



การประยุกต์ใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกในการผลิตไบโอดีเซล

Application of Dielectric Heating in Biodiesel Production

อรรถพล โชโต

Attapon Choto

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Chemical Engineering

Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกในการผลิตไบโอดีเซล

ผู้เขียน นายอรรถพล โชโต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

.....
(ดร.มณฑเทพ เกียรติวีระสกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์)

.....กรรมการ
(ดร.มณฑเทพ เกียรติวีระสกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายอรรถพล โชโต)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายอรรถพล โชโต)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกในการผลิตไบโอดีเซล
ผู้เขียน นายอรรถพล โชโต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกซึ่งประกอบด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ (2450 MHz) และคลื่นความถี่วิทยุ (27.12 MHz) โดยการทดลองมีขั้นตอนการศึกษาได้แก่ (1) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแก่ผลปาล์มเพื่อยับยั้งการเพิ่มของกรดไขมันอิสระ (2) หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อน และ (3) วิเคราะห์พลังงานสำหรับการใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า

ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิของผลปาล์มได้แก่ เวลาในการให้ความร้อน กำลังส่ง และชนิดของคลื่นความถี่ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในผลปาล์มจะแปรผันตรงกับกำลังส่ง และเวลาในการให้ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการให้ความร้อนการใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนได้ดีกว่าคลื่นวิทยุ นอกจากนี้การใช้คลื่นทั้งสองชนิดสามารถยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระอย่างได้ผล โดยการให้ความร้อนจนผลปาล์มมีอุณหภูมิสูงเกิน 60 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้อัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระในผลปาล์มมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับผลปาล์มที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อน สำหรับผลปาล์มที่ได้จะยังคงมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 5% เมื่อผ่านไป 8 วัน ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานระหว่างคลื่นทั้งสองชนิดนั้นพบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงกว่าคลื่นวิทยุ

Thesis Title	Application of Dielectric Heating in Biodiesel Production
Author	Mr. Attapon Choto
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2016

ABSTRACT

The aim of this thesis study was to the sterilize oil palm by dielectric heating. It consists of microwave frequency (2450 MHz) and Radio-frequency (RF) (27.17 MHz). The study was composed of (1) investigating the technical possibility of oil palm sterilized by dielectric heating, (2) determine the suitable conditions of oil palm sterilization using dielectric heating And (3) analyze the efficiency of sterilizing oil palm using dielectric heating.

The experimental results revealed that factor of heating oil palm were duration of heating, power and types of frequency. The temperature of palm fruits increases correspondingly as power and duration time. Comparison between Microwave and RF technical results showed that microwave can better heat than RF. In addition, sterilization of oil palm from both technics could inhibit the increasing of free fatty acid in oil palm fruits. The temperature of heating higher than 60 degree Celsius can reduce increment rate of free fatty acid. The oil palm fruits can be stored for 8 days in ambient condition with free fatty acid content lower than 5 percent. Analysis energy efficiency result indicated that energy efficiency of microwave higher than RF.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดีเนื่องจากการได้รับการสนับสนุนและช่วยเหลืออย่างดี ในด้านวิชาการและการดำเนินการจากบุคคลและกลุ่มองค์กรต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร. ชาศริต ทองอุไร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ ดร.มณฑเทพ เกียรติวิระสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ชี้แนะและให้คำปรึกษาด้านวิชาการและแนวทางการดำเนินงาน รวมทั้งการตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ร่วมให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ขึ้น

ดร.ณัฐวรรณ กลัดแก้ว ที่ให้การชี้แนะและให้คำปรึกษาด้านวิชาการและแนวทางการดำเนินงาน

สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือและวัตถุดิบงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่เอื้อเพื่อวัสดุและสถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนส่งเสริมการศึกษาตลอดมา

อรรถพล โชโต

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm)	5
2.2 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Mill processing)	10
2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	12
2.4 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก	16
2.5 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Properties)	18
2.6 หลักการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไดอิเล็กทริก	20
2.7 คลื่นวิทยุ (Radio-Frequency)	23
2.8 คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	27
3.1 วัสดุในการทดลอง	27
3.2 อุปกรณ์และสารเคมี	27
3.2.1 เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ	27
3.2.2 เตาอบไมโครเวฟ	29
3.2.3 เครื่องมือวัด	30
3.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือ	30

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
3.3 วิธีการทดลอง	31
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	34
4.1 การศึกษาการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแก่ผลปาล์มน้ำมัน	34
4.2 การศึกษาการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแก่ช่อผลปาล์ม	43
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผล	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก	75
ภาคผนวก ข	77
ภาคผนวก ค	81
ภาคผนวก ง	95
ประวัติผู้เขียน	100

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	54
4.2	55
4.3	57
4.4	67
ค1	81
ค2	87
ค3	89
ค4	90
ค5	91
ค6.	92
ค7	93
ค8	94

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในทะเลสาบปาล์มสด	6
2.2 ส่วนประกอบของปาล์มน้ำมันพันธุ์เทเนอร์่า	7
2.3 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์	9
2.4 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	9
2.5 การแผ่รังสีความร้อนจากของแข็งในสูญญากาศ	15
2.6 การเกิดความร้อนในเนื้อวัสดุจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก	16
2.7 การทะลุผ่านของคลื่น (Transmitted wave)	17
2.8 การสะท้อนของคลื่น (Reflected wave)	17
2.9 การดูดกลืนของคลื่น (Absorbed wave)	18
2.10 ลักษณะการเปลี่ยนจากพลังงานความร้อนภายในตัววัตถุเมื่อถูกนำไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	21
2.11 ช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ	23
3.1 ผลปาล์มน้ำมันในการทดลอง	27
3.2 เครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุ	28
3.3 ตัวปล่อยสนามไฟฟ้า	28
3.4 ระบบวงจรแมทซ์ซึ่งปรับได้	29
3.5 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ใช้ในการแมชชิงพีแดนซ์	29
3.6 เตาอบไมโครเวฟ	30
4.1 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มผ่าซีกภายใต้การให้ความร้อนที่ 200 วัตต์	35
4.2 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มผ่าซีกภายใต้การให้ความร้อนที่ 400 วัตต์	36
4.3 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มผ่าซีกภายใต้การให้ความร้อนที่ 600 วัตต์	37
4.4 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มผ่าซีกก่อนการให้ความร้อน	38

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า	
4.5	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลปาล์มภายใต้การให้ความร้อนที่กำลังส่งต่างๆ	39
4.6	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของผลปาล์มระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ	41
4.7	ปริมาณความชื้นของผลปาล์มหลังผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ	43
4.8	เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของผลปาล์มน้ำมันหลังผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟภายใต้กำลังส่งต่างๆ	44
4.9	อัตราการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของผลปาล์มซึ่งให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ ภายใต้กำลังส่งต่างๆ	49
4.10	ปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์ม ซึ่งให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุภายใต้กำลังส่งต่างๆ	50
4.11	อัตราการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของผลปาล์มซึ่งให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้กำลังส่งต่างๆ	51
4.12	ปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์ม ซึ่งให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้กำลังส่งต่างๆ	52
4.13	สีน้ำมันปาล์มที่หีบได้ในช่วงอุณหภูมิต่าง	53
4.14	ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มผ่าซีกภายใต้การให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์ม	59
4.15	อุณหภูมิของผลปาล์มระหว่างการให้ความร้อนแก่ช่อปาล์ม	60
4.16	เปรียบเทียบอุณหภูมิต่างระหว่างการให้ความร้อนแก่ผลร่วงและช่อปาล์ม	60
4.17	ปริมาณความชื้นของช่อปาล์มหลังการให้ความร้อน	61
4.18	อัตราการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของผลปาล์มในการให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์ม	63
4.19	ปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์มในการให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์ม	64
4.20	ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์ม	66
ข.1	รูปแบบการต่อตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้แบบปกติ	77

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
ข.2 รูปแบบการต่อตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ให้สามารถทำการแมทซิ่งได้ สมบูรณ์และลดการสูญเสีย	78
ข.3 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้สำหรับการแมชอิมพีแดนซ์	79
ข.4 ตัวปล่อยสนามไฟฟ้าสามารถปรับระยะห่างได้	79
ข.5 ตัวปล่อยสนามไฟฟ้าและสายพาดำเสียงเมื่อประกอบแล้ว	80
ข.6 การให้ความร้อนโดยวางผลปาล์มอยู่ภายใต้ตัวปล่อยสนามไฟฟ้า	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำตั้งเรื่อง

จากปัญหาด้านวิกฤตพลังงานที่เกิดขึ้นได้นำไปสู่ความพยายามในการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน โดยหนึ่งในพืชพลังงานทดแทนที่สำคัญคือปาล์มน้ำมัน ประเทศไทยรัฐบาลได้มีนโยบายในการเพิ่มพื้นที่การปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อนำไปใช้ผลิตเป็นไบโอดีเซลส่งผลให้การเพาะปลูกได้เพิ่มพื้นที่ไปยังภาคอื่นๆ นอกเหนือจากภาคใต้และภาคตะวันออก แต่ยังคงพบปัญหาการไม่มีโรงงานหีบสกัดน้ำมันปาล์มตั้งอยู่ในพื้นที่อย่างเช่นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่ใหม่ของการปลูกปาล์มน้ำมัน และมีบางพื้นที่ที่มีผลผลิตปาล์มน้ำมันเกิดขึ้นแล้วแต่ไม่มีโรงงานน้ำมันปาล์มจึงเป็นอุปสรรคในการส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ใหม่ๆ โดยการมีโรงหีบน้ำมันห่างไกลจากพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันนอกจากจะทำให้เกษตรกรมีต้นทุนค่าขนส่งที่สูงขึ้นแล้วยังส่งผลให้คุณภาพของปาล์มน้ำมันที่ได้ต่ำลงจากระยะทางการขนส่งที่ไกลขึ้นตามไปด้วย

ในส่วนของปาล์มน้ำมันเมื่อเริ่มสุกผลปาล์มจะเริ่มมีสีส้มแดงและภายในผลปาล์มจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวทะลายนอกจากต้นมักพบปัญหาว่ากรดไขมันอิสระในผลปาล์มน้ำมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยสามารถเพิ่มขึ้นสูงได้ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลาเพียง 20 นาที และหากผลปาล์มได้รับความเสียหายหรือบาดแผลก็จะยังเป็นการกระตุ้นให้เอนไซม์ไลเปสในผลปาล์มเกิดการเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันอิสระเร็วขึ้นส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในปาล์มน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2554) โดยกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นเป็นองค์ประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปาล์มเนื่องจากกรดไขมันอิสระเหล่านี้เมื่อนำไปผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันจะทำให้เกิดสบู่และน้ำ ดังนั้นเพื่อจะให้ได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำที่สุดจึงต้องรีบนำผลปาล์มเข้าสู่กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มเร็วที่สุดเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการนึ่งปาล์มซึ่งขั้นตอนนี้จะช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยจะหยุดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระอันเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียผลได้

ในการสกัดน้ำมันปาล์มประกอบไปด้วยกระบวนการสำคัญต่างๆ ได้แก่ การรับและการเก็บ ทะลายปาล์มสดที่โรงงาน การนึ่งหรือการให้ความร้อน การแยกผลปาล์ม การย่อยผลปาล์ม การหีบ น้ำมันปาล์ม การกรองน้ำมัน การแยกน้ำและสิ่งเจือปน และการสกัดความชื้น (Ngan, M.A. และ คณะ, 1999) ในส่วนการศึกษานี้ให้ความสำคัญกับกระบวนการนึ่งหรือการให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม น้ำมัน โดยการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มจนผลปาล์มมีอุณหภูมิในระดับที่เหมาะสมจะส่งผลให้การทำงานของเอนไซม์ไลเปสในผลปาล์มซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดการเพิ่มของกรดไขมันอิสระนั้นหยุดลง ซึ่งจะทำให้สามารถเก็บผลปาล์มไว้ได้นานขึ้น โดยกรดไขมันอิสระในผลปาล์มไม่เพิ่มขึ้น แต่ปัจจุบันกระบวนการให้ความร้อนผลปาล์มเพื่อยับยั้งการเกิดของกรดไขมันอิสระและทำให้ผลปาล์มสุกยังคงจำกัดอยู่กับกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ไอน้ำหรือกระบวนการทอดผลปาล์ม (พรชัย, 2549) การให้ความร้อนด้วยกระบวนการเหล่านี้ ความร้อนที่ป้อนให้กับวัสดุจะสัมผัสเฉพาะผิวหน้าของวัสดุทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยตำแหน่งที่วัสดุสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจจะเกิดการเสียหายได้ด้วยเหตุนี้ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ลำบาก ในปัจจุบันมีกระบวนการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มแบบใหม่หลายวิธีซึ่งกระบวนการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดพลังงาน เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานไปเป็นความร้อนเกิดภายในเนื้อวัสดุโดยตรงซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมที่ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ผิววัสดุก่อนแล้วจึงค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าไปสู่ภายในซึ่งต้องใช้เวลานาน

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกสามารถทดแทนการให้ความร้อนแบบเก่า เช่น ขดลวดไฟฟ้า หรือหัวเผาเชื้อเพลิงเพื่อสร้างความร้อนให้แก่วัสดุ โดยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะเป็นการให้ความร้อนซึ่งเกิดขึ้นโดยตรงภายในวัสดุซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมที่จะเกิดความร้อนจากบริเวณผิววัสดุก่อนแล้วจึงค่อยเกิดการนำความร้อนสู่ภายในทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงภายในเนื้อวัสดุพร้อมๆกัน ส่งผลให้ลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ความร้อน ในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะทำงานโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุหรือไมโครเวฟกำลังสูงส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุมีขนาดของกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมจะอยู่ในระดับตั้งแต่ 500 วัตต์ ไปจนถึงหลายร้อยกิโลวัตต์ในย่านความถี่ 13.56, 27.12 และ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ซึ่งจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและความถี่คลื่น โดยคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกกว่าเหมาะสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ ส่วนคลื่นความถี่สูงจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ตื้นกว่าเหมาะสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีขนาดเล็ก การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นมี

ขนาดของกำลังคลื่นที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมจะอยู่ในระดับตั้งแต่ 200 วัตต์ ไปจนถึง 60 กิโลวัตต์ในย่านความถี่ 915, 2,450 และ 5,800 เมกกะเฮิรตซ์โดยจะทำงานในลักษณะเดียวกับคลื่นวิทยุแต่ด้วยความถี่ที่สูงกว่าทำให้ลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างคลื่นเมื่อเทียบกับคลื่นวิทยุที่มีกำลังคลื่นเท่ากัน คลื่นไมโครเวฟจะเหมาะสมกับการให้ความร้อนแก่วัสดุขนาดเล็กกว่าคลื่นวิทยุ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554) เนื่องจากคลื่นจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุในระดับที่ต่ำกว่า

จากความสำคัญที่กล่าวมาโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษากระบวนการให้ความร้อนโดยอาศัยเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกซึ่งประกอบด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟเพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม ทั้งยังเปรียบเทียบความสามารถในการให้ความร้อนระหว่างคลื่นวิทยุและไมโครเวฟเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการให้ความร้อนโดยอาศัยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกมาใช้ในกระบวนการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มน้ำมันเพื่อยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม

1.2.2 หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มน้ำมันโดยอาศัยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

1.2.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกในกระบวนการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มน้ำมัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิในผลปาล์ม ปริมาณความชื้น และระยะเวลาในการให้ความร้อนอันได้แก่ กำลังส่ง เวลาให้ความร้อน และชนิดคลื่น

1.3.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเพื่อยับยั้งการเพิ่มของกรดไขมันอิสระในผลปาล์มน้ำมัน

1.3.3 หาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สามารถควบคุมการเพิ่มของกรดไขมันอิสระในผลปาล์มน้ำมันอย่างได้ผล

1.3.4 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไม่โครเวฟ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนากระบวนการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

1.4.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอื่นๆ ต่อไปในอนาคตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

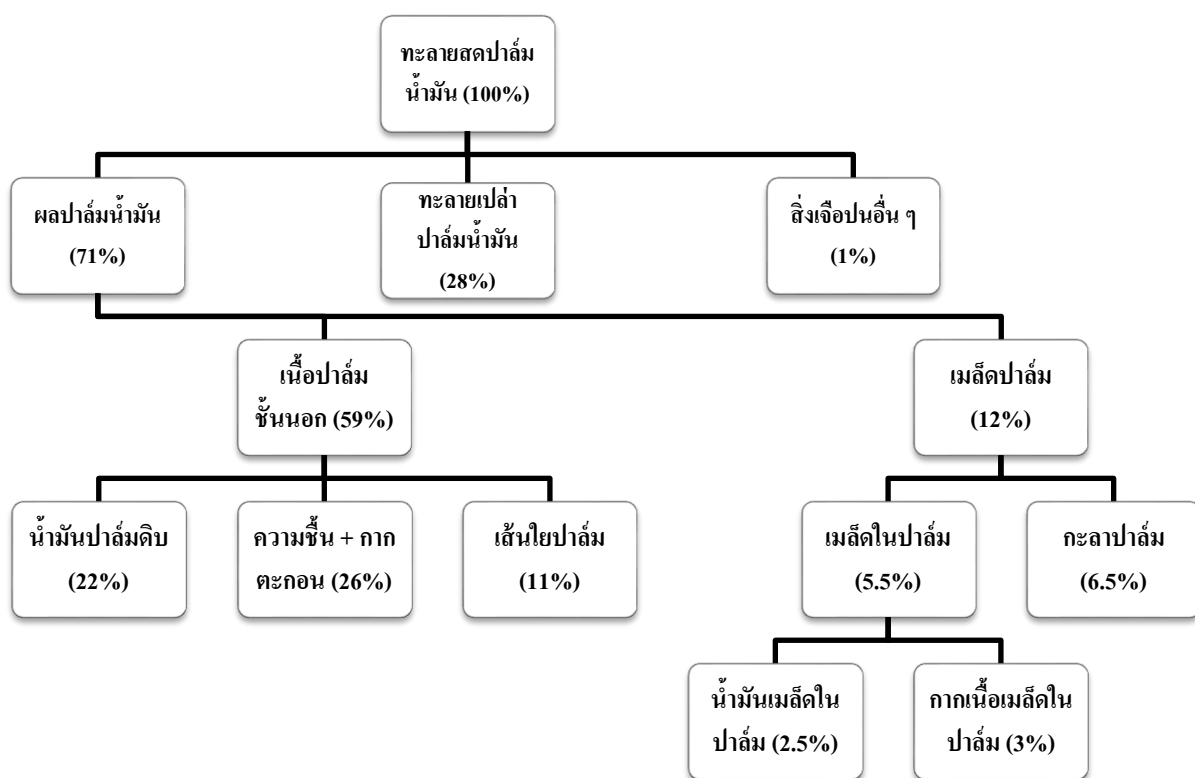
ทฤษฎี

2.1 ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm)

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชน้ำมันที่สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับการบริโภคและบริโภค ปาล์มน้ำมันนั้นให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด สำหรับปาล์มน้ำมันนั้นมีชื่อทางพฤกษศาสตร์คือ *Elaeis guineensis Jacq.* จัดอยู่ในพืชตระกูลปาล์ม (Palmae หรือ Arecaceae) ตระกูลย่อยเดียวกับมะพร้าว ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชผสมข้าม ใบเลี้ยงเดี่ยว เป็นพืชยืนต้นที่สามารถให้ผลผลิตทะลายสดได้ตลอดปี โดยการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มจะเริ่มจากที่ปาล์มมีอายุได้ประมาณ 30 เดือนหลังจากปลูก และสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายสดได้นานกว่า 20 ปี (ธีระ และคณะ, 2546) จากการศึกษาการใช้ประโยชน์จากปาล์มน้ำมันพบว่าในภาคอุตสาหกรรมมีการนำปาล์มน้ำมันไปใช้กันหลากหลายไม่ว่าจะเป็นการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้านบริโภคและอุปโภค ความหลากหลายของการใช้ประโยชน์ดังกล่าวสามารถสรุปเป็นภาพรวมได้ เช่น ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอิน (olein palm oil) ทำอาหารในครัวเรือน หรือใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่ต้องมีการทอด เนยเทียม ไอศกรีม และขนมขบเคี้ยว ครีมเทียมประเภทต่างๆ สบู่ และผงซักฟอก และอุตสาหกรรมโอเลโอเคมีคอล (oleochemical) ซึ่งรวมถึงการผลิตเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ เป็นต้น ทั้งยังมีการนำน้ำมันปาล์มดิบมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปและได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาลอย่างจริงจัง โดยในส่วนของปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้ผลิตเป็นน้ำมันปาล์มดิบ คือ ผล ซึ่งจะสกัดน้ำมันได้จาก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกได้จากเปลือกผลชั้นนอกและเนื้อผลชั้นนอก เรียกว่าน้ำมันปาล์ม (Palm oil) และส่วนที่สองจากเนื้อผลชั้นในและเอมบริโอ เรียกว่าน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil) น้ำมันทั้ง 2 ชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน น้ำมันปาล์มนิยมนำมาใช้บริโภค ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีองค์ประกอบและคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันมะพร้าว นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอุปโภค (นคร, 2545)

2.1.1 ทะลายปาล์มน้ำมัน

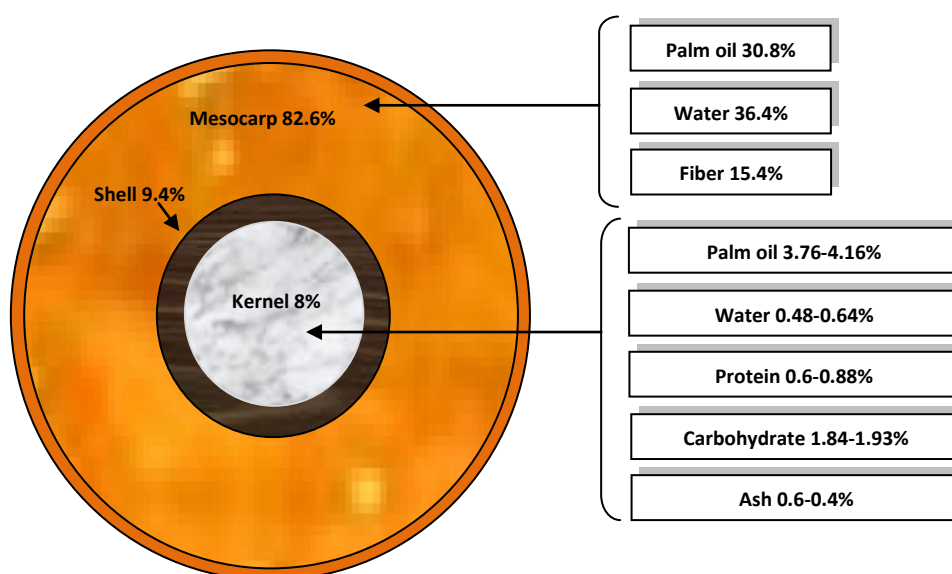
ทะลายปาล์มน้ำมันประกอบด้วย ก้านทะลาย ช่อทะลายย่อยและผล ในแต่ละทะลายมีน้ำหนักผล 48-80 เปอร์เซ็นต์ (ตามความสมบูรณ์และขนาดของทะลาย) ทะลายปาล์มน้ำมันเมื่อสุกแก่เต็มที่จะมีน้ำหนักประมาณ 1-60 กิโลกรัม แปรไปตามชนิดของสายพันธุ์ อายุของปาล์ม และปัจจัยสิ่งแวดล้อม โดยทะลายปาล์มที่เหมาะสมควรมีน้ำหนักทะลายระหว่าง 15-25 กิโลกรัม เนื่องจากจะเป็นขนาดที่ให้สัดส่วนของผลปาล์มต่อทะลายมากที่สุด ส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์น้ำมันสูงสุด จำนวนทะลายต่อต้นก็มีความแตกต่างกันตามชนิดของสายพันธุ์หรือความสมบูรณ์ของปาล์ม โดยมีสหสัมพันธ์ทางลบกับน้ำหนักทะลาย กล่าวคือหากขนาดทะลายใหญ่จะให้จำนวนทะลายน้อยแต่หากมีจำนวนทะลายมากก็จะให้ทะลายที่มีขนาดเล็ก สำหรับทะลายปาล์มสดมีลักษณะและส่วนประกอบดังภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในทะลายปาล์มสด
ที่มา: ธีระ และคณะ (2548)

2.1.2 ผลปาล์มน้ำมัน

โดยทั่วไปปาล์มน้ำมันสามารถผลิตทะลายปาล์มได้ไม่ควรต่ำกว่า 12 ทะลายต่อต้นต่อปี จำนวนผลทั้งหมดต่อทะลายรวมแล้วประมาณ 500-4,000 ผล โดยเฉลี่ยมีจำนวน 1,600 ผลต่อทะลาย ผลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-5 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ มีน้ำหนักต่อผลประมาณ 3-30 กรัม อย่างไรก็ตามลักษณะดังกล่าวข้างต้นขึ้นกับอายุปาล์ม



ภาพประกอบที่ 2.2 ส่วนประกอบของปาล์มน้ำมันพันธุ์เทเนอราที่มีอายุเกิน 8 ปีขึ้นไป
ที่มา: ผาสุก และคณะ (2528)

ผลของปาล์มน้ำมันนั้นประกอบด้วย เปลือกชั้นนอก เนื้อปาล์มชั้นนอก กะลา เนื้อปาล์มชั้นใน และเอมบริโอ โดยปาล์มน้ำมันที่ปลูกเป็นการค้าโดยทั่วไปพบว่ามีสีผลที่ผิวเปลือกนอกด้วยกัน 3 ลักษณะคือ เมื่อผลดิบเป็นสีเขียวจะเปลี่ยนเป็นสีส้มเมื่อสุกเรียกลักษณะนี้ว่า *virescens* โดยทั่วไปจะพบน้อยกว่าแบบที่ 2 ที่เรียกว่า *nigrescens* ซึ่งผลดิบมีสีดำปลายผลมีสีงาช้างจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อสุกแล้ว แบบที่ 3 เรียกว่า *albescens* มีสีผิวเปลือกเมื่อสุกเป็นสีเหลืองซีด จากลักษณะของผลปาล์มทำให้แบ่งชนิดของปาล์มน้ำมันได้ 3 ชนิด ได้แก่

- 1) ดุรา (Dura) มีกะลาหนา 2-8 มิลลิเมตร และไม่มีวงเส้นประสีดำอยู่รอบกะลา มีชั้นเปลือกนอกบาง 35-60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักผล มียีนส์ควบคุมลักษณะเด่น (Sh+Sh+) ปาล์มชนิดนี้ใช้เป็นแม่พันธุ์
- 2) พิซิเฟอรา (Pisifera) ยีนส์ควบคุมลักษณะด้อย (Sh-Sh-) ลักษณะผลไม่มีกะลาหรือกะลาบาง มีข้อเสียคือช่อดอกตัวเมียมักเป็นหมัน (abortion) ทำให้ผลฝ่อ

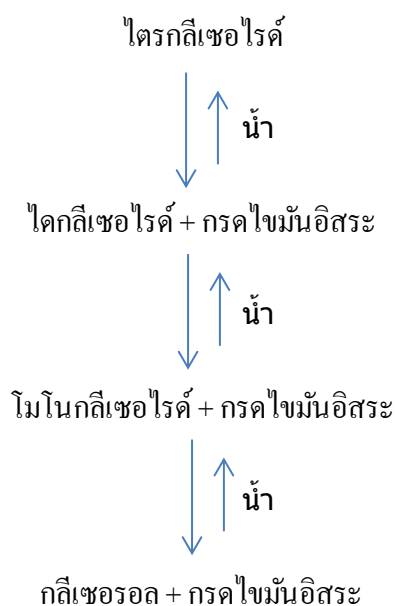
ลึบ ทะลายเล็กเนื่องจากผลไม่พัฒนา ผลผลิตทะลายต่ำมาก ไม่ใช่ลูกเป็นการค้า แต่ใช้เป็นต้นพ่อพันธุ์ในการผลิตลูกผสม

- 3) เทเนอรา (Tenera) มีกะลาบางตั้งแต่ 0.5-4 มิลลิเมตร มีวงเส้นประอยู่รอบกะลา มีชั้นเปลือกนอกมากประมาณ 60-90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักผล ลักษณะเทเนอรา (Sh+Sh-) เป็นพันธุ์ทาง (heterozygous) เกิดจากการผสมข้ามระหว่างลักษณะคู่กับพิสิเฟอรา

ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มส่วนของผลปาล์มที่นำมาหีบเพื่อสกัดน้ำมันมาใช้ประโยชน์มี 2 ส่วน คือส่วนแรกจากเปลือกผลชั้นนอกและเนื้อผลชั้นนอกและส่วนที่สองจากเนื้อผลชั้นในและเอมบริโอ น้ำมันที่หีบออกจากทั้ง 2 ส่วนนี้มีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันมากโดยส่วนแรกนิยมนำไปใช้เพื่อการบริโภค และส่วนที่สองนิยมนำไปใช้เพื่อการอุปโภค (ธีระ และคณะ, 2546)

ปัญหาอย่างหนึ่งของปาล์มน้ำมันที่ผู้ปลูกปาล์มมักต้องประสบคือ การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายปาล์มออกจากต้นหรือเกิดจากการที่ปาล์มน้ำมันถูกกระแทกทำให้เกิดแผลหรือจากการรบกวนจากโรคและแมลงซึ่งเป็นการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ไลเปสที่มีอยู่ในผลปาล์มน้ำมัน ในทางปฏิบัตินั้นภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตปาล์มน้ำมันจะต้องรีบนำส่งโรงงานสกัดน้ำมันให้เร็วที่สุด ตามหลักแล้วควรส่งภายใน 24 ชั่วโมง หลังเก็บเกี่ยวจากต้น การเก็บเกี่ยวจะต้องลดการทำให้ผลปาล์มน้ำมันกระทบกระเทือนพยายามไม่ทำให้ผลปาล์มน้ำมันเกิดแผลอันเกิดจากกระบวนการเก็บเกี่ยว จากการศึกษาพบว่าผลปาล์มน้ำมันที่ทำให้เกิดแผลจะเร่งการทำงานของเอนไซม์ ทำให้เกิดกรดไขมันจาก 1% เป็น 5% ภายในระยะเวลา 20 นาที กระบวนการทำงานของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระนี้จะเกิดได้ดีอีกกรณีหนึ่ง คือ จะเกิดขึ้นรวดเร็วภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส โดยถ้าอุณหภูมิสูงการทำงานของเอนไซม์จะหยุดทันที เหตุนี้จึงต้องรีบนำผลผลิตปาล์มน้ำมันส่งโรงงานและนึ่งไอน้ำเพื่อช่วยยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระ (สาวิตรี และคณะ, 2551)

ในปาล์มน้ำมันจะมีเอนไซม์ไลเปส (Lipase) ประเภท triacylglycerol acylhydrolase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยทำการไฮโดรไลซ์พันธะเอสเตอร์ (Ester bond) ของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ได้ผลผลิตเป็น โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) และกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ตรงผิวระหว่างน้ำและน้ำมัน ซึ่งมีปฏิกิริยาดังภาพประกอบที่ 2.3 (Henderson และคณะ, 1991; Mohankumar และคณะ, 1990 และ Sambanthamurthi และคณะ, 2000)



ภาพประกอบที่ 2.3 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: ธิดารัตน์ (2543)

นอกจากนี้พบว่าในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำกับทั้งกลีเซอไรด์ที่เป็นสารป้อน และเอสเทอร์ซึ่งเป็นผลผลิตที่เราต้องการก่อให้เกิดเป็นกรดไขมันอิสระดังภาพประกอบที่ 2.4 โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำกับเอสเทอร์นั้นจะเกิดได้ดีในสภาวะกรด/เบส (ชาคริต และคณะ, 2554)



ภาพประกอบที่ 2.4 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

2.2 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Mill processing) (พรชัย, 2549)

การผลิตน้ำมันปาล์มดิบทำโดยกระบวนการสกัดซึ่งมี 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยก) และแบบหีบน้ำมันผสม โดยโรงงานแบบมาตรฐานนั้นจะสกัดน้ำมันจากส่วนเปลือกเพียงส่วนเดียวและส่งเนื้อในให้โรงงานอื่นสกัดน้ำมันต่อไป โรงงานแบบมาตรฐานจะมีกำลังการผลิตสูงและน้ำมันที่ได้จัดเป็นน้ำมันเกรดเอเนื่องจากการแยกชนิดของน้ำมันปาล์มสำหรับโรงงานแบบหีบน้ำมันผสม คือ การที่เกษตรกรนำทะลายปาล์มน้ำมันออกจากต้นแล้วนำมาบ่มและแยกผลปาล์มน้ำมันออกจากทะลายแล้วส่งเฉพาะผลสู่โรงงานที่สกัดน้ำมันปาล์มและน้ำมันจากเนื้อในพร้อมกัน โรงงานแบบหีบน้ำมันผสมจะมีกำลังการผลิตต่ำและน้ำมันที่สกัดได้เป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการสกัดน้ำมันแบบที่นิยมใช้โดยทั่วไปมาตรฐาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 การรับและการเก็บทะลายปาล์มสดที่โรงงาน (Fresh fruit bunch grading)

หลังจากการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มสดจะต้องรีบนำส่งไปยังโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ระยะเวลาหลังการเก็บเกี่ยวจนถึงการนึ่งทะลายปาล์มควรสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และไม่ควรเกิน 72 ชั่วโมง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกรดไขมันอิสระจากเอนไซม์ที่มีอยู่ในส่วนเปลือก น้ำมันปาล์มจากผลปาล์มสดมีกรดไขมันอิสระประมาณร้อยละ 1 หากทิ้งผลปาล์มไว้นานปริมาณกรดไขมันอิสระจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำมันมีปริมาณและคุณภาพลดลง สำหรับการรับทะลายปาล์มจะมีการตรวจสอบคุณภาพผลปาล์มสด โดยจะพิจารณาถึง ความสุกที่พอเหมาะขณะเก็บเกี่ยว ความสะอาดไม่มีสิ่งสกปรกและดินทรายปะปน ขนาดโดยพิจารณาจากน้ำหนักเฉลี่ยของทะลาย และความถูกต้องในเรื่องไขการเก็บเกี่ยว เช่น ปริมาณผลปาล์มร่วงหรือความยาวของก้านทะลาย เป็นต้น

2.2.2 การนึ่ง (Sterilization)

ทะลายปาล์มน้ำมันสดจะถูกนำเข้าอบด้วยความร้อนประมาณ 120-130 องศาเซลเซียส ความดัน 2 บาร์ เวลา 40 - 60 นาที ปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากการนึ่งทะลายปาล์มประมาณ 150 กิโลกรัม/ตัน ทะลายปาล์มสด การนึ่งปาล์มมีวัตถุประสงค์เพื่อยับยั้งเอนไซม์ซึ่งจะหยุดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ อันเป็นผลให้เกิดการสูญเสียน้ำมัน การนึ่งปาล์มยังทำให้ขี้ผลปาล์มนิ่มหลุดร่วงจากทะลายปาล์มได้ง่ายและทำให้เนื้อเยื่อของผลปาล์มอยู่ ง่ายต่อการหีบอัดน้ำมัน

2.2.3 การแยกผลปาล์ม (Bunch stripping)

ทะลายปาล์มที่นึ่งเสร็จแล้วจะถูกลำเลียงเข้าเครื่องแยกผลปาล์มและทะลายปาล์มออกจากกัน โดยใช้เครื่อง rotary drum thresher ทะลายปาล์มเปล่าถูกแยกเก็บแล้วนำไปเผาเพื่อลดปริมาณวัสดุเหลือและเพื่อผลิตถ่านสำหรับใช้เป็นปุ๋ยต่อไป

2.2.4 การย่อยผลปาล์ม (Digestion)

การย่อยผลปาล์มน้ำมัน (Digestion) ทำเพื่อย่อยเปลือกออกจากเมล็ดเมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จะได้ส่วนของเปลือกประมาณ 44.0-55.0 เปอร์เซ็นต์ และส่วนของเมล็ดประมาณ 10.0-14.0 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการย่อยผลปาล์มน้ำมันจะต้องใช้ความร้อนประมาณ 95 องศาเซลเซียส โดยต้องควบคุมอุณหภูมิอยู่ในระดับนี้ตลอดไม่ให้สูง เพราะจะทำให้น้ำเดือด การย่อยนี้จะต้องให้ความสม่ำเสมอทั่วถึง

2.2.5 การหีบน้ำมันปาล์ม (Pressing)

เนื้อปาล์มที่ผ่านการย่อยจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องหีบน้ำมันเพื่อคั้นน้ำมันออกจากชั้นเปลือกเท่านั้น โดยเครื่องหีบน้ำมันนั้นมีหลายแบบเช่น แบบเกลียวอัด แบบเครื่องปั่น และแบบไฮดรอลิก ในการหีบน้ำมันปาล์มจะได้ผลผลิตออกมาเป็นน้ำมันปาล์มที่ยังคงมีสิ่งเจือปนและความชื้นอยู่จึงต้องผ่านขั้นตอนต่อไป

2.2.6 การกรองน้ำมัน (Separation)

เป็นกระบวนการกรองน้ำมันจากน้ำมันดิบที่ได้จากการหีบเพื่อจะแยกกากออกจากน้ำมัน เครื่องกรองน้ำมันเป็นแบบมีแผ่นกรองหลายชั้น เมื่อเสร็จสิ้นการกรองจะได้น้ำมันที่สะอาดปราศจากกากโดยเครื่องจะแยกกากออกไป

2.2.7 การแยกน้ำและสิ่งเจือปน (Clarification, washing)

เป็นการใช้เครื่องเหวี่ยงแยกความเร็วสูง กระบวนการทำงานของเครื่อง คือ การแยกน้ำและสิ่งเจือปนออกจากน้ำมันดิบ น้ำมันดิบที่ได้จากการกรองจะยังมีน้ำและสิ่งเจือปนอยู่ การเหวี่ยงด้วยความเร็วสูงและใช้ความร้อนเข้าช่วยทำให้สามารถแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำมันดิบได้ โดยน้ำมันจะอยู่ส่วนบนส่วนน้ำจะถูกแยกออกมาตามท่อ

2.2.8 การกำจัดความชื้น (Drying)

น้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านเครื่องเหวี่ยงแยกเรียบร้อยแล้วอาจยังมีความชื้นหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการกำจัดความชื้นออกก่อนที่จะมีการนำไปบรรจุลงถังเพื่อทำการส่งต่อไปยังโรงงานแปรรูปต่อไป น้ำมันดิบที่ได้จะต้องมีมาตรฐานความชื้นไม่เกินจากที่กำหนด เมื่อสิ้นสุดกระบวนการให้

ความชื้นจะได้น้ำมันดิบ ซึ่งน้ำมันปาล์มที่ดีมีคุณภาพตามกำหนด คือ กรดไขมันอิสระไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ และสิ่งเจือปนไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์

2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้น โดยความร้อนจะเคลื่อนที่จากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำ ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน จึงเรียกผลต่างของอุณหภูมินี้ว่า แรงขับเคลื่อน (Driving force) ปริมาณความร้อนหรืออัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงขับเคลื่อน และเป็นสัดส่วนผกผันกับความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อน เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{อัตราการถ่ายเทความร้อน} \propto \frac{\text{แรงขับเคลื่อน}}{\text{ความต้านทานความร้อน}}$$

กลไกการเคลื่อนที่ของความร้อนจากจุดๆ หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และ การแผ่รังสี (Radiation) โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนทุกกระบวนการอาจเกิดจากการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวหรือหลายวิธีรวมกันก็ได้

2.3.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อนเป็นวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ในตัวกลางเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยตัวกลางนี้อาจเป็นตัวกลางเดียวกันหรือเป็นตัวกลางหลายชนิดอยู่ติดกัน การนำความร้อนเกิดขึ้นในระดับโมเลกุลซึ่งความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสสารจากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลถัดไป

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิและพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของความร้อนและเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาหรือระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่นั้นคือ

$$q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

เมื่อ q_{cond} = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (W, J/s)

$$k = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m K)}$$

$$A = \text{พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m}^2\text{)}$$

$$\frac{dT}{dx} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง (K/m)}$$

สมการ (1) เรียกว่า สมการของฟูเรียร์ (Fourier rate equation) ซึ่งเครื่องหมายลบในสมการเป็นผลเนื่องจากกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มี อุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิจะต้องลดลงเมื่อระยะทาง (x) เพิ่มมากขึ้นจึงมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวกหรือมีค่าเป็นบวก จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวาของสมการ

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น รูปทรง ความหนา และวัสดุที่ใช้ในการทำตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลาง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของเหลว ของแข็ง และแก๊ส ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของแก๊สไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัสดุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัสดุจะแปรตามอุณหภูมิ แต่การนำไปใช้งานในด้าน การปฏิบัตินั้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิเฉลี่ย ซึ่งสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น สารกลุ่มอโลหะจะมีค่า k ต่ำ ดังนั้นค่า k จึงเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารที่สำคัญมาก ในการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของความร้อนในสารนั้นสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการนำความร้อนของสารต่างๆ โดยเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารเหล่านั้น โดยสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงจะเรียกว่า สารตัวนำ (Conductor) และสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ จะเรียกว่า ฉนวน (Insulator)

2.3.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่อุณหภูมิแตกต่างกันก็จะมีเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อน กระบวนการพาความร้อนดังกล่าวนี้เป็นปรากฏการณ์พื้นๆ แต่กลไกของการถ่ายเทความร้อนนั้นซับซ้อนมาก จึงจะไม่กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ แต่จะเสนอกลไกและสมการ หลักๆ ที่สามารถใช้หาอัตราการพาความร้อนจากส่วนย่อยๆ ของระบบ ซึ่ง

เป็นส่วนสำคัญของระบบที่ใช้ให้ความร้อนและใช้ระบายความร้อน การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) หรือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือเครื่องสูบน้ำ
2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างพื้นผิวร้อนกับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านไปบนแผ่นวัตถุ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิ จุดที่น่าสังเกตคือ ความเร็วจะลดน้อยลงในทิศทางที่วิ่งเข้าสู่ผิวของวัตถุด้วยผลของแรงจากความเสียดทานที่เนื่องมาจากความหนืดของของไหลและเนื่องจากของไหลชั้นที่อยู่ติดกับผิวนั้นมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของแผ่นวัสดุกับของไหลชั้นดังกล่าวเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำอย่างเดียว สำหรับของไหลที่มีความเร็วสูงจะทำให้ค่าความลาดชันของอุณหภูมิสูงทำให้มีอัตราการนำความร้อนสูงตามไปด้วย การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้วมีหลายสิ่งหลายอย่างที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็งและของไหล เป็นต้น ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยการเสนอสมการเพื่อคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา ดังนี้

$$q = hA(T_h - T_c) \quad (2)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) หน่วย $W/m^2 K$
 q คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล หน่วย m^2

T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง) หน่วย K

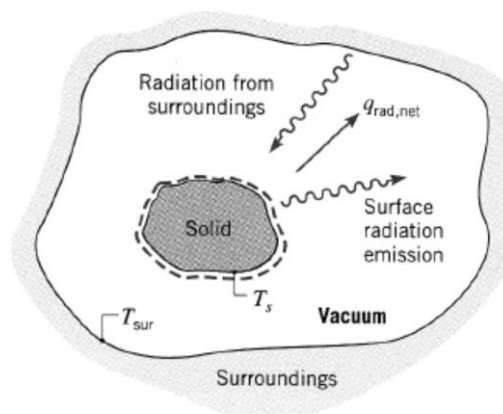
T_c คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง) หน่วย K

2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีต่างไปจากการนำความร้อน (conduction) และการพาความร้อน (convection) เพราะไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีนี้มีบทบาทสำคัญในกระบวนการทำแห้งรวมถึงกระบวนการให้ความร้อนและหล่อเย็นในทางอุตสาหกรรม

พิจารณาของแข็งในสภาวะสุญญากาศ ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น T_s สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม T_{sur} ในภาพประกอบที่ 2.5 แม้สภาวะสุญญากาศจะทำให้การนำและการพาความร้อนเกิดขึ้นไม่ได้ แต่อุณหภูมิของของแข็งจะลดลงกระทั่งเข้าสู่สมดุลกับอุณหภูมิแวดล้อมในที่สุด กระบวนการลดอุณหภูมิดังกล่าวเกี่ยวเนื่องกับการลดพลังงานภายใน (internal energy) ที่มีอยู่ในของแข็งและเป็นผลลัพธ์โดยตรงจากการปล่อย (emission) รังสีความร้อนจากพื้นผิวของแข็ง การแผ่รังสีเกิดขึ้นได้ทั้งสองทางทั้งจากของแข็งสู่สิ่งแวดล้อมและจากสิ่งแวดล้อมสู่ของแข็ง อย่างไรก็ตาม ถ้าอุณหภูมิของแข็งมากกว่าสิ่งแวดล้อม ($T_s > T_{sur}$) อย่างในกรณีนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิด้วยการแผ่รังสี ($q_{rad,net}$) จะมาจากพื้นผิวของแข็ง โดยอุณหภูมิพื้นผิวของแข็งจะลดลงจาก T_s เข้าสู่ T_{sur}

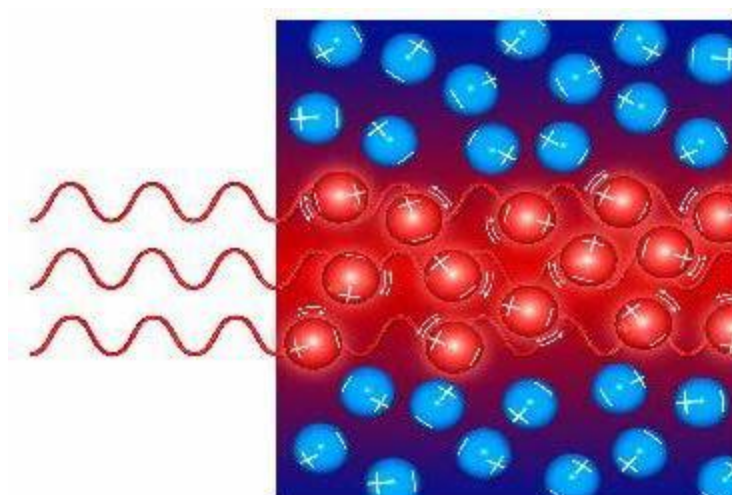
กลไกการปล่อยรังสีความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่แบบสั่น (oscillations) และการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนหลายตัวที่ประกอบเป็นสสาร แหล่งพลังงานภายในที่แปรผันไปกับอุณหภูมิของสสารทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบสั่นนี้ปรากฏการณ์แผ่รังสีความร้อนอาจเป็นได้ทั้งในเชิงปริมาตร (volumetric) ในกรณีของแก๊สและตัวกลางโปร่งแสงที่อุณหภูมิสูงหรือในเชิงพื้นผิว (surface)



ภาพประกอบที่ 2.5 การแผ่รังสีความร้อนจากของแข็งในสุญญากาศ

2.4 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric heating) ทำงานโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุหรือไมโครเวฟกำลังสูงส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ สนามของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบมีขั้ว (Dipolar molecules) ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวตามทิศทางของสนามคลื่นที่ส่งผ่านเข้ามา ทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล เกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุหรือการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นไปยังวัสดุนั้นเองดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 แสดงการเกิดความร้อนในเนื้อวัสดุจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานเป็นความร้อนเกิดภายในเนื้อวัสดุโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมซึ่งใช้เชื้อเพลิงหรือขดลวดไฟฟ้า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะอาศัยการพาของอากาศร้อนหรือการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนเป็นหลัก ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปที่ผิววัสดุก่อน จากนั้นจึงจะค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าไปสู่ภายใน

อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะมีส่วนประกอบการทำงานหลัก คือ แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า ส่วนกระจายคลื่นไปยังวัสดุ และส่วนโครงสร้างเตา โดยจะแบ่งเตาออกได้เป็น 2 ประเภทตามย่านความถี่ของคลื่นที่ใช้งาน คือ เตาให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio frequency heating) และเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating)

2.4.1 คุณลักษณะการแผ่รังสีของคลื่นไดอิเล็กทริก

ลักษณะการแผ่รังสีของคลื่นไดอิเล็กทริกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

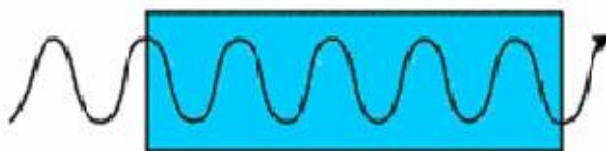
1. การแผ่รังสีแบบไม่ทำให้อะตอมภายในสสารเกิดการแตกตัว (Nonionizing rays) ได้แก่ คลื่นไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ คลื่นอินฟราเรดและคลื่นแสงที่ตามองไม่เห็น ซึ่งการแผ่รังสีรูปแบบนี้จะมีอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตน้อยมาก

2. การแผ่รังสีแบบทำให้อะตอมภายในสสารเกิดการแตกตัว (Ionizing rays) ได้แก่ รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา และแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งการแผ่รังสีรูปแบบนี้จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหากได้รับรังสีในปริมาณมากและรับเป็นเวลานาน

2.4.2 คุณลักษณะของคลื่นไดอิเล็กทริก

1. การทะลุผ่านของคลื่น (Transmitted wave)

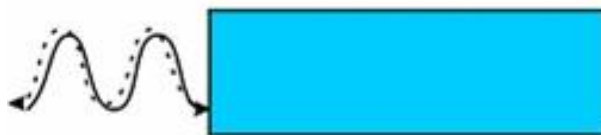
คลื่นไดอิเล็กทริกสามารถทะลุผ่านวัสดุโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน โดยวัสดุเหล่านี้ได้แก่ แก้วทั่วไป (ยกเว้นแก้วที่ผ่านการเจียรนัยซึ่งมีส่วนของตะกั่วซึ่งเป็นโลหะรวมอยู่) เครื่องกระเบื้องเคลือบ พลาสติกและกระดาษ เป็นต้น โดยเมื่อนำเอาวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นภาชนะในการบรรจุอาหารและทำการให้ความร้อนด้วยคลื่นไดอิเล็กทริก ภาชนะเหล่านี้จะไม่เกิดความร้อนขึ้นจากการรับคลื่น



ภาพประกอบที่ 2.7 การทะลุผ่านของคลื่น (Transmitted wave)

2. การสะท้อนของคลื่น (Reflected wave)

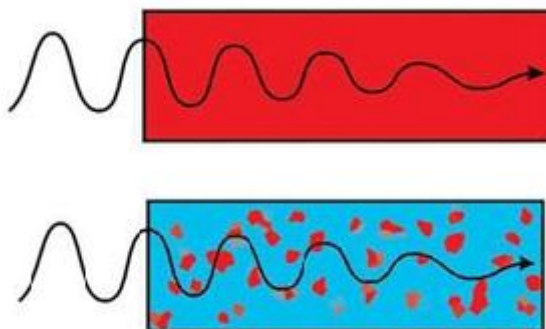
คลื่นไดอิเล็กทริกเมื่อกระทบกับวัสดุจำพวกโลหะจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่น เนื่องจากคลื่นไดอิเล็กทริกไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุโลหะได้



ภาพประกอบที่ 2.8 การสะท้อนของคลื่น (Reflected wave)

3. การดูดกลืนของคลื่น (Absorbed wave)

คลื่นไดอิเล็กทริกจะถูกดูดกลืนด้วยวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วหรือประกอบไปด้วยน้ำซึ่งมีโมเลกุลแบบมีขั้วเช่นกันเป็นองค์ประกอบทั้งยังส่งผลให้พลังงานคลื่นลดลง โดยพลังงานคลื่นที่ลดลงจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนส่งผลให้วัสดุร้อนขึ้น (ผดุงศักดิ์, 2551)



ภาพประกอบที่ 2.9 การดูดกลืนของคลื่น (Absorbed wave)

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2550)

2.4.3 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Properties) (สายสนม, 2543)

องค์ประกอบของวัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเป็นไดอิเล็กทริก แต่ความสามารถในการดูดซับคลื่นของวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ โดยปริมาณน้ำและรูปแบบของน้ำที่เป็นส่วนประกอบในวัสดุนั้นจะมีความสำคัญต่อการดูดซับคลื่นด้วยของวัสดุ ซึ่งน้ำที่อยู่ในรูปอิสระ (Free water) จะทำให้สามารถดูดซับคลื่นได้ดีกว่าน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบอื่น เช่น โปรตีน หรือคาร์โบไฮเดรต เช่นเดียวกับเกลือแร่ถ้าอยู่ในรูปที่แตกตัว (Dissociated) จะทำให้วัสดุนั้นดูดซับคลื่นได้ดีกว่าเกลือที่อยู่ในรูปรวมตัวกับสารอื่น (Associated)

2. ลักษณะทางกายภาพของวัสดุ เมื่อขึ้นของวัสดุถูกทำให้ร้อนขึ้น วัสดุที่มีขนาดเหมือนกันหรือใกล้เคียงกันจะร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และขนาดของชิ้นวัสดุที่เล็กกว่านั้นจะต้องการพลังงานที่น้อยกว่าชิ้นที่ขนาดใหญ่กว่า นอกจากนี้รูปร่างหรือลักษณะพื้นฐานของวัสดุก็มีความสำคัญ โดยการให้ความร้อนที่มากเกินไปสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ส่วนชิ้นวัสดุที่มีรูปร่างกลมมนนั้นมีแนวโน้มที่จะร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอมากกว่าชิ้นวัสดุที่มีมุมแหลมหรือมีทั้งส่วนที่หนาและบาง อย่างไรก็ตามลักษณะทรงกลมหรือมีผิวที่โค้งคล้ายทรงกลมอาจ

มีส่วนกลางที่ร้อนกว่าแต่การให้ความร้อนที่มากเกินไปไม่สามารถที่จะสังเกตได้ในชั้นวัสดุที่มีรัศมีเกิน 0-50 mm. นอกจากนี้ความหนาแน่นหรือความเป็นเนื้อเดียวกันยังมีผลต่อวิธีที่ทำให้วัสดุเหล่านี้ร้อนขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสม่ำเสมอของวัสดุที่แน่นกว่าจะมีแนวโน้มที่จะใช้เวลานานกว่าวัสดุที่มีองค์ประกอบที่เปิดและเป็นรูพรุนมากกว่า

3. อุณหภูมิของวัสดุ โดยเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากคลื่นไดอิเล็กทริกการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุหลายอย่าง ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดอัตราและเวลาการให้ความร้อน โดยทั่วไปแล้วการให้ความร้อนใดๆ ก็ตามหากอาหารนั้นมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่สูง วัสดุก็จะยิ่งร้อนเร็วขึ้น ซึ่งในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นวิทยุก็เป็นเช่นเดียวกัน ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิที่จะได้คือ ความร้อนแฝง เช่น น้ำแข็งในอาหารแช่แข็งที่เปลี่ยนไปเป็นน้ำทำให้มีความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น ปัจจัยทางไดอิเล็กทริกและปัจจัยทางความร้อนของวัสดุเองก็มีผลด้วยเช่นกัน

4. ระดับความถี่ของคลื่น โดยทั่วไปสำหรับตัวอย่างของการใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยการใช้ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ยิ่งต่ำความสามารถในการทะลุทะลวงก็จะยิ่งมาก เช่น พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 915 MHz จะทะลุทะลวงได้ดีกว่าหลังจากคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 MHz เนื่องจากความยาวคลื่นมากกว่า นอกจากนี้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสหรืออุณหภูมียิ่งต่ำจะทำให้ความสามารถในการทะลุทะลวงยิ่งสูงขึ้นเมื่อใช้ความถี่เดียวกัน

สำหรับในวัสดุหรือพวกอาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นองค์ประกอบอยู่สูงจะมีการดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีกว่าและไม่มีผลต่ออุณหภูมิของวัสดุรวมทั้งความถี่ของคลื่นไมโครเวฟด้วย ซึ่งสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุต่างแสดงออกมาเป็นค่าตัวเลขที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าต่างๆ อยู่ 3 ค่าคือ

1. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, k') คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถของสารประกอบที่จะสามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้เมื่อนำเอาสารประกอบนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสารใดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะสามารถกักเก็บพลังงานไว้ได้สูงตามไปด้วย ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นของอาหารนั้นๆ

2. แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor, k'') คือ ค่าของพลังงานที่สูญเสียไปหรือที่แพร่กระจายไปในสารไดอิเล็กทริกเมื่อนำไปวางไว้ในพื้นที่สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งพลังงานไฟฟ้าจะสูญเสียไปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในชั้นของอาหารนั้นๆ ถ้าค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าสูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนขึ้นสูง แต่พลังงานก็จะถูกดูดซับไปอย่างรวดเร็วเมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่าน

