้ำมันที่บีบได้ต่ำที่สุด

คำหลัก: อุณหภูมิ ผลปาล์ม กรดไขมันอิสระ ความแข็ง

Abstract

The objectives of this study were to investigate the effect of palm fruit temperatures on the inhibition of free fatty acid (FFA) in palm oil and the surface hardness reduction of palm fruit. Palm fruits were dried until its temperature was at 60, 80, 100 and 120 °C respectively. The surface hardness of palm fruit, the amount of pressed palm oil and the concentration of free fatty acid were examined. The results showed that when temperatures were increased, the surface hardness continually decreased. The surface hardness was found to be at the lowest at 100 °C. Its value reduced from 22 N (at ambient temperature) to 13 N or in other words its surface hardness reduced as 60% of its initial value. However

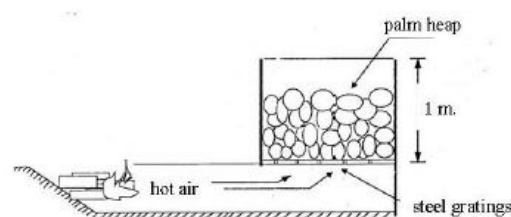
when temperatures was increased beyond 120 °C, the surface hardness increased to 27 N because the palm fruits were burned. The FFA increased from 28.47 wt.% to 29.14 wt.% when the plam fruits were kept at ambient temperature for 8 hours and it reduced when the temperatures of plam fruit increased. Palm oil which collected at 60 – 120 °C (kept temperature constant for 1 - 2 hour) had the lowest FFA at 4.13 wt.%. Again the FFA slightly increased if they were dried for longer than this condition. It can be summarized that the suitable temperature of palm fruits drying is 100 °C because it gives the lowest surface hardness of palm fruit and the free fatty acid concentration in pressed plam oil.

Keywords: temperature, palm fruit, free fatty acid, hardness.

1. บทนำ

ไบโอดีเซลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญ เนื่องจากราคาน้ำมันดีเซลที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิต และการขนส่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่ารัฐได้มีการส่งเสริมให้มีการใช้ไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราร้อยละ 5 (B5) เพื่อลดราคาจำหน่ายน้ำมันดีเซลลง แต่ราคาก็ยังคงสูงอยู่เมื่อเทียบกับราคาเมื่อหลายปีที่ผ่านมา ซึ่งภาคเกษตรกรรมและชุมชนชนบทได้รับผลกระทบอย่างมากจากราคาน้ำมันที่สูงขึ้น ในขณะที่ราคาผลผลิตทางการเกษตรกลับไม่ได้สูงตามราคาน้ำมัน จึงทำให้เกษตรกรอยู่ด้วยความลำบาก ปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลในอนาคต ที่รัฐบาลมีการวางยุทธศาสตร์อย่างเป็นรูปธรรม ส่งเสริมการปลูกต้นปาล์มน้ำมัน [1-3] และการผลิตน้ำมันปาล์มที่มีระบบง่ายที่สุดคือ น้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม ซึ่งเป็นน้ำมันที่ได้จากการหีบเส้นใยและเมล็ดในปาล์มรวมกัน โดยใช้เครื่องอัดแบบสกรู (screw press) ซึ่งก่อนการหีบจำเป็นต้องอบให้ผลปาล์มสุกก่อน เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาไลโปไลซิสที่จะสร้างกรดไขมันอิสระ และไล่น้ำออกจากผลปาล์ม การอบแห้งผลปาล์มในระดับชุมชนจะอบแห้งโดยบรรจุผลปาล์มในกระบะซีเมนต์ ที่ปูพื้นด้วยตะแกรงเหล็กด้านล่าง มีช่องให้ลมร้อนไหลขึ้นผ่านตะแกรงเหล็กได้ ลมร้อนที่ใช้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ไม้ยางพารา ดังรูปที่ 1 ซึ่งการอบแห้งเช่นนี้ทำให้ช่วงแรกของการอบแห้งไอน้ำจะกลั่นตัวที่ชั้นบนของกองปาล์มซึ่งอุณหภูมิยังต่ำอยู่ทำให้ไม่อาจยับยั้งปฏิกิริยาเอนไซม์ได้ นอกจากนั้นยังพบว่าผล

ปาล์มทั้งกองแห้งไม่สม่ำเสมอ โดยผลปาล์มชั้นล่างอาจจะแห้งเกินไป ผลปาล์มที่แห้งเกินไปจะแข็งและทำให้สกรูบีบสีกหรือได้ง่าย ผลปาล์มชั้นบนที่แห้งไม่สนิทจะมีน้ำปนทำให้ได้น้ำมันปาล์มด้อยคุณภาพ [4, 5]