เข้าไปในชั้นอาหารนั้นเพียงระยะสั้นๆ แล้วความร้อนนั้นจะลดลงโดยกระบวนการนำและพาความร้อนเข้าสู่ภายในของชั้นอาหารร่วมด้วย

3. Loss tangent ($\tan \delta$) หรือ Dissipation factor คือ ลักษณะของการสูญเสียพลังงานของสารนั้นซึ่งคิดออกมาในรูปของมุมที่ต่างไปจาก 90 องศาในสภาพปกติทั่วไปของกระแสไฟฟ้า โดยค่านี้จะมีส่วนสัมพันธ์กับค่า k' และ k'' คือ

$$\tan \delta = k''/k' \quad (3)$$

$$k'' = k' \tan \delta \quad (4)$$

ในการให้ความร้อนแก่อาหารจะทำให้คลื่นสูญเสียพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เราใช้คำว่า loss factor หรือ loss tangent เป็นตัวชี้บอกการสูญเสียพลังงานของคลื่นในการเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอาหารหรือบอกว่าคลื่นถูกดูดซับไว้ทั้งหมด วัสดุที่ที่สามารถดูดซับคลื่นไว้ได้มากคือ วัสดุที่มีการเคลื่อนที่ภายในโมเลกุลมากกว่าวัสดุอีกชนิดหนึ่งซึ่งเรียกลักษณะดังกล่าวว่า ความหลวม (Lossy) ระดับความหลวมนี้จะแปรผันกับความถี่คลื่น อุณหภูมิและคุณลักษณะของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหลวมมากวัสดุนั้นจะสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นได้มากซึ่งวัสดุจะร้อนมากนั่นเอง (วิล, 2543)

2.5 หลักการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไดอิเล็กทริก

การให้ความร้อนโดยคลื่นความถี่วิทยุ อาศัยหลักการเดียวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปของสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นพลังงานความร้อนในตัววัตถุโดยไม่มีการกระจายของประจุในวัสดุนั้น ในสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงโมเลกุลของวัตถุเกิดการสั่นสะเทือนตามการเหนี่ยวนำไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นจำนวนหลายล้านครั้งใน 1 วินาที ทำให้เกิดปรากฏการณ์ 2 รูปแบบ คือ

1. Intermolecular Friction ที่เกิดจากแรงดึงดูดกันระหว่างโมเลกุล

2. Hysteresis เป็นแรงต้านทานทางประจุไฟฟ้าเนื่องมาจากแรงเฉื่อย ซึ่งขึ้นกับจำนวนประจุ มวลและรูปร่างของโมเลกุล (พิทยา, 2550)

เมื่อวัตถุมีการดูดซับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อให้เกิดความร้อนได้ 2 กลไกร่วมกันคือ กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกการหมุนทั้งสองข้าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic conduction) (ผดุงศักดิ์, 2551)

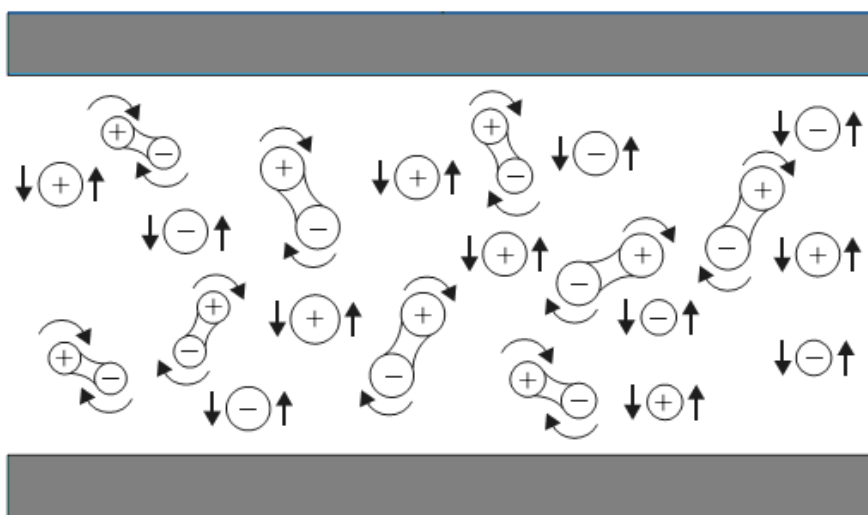
เป็นลักษณะการเกิดความร้อนเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า โดยกลไกนี้จะเริ่มขึ้นเมื่อประจุไอออนซึ่งเกิดการแตกตัวในสารละลายถูกเร่งด้วยแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อวัสดุ ตัวอย่างเช่น สารละลายเกลือในน้ำ

ซึ่งในสารละลายจะประกอบไปด้วยไอออนของโซเดียม (Na^+) คลอไรด์ (Cl^-) ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+ , H^+) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งเคลื่อนที่โดยสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามกับประจุที่มีอยู่แต่ละไอออน จากการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้ไอออนชนกับโมเลกุลของน้ำที่ยังไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้พลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้ไอออนเกิดความเร่งและส่งผลเป็นลูกโซ่ต่อการชนของโมเลกุลอื่นคล้ายกับการชนของลูกบิลเลียด เมื่อค่าประจุเปลี่ยนแปลง ไอออนจึงมีความเร่งเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม โดยเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดด้วยอัตราความถี่สูงนับล้านครั้งต่อวินาที ทำให้มีการชนและถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นในระดับโมเลกุลอย่างมหาศาล ดังนั้นจึงมีขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน 2 ขั้นตอน คือ พลังงานของสนามไฟฟ้าถูกเปลี่ยนแปลงไปตามพลังงานจลน์ โดยการเหนี่ยวนำแบบบังคับทิศทาง (Ordered kinetic energy) ซึ่งถูกเปลี่ยนกลับมาเป็นพลังงานจลน์ โดยการเหนี่ยวนำแบบไร้ทิศทาง (Disordered kinetic energy) ณ จุดซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนและพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยกลไกนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิหรือความถี่

2. กลไกการหมุนของทั้งสองขั้ว (Dipolar rotation)

สำหรับโมเลกุลหลาย ๆ ชนิด เช่น โมเลกุลน้ำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสองขั้ว (Dipole) โดยธรรมชาติ หมายถึง โมเลกุลมีสมบัติของการกระจายความถี่ที่ไม่สมมาตร เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางส่วนโมเลกุลของสารชนิดอื่นจะเกิดความไม่สมมาตรได้หากเกิดการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทั้งนี้เพราะสนามไฟฟ้าทำให้เกิดหน่วยแรงค้ำภายในโมเลกุล โดยขั้วทั้งสองได้รับอิทธิพลจากกลไกดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงขั้วอย่างรวดเร็วตามสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ตัวอย่างเช่น คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุถึง 4900 ล้านครั้งต่อหนึ่งรอบคลื่น แม้ว่าในตอนจะเริ่มประจุในโมเลกุลจะมีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรืออย่างสุ่มก็จะได้รับผลให้มีการจัดเรียงประจุตามทิศทางหรือขั้วของสนามไฟฟ้าที่มากระทำ อย่างไรก็ตามเมื่อสนามไฟฟ้าที่มากระทำมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าดังกล่าวเปลี่ยนกลับมามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เช่นเดิม คือ การคลายสนาม (Relaxes) เช่นกัน เมื่อสนามไฟฟ้ามากระทำในทิศทางตรงกันข้ามดังนั้นการสร้างหรือการจัดเรียง (Alignment) และการคลายสนามที่ความถี่หนึ่งจะเกิดขึ้นนับล้านครั้งในหนึ่งวินาที เป็นการแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าเป็นศักย์เก็บไว้ในวัสดุแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์หรือพลังงานความร้อนนั่นเอง นอกจากนั้นขนาดของโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิในขณะที่มีการสร้างหรือการจัดเรียงและการคลายสนามไฟฟ้านั้นจะถูกนิยามเป็นความถี่ของการคลายสนามโดยโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำและโมโนเมอร์จะมีค่าความถี่ของการคลายสนามมากกว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟและมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุให้การ

เปลี่ยนพลังงานไปเป็นความร้อนได้ช้าลง ในทางตรงกันข้ามกับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เช่น พอลิเมอร์จะมีค่าความถี่ของการคลายสนามน้อยกว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีผลทำให้อนุภาคมีสูงขึ้นได้ในบางสภาวะซึ่งนั่นก็คือมีการแปลงพลังงานไปเป็นความร้อนได้สูงและนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal runaway) ในวัสดุได้ง่าย มีข้อสนับสนุนถึงความจริงอย่างหนึ่งที่ว่าของเหลว เช่น น้ำและโมโนเมอร์จะเป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าพอลิเมอร์ เหตุนี้จึงสามารถนำไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งที่มีองค์ประกอบเป็นของเหลวและโมโนเมอร์ได้

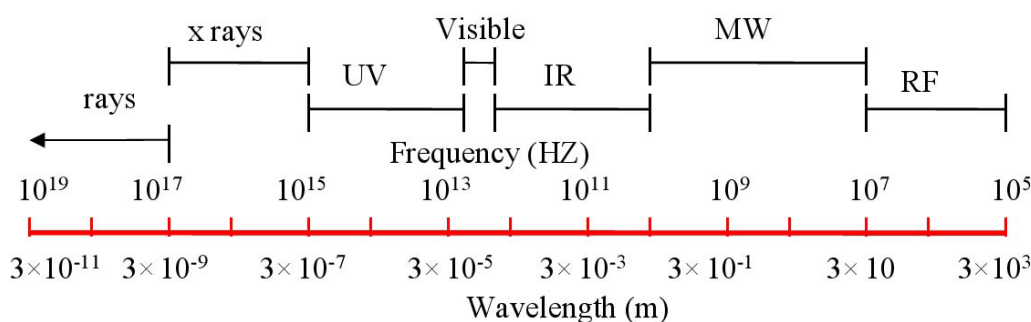


ภาพประกอบที่ 2.10 ลักษณะการเปลี่ยนจากพลังงานความร้อนภายในตัววัตถุเมื่อถูกนำไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปมาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในคลื่นความถี่วิทยุการเคลื่อนที่ของประจุอยู่ที่ 3-300 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งผลของความเร็วในการหมุนตัวและการเสียดสีกันก่อให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 2-3 วินาทีหรือประมาณ 1 นาทีหลังจากได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดการกระจายตัวไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลจากการเดือดของน้ำโดยกระบวนการนำความร้อน และสามารถเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับ การลดความชื้น โดยใช้ลมร้อนแล้วการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้เวลาและพลังงานในปริมาณน้อยมาก

2.6 คลื่นความถี่วิทยุ (Radio-Frequency, RF)

คลื่นความถี่วิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วงระหว่าง 3-300 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถดูภาพประกอบที่ 2.11 ประกอบ สำหรับคลื่นความถี่ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้มีอยู่ 3 ระดับคือ 13.56, 27.12 และ 14.68 เมกะเฮิร์ตซ์ การให้ความร้อนโดยคลื่นวิทยุนี้สามารถกระจายความร้อนผ่านวัตถุที่มีความหนาได้ดีกว่าคลื่นไมโครเวฟและยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการที่ทำกับวัตถุที่มีขนาดใหญ่หลายชิ้นพร้อมๆกันหรือมีองค์ประกอบที่ถูกกำจัดทิ้งมากๆ เช่น มีน้ำในตัววัตถุนั้นมาก ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมาก เช่น การใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปผลผลิตจากพืชและสัตว์ โดยใช้เพื่อการออกฤทธิ์ของ inactivated enzymes ที่มีอยู่ในพืชหรือใช้ในการฆ่าเชื้อโรคและแมลงต่างๆ ที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบ



ภาพประกอบที่ 2.11 ช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ

ที่มา: Marra และคณะ (2008)

2.7 คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)

คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ชนิดหนึ่ง โดยช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟอยู่ในช่วงตั้งแต่ 300 เมกะเฮิร์ตซ์–300 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่ในการใช้งานนั้นส่วนมากนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 1–60 กิกะเฮิร์ตซ์ เนื่องจากเป็นย่านความถี่ที่สามารถผลิตได้ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (N. Sukaribin, 2009) คลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะกลไกการเกิดความร้อนคล้ายกับคลื่นความถี่วิทยุแต่มีความถี่คลื่นที่สั้นกว่า สำหรับเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แม็กนีตรอนซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ นอกจากนี้ก็ยังมีส่วนประกอบอื่นของเตา ได้แก่ วงจรสร้างความดันไฟฟ้าสูง ท่อนำคลื่น (Wave guide) ห้องอบ (Cavity) ระบบระบายความร้อนของแม็กนีตรอน และระบบควบคุม

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Akaranuchat, P. (2009) ได้ศึกษาการให้ความร้อนแก่เมล็ดข้าวบาร์เลย์โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ตซ์ เป็นระยะเวลา 1 และ 3 นาที พบว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที สามารถลดปริมาณของเชื้อรา และทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ไฮโดรจีเนสลดลง อีกทั้งยังคงรักษาคุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดไว้ได้

Chow, M. N. และ Ma, A. N. (2007) ได้ศึกษาการอบปาล์มน้ำมันโดยเตาไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 800 วัตต์ พบว่า การใช้เตาอบไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ปาล์มน้ำมันสามารถทำให้ผลของปาล์มน้ำมันมีลักษณะที่อ่อนนุ่ม และยังสามารถยับยั้งปฏิกิริยาไลโปไลซิสนในผลปาล์มได้ ส่วนน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในที่สกัดออกมาได้นั้นมีคุณภาพดีทั้งยังมีปริมาณของกรดไขมันอิสระน้อย โดยเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการให้ความร้อนโดยเตาไมโครเวฟคือ 3 นาที ซึ่งจะไม่ส่งผลให้เนื้อในเมล็ดปาล์มไหม้และไม่ทำให้น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์มเสื่อมคุณภาพ

Zhang, L. และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของไขมัน น้ำ และเกลือต่อสมบัติอุณหพลศาสตร์และสมบัติไดอิเล็กทริกของชั้นเนื้อ โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟที่ความถี่ 27.12, 915 และ 2450 เมกกะเฮิร์ตซ์ พบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ dielectric constant (E') และ dielectric loss factor (E'') คือ ปริมาณไขมัน ปริมาณน้ำและความถี่ที่ใช้ โดยเมื่อปริมาณไขมันและความถี่ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ E' และ E'' มีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ E' และ E'' เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ penetration depth (d_p) พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำและไขมันในชั้นเนื้อ ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของ d_p เนื่องจากการเพิ่มของทั้งสองตัวแปรส่งผลให้ d_p เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ d_p ลดลง จึงทำให้ d_p ของคลื่นความถี่วิทยุมากกว่าของไมโครเวฟ

Zhong, Q. และคณะ (2004) ได้ศึกษาการให้คลื่นความถี่วิทยุแก่ ชั้นแคโรททีน แคโรทีนทรูปทรูกลูเตา และมันฝรั่งรูปทรูกลูเตาที่อยู่ในสารละลาย Carboxymethylcellulose (CMC) 1 เปอร์เซ็นต์โดยใช้ความถี่ 40.68 เมกกะเฮิร์ตซ์ พบว่า การกระจายตัวของอนุภาคภายในแคโรทีนชั้นเล็กและมันฝรั่งรูปทรูกลูเตาซึ่งมีโครงสร้างภายในเหมือนกันตลอดทั้งชิ้น การกระจายตัวของอนุภาคในอนุภาคมีความคงตัวโดยอนุภาคภายในของอนุภาคตรงส่วนกลางจะสูงกว่าบริเวณรอบนอก ในขณะที่การกระจายตัวของอนุภาคในแคโรทีนทรูปทรูกลูเตาที่มีโครงสร้างของส่วนแกนแคโรทีนที่มีลักษณะแข็งกว่าส่วนอื่นอยู่ด้วย ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคภายในไม่คงตัว โดยส่วนที่เป็นแกนจะมีอนุภาคต่ำกว่าบริเวณรอบๆ และมีอัตราการให้ความร้อนที่ช้ากว่า

ส่วนอื่น ดังนั้นความแตกต่างทางโครงสร้างจะส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของอนุภาคในอนุภาค

Irfan, I. และ Elke, P. (1999) ได้ศึกษาการให้คลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 140 วัตต์ และคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 1200 วัตต์ แก่เมล็ดเรพซิด พบว่า การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ ส่งผลให้ปริมาณกรดและเพอร์ออกไซด์ในน้ำมันลดลง แต่ปริมาณกรด thiobarbituric (TBA) และกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบในน้ำมันไม่ได้รับผลกระทบจากการใช้คลื่นเลย แต่กิจกรรมของเอนไซม์ peroxidase และเอนไซม์ methylumbelliferyl-palmitic-acid-esterhydrolase (MU-Pase) ในเมล็ดพันธุ์ถูกทำให้ลดลง ซึ่งข้อดีของการใช้คลื่นวิทยุเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นไมโครเวฟ คือ การใช้คลื่นความถี่วิทยุจะไม่เกิดการเผาไหม้ของสารหอม ซึ่งยืนยันได้ด้วยการประยุกต์ใช้กับเมล็ดเรพซิดที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยการใช้อุณหภูมิสูงกับเมล็ดเรพซิด ทำให้ส่วนประกอบของคุณภาพน้ำมันบางชนิด เช่น ปริมาณกรด ปริมาณเพอร์ออกไซด์ และปริมาณ TBA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า คลื่นวิทยุไม่มีผลกระทบต่อส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมัน

Jiaxun, T. และคณะ (1993) ได้ศึกษาการอบรำข้าวโดยใช้เตาอบไมโครเวฟความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 550 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที แล้วจึงนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 สัปดาห์ หลังจากนั้นจึงมีการนำรำข้าวไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระและเปรียบเทียบกับปริมาณกรดไขมันอิสระในรำข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ พบว่าการให้ความร้อนด้วยเตาอบไมโครเวฟสามารถลดอัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระลงได้อย่างมาก โดยรำข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟมีกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือจาก 4.00 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 4.90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่รำข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟกลับมีกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นมาก คือ จาก 4.00 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 68.30 เปอร์เซ็นต์

สาวิตรี และคณะ (2551) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟแบบสายพานในกระบวนการนึ่งผลปาล์มน้ำมัน โดยใช้เตาอบไมโครเวฟแบบคริวร้อนและแบบสายพาน พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระในผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนและทิ้งไว้เป็นเวลา 96 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณกรดไขมันอิสระของปาล์มที่ทิ้งให้ความร้อนเสร็จ โดยเวลาที่น้อยที่สุดของเตาอบไมโครเวฟแบบคริวร้อนและแบบสายพานที่ทำให้เนื้อของผลปาล์มมีลักษณะอ่อนนุ่มและหีบน้ำมันง่าย คือ 3 และ 20 นาทีตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการซ้อนทับกันของผลปาล์มมีผลให้คลื่นสะท้อนได้ไม่ทั่วถึงทำให้ผลปาล์มน้ำมันสุกได้ไม่ทั่วถึงเท่ากัน

พัทธา (2550) ได้ศึกษาการให้คลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมเชื้อราและผลกระทบต่อคุณภาพเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ โดยให้เมล็ดมีความชื้นเริ่มต้น 13 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองโดยใช้ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 1, 3 และ 5 นาที พบว่า คลื่นความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพในการยับยั้งและลดปริมาณเชื้อรา *T. padwickii* และทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ในเมล็ดลดลง แต่มีผลให้ความชื้นในเมล็ดข้าวลดลงเพียงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้คลื่นความถี่วิทยุที่เหมาะสมและมีผลกระทบต่อคุณภาพเมล็ดน้อยที่สุดคือ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที โดยสามารถลดปริมาณเชื้อรา *T. padwickii* ลงได้ 40 เปอร์เซ็นต์

ปรัชญา (2548) ได้ศึกษาการให้คลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดพันธุ์งาที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 810 วัตต์ เป็นเวลา 180 วินาที โดยให้มีความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพันธุ์งาเป็น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า อุณหภูมิตั้งแต่ 80 องศาเซลเซียส ขึ้นไปสามารถใช้ได้ผลดี ปริมาณความชื้นในเมล็ดมีผลต่อประสิทธิภาพในการให้คลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ด ซึ่งที่ความชื้นเริ่มต้นเป็น 10 เปอร์เซ็นต์สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส และปริมาณเชื้อรา *M. phaseolina* ได้สูงกว่าที่ความชื้นเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์ และยังพบอีกว่าอิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดและอุณหภูมิที่ให้แก่เมล็ด ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันอิสระในเมล็ด

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ผลปาล์มน้ำมันซึ่งรับซื้อทะเลาะปาล์มสดมาจากสวนปาล์มน้ำมันภายในพื้นที่ของจังหวัดสงขลาและพื้นที่ใกล้เคียง โดยอายุของผลปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลองจะต้องถูกเก็บจากต้นเป็นเวลาไม่เกิน 48 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.1



ภาพประกอบที่ 3.1 ผลปาล์มน้ำมันในการทดลอง

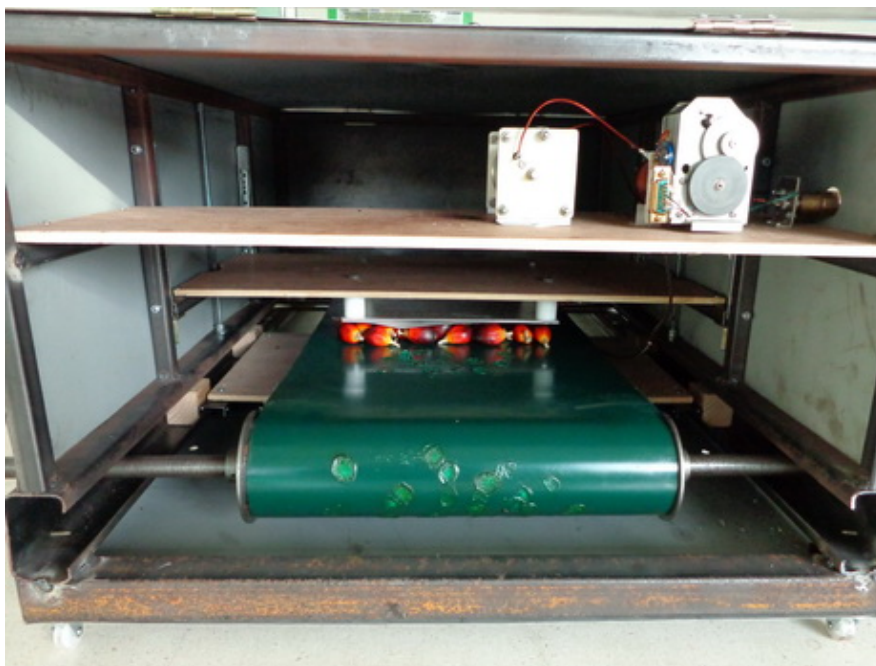
3.2 อุปกรณ์สารเคมี

3.2.1 เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ

การศึกษาการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุ ได้ดำเนินการ โดยใช้ชุดเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกชนิดคลื่นวิทยุ ซึ่งในชุดเครื่องให้ความร้อนประกอบด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุ Dressler รุ่น Cesare DTG 2710 ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลังส่ง 1000 วัตต์ และตัวปล่อยสนาม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

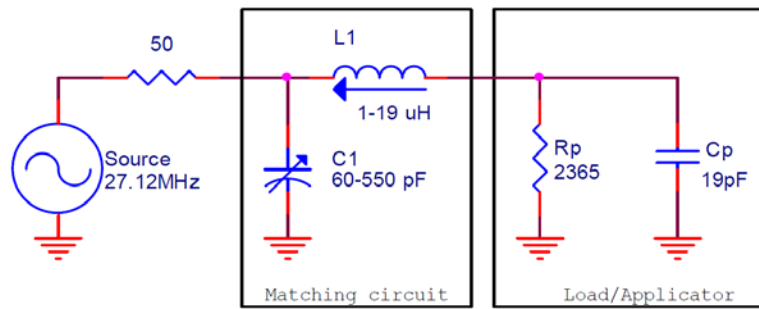


ภาพประกอบที่ 3.2 เครื่องกำเนิดคลื่น



ภาพประกอบที่ 3.3 ตัวปล่อยสนามไฟฟ้า

ภายในตัวปล่อยสนามประกอบด้วยตัวปล่อยสนามไฟฟ้ากว้าง 16 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร ซึ่งสามารถปรับระยะระหว่างแผ่น โลหะทั้งสอง ได้ตั้งแต่ 4 ถึง 10 เซนติเมตร และ วงจรแม่เหล็กซึ่งปรับได้ที่มีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 วงจรแมตช์ซึ่งปรับได้



ภาพประกอบที่ 3.5 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ใช้ในการแมตช์อิมพีแดนซ์

3.3.2 เตาอบไมโครเวฟ

การศึกษาการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้ดำเนินการโดยใช้ เตาอบไมโครเวฟแบบทั่วไปที่ใช้ในครัวเรือน ยี่ห้อ SAMSUNG กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ใช้ไฟ 220 โวลต์ ความจุ 20 ลิตร ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.6



ภาพประกอบที่ 3.6 เตอบไมโครเวฟ

3.2.3 เครื่องมือวัด

3.2.3.1 นาฬิกาจับเวลา

3.2.3.2 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าหือ TMT รุ่น DDS-1Y

3.2.3.3 กล้องถ่ายภาพอุณหภูมิตามแบบอินฟราเรด หือ FLIR รุ่น FLIR i3

3.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.4.1 เครื่องหีบน้ำมันปาล์ม

3.2.4.2 ตู้อบ (Oven)

3.2.4.3 บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิลิตร

3.2.4.4 ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร

3.2.4.5 ปิเปต (pipette) ขนาด 1, 5 และ 10 มิลลิลิตร

3.2.4.6 บิวเรต (burette) ขนาด 25 และ 50 มิลลิลิตร

3.2.4.7 หลอดหยดสาร

3.2.4.8 ซ้อนตักสาร

3.2.4.9 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง

3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.5.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 และ 0.1 นอร์มัล

3.2.5.2 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

3.2.5.3 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol)

3.2.5.4 น้ำกลั่น

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุเพื่อยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม

การศึกษาการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งดำเนินการโดยชุดเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกชนิดคลื่นวิทยุ มีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การศึกษาการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุ

- 1) ทำการชั่งน้ำหนักผลปาล์มตัวอย่าง ตัวอย่างละ 150 กรัม
- 2) ทำการตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นในผลปาล์ม โดยการหีบน้ำมันปาล์มออกมา แล้วทำการวิเคราะห์น้ำมันที่ได้ตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40
- 3) ทำการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มตัวอย่างด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกชนิดคลื่นวิทยุ ภายใต้กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 นาที
- 4) ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิผลปาล์มตัวอย่างด้วยกล้องอินฟราเรด FLIR
- 5) เก็บข้อมูลน้ำหนักของผลปาล์มหลังการให้ความร้อน และข้อมูลการใช้ไฟฟ้าจากวัตต์มิเตอร์
- 6) วิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิด้วยโปรแกรม FLIR Quick Report 1.2 sp2
- 7) ตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 4 และ 8 วันหลังจากการให้ความร้อนตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40
- 8) วิเคราะห์พลังงานที่ผลปาล์มได้รับ พลังงานที่ให้แก่ผลปาล์ม และประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

3.3.1.2 การศึกษาการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุ

- 1) แยกผลปาล์มออกจากทะเลาะ และทำการชั่งน้ำหนักผลปาล์มตัวอย่าง ตัวอย่างละ 600 กรัม
- 2) ทำการตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นในผลปาล์ม โดยการหีบน้ำมันปาล์มออกมา แล้วทำการวิเคราะห์น้ำมันที่ได้ตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40
- 3) ทำการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มตัวอย่างด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกชนิดคลื่นวิทยุ ภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที (ปรับระยะระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองจาก 4 เป็น 10 เซนติเมตร)

- 4) ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิผลปาล์ม ตัวอย่างด้วยกล้องอินฟราเรด FLIR
- 5) เก็บข้อมูลน้ำหนักของผลปาล์มหลังการให้ความร้อน และข้อมูลการใช้ไฟฟ้า จากวัตต์มิเตอร์
- 6) วิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิด้วยโปรแกรม FLIR Quick Report 1.2 sp2
- 7) ตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 4 และ 8 วันหลังจากการให้ความร้อนตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40
- 8) วิเคราะห์พลังงานที่ผลปาล์มได้รับ พลังงานที่ให้แก่ผลปาล์ม และประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

3.3.2 การศึกษาการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม

การศึกษาการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดำเนินการโดยใช้เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปตามครัวเรือน มีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

3.3.2.1 การศึกษาการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

- 1) ทำการชั่งน้ำหนักผลปาล์มตัวอย่าง ตัวอย่างละ 150 กรัม
- 2) ทำการตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นในผลปาล์ม โดยการหีบน้ำมันปาล์มออกมา แล้วทำการวิเคราะห์น้ำหนักที่ได้ตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40
- 3) ทำการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มตัวอย่างด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกชนิดคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้อำนาจส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 นาที
- 4) ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิผลปาล์ม ตัวอย่างด้วยกล้องอินฟราเรด FLIR
- 5) เก็บข้อมูลน้ำหนักของผลปาล์มหลังการให้ความร้อน และข้อมูลการใช้ไฟฟ้า จากวัตต์มิเตอร์
- 6) วิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิด้วยโปรแกรม FLIR Quick Report 1.2 sp2
- 7) ตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 4 และ 8 วันหลังจากการให้ความร้อนตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40
- 8) วิเคราะห์พลังงานที่ผลปาล์มได้รับ พลังงานที่ให้แก่ผลปาล์ม และประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

3.3.2.2 การศึกษาการให้ความร้อนแก่ข้อผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

- 1) แยกข้อผลปาล์มออกจากทะเลา และทำการชั่งน้ำหนักผลปาล์มตัวอย่างตัวอย่างละ 600 กรัม
- 2) ทำการตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นในผลปาล์ม โดยการหีบน้ำมันปาล์มออกมา แล้วทำการวิเคราะห์น้ำมันที่ได้ตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40
- 3) ทำการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มตัวอย่างด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกชนิดคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที
- 4) ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิผลปาล์มตัวอย่างด้วยกล้องอินฟราเรด FLIR
- 5) เก็บข้อมูลน้ำหนักของผลปาล์มหลังการให้ความร้อน และข้อมูลการใช้ไฟฟ้าจากวัตต์มิเตอร์
- 6) วิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิด้วยโปรแกรม FLIR Quick Report 1.2 sp2
- 7) ตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 4 และ 8 วันหลังจากการให้ความร้อนตามมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40
- 8) วิเคราะห์พลังงานที่ผลปาล์มได้รับ พลังงานที่ให้แก่ผลปาล์ม และประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

บทที่ 4

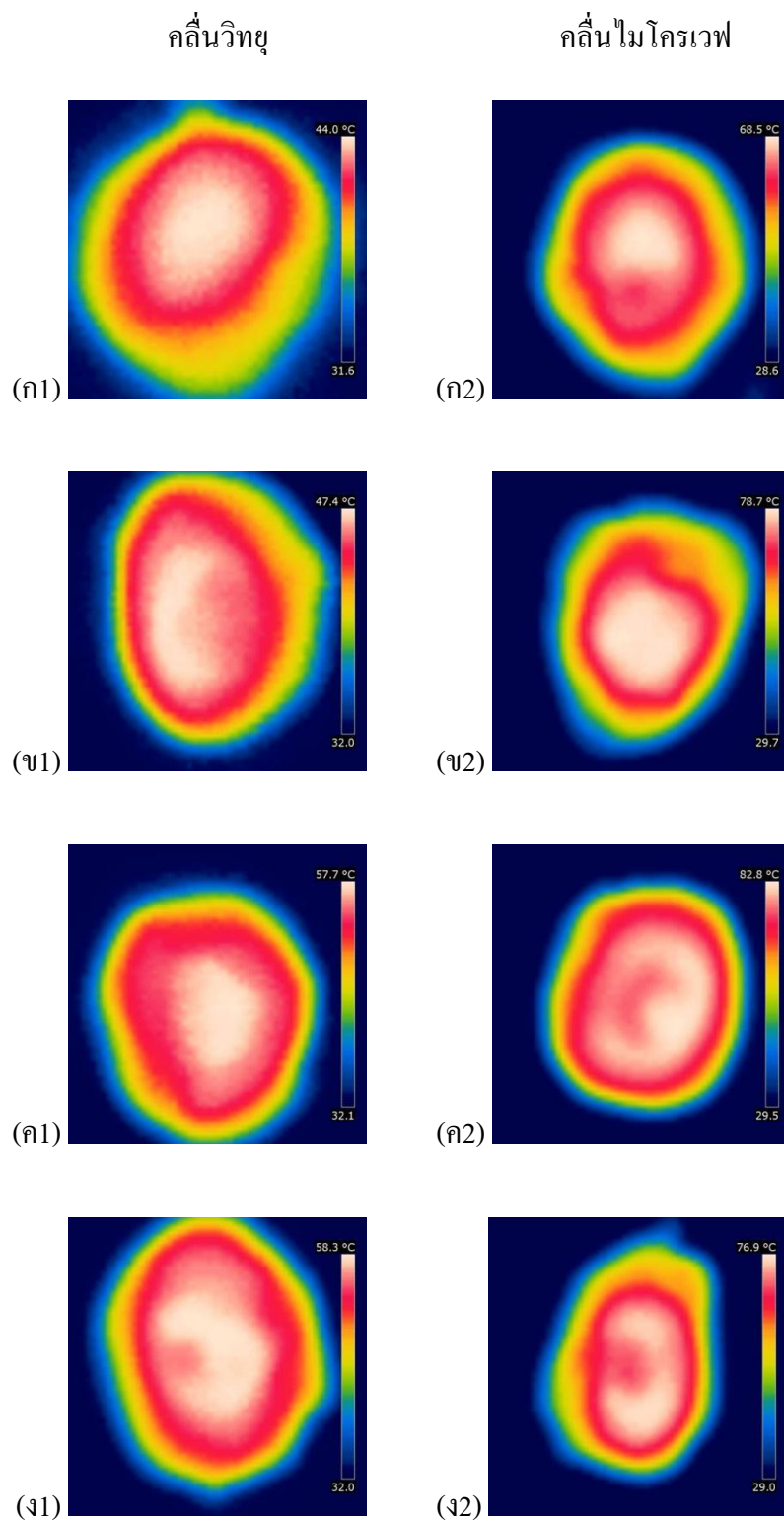
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากผลการทดลองให้ความร้อนแก่ผลปาล์มน้ำมัน โดยประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและเตาอบไมโครเวฟเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการให้ความร้อนของทั้งสองเทคนิค สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 การศึกษาการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแก่ผลปาล์มน้ำมัน

4.1.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผลปาล์มน้ำมัน

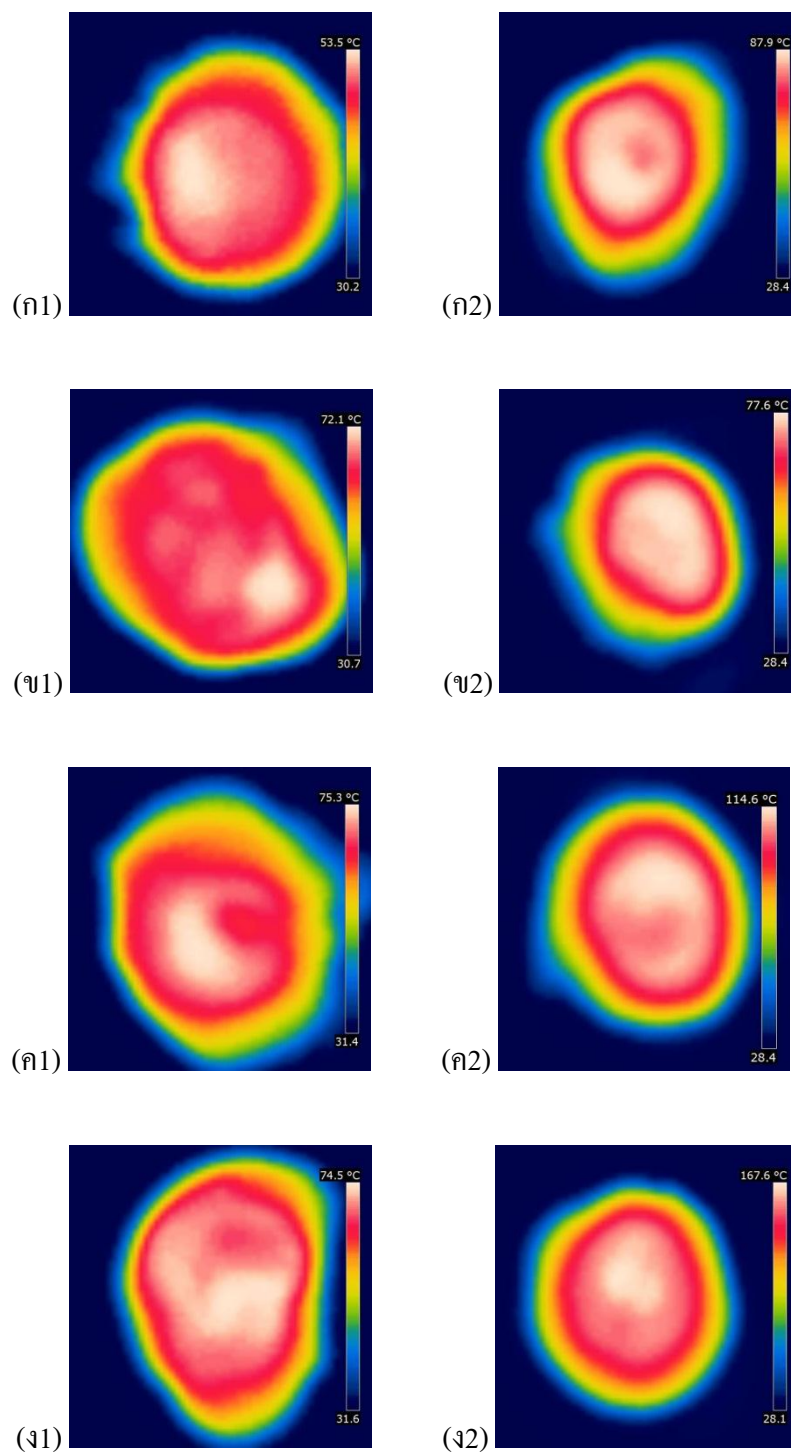
ผลการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มจากการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มน้ำมัน โดยเครื่องกำเนิดความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟภายใต้กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 นาที ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.1-4.4 พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนโดยเครื่องกำเนิดความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟภายใต้กำลังส่งและเวลาการให้ความร้อนต่างกันนั้นมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยอุณหภูมิในส่วนของเมล็ดในและเนื้อผลปาล์มจะสูงกว่าบริเวณส่วนฝัวนอกของผลปาล์ม ซึ่งพื้นที่โทนสีเหลืองจนถึงสีแดงในภาพแสดงถึงอุณหภูมิของผลปาล์มที่สูงกว่าอุณหภูมিরอบนอก โดยบริเวณส่วนเนื้อใกล้ฝัวนอกและที่ฝัวนอกของผลปาล์มซึ่งมีโทนสีในช่วงสีเหลืองถึงเขียว แสดงถึงอุณหภูมิต่ำกว่าส่วนเนื้อภายในและเมล็ดในนั้นเกิดจากการถ่ายโอนความร้อนจากผลปาล์มออกสู่ภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (Qixin และคณะ, 2004) ซึ่งการเป็นไปตามหลักการที่กล่าวว่าการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกการถ่ายเทพลังงานไปเป็นพลังงานความร้อนจะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุโดยตรงทำให้อุณหภูมิของเนื้อวัสดุสม่ำเสมอหรือใกล้เคียงกันทั้งสิ้น



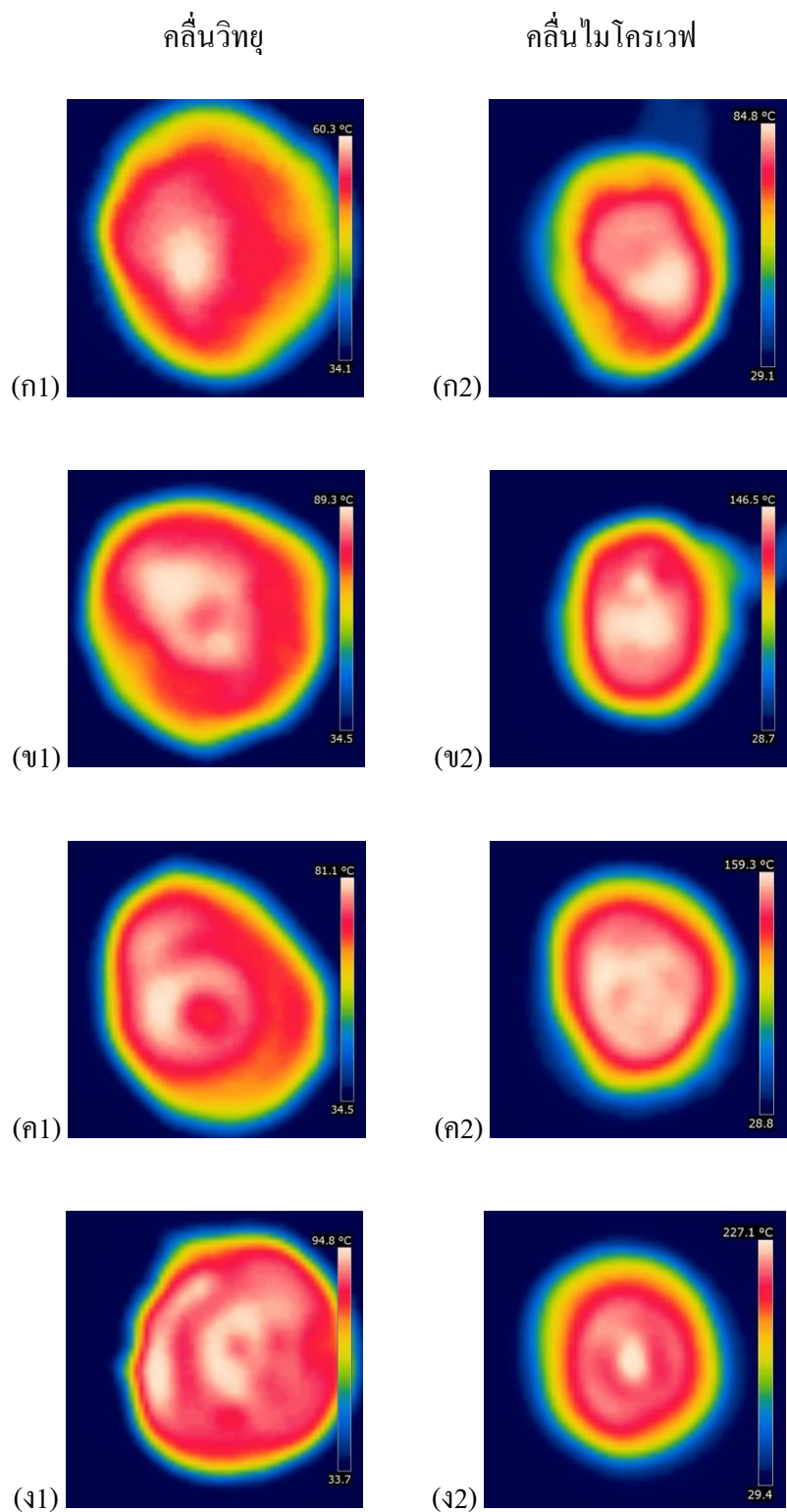
ภาพประกอบที่ 4.1 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลพาล์มผ่าซีก ภายใต้การให้ความร้อนที่ 200 วัตต์ เป็นเวลา (ก) 3 นาที (ข) 6 นาที (ค) 9 นาที และ (ง) 12 นาที

คลื่นวิทยุ

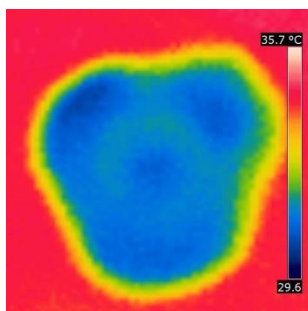
คลื่นไมโครเวฟ



ภาพประกอบที่ 4.2 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลพาล์มผ่าซีก ภายใต้การให้ความร้อนที่ 400 วัตต์ เป็นเวลา (ก) 3 นาที (ข) 6 นาที (ค) 9 นาที และ (ง) 12 นาที



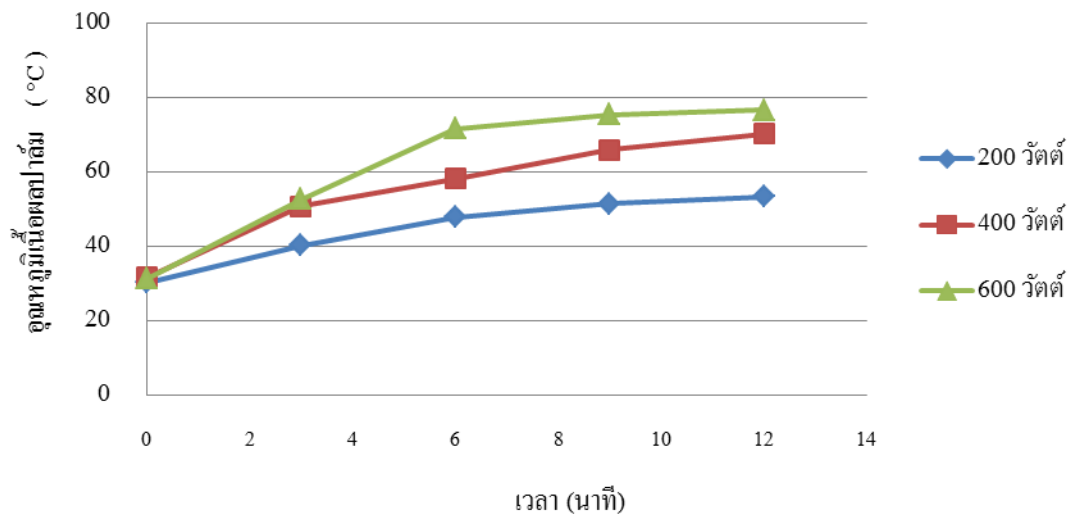
ภาพประกอบที่ 4.3 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลพริกเผ่าซีก ภายใต้การให้ความร้อนที่ 600 วัตต์ เป็นเวลา (ก) 3 นาที (ข) 6 นาที (ค) 9 นาที และ (ง) 12 นาที



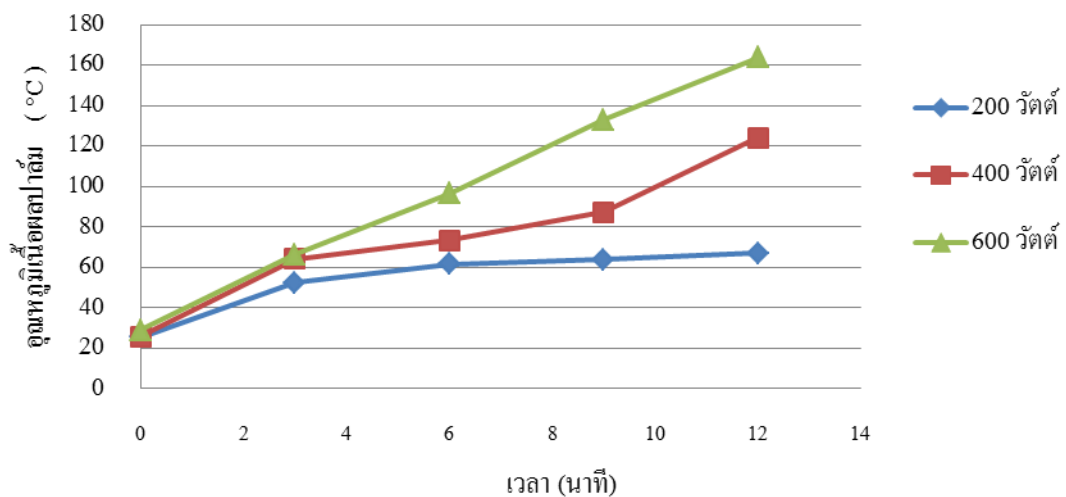
ภาพประกอบที่ 4.4 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มผ่าซีกก่อนการให้ความร้อน

ในส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผลปาล์มซึ่งผ่านการให้ความร้อนโดยใช้เครื่องกำเนิดความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟภายใต้กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 นาที พบว่า การให้ความร้อนด้วยเทคนิคทั้งสองสามารถทำให้เนื้อผลปาล์มร้อนขึ้นได้ โดยในการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุสามารถทำความร้อนให้แก่เนื้อผลปาล์มได้ถึง 76.6 องศาเซลเซียส ภายใต้การทดลองที่สภาวะกำลังส่ง 600 วัตต์ เวลา 12 นาที ในขณะที่การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถทำความร้อนให้แก่เนื้อผลปาล์มได้ถึง 163.8 องศาเซลเซียส ภายใต้การทดลองที่สภาวะกำลังส่ง 600 วัตต์ เวลา 12 นาที แต่สภาวะดังกล่าวส่งผลให้เมล็ดในและเนื้อของผลปาล์มเกิดความเสียหายจากการไหม้ขึ้น โดยข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลปาล์มภายใต้การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟภายใต้กำลังส่งและเวลาต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.5 ซึ่งผลการจากทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเนื้อผลปาล์มจะแปรผันตรงกับเวลาในการให้ความร้อนและกำลังส่ง โดยเมื่อพิจารณาผลการทดลองภายใต้กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ พบว่า เมื่อใช้เวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระดับอุณหภูมิเนื้อผลปาล์มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะไม่คงที่ตลอดระยะเวลาในการให้ความร้อน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการดูดซับพลังงานและการที่วัตถุจะเปลี่ยนพลังงานที่ดูดซับไว้ให้เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจะแปรผันตามปริมาณความชื้นที่ยังคงเหลืออยู่ในผลปาล์ม ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงออกได้สองช่วงได้แก่ ช่วงเริ่มต้นและช่วงปลายของของกระบวนการให้การให้ความร้อน โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการให้ความร้อนจะมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากผลปาล์มน้ำมันจะมีปริมาณความชื้นหรือน้ำสะสมอยู่มาก เมื่อได้รับพลังงานจากคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟผลปาล์มจะดูดซับพลังงานไว้ด้วย โครงสร้างของผลปาล์มและน้ำที่สะสมอยู่ในผลปาล์มจากนั้น

พลังงานที่ถูกดูดซับไว้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิของผลปาล์มสูงขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำในผลปาล์มเกิดการเคลื่อนที่จากภายในของผลปาล์มออกสู่บริเวณผิวและระเหยออกไปจากผลปาล์ม ส่วนช่วงปลายของกระบวนการจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลงเนื่องจากปริมาณความชื้นในผลปาล์มลดลงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานลดลง (กฤษฎา, 2554)



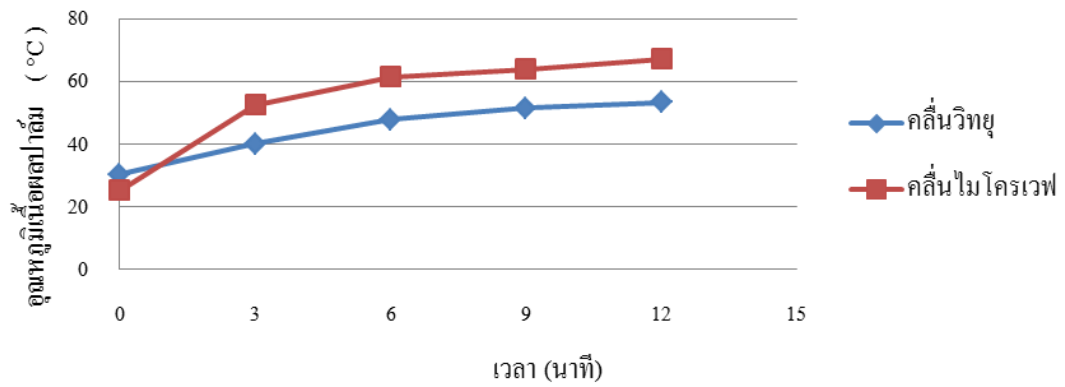
(ก) คลี้นวิทฑู



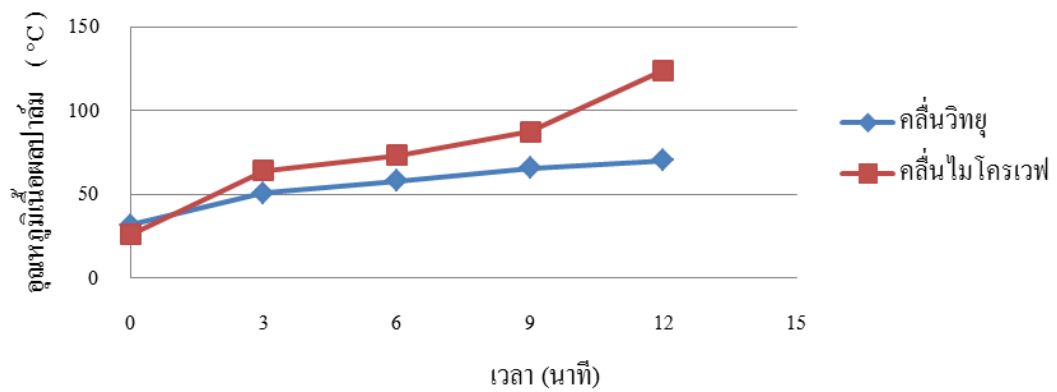
(ข) คลี้นไมโครเวฟ

ภาพประกอบที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลปาล์มภายใต้การให้ความร้อนที่กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 นาที ด้วย (ก) คลี้นวิทฑู และ (ข) คลี้นไมโครเวฟ

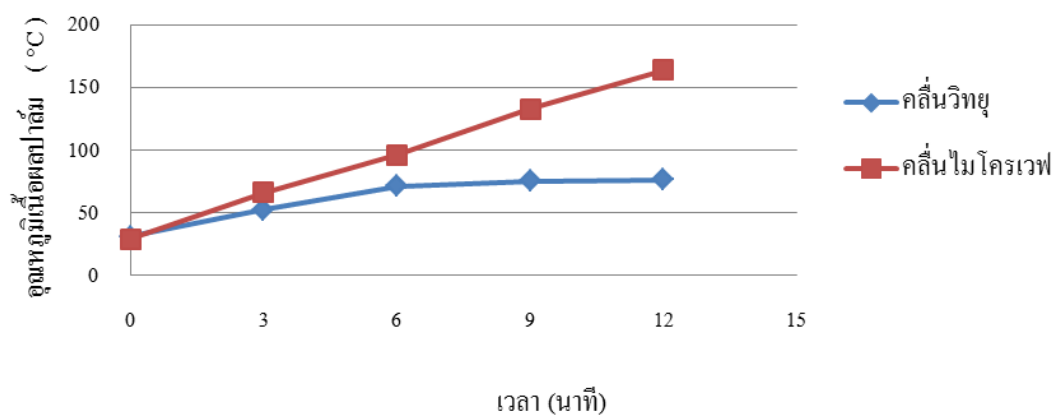
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกำลังส่งต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ พบว่า ณ เวลาในการให้ความร้อนเดียวกันแต่กำลังส่งสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของเนื้อผลปาล์มสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อผลปาล์มดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.6 พบว่า อุณหภูมิของเนื้อผลปาล์มภายใต้การให้ความร้อนที่สภาวะเวลาและกำลังส่งเดียวกัน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถทำความร้อนให้แก่ผลปาล์มได้สูงกว่าการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ โดยผลการทดลองดังกล่าวมีลักษณะในทิศทางเดียวกันทั้งในการทดลองที่ใช้กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแก่ผลปาล์มสามารถทำให้ผลปาล์มรับความร้อนได้เร็วกว่าการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่คลื่นไมโครเวฟมีความถี่คลื่นที่สูงกว่าคลื่นวิทยุทำให้โมเลกุลของน้ำในผลปาล์มมีการสั่นและเกิดการเสียดสีกันด้วยจำนวนครั้งที่มากกว่าคลื่นวิทยุจึงทำให้สามารถเกิดความร้อนขึ้นได้เร็วกว่า