รูปที่ 1 การย่างผลปาล์มในโรงงานแบบหีบรวม [4]

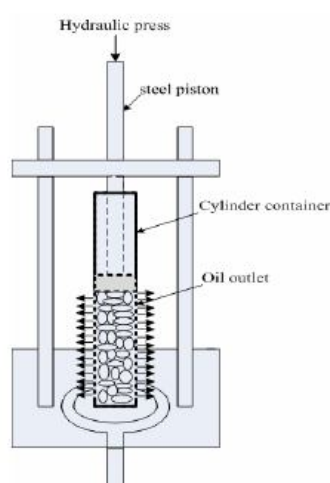
ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับอบผลปาล์ม โดยบทความนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระ และการลดความแข็งของผิวผลปาล์มเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบสกรูสำหรับอบผลปาล์ม ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาการอบแห้งผลปาล์มดังกล่าวข้างต้น และพัฒนาระบบการอบแห้งผลปาล์มที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นกระบวนการต้นทางที่ควบคุมคุณภาพน้ำมันปาล์ม

2. เครื่องมือวัดและวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการเกิดกรดไขมันอิสระและความแข็งของที่

ผิวผลปาล์ม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ตู้อบไฟฟ้า (Memmert model 400) ใช้ในการอบผลปาล์ม โดยก่อนอบต้องชั่งน้ำหนักผลปาล์มด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (LIBROR รุ่น EB-3200H Capacity 3,120 g ความละเอียด 0.01 g) และวัดอุณหภูมิภายในของผลปาล์มโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Thermocouple Thermometer, Specification 1-1000 °C) ทั้งก่อนอบและหลังอบ ในขณะที่เดียวกันจะวัดความแข็งของผิวผลปาล์มโดยใช้เครื่องวัดแรงดึงและแรงกด (FORCE GAUGE, Specification 0.01 - 49.03 N) หลังจากนั้นนำผลปาล์มที่ผ่านการอบแล้วมาบิบน้ำมันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดบิบน้ำมันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการเกิด FFA และความแข็งของผิวผลปาล์ม แบ่งออกเป็น 5 กรณีคือ ที่อุณหภูมิ 30, 60, 80, 100, และ 120 °C ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรที่ได้ศึกษามีดังนี้ ปริมาณน้ำมันที่บิบน้ำมัน ความชื้น กรดไขมันอิสระ (FFA) และความแข็งของผิวผลปาล์ม ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการทดลองมีดังต่อไปนี้ เริ่มจากเตรียมตัวอย่างผลปาล์มร่วนจากหลายเดียวกัน ดังรูปที่ 3 นำผลปาล์มร่วนที่เตรียมไว้มาใส่ตะแกรงลวด ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างละ 300 กรัม

จากนั้นวัดความแข็งของผิวผลปาล์มก่อนอบ นำผลปาล์มเข้าตู้อบไฟฟ้า ขณะที่อบทำการวัดอุณหภูมิของผลปาล์มทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าจะได้อุณหภูมิต่างๆ ตามแต่ละกรณีศึกษา แล้วทำการชั่งน้ำหนักผลปาล์มวัดความแข็งของผิวผลปาล์มหลังอบอีกครั้ง นำผลปาล์มที่ผ่านการอบมาบิบน้ำมันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก เมื่อได้น้ำมันปาล์มดิบแล้วนำมาอุ่นให้ความร้อน แล้วชั่งน้ำหนัก พร้อมทั้งวัดปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่บิบน้ำมันได้ แล้วทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่กล่าวจนครบอุณหภูมิทั้ง 5 กรณีศึกษา



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลปาล์มร่วนจากหลายเดียวกัน

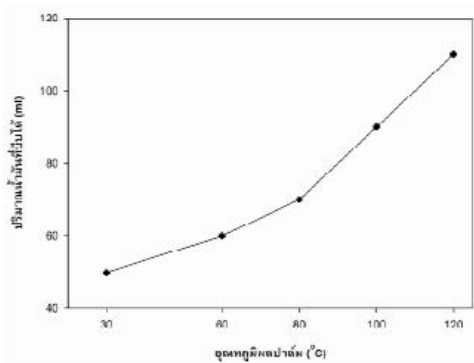
น้ำมันปาล์มดิบที่บิบน้ำมันในแต่ละเงื่อนไข นำมาทดสอบหาค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรตด้วย NaOH 0.1 molar จนสีเริ่มเปลี่ยน แล้วคำนวณร้อยละของกรดไขมัน Free fatty as Palmitic ดังสมการที่ (1) [6]

$$\% \text{ FFA} = \frac{\text{NaOH}(\text{ml}) \times 25.6 \times 0.0977}{3.0(\text{g})} \quad (1)$$