(ก) 200 วัตต์



(ข) 400 วัตต์

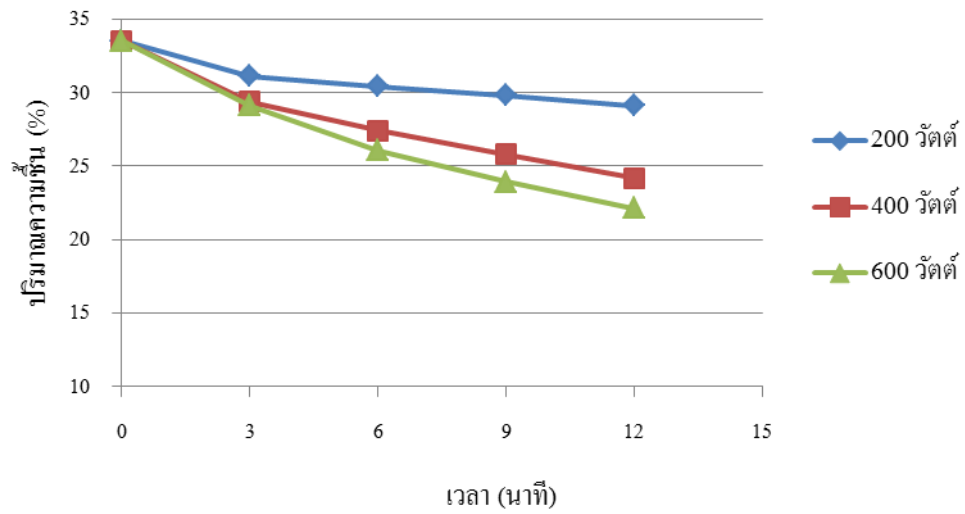


(ค) 600 วัตต์

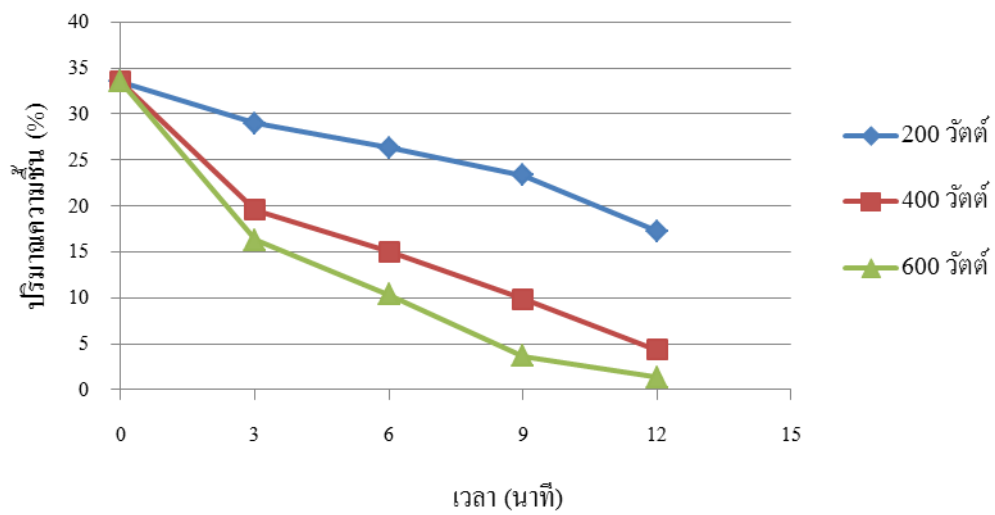
ภาพประกอบที่ 4.6 เปรียบเทียบอุณหภูมิของผลปาล์มระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟภายใต้กำลังส่ง (ก) 200 วัตต์ (ข) 400 วัตต์ และ (ค) 600 วัตต์

4.1.2 ปริมาณความชื้น

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นที่สะสมในผลปาล์มน้ำมันสามารถดูได้จากภาพประกอบที่ 4.7 ซึ่งแสดงปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในผลปาล์มเมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ ภายใต้กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 นาที จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณความชื้นที่สะสมอยู่ในผลปาล์มมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผันกับกำลังส่งและเวลาในการให้ความร้อน โดยเมื่อเวลาในการให้ความร้อนและกำลังส่งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลง อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนที่นานเกินไปและใช้กำลังส่งที่สูงเกินไปอาจส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของผลปาล์มได้ สำหรับการลดลงของปริมาณความชื้นในผลปาล์มเป็นผลเนื่องมาจากน้ำที่อยู่ในผลปาล์มได้รับพลังงานในรูปคลื่นและเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนส่งผลให้น้ำในผลปาล์มเกิดการเคลื่อนที่จากภายในออกสู่ผิวและระเหยกลายเป็นไอออกไป ซึ่งน้ำจัดเป็นสารไดอิเล็กทริกที่สามารถจะดูดซับพลังงานจากคลื่นไดอิเล็กทริกและสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ ดังนั้นเมื่อน้ำในผลปาล์มได้รับพลังงานไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิในผลปาล์มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่ออุณหภูมิของผลปาล์มนั้นเพิ่มสูงขึ้นก็ย่อมส่งผลต่อการถ่ายเทมวลของน้ำในผลปาล์มซึ่งปัจจัยนี้จึงมีผลต่อการปลุกให้ความชื้นออกไปสู่ผิวปาล์มและเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอได้เร็วขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.8 พบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถลดปริมาณความชื้นที่สะสมในผลปาล์มได้สูงกว่าการใช้คลื่นวิทยุ โดยผลจากการทดลองภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ การใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถลดปริมาณความชื้นลงจนเหลือเพียง 1.5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การใช้คลื่นวิทยุสามารถลดต่ำสุดเหลือ 22.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่คลื่นไมโครเวฟสามารถที่จะทำอุณหภูมิได้สูงกว่าและเร็วกว่าจึงเป็นผลให้มีปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ระเหยออกไปสูงกว่าการใช้คลื่นวิทยุ

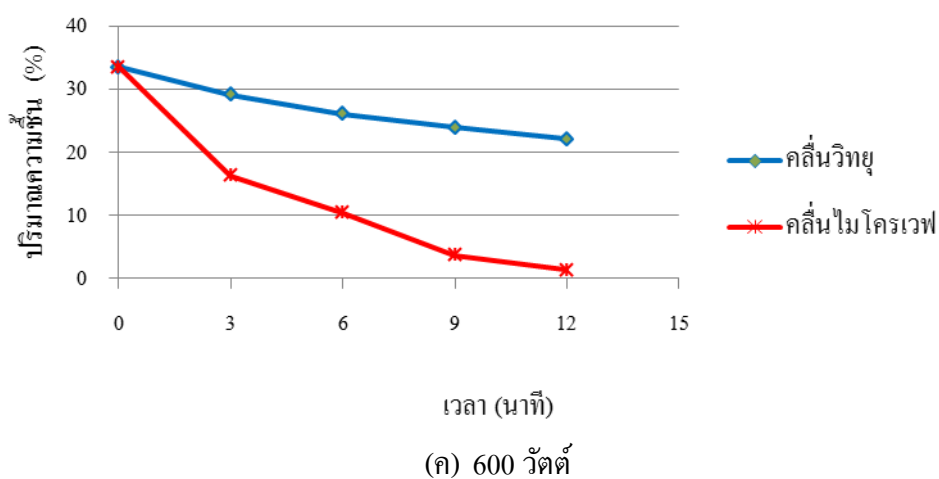
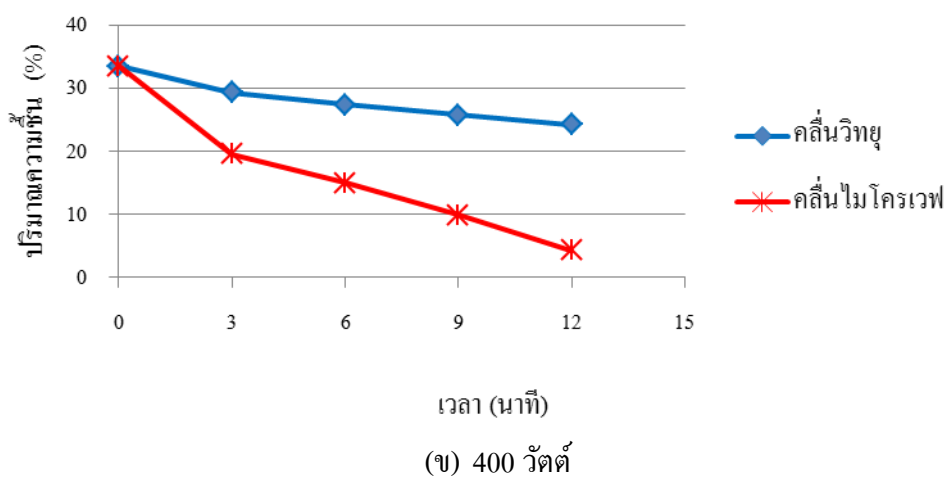
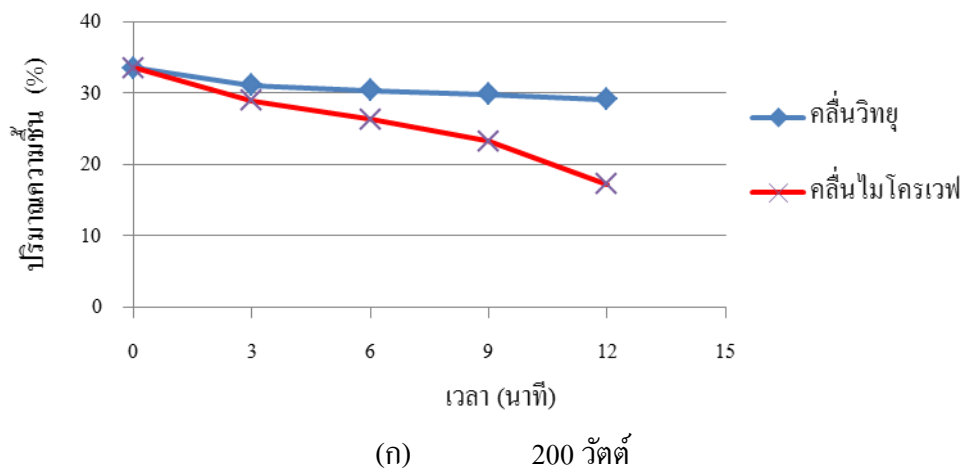


(ก) คลื่นวิทยุ



(ข) คลื่นไมโครเวฟ

ภาพประกอบที่ 4.7 ปริมาณความชื้นของผลปาล์มหลังผ่านการให้ความร้อนด้วย (ก) คลื่นวิทยุ และ (ข) ไมโครเวฟ



ภาพประกอบที่ 4.8 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของผลปาล์มน้ำมันหลังผ่านการให้ความร้อนด้วยคลิ่นวิฑูและไมโครเวฟภายใต้กำลังส่ง (ก) 200 วัตต์ (ข) 400 วัตต์ และ (ค) 600 วัตต์

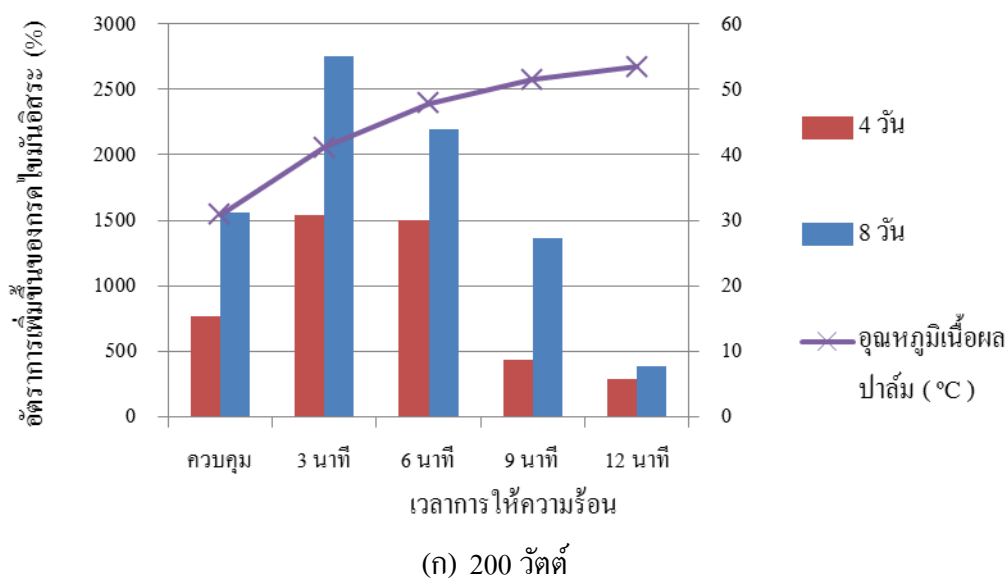
4.1.3 ปริมาณกรดไขมันอิสระ

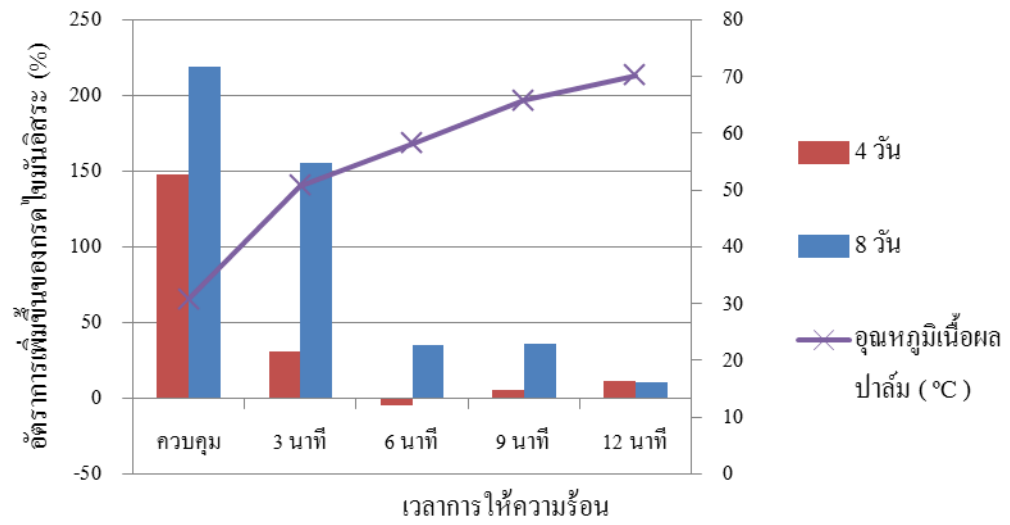
ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของผลปาล์มน้ำมันที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุภายใต้กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 นาที พบว่า การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุแก่ผลปาล์มสามารถยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระซึ่งเป็นผลมาจากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลเปสในผลปาล์มลงได้ โดยผลการทดลองซึ่งเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระจากผลปาล์มที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนกับผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุแสดงในภาพประกอบที่ 4.9 และ 4.10 โดยการให้ความร้อนภายใต้กำลังส่ง 400 วัตต์ พบว่า การใช้เวลาให้ความร้อนตั้งแต่ 6 นาทีเป็นต้นไปซึ่งอุณหภูมิของผลปาล์มสูงกว่า 58 องศาเซลเซียส สามารถควบคุมให้อัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระให้อยู่ประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น ขณะที่ผลปาล์มที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุมีการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระถึง 219 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น ส่วนการทดลองภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ ก็สามารถควบคุมให้การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระให้อยู่ในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านคลื่นวิทยุ โดยการให้ความร้อนตั้งแต่ 6 นาทีเป็นต้นไป ภายใต้อุณหภูมิของผลปาล์มที่สูงกว่า 71 องศาเซลเซียส สามารถควบคุมให้อัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระให้อยู่ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลปาล์มที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระถึง 1200 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น ส่วนการทดลองภายใต้กำลังส่ง 200 วัตต์ การให้คลื่นเป็นเวลา 3 และ 6 นาที ซึ่งทำให้ผลปาล์มมีอุณหภูมิ 41 และ 47 องศาเซลเซียส ส่งผลให้กรดไขมันอิสระในผลปาล์มเพิ่มขึ้นเป็น 2750 และ 2194 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น ในขณะที่ผลปาล์มที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระเพียง 1557 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิต่ำกว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการทำให้เกิดการเร่งกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปสในผลปาล์มจึงส่งผลให้เอนไซม์ไลเปสในผลปาล์มเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นกรดไขมันอิสระในปริมาณที่สูงขึ้น (Ngando, 2006)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้กำลังส่ง 200, 400 และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 นาที แสดงในภาพประกอบที่ 4.11 และ 4.12 ผลการทดลองพบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มสามารถลดการเพิ่มของกรดไขมันอิสระในผลปาล์มลงได้เช่นเดียวกับการใช้คลื่นความถี่วิทยุ โดยการทดลองภายใต้กำลังส่ง 200 วัตต์ ให้ความร้อนเป็นเวลา 6 นาที อุณหภูมิของผลปาล์มสูงกว่า 61 องศาเซลเซียส สามารถลดอัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระในผลปาล์มให้เหลือเพียง 281 เปอร์เซ็นต์ จากกรดไขมันอิสระเริ่มต้น ในขณะที่ผลปาล์มที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนกลับ

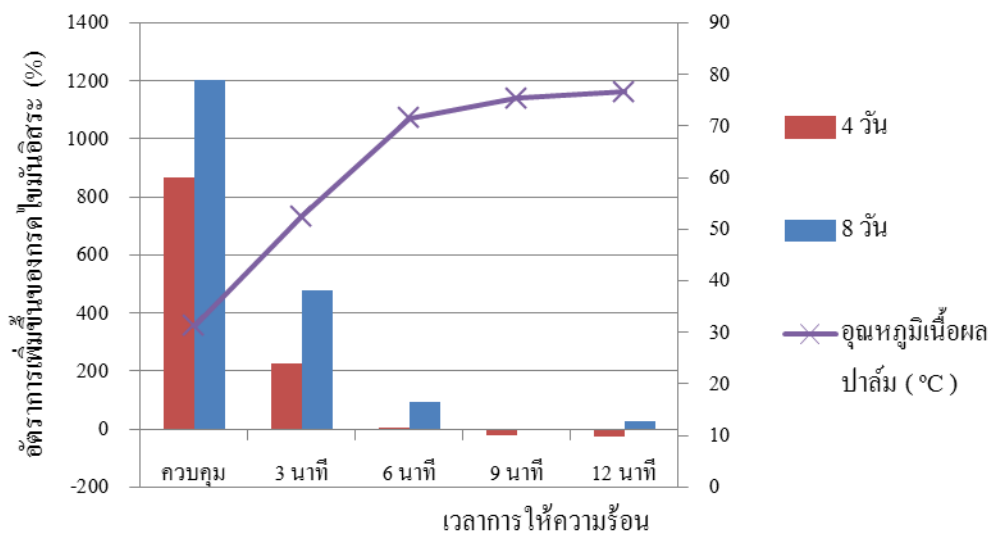
มีอัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระสูงถึง 1978 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่กำลังส่ง 400 และ 600 วัตต์ การรับความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียง 3 นาที ซึ่งผลปาล์มมีอุณหภูมิสูงกว่า 64 และ 66 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มของกรดไขมันอิสระเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลปาล์มที่ไม่ได้รับความร้อนซึ่งมีอัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระสูงขึ้นไปถึง 2386 และ 1658 เปอร์เซ็นต์ จากกรดไขมันอิสระเริ่มต้น

ดังนั้นจากการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระในผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ สามารถสรุปได้ว่าการใช้คลื่นทั้งสองในการความร้อนแก่ผลปาล์มสามารถยับยั้งการเพิ่มของกรดไขมันอิสระลงได้ โดยช่วงอุณหภูมิที่สามารถลดอัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระอย่างมีประสิทธิภาพและควบคุมไม่ให้กรดไขมันอิสระเกินค่ามาตรฐานที่ 5 เปอร์เซ็นต์ คือช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 58 องศาเซลเซียสเป็นต้นไปดังเห็นได้จากภาพประกอบที่ 4.10 และ 4.12 นอกจากนี้การใช้คลื่นไมโครเวฟยังใช้เวลาน้อยกว่าการใช้คลื่นวิทยุก็สามารถควบคุมการเพิ่มของกรดไขมันอิสระอย่างได้ผลเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นในผลปาล์มเร็วกว่าคลื่นวิทยุดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้าจึงส่งผลให้อุณหภูมิของผลปาล์มเกิน 58 องศาเซลเซียส ได้เร็วกว่าการใช้คลื่นวิทยุในการให้ความร้อน และการใช้กำลังวัตต์ที่สูงขึ้นก็สามารถช่วยในการลดระยะเวลาในการให้ความร้อนลงได้เช่นกัน



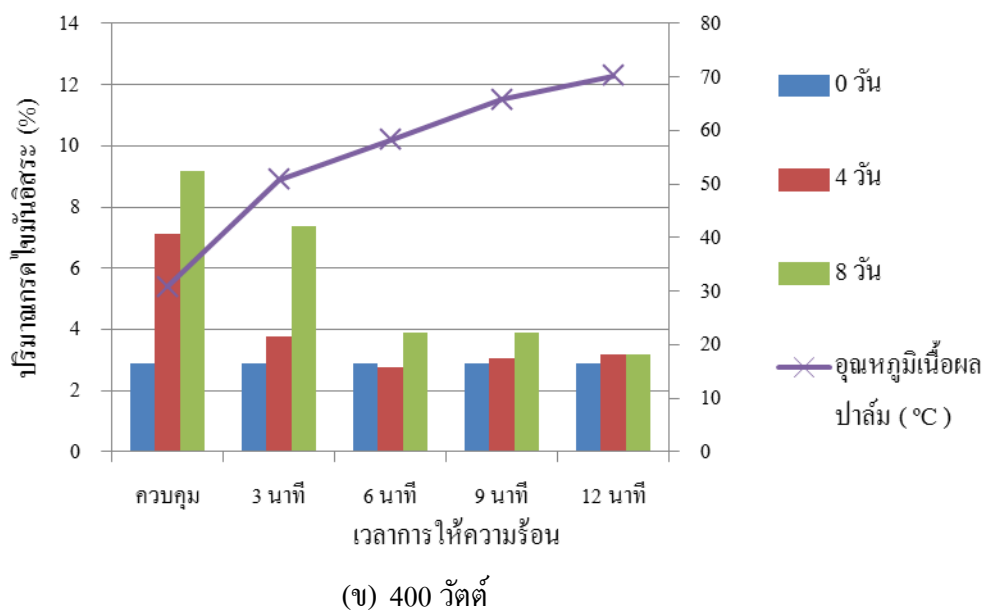
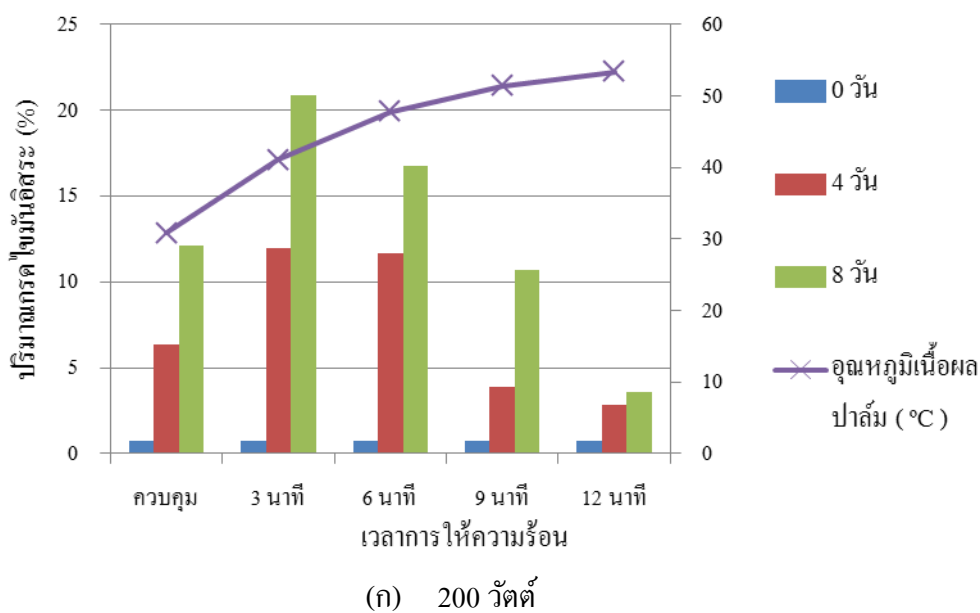


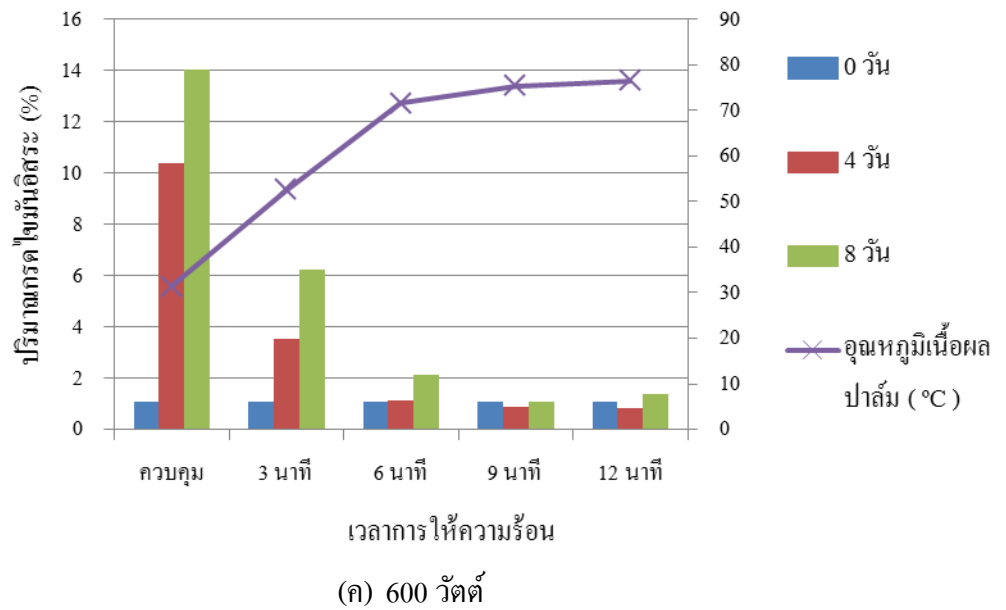
(ข) 400 วัตต์



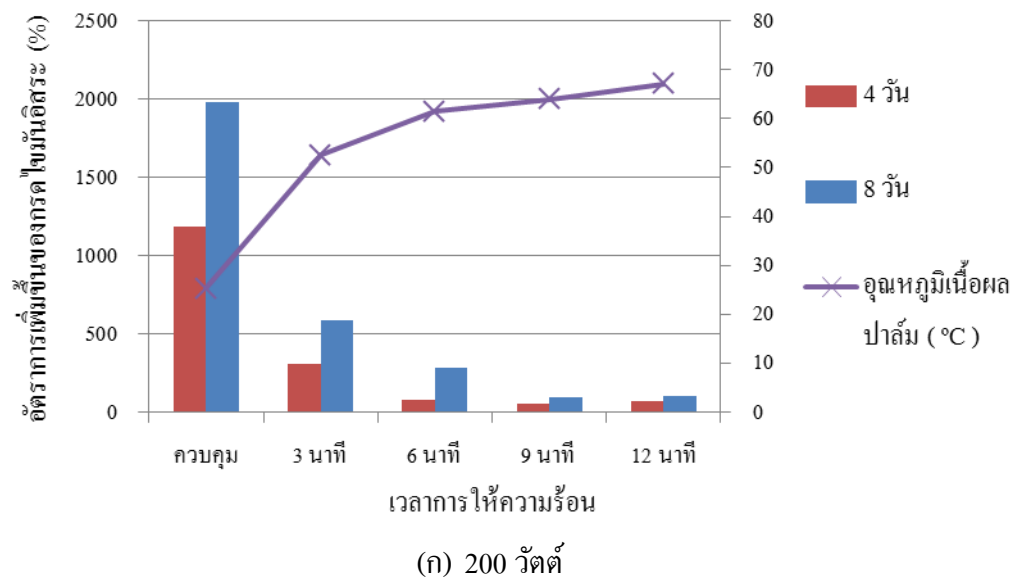
(ค) 600 วัตต์

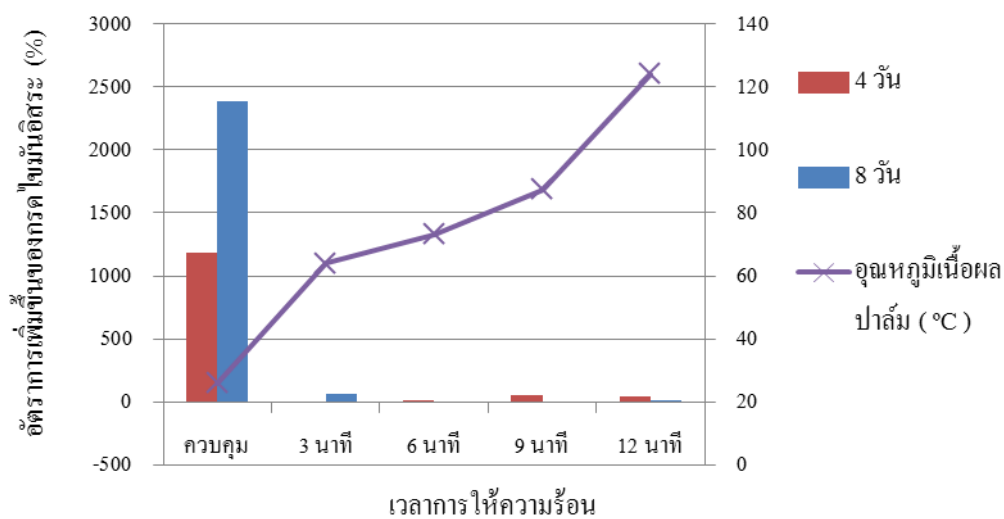
ภาพประกอบที่ 4.9 อัตราการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของผลปาล์มซึ่งให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ ภายใต้กำลังส่ง (ก) 200 วัตต์ (ข) 400 วัตต์ และ (ค) 600 วัตต์



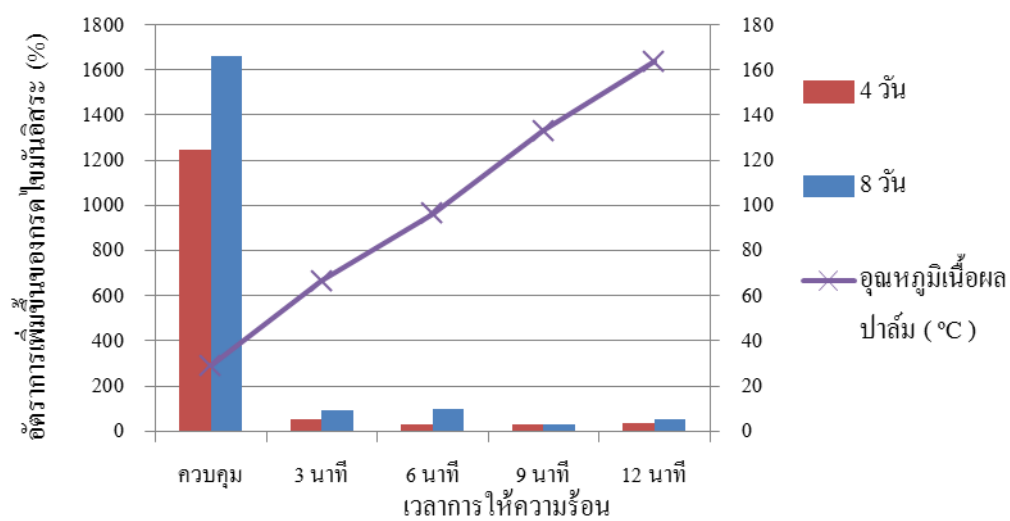


ภาพประกอบที่ 4.10 ปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์ม ซึ่งให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ ภายใต้กำลังส่ง (ก) 200 วัตต์ (ข) 400 วัตต์ และ (ค) 600 วัตต์



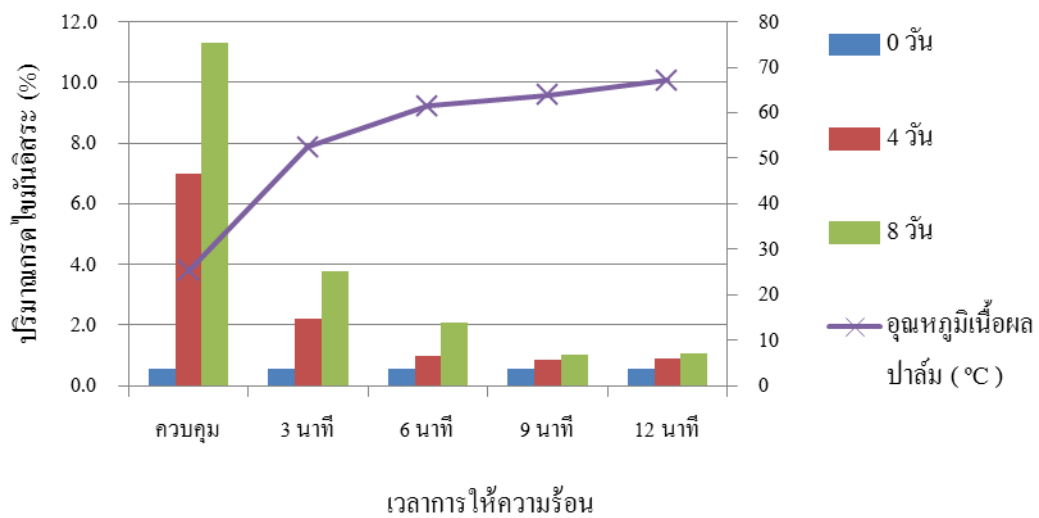


(ข) 400 วัตต์

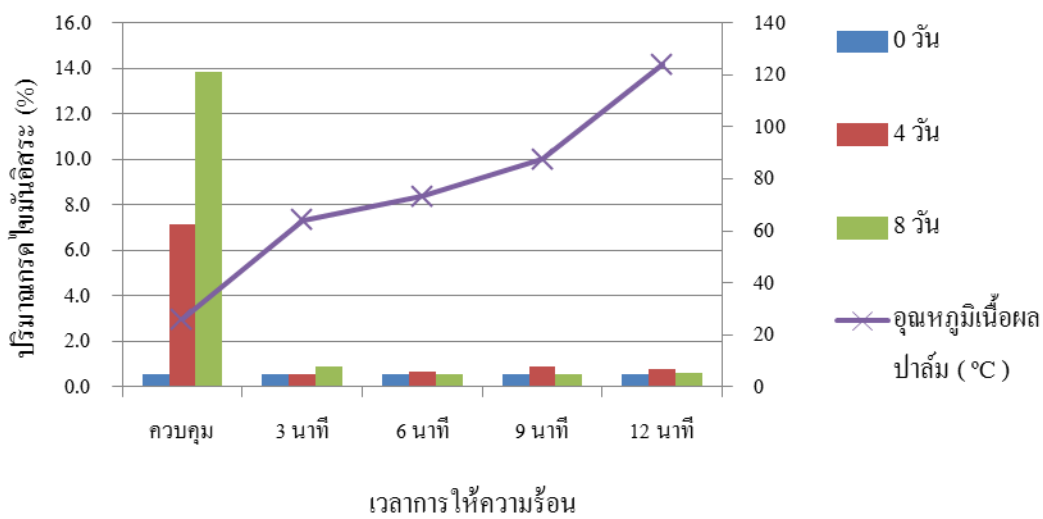


(ค) 600 วัตต์

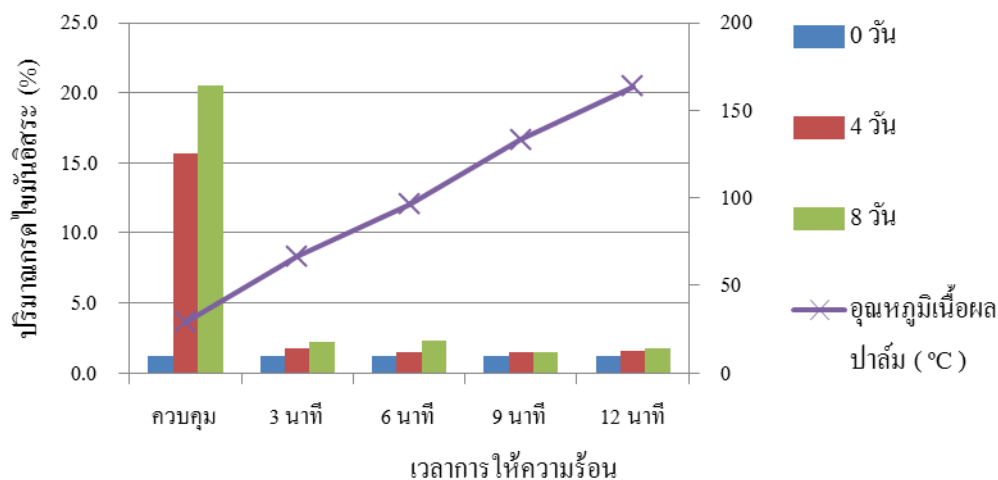
ภาพประกอบที่ 4.11 อัตราการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของผลปาล์มซึ่งให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้กำลังส่ง (ก) 200 วัตต์ (ข) 400 วัตต์ และ (ค) 600 วัตต์



(ก) 200 วัตต์



(ข) 400 วัตต์



(ค) 600 วัตต์

ภาพประกอบที่ 4.12 ปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์ม ซึ่งให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้กำลังส่ง (ก) 200 วัตต์ (ข) 400 วัตต์ และ (ค) 600 วัตต์

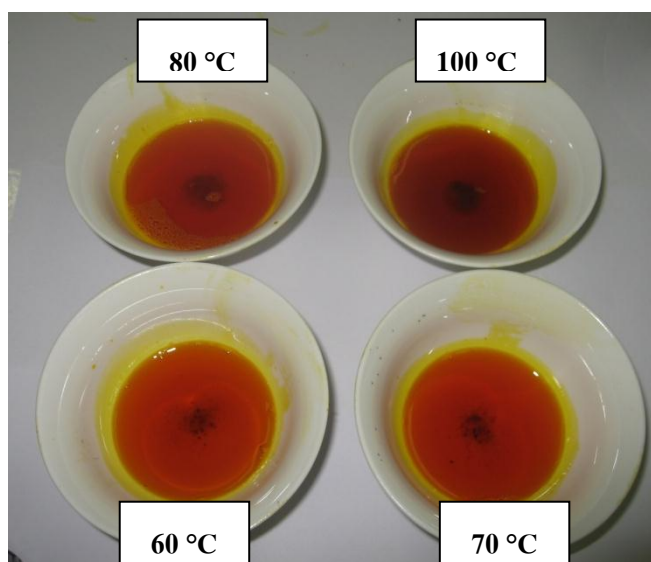
4.1.4 ลักษณะทางกายภาพ

ในการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มนอกจากพิจารณาอุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณกรดไขมันอิสระแล้วยังต้องมีการพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพของผลปาล์มหลังจากผ่านการใช้ความร้อนด้วยคลื่นไดอิเล็กทริกด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการสังเกตพบว่า การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุแก่ผลปาล์มจนสามารถเกิดความร้อนขึ้นในผลปาล์มที่กำลังส่ง 200 วัตต์ เป็นเวลา 12 นาที จนอุณหภูมิของผลปาล์มสูงขึ้นถึง 55 องศาเซลเซียส จะทำให้เนื้อของผลปาล์มนุ่มง่ายต่อการนำไปหีบสกัดน้ำมันต่อไป ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุภายใต้กำลังส่ง 400 และ 600 วัตต์ ใช้เวลาในการให้ความร้อนเพียง 3 นาที ก็ส่งผลให้เนื้อของผลปาล์มมีลักษณะนุ่มและง่ายต่อการหีบ โดยมีอุณหภูมิของปาล์มสูงเกิน 53 องศาเซลเซียส ลักษณะของของผลปาล์มที่การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุสามารถดูได้จากตารางที่ 4.1

กรณีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถดูได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งผลการทดลองพบว่า การใช้เวลาในการให้ความร้อนเพียง 3 นาที ภายใต้กำลังส่ง 200 วัตต์ ก็สามารถทำให้เนื้อของผลปาล์มนุ่ม โดยอุณหภูมิของเนื้อปาล์มประมาณ 73 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการป้อนคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีความถี่สูงอย่างต่อเนื่องให้แก่ผลปาล์มส่งผลให้น้ำซึ่งอยู่ในรูปความชื้นเกิดการสั่นและเสียดสีกันอย่างต่อเนื่องทำให้น้ำในผลปาล์มเกิดความร้อนแฝงของการระเหยในการกลายเป็นไอสูงมาก (กฤษญา, 2550) ซึ่งในกรณีการป้อนคลื่นไมโครเวฟตั้งแต่ 400 วัตต์เป็นเวลา 6 นาที และ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที โดยผลปาล์มมีอุณหภูมิสูงเกิน 75 องศาเซลเซียส นั้นสามารถ


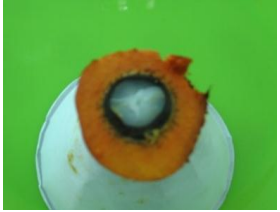






















ลดความชื้นลงได้อย่างรวดเร็วโดยมีความชื้นเหลือต่ำกว่า 16 เปอร์เซ็นต์ แต่ส่งผลให้เมล็ดในและเนื้อผลปาล์มเกิดความเสียหายเนื่องจากมีการไหม้เกิดขึ้นในส่วนดังกล่าว

สีของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟจะมีลักษณะสีที่เข้มขึ้นเมื่อความร้อนของผลปาล์มสูงขึ้น โดยจากการทดลองพบว่า ช่วงอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส สีของน้ำมันที่ได้จะมีสีเหลืองอมส้มและสีของน้ำมันจะเข้มขึ้นดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.13 โดยเมื่อผลปาล์มมีอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส สีของน้ำมันที่ได้จะเป็นสีออกโทนน้ำตาลและเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 120 องศาเซลเซียสสีของน้ำมันที่ได้จะกลายเป็นสีดำ



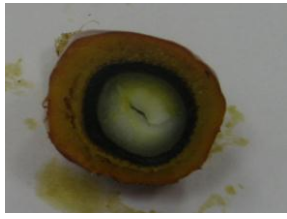
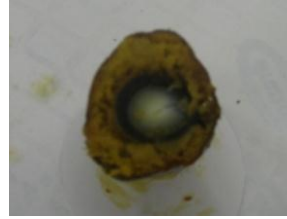

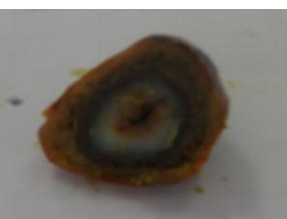
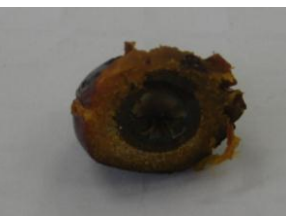
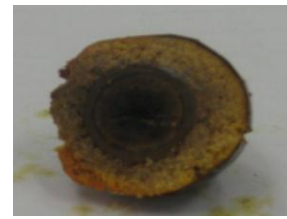


















ภาพประกอบที่ 4.13 สีน้ำมันปาล์มที่หีบได้ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ลักษณะผลปาล์มเมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ

ชนิดคลื่น	กำลังส่ง (วัตต์)	เวลา (นาที)							
		3		6		9		12	
คลื่นวิทยุ	200	อุณหภูมิ 40°C	ความชื้น 31.3%	อุณหภูมิ 47°C	ความชื้น 30.5%	อุณหภูมิ 53°C	ความชื้น 30.0%	อุณหภูมิ 55°C	ความชื้น 29.3%
									
		อุณหภูมิ 53°C	ความชื้น 29.5%	อุณหภูมิ 63°C	ความชื้น 27.6%	อุณหภูมิ 71°C	ความชื้น 25.9%	อุณหภูมิ 75°C	ความชื้น 24.3%
									
	400	อุณหภูมิ 54°C	ความชื้น 29.2%	อุณหภูมิ 76°C	ความชื้น 26.2%	อุณหภูมิ 78°C	ความชื้น 24.0%	อุณหภูมิ 82°C	ความชื้น 22.3%
									
		อุณหภูมิ 54°C	ความชื้น 29.2%	อุณหภูมิ 76°C	ความชื้น 26.2%	อุณหภูมิ 78°C	ความชื้น 24.0%	อุณหภูมิ 82°C	ความชื้น 22.3%
									
	600	อุณหภูมิ 54°C	ความชื้น 29.2%	อุณหภูมิ 76°C	ความชื้น 26.2%	อุณหภูมิ 78°C	ความชื้น 24.0%	อุณหภูมิ 82°C	ความชื้น 22.3%
									
		อุณหภูมิ 54°C	ความชื้น 29.2%	อุณหภูมิ 76°C	ความชื้น 26.2%	อุณหภูมิ 78°C	ความชื้น 24.0%	อุณหภูมิ 82°C	ความชื้น 22.3%
									

ตารางที่ 4.2 ลักษณะผลปาล์มเมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ชนิดคลื่น	กำลังส่ง (วัตต์)	เวลา (นาที)							
		3		6		9		12	
คลื่น ไมโครเวฟ	200	อุณหภูมิ 58°C	ความชื้น 29.1%	อุณหภูมิ 69°C	ความชื้น 26.5%	อุณหภูมิ 71°C	ความชื้น 23.4%	อุณหภูมิ 77°C	ความชื้น 17.4%
									
		อุณหภูมิ 64°C	ความชื้น 19.7%	อุณหภูมิ 73°C	ความชื้น 15.1%	อุณหภูมิ 87°C	ความชื้น 10%	อุณหภูมิ 124°C	ความชื้น 4.5%
									
	400	อุณหภูมิ 75°C	ความชื้น 16.4%	อุณหภูมิ 109°C	ความชื้น 10.5%	อุณหภูมิ 153°C	ความชื้น 3.8%	อุณหภูมิ 187°C	ความชื้น 1.5%
									
		อุณหภูมิ 75°C	ความชื้น 16.4%	อุณหภูมิ 109°C	ความชื้น 10.5%	อุณหภูมิ 153°C	ความชื้น 3.8%	อุณหภูมิ 187°C	ความชื้น 1.5%
									
	600	อุณหภูมิ 75°C	ความชื้น 16.4%	อุณหภูมิ 109°C	ความชื้น 10.5%	อุณหภูมิ 153°C	ความชื้น 3.8%	อุณหภูมิ 187°C	ความชื้น 1.5%
									
		อุณหภูมิ 75°C	ความชื้น 16.4%	อุณหภูมิ 109°C	ความชื้น 10.5%	อุณหภูมิ 153°C	ความชื้น 3.8%	อุณหภูมิ 187°C	ความชื้น 1.5%
									

4.1.5 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

เมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการทำให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า การเพิ่มกำลังส่งและเวลาในการให้ความร้อนจะส่งผลให้พลังงานที่ผลปาล์มได้รับสูงขึ้นแต่พลังงานที่ต้องใช้ก็สูงขึ้นตามไปด้วยจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยการเพิ่มขึ้นของกำลังส่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานลดลง ในส่วนของผลการทดลองให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุนั้นมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบอยู่ที่สูงสุด 23 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวอย่างการทดลองที่สถานะกำลังส่ง 200 วัตต์ เวลา 3 นาที แต่เมื่อนำข้อมูลของปริมาณกรดไขมันอิสระ และลักษณะของผลปาล์มที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้ามารวมพิจารณาด้วยจะพบว่า สถานะการทดลองที่กำลังส่ง 400 วัตต์ เวลา 6 นาที เป็นสถานะที่ดีที่สุดในการทดลองใช้คลื่นวิทยุให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม โดยประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ที่ 12 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนของตัวอย่างการทดลองด้วยคลื่นไมโครเวฟจะพบว่า สามารถมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อพิจารณาถึงข้อมูลกรดไขมันอิสระ และลักษณะของผลปาล์มรวมด้วยแล้วนั้น ประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีที่สุดในการทดลองด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่ 67 เปอร์เซ็นต์ ที่สถานะกำลังส่ง 400 วัตต์ เวลา 3 นาที ซึ่งที่สถานะดังกล่าวกรดไขมันอิสระมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและผลปาล์มที่ได้ก็ไม่มี ความเสียหายเกิดขึ้นกับเนื้อและเมล็ดในปาล์มเลย

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองโดยใช้คลื่นวิทยุและไมโครเวฟ พบว่า ภายใต้สถานะกำลังส่งและเวลาในการให้ความร้อนที่เท่ากัน การใช้คลื่นไมโครเวฟจะมีการใช้พลังงานในการให้ความร้อนที่ต่ำกว่าคลื่นวิทยุ ทั้งพลังงานที่ผลปาล์มได้รับยังมีปริมาณที่สูงกว่าด้วยจึงส่งผลให้ภาพรวมการใช้คลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงกว่าการใช้คลื่นวิทยุดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.3 อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ สถานะการทดลองที่ดีที่สุดนั้นคือการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังส่ง 400 วัตต์ เวลา 3 นาที สามารถควบคุมการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระและไม่สร้างความเสียหายแก่ผลปาล์ม โดยมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ที่ 67 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลด้านพลังงานในการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟ

ชนิดคลื่น	กำลังส่ง (วัตต์)	เวลา (นาที)	พลังงานที่ใช้จริง (กิโลจูล)	พลังงานที่ผลปาล์ม ได้รับ (กิโลจูล)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
คลื่นวิทยุ	200	3	108.0	25.3	23
		6	198.0	28.9	15
		9	288.0	32.0	11
		12	396.0	34.8	9
	400	3	144.0	33.1	23
		6	324.0	41.4	13
		9	432.0	48.5	11
		12	612.0	54.7	9
	600	3	180.0	34.2	19
		6	423.0	48.7	11
		9	630.0	56.3	9
		12	864.0	63.0	7
คลื่นไมโครเวฟ	200	3	54.0	38.0	70
		6	90.0	48.9	54
		9	144.0	59.6	41
		12	216.0	81.1	38
	400	3	108.0	72.3	67
		6	252.0	89.4	35
		9	378.0	110.0	29
		12	468.0	136.4	29
	600	3	180.0	82.6	46
		6	324.0	108.8	34
		9	486.0	139.7	29
		12	648.0	153.6	24

4.2 การศึกษาการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแก่ช่อผลปาล์ม

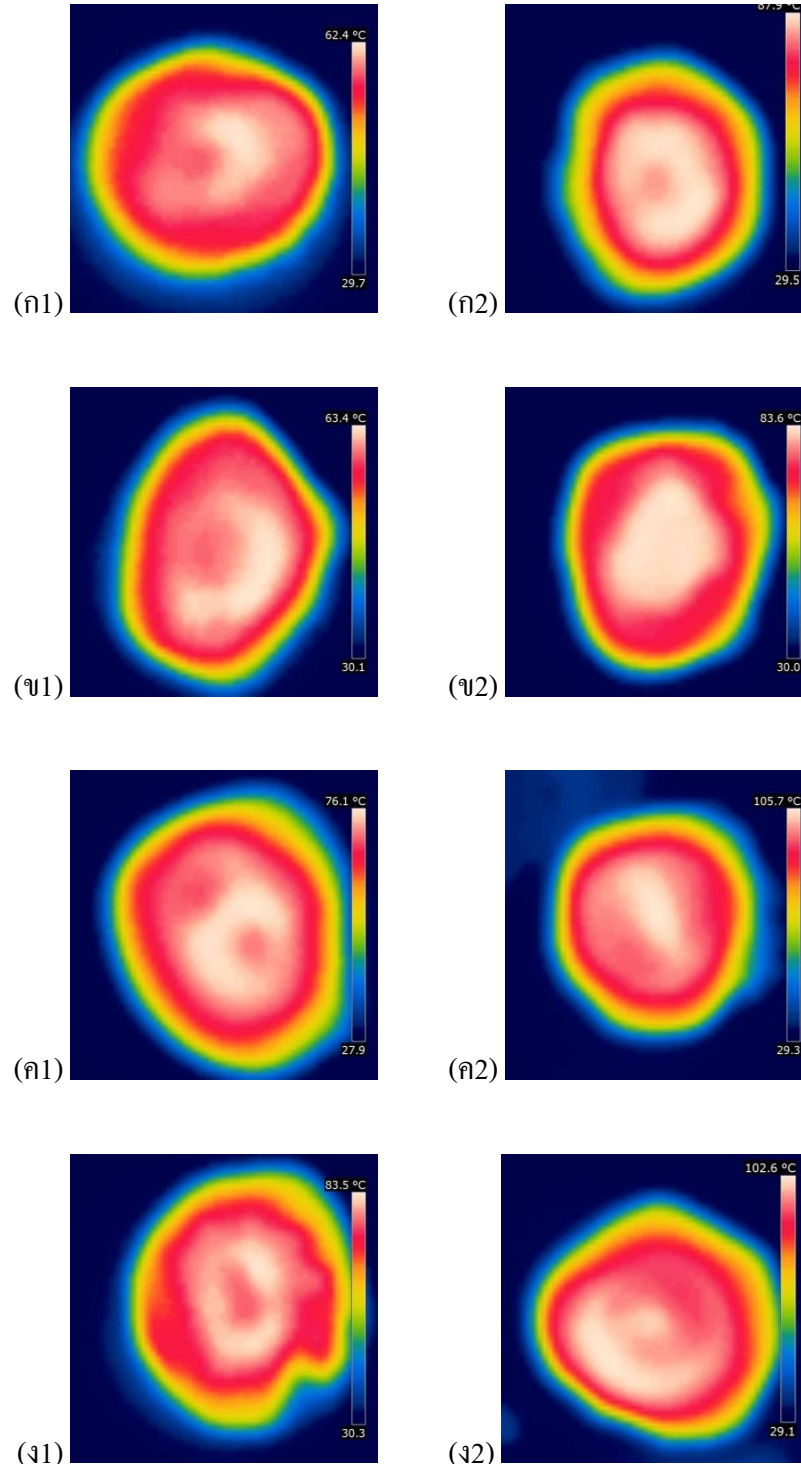
4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของผลปาล์มจากการให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ ภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที แสดงดังภาพประกอบที่ 4.14 พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มที่ให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์มมีลักษณะคล้ายกับผลจากการทดลองก่อนหน้านี้ซึ่งทดลองโดยใช้ผลปาล์มร่วง จากภาพกระจายตัวของอุณหภูมิของทั้งสองการทดลองแสดงให้เห็นว่า การให้ความร้อนโดยการใช้อิเล็กทริกซึ่งประกอบด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟนั้นจะส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัตถุโดยตรง ทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการทดลองโดยใช้ช่อปาล์มมีลักษณะคล้ายกับผลจากการทดลองโดยใช้ผลปาล์มร่วงถึงแม้โครงสร้างกันจัดวางของช่อและผลร่วงจะต่างกันก็ตาม

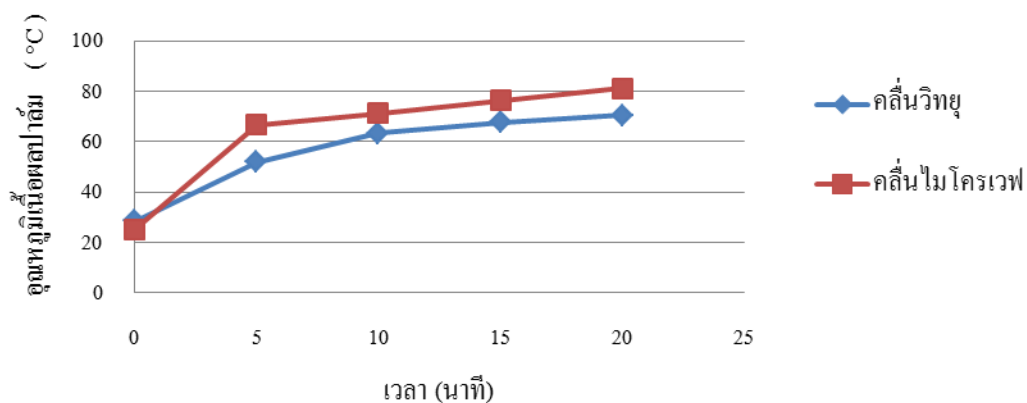
ในส่วนของอุณหภูมิ พบว่า ถึงแม้จะเป็นการให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์มแต่การใช้คลื่นไมโครเวฟยังสามารถทำให้อุณหภูมิของผลปาล์มสูงขึ้นได้เร็วกว่าการใช้คลื่นวิทยุภายใต้กำลังส่งที่เท่ากัน โดยการใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถทำให้อุณหภูมิของผลปาล์มสูงขึ้นได้ถึง 67 องศาเซลเซียส ในการให้ความร้อน 5 นาที และอุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นจนเมื่อใช้เวลาให้ความร้อน 20 นาที เนื้อผลปาล์มมีอุณหภูมิ 81 องศาเซลเซียส ในขณะที่การใช้อิเล็กทริกนั้นทำความร้อนได้ช้ากว่า โดยเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 5 นาที เนื้อผลปาล์มมีอุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่งไรก็ตามเมื่อพิจารณาความต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นทั้งสองแก่ผลปาล์ม พบว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนด้วยเวลาที่เท่ากัน ไม่ได้มีความแตกต่างกันมากเหมือนผลจากการทดลองโดยใช้ผลร่วง นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลองโดยใช้ผลปาล์มร่วงและช่อผลปาล์มดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.16 พบว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นกับช่อผลปาล์มซึ่งมีลักษณะการจัดวางที่ซับซ้อนและมีปริมาณมากกว่าผลร่วงส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่อผลปาล์มเกิดได้ช้ากว่าการทดลองในผลร่วง และเมื่อเปรียบเทียบความต่างของอุณหภูมิที่ต่างกันของอุณหภูมิต่างกันระหว่างผลร่วงและช่อผลปาล์มจากการใช้อิเล็กทริกและไมโครเวฟจะสังเกตได้ว่า การใช้อิเล็กทริกมีความต่างของอุณหภูมิต่างกันระหว่างผลร่วงและช่อปาล์มน้อยกว่าการใช้อิเล็กทริกไมโครเวฟซึ่งเป็นผลมาจากการที่คลื่นวิทยุมีความถี่ที่ต่ำกว่า และความยาวคลื่นที่ยาวกว่าคลื่นไมโครเวฟทำให้สามารถผ่านเข้าสู่ตัวอย่างที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าเมื่อตัวอย่างมีโครงสร้างและการจัดวางที่ซับซ้อนขึ้นจึงอาจส่งผลให้อิเล็กทริกสามารถให้ความร้อนได้ดีกว่า