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลจากการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำมันที่บิบน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในผลปาล์มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 ที่อุณหภูมิต่ำ (ที่อุณหภูมิมิปรายกาศ 30 °C) จะได้ปริมาณน้ำมันน้อยที่สุด เนื่องจากผลปาล์มยังไม่ได้รับความร้อน และเมื่อได้รับความร้อนทำให้ปริมาณน้ำมันที่บิบน้ำมันเพิ่มขึ้น แต่ความร้อนที่ให้ความร้อนไม่เกิน 120 °C เพราะจะ

ทำให้ผลปาล์มใหม่ซึ่งมีผลต่อคุณภาพปริมาณน้ำมัน ดังแสดงใน รูปที่ 5 ซึ่งเปรียบเทียบสีของน้ำมันที่อุณหภูมิผลปาล์มต่างๆ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิผลปาล์ม 120 °C น้ำมันที่ได้จะมีสีต่างจากที่อุณหภูมิมอื่น ๆ



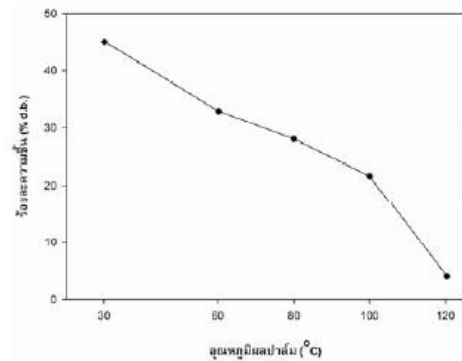
รูปที่ 4 ปริมาณน้ำมันจากการบีบที่ได้



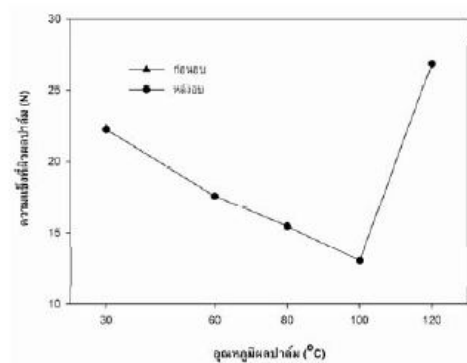
รูปที่ 5 สีของน้ำมันที่บีบได้

รูปที่ 6 แสดงความชื้นที่เหลือในผลปาล์มเมื่อผลปาล์มมีอุณหภูมิต่างๆ พบว่าความชื้นในผลปาล์มลดลงอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิในผลปาล์มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออุณหภูมิในผลปาล์มเพิ่มขึ้นจาก 100 °C เป็น 120 °C ความชื้นในผลปาล์มลดลงถึงร้อยละ 20 จากร้อยละ 23 เหลือเพียงร้อยละ 3 จนส่งผลต่อความแข็งแรงของผิวผลปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความแข็งแรงของผิวผลปาล์ม ก่อนอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 °C ถึง 100 °C มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากเริ่มต้นที่ร้อยละ 22.47 เป็นร้อยละ 29.14 เมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง การ

ที่อยู่ที่ 13 N ที่อุณหภูมิผลปาล์ม 100 °C ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 60 และหากอุณหภูมิผลปาล์มยังคงสูงขึ้นอีก ความแข็งแรงของผิวผลปาล์มก็จะสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 120 °C ความแข็งแรงของผิวผลปาล์มเท่ากับ 27 N เนื่องจากการให้ความร้อนต่อผลปาล์ม มีผลให้ผลปาล์มสุกและนิ่ม ทำให้ความแข็งแรงของผิวผลปาล์มลดลง แต่ถ้าผลปาล์มได้รับความร้อนต่อและมีอุณหภูมิสูงเกินไปก็จะมีผลให้ผลปาล์มใหม่ และทำให้ความแข็งแรงของผิวผลปาล์มเพิ่มขึ้น



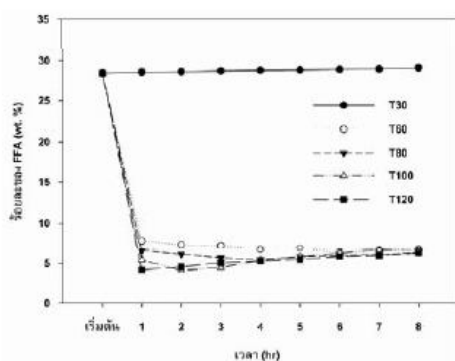
รูปที่ 6 ความชื้นของผลปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 7 ความแข็งแรงของผิวผลปาล์ม

ผลของเปอร์เซ็นต์ FFA พบว่า ร้อยละของ FFA ในน้ำมันที่บีบได้จากผลปาล์มที่ตั้งทิ้งไว้ในบรรยากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากเริ่มต้นที่ร้อยละ 28.47 เป็นร้อยละ 29.14 เมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง การ

เพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ FFA เนื่องจากกรดไขมันทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ เกิดการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ แต่ในการทดลองนี้ตั้งผลปาล์มทิ้งไว้ในบรรยากาศเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงซึ่งเป็นระยะเวลาที่สั้น จึงมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ FFA ค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ไม่เห็นผลแตกต่างมากนัก และอาจเป็นเพราะว่าการทดลองเก็บผลปาล์มสด ได้กระจายผลปาล์มออกทำให้อากาศถ่ายเทสะดวกไม่มีการหมักบ่ม ผลปาล์มเน่าเสียช้ากว่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 8 การนำผลปาล์มไปอบ จนอุณหภูมิในผลปาล์มเพิ่มขึ้นเป็น 60, 80, 100, และ 120 °C ทำให้อัตราของ FFA ลดลงอย่างมาก โดยค่าร้อยละของ FFA ต่ำที่สุดคือ 4.13 wt. % ที่อุณหภูมิในผลปาล์ม 100 °C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิผลปาล์มเพิ่มขึ้น มีผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลน้ำมันปาล์ม (triglyceride) เกิดการแตกตัวเป็นกลีเซอรอล (glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งในช่วงแรกๆ triglyceride จะแตกตัวเป็น glycerol ในสัดส่วนที่มาก มีผลทำให้สัดส่วนร้อยละของ FFA น้อย แต่หากอุณหภูมิในผลปาล์มไว้เป็นระยะเวลานาน จะทำให้ร้อยละของ FFA เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



รูปที่ 8 ร้อยละของ FFA น้ำมันที่บีบได้

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระและการลดความแข็งของผิวผลปาล์ม สามารถสรุปได้ว่า การอบผลปาล์มจนให้อุณหภูมิภายในผลปาล์มเป็น 100 °C จะทำให้

ความแข็งของผิวผลปาล์มลดลงต่ำสุดเหลือ 13 N หรือลดลงเหลือ 60 % ของความแข็งเริ่มต้น และมีค่าร้อยละของ FFA ในน้ำมันที่บีบได้ต่ำสุดที่ FFA ร้อยละ 4.13 wt.% จึงกล่าวโดยสรุปได้ว่า การอบผลปาล์มให้อุณหภูมิ 100 °C และคงไว้ 1-2 ชั่วโมง มีผลให้ความแข็งของผิวผลปาล์มและ FFA ในน้ำมันที่บีบได้ต่ำสุด จากข้อสรุปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบสกรูสำหรับอบผลปาล์มต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) และบัณฑิตวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดลองในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] พรชัย เหลืองอากาศพงศ์ (2549). คัมภีร์ปาล์มน้ำมันพืชเศรษฐกิจเพื่อบริโภคและอุปโภค, กรุงเทพฯ: ครั้งที่ 1 มติชน.
- [2] จดหมายข่าวปาล์มน้ำมัน (สกว.) เดือน ธันวาคม 2545 – กุมภาพันธ์ 2546 ปีที่ 3 ฉบับที่ 4.
- [3] ชนิทร พรหมผล (2550). การวิเคราะห์และออกแบบตู้หนึ่งปาล์ม, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 2.
- [4] บัญญัติ นิยมवास (2544). การพัฒนาระบบอบแห้งผลปาล์ม, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 6 – 8.
- [5] สำนักวิจัยงานและพัฒนา (2540). การพัฒนาระบบอบแห้งผลปาล์มโดยใช้ซอทะเลลายปาล์มน้ำมันและวัสดุเหลือใช้จากการสกัดน้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง, ภาควิชาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 8.
- [6] ปัญญา แดงวิไลลักษณ์และคณะ (2551). พัฒนาการอบปาล์มน้ำมันด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานเคลื่อนแบบต่อเนื่อง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต กรุงเทพฯ.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายชัยวัฒน์ พรหมเพชร

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120009

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์-พลังงาน)	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2551

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ชัยวัฒน์ พรหมเพชร นันทพันธ์ นภัทรานันท์ และ กำพล ประทีบชัยกูร. 2554. ผลของอุณหภูมิในผลปาล์มต่อการเกิดกรดไขมันอิสระและความแข็งของที่ผิวผลปาล์ม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25. กระบี่. ประเทศไทย. 19-21 ตุลาคม 2554.