คลื่นวิทยุ

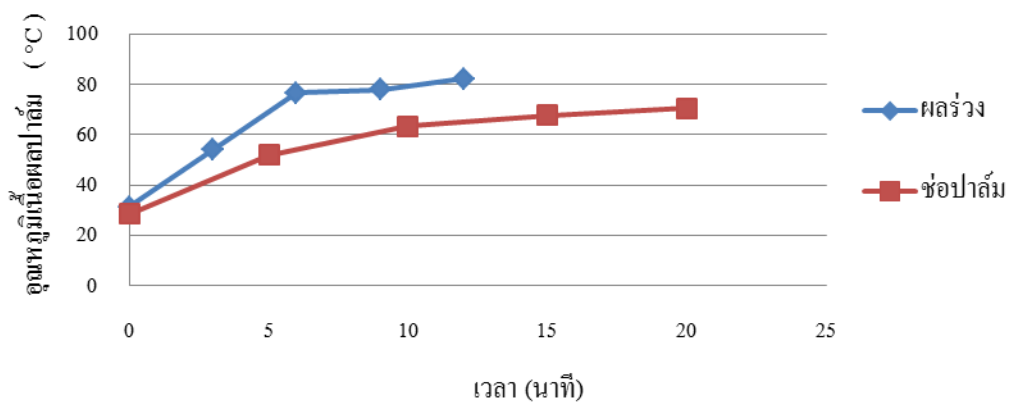
คลื่นไมโครเวฟ



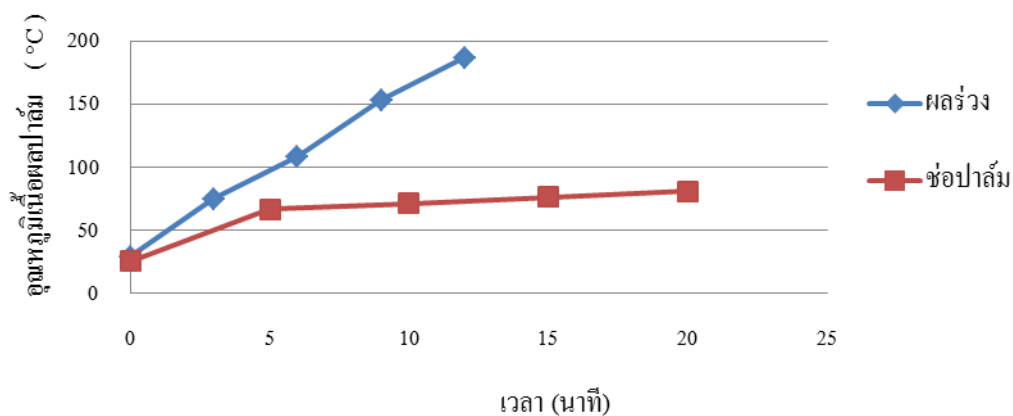
ภาพประกอบที่ 4.14 ภาพเทอร์โมกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในผลปาล์มผ่าซีก ภายใต้การให้ความร้อนแก่ซอผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุ และคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังส่ง 600 วัตต์ เป็นเวลา (ก) 5 นาที (ข) 10 นาที (ค) 15 นาที และ (ง) 20 นาที



ภาพประกอบที่ 4.15 อุณหภูมิของผลปาล์มระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟ



(ก) คลื่นวิทยุ

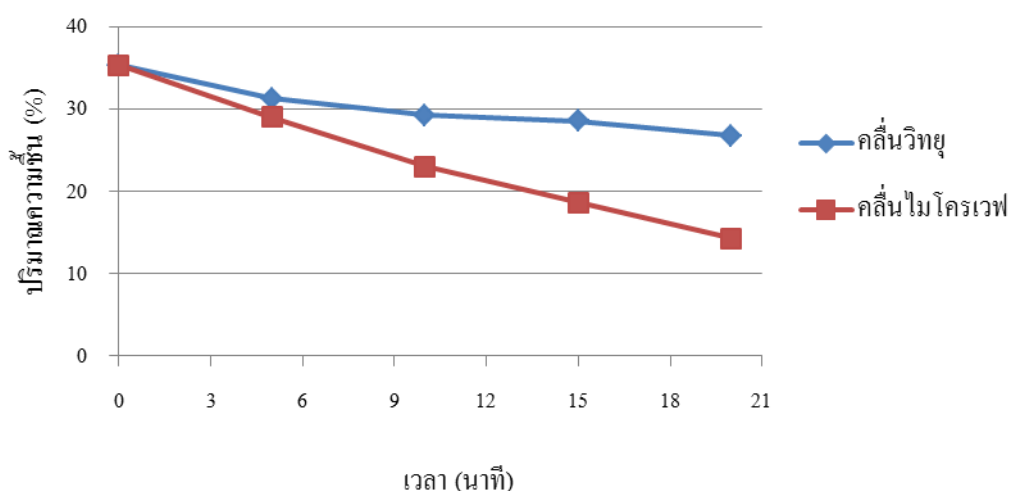


(ข) คลื่นไมโครเวฟ

ภาพประกอบที่ 4.16 เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการให้ความร้อนแก่ผลร่วงและช่อปาล์มที่กำลังส่ง 600 วัตต์ ด้วย (ก) คลื่นวิทยุ และ (ข) คลื่นไมโครเวฟ

4.2.2 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในช่อผลปาล์มหลังจากผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแปรผกผันกับเวลาในการให้ความร้อน โดยเมื่อใช้เวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นในผลปาล์มลดลงซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองโดยผลร่วงดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.17 การให้ความร้อนแก่ช่อปาล์มด้วยคลื่นวิทยุเป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที สามารถลดความชื้นลงเหลือ 31, 29, 29 และ 27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากความชื้นเริ่มต้น 35.3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถลดความชื้นลงเหลือ 29, 23, 19, และ 14 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถลดความชื้นลงได้เร็วกว่าคลื่นวิทยุเช่นเดียวกับการทดลองด้วยผลร่วงซึ่งเป็นผลมาจากการใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้ผลปาล์มมีอุณหภูมิที่สูงกว่าจึงส่งผลให้ให้น้ำในผลปาล์มระเหยออกได้เร็วกว่าคลื่นวิทยุ



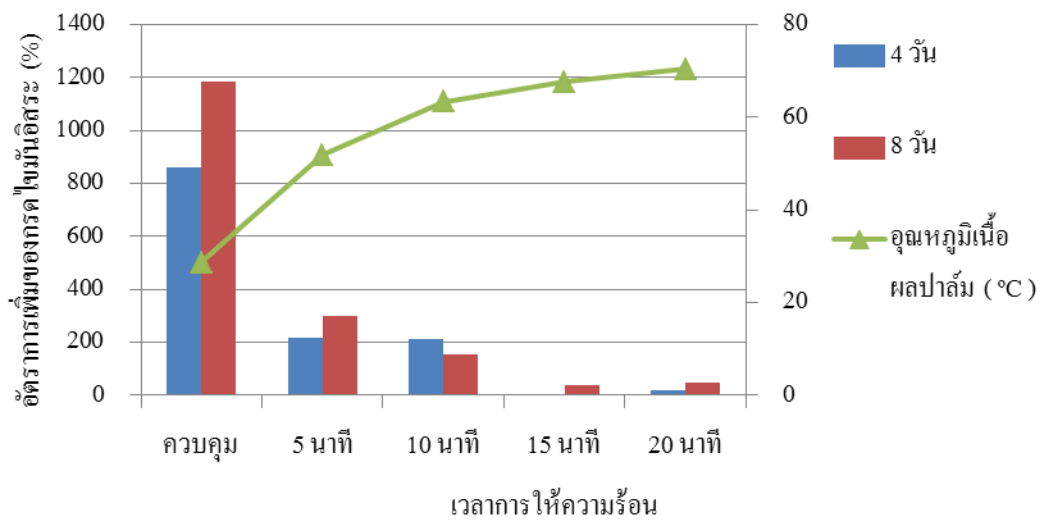
ภาพประกอบที่ 4.17 ปริมาณความชื้นของช่อปาล์มหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟ

4.2.3 ปริมาณกรดไขมันอิสระ

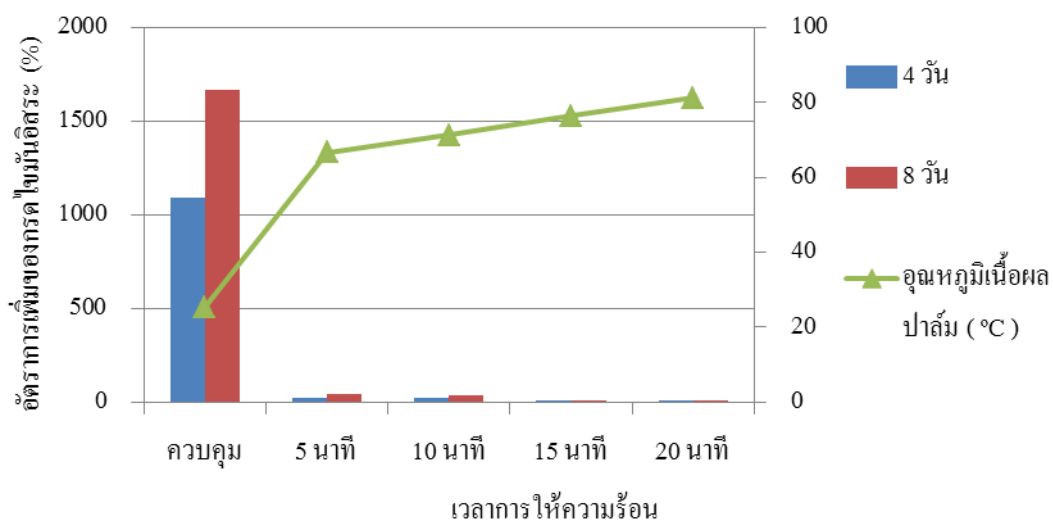
ผลการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระของผลปาล์มหลังจากผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟแก่ช่อผลปาล์มภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ เป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่า การใช้คลื่นทั้งสองในการให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์มสามารถยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระของผลปาล์มลงได้เช่นเดียวกับการทดลองในผลร่วงดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.18 และ 4.19 โดยการใช้คลื่นวิทยุในการให้ความร้อนยังอาจมีการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระในช่วง

การให้ความร้อนที่เวลา 5 และ 10 นาที โดยช่วงดังกล่าวผลปาล์มมีอุณหภูมิ 52 และ 63 องศาเซลเซียส แต่เมื่อนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระช่วงดังกล่าวเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนนั้นกลับมีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่ามากและมีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกินจากมาตรฐานซึ่งต้องมีไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยในตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีอัตราการเพิ่มขึ้นของการของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นถึง 1184 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณกรดไขมันอิสระถึง 11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาผ่านไป 8 วัน ขณะที่ตัวอย่างผลปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระสูงสุดเพียง 300 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณกรดไขมันอิสระ 3.5 เปอร์เซ็นต์ จากตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนเพียง 5 นาที ส่วนผลการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า การได้รับความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ผลที่ดีโดยกรดไขมันอิสระมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยถึงแม้จะให้เวลาในการให้ความร้อนเพียง 5 นาที โดยมีอัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระเพียง 38 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1 เปอร์เซ็นต์ หลังผ่านไป 8 วัน ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ผ่านความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีอัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระถึง 1666 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 12 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างการทดลองที่ให้ความร้อนด้วยคลื่นทั้งสองจะไม่สูงเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนกลับมีปริมาณกรดไขมันสูงเกินมาตรฐานมาก

จากผลการทดลองให้ความร้อนด้วยคลื่นไดอิเล็กทริกซึ่งประกอบด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟแก่ซอผลปาล์มกล่าวได้ว่า สามารถใช้ควบคุมปัญหาการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันอิสระได้โดยใช้เวลาในการให้ความร้อนที่สั้น นอกจากนั้นการให้ความร้อนจนผลปาล์มมีอุณหภูมิสูงเกิน 60 องศาเซลเซียส จะสามารถควบคุมการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระอย่างได้ผลและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการให้ความร้อนแก่ซอปาล์มด้วยคลื่นวิทยุต้องใช้เวลาตั้งแต่ 10 นาทีขึ้นไปจึงสามารถทำให้เนื้อปาล์มมีอุณหภูมิเกิน 60 องศาเซลเซียส ขณะที่การใช้คลื่นไมโครเวฟใช้เวลาเพียง 5 นาที ก็สามารถทำอุณหภูมิถึง 60 องศาเซลเซียส และยังสามารถควบคุมการเพิ่มของกรดไขมันอิสระอย่างได้ผล

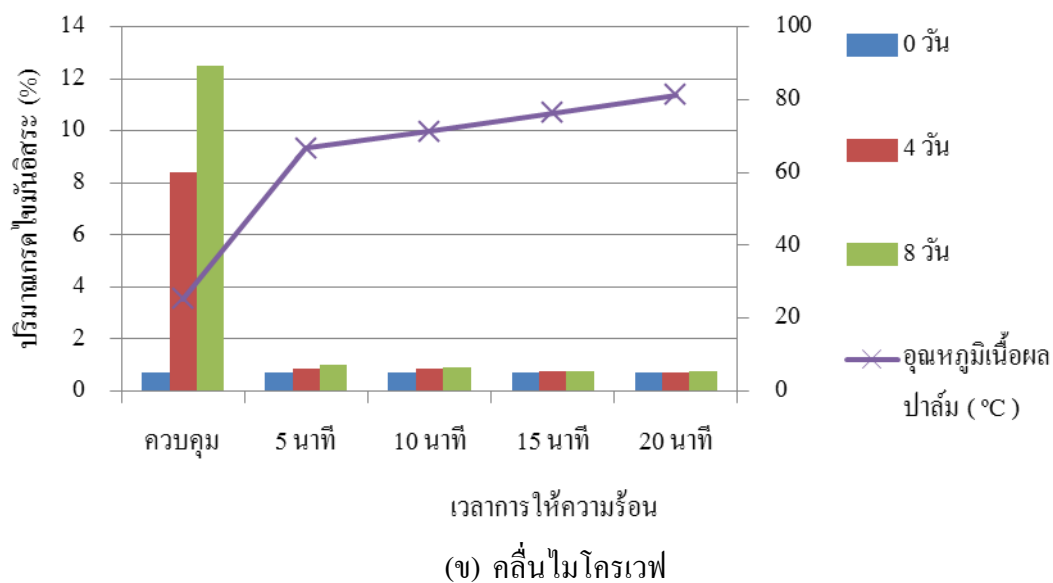
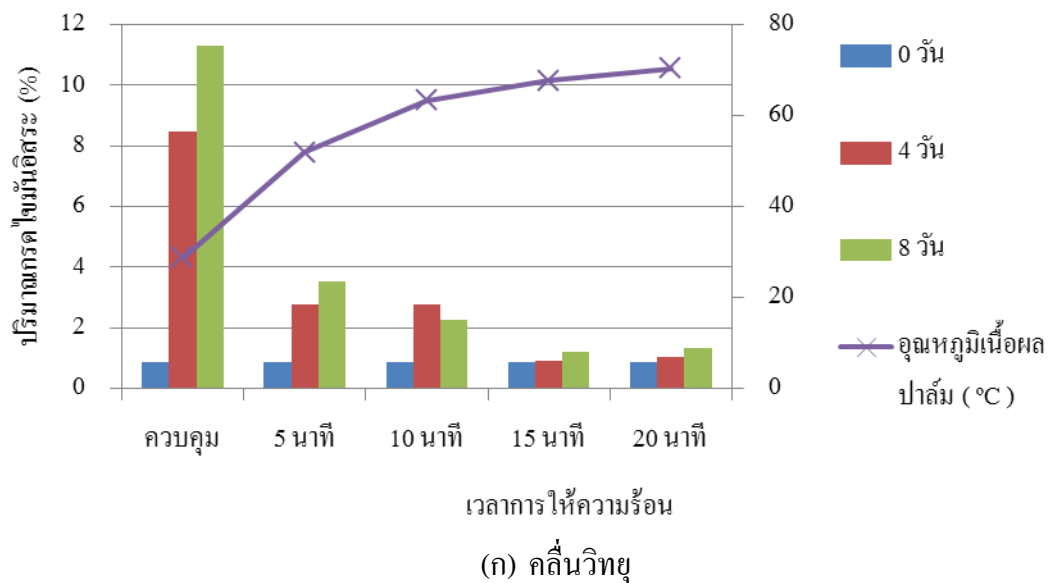


(ก) คลื่นวิทยุ



(ข) คลื่นไมโครเวฟ

ภาพประกอบที่ 4.18 อัตราการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของผลปาล์มซึ่งให้ความร้อนภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ด้วย (ก) คลื่นวิทยุ และ(ข) คลื่นไมโครเวฟ



ภาพประกอบที่ 4.19 ปริมาณกรดไขมันอิสระของผลปาล์มซึ่งให้ความร้อนภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ ด้วย (ก) กล้วย (กล้วย) และ (ข) กล้วย (กล้วย)

4.2.4 ลักษณะทางกายภาพ

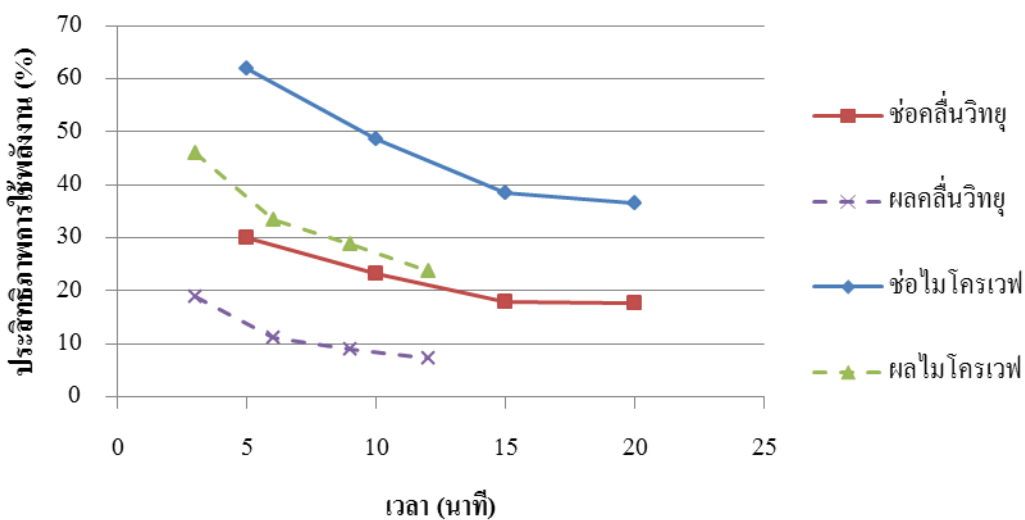
ช่อปลาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ มีลักษณะทางกายภาพของผลปลาล์มหลังผ่านการให้ความร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่า ลักษณะผลปลาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุตั้งแต่ 5 นาทีขึ้นไปและมีอุณหภูมิสูงเกิน 54 องศาเซลเซียส จะมีเนื้อที่นุ่มง่ายต่อการหีบและไม่มีความเสี่ยงหายเกิดขึ้นกับเนื้อและเมล็ดในส่วนตัวอย่างที่ให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เนื้อผลปลาล์มที่ได้รับความร้อนตั้งแต่ 5 นาทีขึ้นไปมีลักษณะนุ่มง่ายต่อการหีบเช่นกัน แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงเวลา 20 นาที เนื้อปลาล์มมีอุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส และความชื้นเหลือเพียง 14 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เมล็ดในของผลปลาล์มเกิดความเสียหายขึ้นโดยเริ่มเกิดการไหม้บริเวณเมล็ดใน ซึ่งเป็นผลมาจากความชื้นที่หลงเหลืออยู่น้อย และมีอุณหภูมิที่สูงจึงทำให้เริ่มเกิดการไหม้ในส่วนเมล็ดในของผลปลาล์มซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองในผลร่วงคือเมื่อผลปลาล์มมีความชื้นหลงเหลืออยู่ต่ำกว่า 16 เปอร์เซ็นต์ ผลปลาล์มจะเริ่มมีความเสียหายจากการไหม้เกิดขึ้น โดยลักษณะการไหม้ดังกล่าวจะเกิดขึ้นจากบริเวณของเมล็ดในก่อนเนื่องจากเมื่อพิจารณาภาพเทอร์โมกราฟประกอบจะสังเกตว่าบริเวณเมล็ดในมีอุณหภูมิที่สูงกว่าส่วนของเนื้อ และเมื่อความชื้นและอุณหภูมิสูงขึ้นจึงเริ่มเกิดการไหม้ต่อไปในส่วนเนื้อ

4.2.5 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการให้ความร้อนแก่ช่อผลปลาล์มแสดงดังภาพประกอบที่ 4.20 ซึ่งพบว่า ทั้งการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น และคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้คลื่นวิทยุเช่นเดียวกับการทดลองในผลร่วง และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างผลร่วงและช่อผลปลาล์ม พบว่า การให้ความร้อนแก่ช่อผลปลาล์มมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ช่อผลปลาล์มมีปริมาณมากกว่าผลร่วง และมีปริมาณของน้ำที่ระเหยออกไปสูงกว่าส่งผลให้พลังงานที่ช่อผลปลาล์มได้รับสูงขึ้น ในขณะที่พลังงานที่ให้แก่ช่อผลปลาล์มมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจากการให้แก่ผลร่วง จึงเป็นเหตุให้การให้ความร้อนแก่ช่อผลปลาล์มมีประสิทธิภาพสูงขึ้น









จากการพิจารณาข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระและลักษณะทางกายภาพประกอบรวมด้วย พบว่า การใช้คลื่นวิทยุในการให้ความร้อนแก่ช่อผลปลาล์มที่กำลังส่ง 600 วัตต์ ซึ่งสามารถควบคุมการเพิ่มของกรดไขมันอิสระอย่างได้ผลและมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 23 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการให้ความร้อน 10 นาที มีพลังงานที่ต้องใช้อยู่ที่ 1170 กิโลจูลต่อกิโลกรัมผลปลาล์มสด และมีกำลังการผลิต 3.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ขณะที่การใช้คลื่นไมโครเวฟให้ความร้อนแก่ช่อผล

ปาล์มเป็นเวลา 5 นาที สามารถลดการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระอย่างได้ผลและมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 62 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ต้องใช้อยู่ที่ 480 กิโลจูลต่อกิโลกรัมผลปาล์มสด และมีกำลังการผลิต 7.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้นจากข้อมูลข้างต้นกล่าวได้ว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์มมีประสิทธิภาพและกำลังการผลิตที่สูงกว่าคลื่นวิทยุ



ภาพประกอบที่ 4.20 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการให้ความร้อนแก่ช่อผลปาล์ม ภายใต้กำลังส่ง 600 วัตต์ ด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.4 ลักษณะผลปาล์มเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่กำลังส่ง 600 วัตต์ ด้วยคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟ

เวลา (นาที)	ชนิดคลื่น			
	คลื่นวิทยุ		คลื่นไมโครเวฟ	
5	อุณหภูมิ 54.8°C	ความชื้น 35.3 %	อุณหภูมิ 76.0°C	ความชื้น 29.0%
				
10	อุณหภูมิ 65.3°C	ความชื้น 31.2%	อุณหภูมิ 80.1°C	ความชื้น 23.0%
				
15	อุณหภูมิ 71.5°C	ความชื้น 29.3%	อุณหภูมิ 85.4°C	ความชื้น 18.6%
				
20	อุณหภูมิ 74.3°C	ความชื้น 28.7%	อุณหภูมิ 90.8°C	ความชื้น 14.3%
				

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มเพื่อยับยั้งปัญหาการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระในผลปาล์มโดยใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ซึ่งประกอบด้วยย่านความถี่คลื่นวิทยุและไมโครเวฟ ทั้งยังเปรียบเทียบผลความแตกต่างระหว่างการใช้เทคนิคทั้งสอง ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

การศึกษาการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟภายใต้กำลังส่งแตกต่างกันเป็นเวลา 0-20 นาที ผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในผลปาล์มนั้น คือ เวลาในการรับความร้อน กำลังส่ง ชนิดหรือความถี่ของคลื่นที่ผลปาล์มได้รับ และปริมาณของผลปาล์ม โดยการเพิ่มขึ้นของกำลังส่งจะช่วยให้ผลปาล์มสามารถทำความร้อนได้เร็วขึ้นลดระยะเวลาในการให้ความร้อนลง ส่วนชนิดของคลื่นหรือความถี่ของคลื่นจะพบว่าความถี่จะส่งผลให้สามารถทำความร้อนได้สูงขึ้นและใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนลดลงโดยสังเกตได้จากผลการทดลองซึ่งคลื่นไมโครเวฟนั้นมีความถี่ที่สูงกว่าคลื่นวิทยุผลที่ได้จึงทำให้อุณหภูมิของผลปาล์มจากคลื่นไมโครเวฟสูงกว่าและใช้เวลาน้อยกว่าการใช้คลื่นวิทยุ ด้านปริมาณจะพบว่าหากเพิ่มปริมาณของผลปาล์มความร้อนที่เกิดขึ้นลดลง ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่สะสมในผลปาล์มมีลักษณะเช่นเดียวกับปัจจัยของอุณหภูมิซึ่งได้แก่ กำลังส่ง และชนิดของคลื่นหรือความถี่คลื่น

ความสามารถในการยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระซึ่งเป็นปัญหาหลักนั้นพบว่าการใช้คลื่นทั้งสองในการให้ความร้อนสามารถลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระในผลปาล์มลงอย่างได้ผล โดยสถานะที่สามารถควบคุมการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีในผลปาล์มคือการให้ความร้อนด้วยคลื่นทั้งสองจนผลปาล์มมีอุณหภูมิเกิน 60 องศาเซลเซียสซึ่งเมื่อผลปาล์มได้รับความร้อนเกิน 60 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ปริมาณการเพิ่มของกรดไขมันอิสระจะมีปริมาณที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลปาล์มที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนโดยที่อุณหภูมิดังกล่าวมีผลการทดลองเหมือนกันทั้งจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟ นอกจากนี้หากอุณหภูมิของผลปาล์มอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้มีอัตราการเพิ่มของกรดไขมันอิสระเพิ่มสูงขึ้นมากเป็นผลมาจากช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่เหมาะสมทำให้มีการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ไลเปสให้เพิ่มสูงขึ้นเป็นส่งผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนกลีเซอไรด์ในน้ำมันไปเป็นกรดไขมันอิสระในปริมาณสูงดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงช่วงอุณหภูมิดังกล่าว เมื่อ

เปรียบเทียบผลระหว่างการใช้คลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟจะพบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟให้ผลดีกว่าการใช้คลื่นวิทยุ โดยใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่สั้นกว่าและลดความชื้นสะสมลงได้สูงกว่าแต่อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนที่สูงเกินไปก็จะส่งผลให้ผลปาล์มเกิดความเสียหายขึ้นได้คือเมื่อผลปาล์มมีอุณหภูมิสูงและมีความชื้นสะสมต่ำกว่า 16 เปอร์เซ็นต์ จะเริ่มส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่ผลปาล์มได้

ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานระหว่างการให้คลื่นทั้งสองในการให้ความร้อนพบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้คลื่นวิทยุ เนื่องจากการที่คลื่นไมโครเวฟมีความถี่ที่สูงกว่า ทำให้สร้างอุณหภูมิได้สูงกว่าคลื่นวิทยุทั้งยังใช้พลังงานในการสร้างคลื่นที่น้อยกว่าของคลื่นวิทยุ ส่วนด้านกำลังการผลิตการใช้คลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสูงกว่าคลื่นวิทยุเช่นกันเนื่องจากการใช้คลื่นไมโครเวฟใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่สั้นกว่าจึงทำให้สามารถให้ความร้อนแก่ผลปาล์มในปริมาณมากกว่าภายใต้เวลาที่เท่ากัน

ข้อเสนอแนะ

จากการทำการวิจัยในครั้งนี้ ทำให้ได้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อนำไปสู่การวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ระบบวงจรแม่เหล็กของคลื่นวิทยุมีความร้อนเกิดขึ้นสูงจึงมักส่งผลให้เกิดความเสียหายและต้องมีการซ่อมบำรุงตลอดเวลาดังนั้นจึงควรมีการสร้างระบบหล่อเย็นที่มีประสิทธิภาพเป็นแก้ปัญหาเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก
2. ในการใช้เครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุจะมีค่ากำลังสะท้อนกลับให้ต้องมีการควบคุมให้ค่าสะท้อนกลับไม่สูงเกินไปเพื่อป้องกันความเสียหายที่มีโอกาสเกิดขึ้นแก่เครื่องกำเนิดคลื่น
3. การให้กำลังส่งที่สูงเกินไปจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผลปาล์มและอาจมีประกายไฟและการติดไฟขึ้นในส่วนของขั้วผลหรือส่วนที่มีความชื้นต่ำ
4. เนื่องจากปริมาณกรดไขมันอิสระในผลปาล์มมีการเพิ่มขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นจึงควรทดลองให้เสร็จสิ้นทั้งชุดการทดลองภายในวันเดียวกัน และไม่ควรทิ้งผลปาล์มไว้เกิน 48 ชั่วโมงหลังจากเก็บเกี่ยวเพื่อไม่ให้มีค่ากรดไขมันอิสระเกิน 5 เปอร์เซ็นต์

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). ข้อมูลเทคโนโลยีเชิงลึกการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Heating). สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2556, สืบค้นจาก <http://dede-at3.bright-ce.com/Vol2/04Sample/PDF/08dielectric.pdf>
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2554). ปาล์มน้ำมัน. สืบค้นเมื่อ 3 มกราคม 2555, สืบค้นจาก <http://www.doae.go.th/plant/palm.htm>.
- กฤษฎา พวงสุวรรณ. (2554). การศึกษาความเป็นไปได้ของวิธีการอบแห้งผลปาล์มน้ำมันด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กฤษฎา พวงสุวรรณ, มิตรชัย จงเชี่ยวชำนาญ, และชาคริต ทองอุไร. (2555). แบบจำลองไดอิเล็กทริกหลายชั้นของผลปาล์มสำหรับการอบแห้งด้วยวิธีคลื่นไมโครเวฟ. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์, 50, 68-75.
- ชาคริต ทองอุไร, ธเนศ ้วยสุวรรณ, และรวมพร นิคม. (ม.ป.ป.). เทคโนโลยีไบโอดีเซล (Biodiesel Technology) ฉบับปฏิบัติการจริง. สงขลา: สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธีระ เอกสมทราเมษฐ์, ชัยรัตน์ นิลนนท์, ธีระพงศ์ จันทรมิขม, ประกิจ ทองคำ, และวรรณ เลี้ยววาริณ. (2546). คู่มือปาล์มน้ำมันและการจัดการสวน. สงขลา: คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธีระ เอกสมทราเมษฐ์, ชัยรัตน์ นิลนนท์, ธีระพงศ์ จันทรมิขม, ประกิจ ทองคำ, และสมเกียรติ สีสนอง. (2548). เส้นทางสู่ความสำเร็จการผลิตปาล์มน้ำมัน. สงขลา: ศูนย์วิจัยพัฒนาการผลิตปาล์มน้ำมัน คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- ธีรารัตน์ อธิโสภณกุล. (2543). การศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไขมันชนิดต่างๆ ที่ถูกเร่งด้วยเอนไซม์ไลเปสในกากรำข้าว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขา

เทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นคร สาระคุณ. (2545). การจัดการผลิตปาล์มน้ำมัน. เอกสารการสอนชุดวิชาการจัดการการผลิตพืชไร่อุตสาหกรรม, นนทบุรี: มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช.

ปรัชญา วาสนาเจริญ. (2548). ผลของการใช้คลื่นเรดิโอฟริควอนซ์ต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์และประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อสาเหตุโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์งา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. (2551). พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ผาสุก กุลละวณิช, สันหิษฐ์ กลิ่นพิบูล, สุมณฑา กุลละวณิช, สุรเชษฐ์ ชีระมณี, และจาตุรงค์ แซ่ลี. (2528). ปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม: คู่มือเกษตรกรกรมเพื่อพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา: คณะทรัพยากรธรรมชาติมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พัทธา จันท์แหง. (2550). ผลของการให้คลื่นความถี่วิทยุต่อการควบคุมเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พรชัย เหลืองอากาศ. (2549). คัมภีร์ปาล์มน้ำมัน พืชเศรษฐกิจเพื่อบริโภคและอุปโภค. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มติชน.

วิไล ริงสาดทอง. (2547). เทคโนโลยีแปรรูปอาหาร. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพมหานคร: เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด.

สายสนม ประดิษฐ์ดวง. (2543). การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร. ใน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. (หน้า 173-177). (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สาวิตรี คำหอม. (2551). การศึกษาการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟแบบสายพานในกระบวนการนึ่งปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- Akaranuchat, P. (2009). Control of seed-borne fungi by using radio frequency to maintain barley seed quality(Master's thesis). Chiang Mai University, Chiangmai.
- Mohankumar, C., Arumugan, C., & Kaleysaraj, R. (1990). Histological localization of oil palm fruit lipase. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 67, 665–669.
- Chow, M. N., & Ma, A. N. (2007). Processing of fresh palm fruits using microwaves. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 40, 165-173.
- Ngando, G.F., Dhouib, R., Carriere, F., Zollo, P. H., & Arondel, V. (2006). Assaying lipase activity from oil palm fruit (*Elaeis guineensis* jacq.) mesocarp. *Plant Physiology and Biochemistry*, 44, 611-617.
- Irfan, I., & Elke, P. (1999). The effect of rapeseed treatment by microwave and radio-frequency application on oil extraction and oil quality. Part II: Influence on oil quality. *fett/Lipid*, 101(5), 168-171.
- Henderson, J., & Osborne, D. J. (1991). Lipase activity in ripening and mature fruit of the oil palm. Stability in vivo and in vitro. *Phytochemistry*, 30, 1073–1078.
- Jiaxun, T., Roa, R., & Liuzzo, J. (1993). Microwave heating for rice bran stabilization . *Journal of Microwave Power and Electromanetic Energy*, 28(3), 156-164
- Zhang, L., Lyng, J. G., & Brunton, N. P. (2006). The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency heating. *Journal of Food Engineering*, 80, 142-151.
- Marra, F., Zhang, L., & Lyng, J. G. (2008). Radio frequency treatment of food: Review of recent advances. *Journal of Food Engineering*, 91(4), 497-508.
- Sukaribin, N., & Khalid, K. (2009). Effectiveness of sterilization of oil palm bunch using microwave technology. *Industrial Crops and Products*, 30, 179 – 183.

- Ngan, M.A., Singam, G., Ean, J.T. & Leong, L.T. (1999). Industrial Process&The Enviroment (handbook No.3) Crude Palm Oil Industry. Malaysia : Department of Environment Ministry of Science Technology and The Environment.
- Zhong, Q., Sandeep, K.P., & Swartzel, K. R. (2004). Continuous flow radio frequency heating of particulate food. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5, 475-483.
- Sambanthamurthi, R., Sundram, K., & Tan, Y.A. (2000). Chemistry and biochemistry of palm oil. *Progress in lipid research*, 39, 507-558.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(มาตรฐาน AOAC Ca 5a-40)

ก.1 นิยาม

กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) หมายถึง กรดไขมัน ที่ไม่ได้รวมอยู่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยปกติกรดไขมันซึ่งจัดเป็นลิพิด มักพบอยู่ในน้ำมัน และไขมันโดยจะรวมกันในรูปของไตรกลีเซอไรด์และหากถูกแยกออกมาโดยการไฮโดรไลซ์จะอยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระ

ก.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. แอลกอฮอล์
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเข้มข้นร้อยละ 1 (ละลายในแอลกอฮอล์)
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล เตรียมโดยการชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร แล้วเก็บสารละลายไว้ในขวดแก้ว

ก.3 วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างน้ำมันให้ได้น้ำหนักแน่นอน 1-10 g ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml
2. เตรียมสารละลายแอลกอฮอล์ (ปรับสภาพให้เป็นกลาง) โดยเติมฟีนอล์ฟทาลีน 5 หยดแล้วหยดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มอล โดยหยดทีละหยดพร้อมทั้งเขย่าจนได้สีชมพูถาวร
3. เติมแอลกอฮอล์ที่มีสภาพเป็นกลาง 50 ml ลงในตัวอย่าง เขย่าอย่างแรงให้ตัวอย่างละลายในแอลกอฮอล์
4. ไตเตรตสารละลายตัวอย่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จนกระทั่งได้สีชมพูถาวร
5. คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระจากสูตร

$$\text{ปริมาณกรดไขมันอิสระ(\% FFA)} = \frac{(\text{ปริมาตรด่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)} \times \text{ความเข้มข้นด่าง (นอร์มัล)} \times 25.6)}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

หมายเหตุ สูตรคำนวณนี้ใช้สำหรับคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่มีกรดปาล์มติกเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น น้ำมันปาล์ม

ภาคผนวก ข

วงจรแมทชิงและตัวปล่อยสนาม

ข1. วงจรแมทชิง

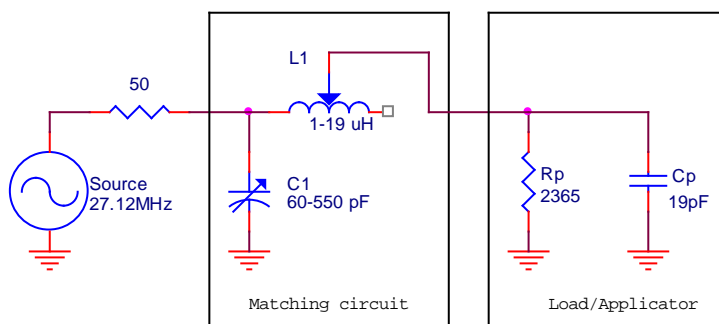
ในการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมบริเวณรอบตัวปล่อยสนามไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงของกำลังสะท้อนกลับจากเครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการให้ความร้อนด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่สามารถปรับค่าได้เพื่อจะปรับลดค่ากำลังสะท้อนของคลื่นวิทยุ การเพิ่มขึ้นของกำลังสะท้อนกลับมีสาเหตุจาก

1. การเปลี่ยนแปลงของวัตถุเมื่อถูกทำให้ร้อนภายใต้ตัวปล่อยสนามไฟฟ้า เมื่อน้ำถูกดึงออกจากวัตถุในรูปของ ไอ่น้ำส่งผลให้บริเวณ โดยรอบมีความชื้นสูงขึ้น

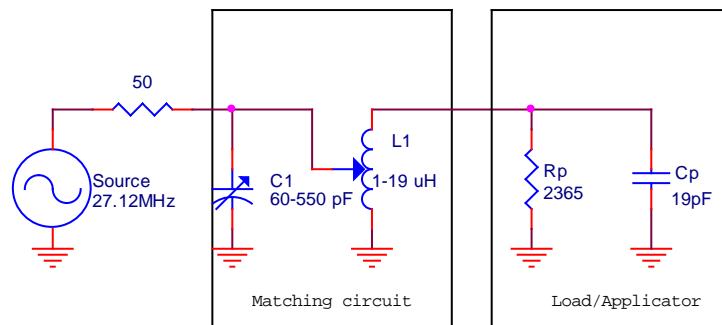
2. ตัวเหนี่ยวนำร้อนขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น

ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการปรับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุบ่อยครั้งในขณะทำการทดลองเพื่อให้ค่ากำลังสะท้อนกลับลดลง

ปัญหาและอุปสรรคสำคัญในการทำแมทชิงคือการตัวเหนี่ยวนำ โดยตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้จะมีขาให้ต่อใช้งานได้อยู่ 3 ขา ซึ่งปกติจะมีการต่อวงจรดังภาพประกอบ ข1 การต่อในลักษณะนี้จะทำให้การแมทชิงอิมพีแดนซ์ (ทำให้กำลังสะท้อนกลับเป็นศูนย์) ทำได้ยากหรืออาจไม่ได้เลยจึงมีการปรับปรุงวงจรประกอบที่ ข2 ซึ่งเป็นการต่อตัวเหนี่ยวนำที่ปรับปรุงแล้วเพื่อลดการเพิ่มขึ้นของกำลังสะท้อนกลับและมีการแมทชิงที่สมบูรณ์



ภาพประกอบ ข.1 รูปแบบการต่อตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้แบบปกติ



ภาพประกอบ ข.2 รูปแบบการต่อตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ให้สามารถทำการแมทซึ่งได้สมบูรณ์และลดการสูญเสีย

ข2. ตัวปล่อยสนามไฟฟ้า

การออกแบบตัวปล่อยสนามและระบบสายพานลำเลียงเพื่อให้เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุสามารถใช้งานได้และมีค่ากำลังสะท้อนน้อยที่สุดจึงได้ทำการออกแบบให้มีระบบสายพานลำเลียงผลปาล์มให้ผ่านแผ่นโลหะซึ่งเป็นตัวปล่อยสนามแล้วปิดด้วยตู้โลหะเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุและเป็นการควบคุมไม่ให้สภาพแวดล้อมรอบๆตัวปล่อยสนามไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ในการออกแบบได้กำหนดขนาดและลักษณะของเครื่องดังนี้

- สายพานสำหรับลำเรียง ยาว 100 เซนติเมตร กว้าง 30 เซนติเมตร
- แผ่นโลหะสำหรับตัวปล่อยสนามไฟฟ้า ยาว 28 เซนติเมตร กว้าง 16 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองสามารถปรับได้ตั้งแต่ 4 ถึง 10 เซนติเมตร
- ตู้โลหะสำหรับป้องกันการกระจายของคลื่น กว้าง 50 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ลึก 100 เซนติเมตร โดยตัวตู้จะมีฝาเปิด-ปิดสำหรับลำเลียงผลปาล์มเข้าออก



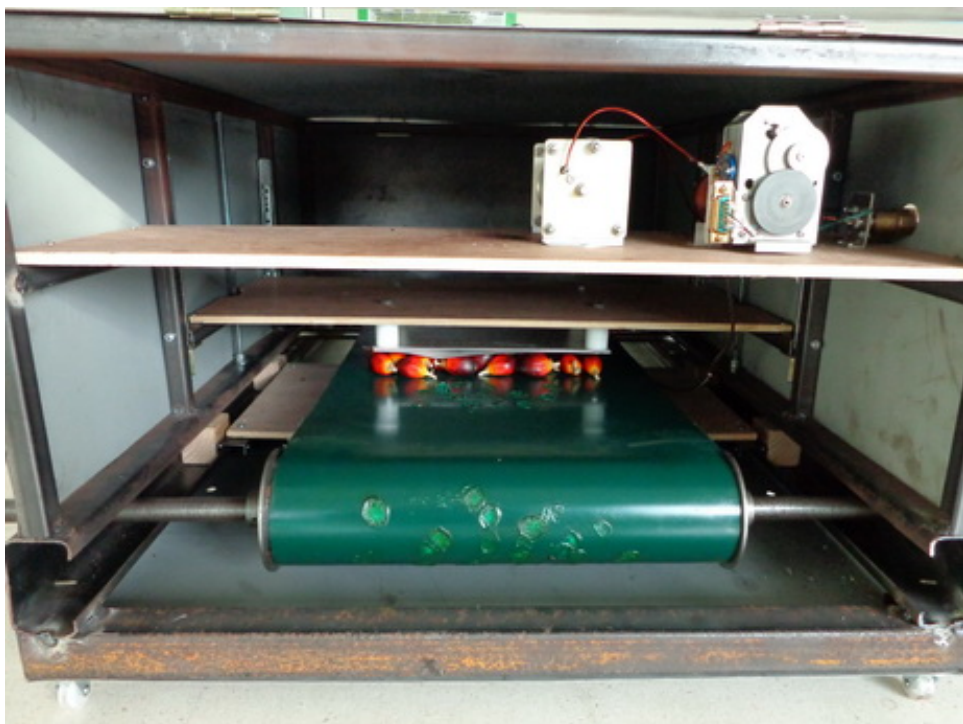
ภาพประกอบ ข.3 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้สำหรับการแมชอินพีแดนซ์



ภาพประกอบ ข.4 ตัวปล่อยสนามไฟฟ้าสามารถปรับระยะห่างได้



ภาพประกอบ ข.5 ตัวปล่อยสนามไฟฟ้าและสายพานลำเลียงเมื่อประกอบแล้ว



ภาพประกอบ ข.6 การให้ความร้อน โดยวางผลปาล์มอยู่ภายใต้ตัวปล่อยสนามไฟฟ้า

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

ตาราง ก1. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระของการให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม

การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ กำลังส่ง 200 วัตต์									
การทดลอง	ตัวอย่าง	วันที่ 4				วันที่ 8			
		นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA	นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA
ควบคุม	1	2.05	0.10	5.0	6.24	2.08	0.10	9.9	12.00
	2	2.07	0.10	5.2	6.43	2.17	0.10	10.6	12.26
	3	2.30	0.10	5.7	6.34	2.14	0.10	10.5	12.31
	เฉลี่ย					6.34			
3 นาที	1	2.12	0.05	19.3	11.65	2.09	0.10	17.4	20.99
	2	2.00	0.10	9.6	12.29	2.05	0.10	16.9	20.79
	3	2.10	0.05	19.7	12.01	2.13	0.10	17.6	20.84
	เฉลี่ย					11.98			
6 นาที	1	2.05	0.05	18.8	11.74	2.04	0.10	13.6	16.81
	2	2.08	0.10	9.5	11.69	2.11	0.10	14.0	16.73
	3	2.13	0.10	9.7	11.66	2.13	0.10	14.3	16.87
	เฉลี่ย					11.70			
9 นาที	1	2.08	0.1	3.4	4.12	2.24	0.10	9.5	10.69
	2	2.03	0.05	5.8	3.66	2.11	0.10	9.0	10.76
	3	2.11	0.05	6.4	3.88	2.2	0.10	9.5	10.74
	เฉลี่ย					3.89			
12 นาที	1	2.06	0.05	4.6	2.86	2.21	0.10	3.2	3.65
	2	2.07	0.05	4.7	2.88	2.09	0.05	5.7	3.46
	3	2.10	0.05	4.7	2.86	2.01	0.05	5.6	3.57
	เฉลี่ย					2.87			

ตาราง ก1. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระของการให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม (ต่อ)

การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ กำลังส่ง 400 วัตต์									
การทดลอง	ตัวอย่าง	วันที่ 4				วันที่ 8			
		นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA	นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA
ควบคุ่ม	1	2.17	0.05	12.2	7.17	2.24	0.10	8.0	9.14
	2	2.1	0.05	11.7	7.13	2.05	0.10	7.4	9.24
	3	2.02	0.05	11.2	7.10	2.12	0.10	7.6	9.18
	เฉลี่ย				7.13				
3 นาที	1	2.2	0.05	6.6	3.81	2.05	0.05	11.7	7.31
	2	2.09	0.05	6.1	3.74	2.05	0.05	11.8	7.34
	3	2.15	0.05	6.4	3.78	2.10	0.05	12.2	7.44
	เฉลี่ย				3.78				
6 นาที	1	2.02	0.05	4	2.53	2.06	0.05	6.3	3.88
	2	2.15	0.05	4.9	2.92	2.19	0.05	6.7	3.92
	3	2.03	0.05	4.5	2.81	2.1	0.05	6.4	3.90
	เฉลี่ย				2.75				
9 นาที	1	2.13	0.05	5.2	3.12	2.12	0.05	6.3	3.80
	2	2.10	0.05	4.9	2.96	2.12	0.05	6.6	3.98
	3	2.15	0.05	5.1	3.04	2.08	0.05	6.4	3.94
	เฉลี่ย				3.04				
12 นาที	1	2.07	0.05	5.1	3.12	2.10	0.05	5.2	3.17
	2	2.11	0.05	5.4	3.28	2.25	0.05	5.7	3.21
	3	2.13	0.05	5.4	3.22	2.02	0.05	5.1	3.20
	เฉลี่ย				3.20				

ตาราง ก1. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระของการให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม (ต่อ)

การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ กำลังส่ง 600 วัตต์									
การทดลอง	ตัวอย่าง	วันที่ 4				วันที่ 8			
		นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA	นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA
ควบคุ่ม	1	2.10	0.05	17.1	10.39	2.07	0.10	11.4	14.04
	2	2.08	0.10	8.5	10.40	2.07	0.10	11.4	14.10
	3	2.07	0.10	8.4	10.39	2.10	0.10	11.4	13.90
	เฉลี่ย				10.39				
3 นาที	1	2.06	0.05	5.6	3.48	2.05	0.05	10.1	6.31
	2	2.02	0.05	5.6	3.55	2.05	0.05	9.8	6.12
	3	2.07	0.01	28.6	3.53	2.1	0.05	10.2	6.22
	เฉลี่ย				3.52				
6 นาที	1	2.04	0.05	1.75	1.10	2.21	0.05	3.35	1.94
	2	2.12	0.01	9.4	1.13	2.06	0.01	17.6	2.18
	3	2.09	0.01	9.1	1.11	2.1	0.01	17.8	2.17
	เฉลี่ย				1.11				
9 นาที	1	2.09	0.05	1.5	0.92	2.08	0.05	1.9	1.14
	2	2.06	0.01	6.8	0.84	2.12	0.01	8.6	1.04
	3	2.10	0.01	6.9	0.84	2.07	0.01	8.3	1.02
	เฉลี่ย				0.87				
12 นาที	1	2.23	0.05	1.5	0.86	2.07	0.05	2.2	1.36
	2	2.13	0.01	6.6	0.79	2.08	0.01	11.2	1.38
	3	2.10	0.01	6.6	0.8	2.10	0.01	11.3	1.37
	เฉลี่ย				0.82				

ตาราง ก1. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระของการให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม (ต่อ)

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ กำลังส่ง 200 วัตต์									
การทดลอง	ตัวอย่าง	วันที่ 4				วันที่ 8			
		นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA	นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA
ควบคุ่ม	1	2.11	0.10	5.7	6.92	2.04	0.10	9.1	11.42
	2	2.26	0.10	6.2	7.02	2.1	0.10	9.3	11.28
	3	2.22	0.10	6.1	7.03	2.06	0.10	9.1	11.25
	เฉลี่ย				6.99				
3 นาที	1	2.07	0.01	18.6	2.23	3.05	0.01	46.6	3.79
	2	2.05	0.05	3.4	2.21	3.05	0.01	4.5	3.78
	3	2.11	0.01	18.7	2.20	3.09	0.05	8.6	3.70
	เฉลี่ย				2.21				
6 นาที	1	2.05	0.01	7.8	0.94	3.09	0.05	4.9	2.11
	2	2.16	0.01	8.5	0.98	3.10	0.05	4.9	2.10
	3	2.09	0.01	8.3	0.98	3.17	0.01	25.8	2.02
	เฉลี่ย				0.97				
9 นาที	1	2.05	0.01	7.1	0.86	3.00	0.01	12.7	1.05
	2	2.12	0.01	7.5	0.87	3.05	0.01	12.9	1.05
	3	2.25	0.01	7.7	0.84	3.13	0.01	12.9	1.02
	เฉลี่ย				0.86				
12 นาที	1	2.01	0.01	7.3	0.90	3.09	0.01	13.3	1.07
	2	2.05	0.01	7.6	0.92	3.03	0.01	13.4	1.10
	3	2.09	0.01	7.7	0.91	3.05	0.01	13.3	1.08
	เฉลี่ย				0.91				

ตาราง ก1. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระของการให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม (ต่อ)

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ กำลังส่ง 400 วัตต์									
การทดลอง	ตัวอย่าง	วันที่ 4				วันที่ 8			
		นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA	นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA
ควบคุ่ม	1	2.29	0.05	12.3	7.15	2.06	0.05	21.4	13.83
	2	2.18	0.05	11.7	7.14	2.18	0.05	22.7	13.86
	3	2.2	0.05	11.7	7.08	2.09	0.05	21.8	13.89
	เฉลี่ย				7.15				
3 นาที	1	2.05	0.01	4.7	0.57	2.15	0.01	8.2	0.95
	2	2.26	0.01	4.2	0.46	2.11	0.01	7.4	0.87
	3	2.18	0.01	5.1	0.58	2.08	0.01	7.8	0.93
	เฉลี่ย				0.54				
6 นาที	1	2.16	0.01	5.4	0.62	2.17	0.01	4.9	0.56
	2	2.18	0.05	1.1	0.67	2.06	0.01	4.4	0.53
	3	2.24	0.01	5.7	0.63	2.01	0.01	4.5	0.55
	เฉลี่ย				0.64				
9 นาที	1	2.06	0.01	7.4	0.89	2.03	0.01	4.5	0.54
	2	2.14	0.01	7.5	0.86	2.04	0.01	4.7	0.57
	3	2.11	0.01	7.6	0.89	2.12	0.01	4.7	0.55
	เฉลี่ย				0.88				
12 นาที	1	2.24	0.01	7.2	0.80	2.11	0.01	5.4	0.63
	2	2.07	0.01	6.7	0.80	2.3	0.01	5.6	0.60
	3	2.1	0.01	7.0	0.82	2.18	0.01	5.4	0.61
	เฉลี่ย				0.80				

ตาราง ก1. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระของการให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม (ต่อ)

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ กำลังส่ง 600 วัตต์									
การทดลอง	ตัวอย่าง	วันที่ 4				วันที่ 8			
		นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA	นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA
ควบคุ่ม	1	2.13	0.05	26.5	15.92	2.10	0.10	16.8	20.48
	2	2.13	0.05	25.8	15.50	2.28	0.10	18.5	20.77
	3	2.03	0.05	25.1	15.83	2.04	0.10	16.2	20.33
	เฉลี่ย				15.71				
3 นาที	1	2.07	0.01	15.2	1.88	2.08	0.05	3.6	2.22
	2	2.16	0.01	14.6	1.73	2.14	0.05	3.7	2.21
	3	2.01	0.01	13.8	1.76	2.10	0.01	18.2	2.22
	เฉลี่ย				1.79				
6 นาที	1	2.02	0.01	12.2	1.55	2.27	0.05	4.1	2.31
	2	2.04	0.01	11.8	1.48	2.08	0.05	3.7	2.28
	3	2.20	0.01	13.1	1.52	2.13	0.01	18.7	2.25
	เฉลี่ย				1.51				
9 นาที	1	2.06	0.01	12.1	1.50	2.15	0.05	2.6	1.55
	2	2.10	0.01	12.8	1.56	2.10	0.01	12.5	1.52
	3	2.01	0.01	12.0	1.53	2.04	0.01	11.7	1.47
	เฉลี่ย				1.53				
12 นาที	1	2.17	0.01	13.5	1.59	2.17	0.05	3.0	1.77
	2	2.23	0.01	13.1	1.50	2.09	0.01	14.9	1.83
	3	2.09	0.01	12.8	1.57	2.10	0.01	14.4	1.76
	เฉลี่ย				1.55				

ตาราง ก2. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระของการให้ความร้อนแก่ชอล์ปาล์ม

การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ กำลังส่ง 600 วัตต์									
การทดลอง	ตัวอย่าง	วันที่ 4				วันที่ 8			
		นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA	นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA
ควบคุม	1	2.16	0.10	7.1	8.41	2.11	0.10	9.3	11.28
	2	2.28	0.05	15.3	8.50	2.22	0.05	20.0	11.42
	3	2.07	0.05	13.8	8.45	2.10	0.10	9.2	11.22
	เฉลี่ย				8.46				
5 นาที	1	2.17	0.05	4.8	2.77	2.08	0.05	5.8	3.53
	2	2.12	0.01	23.5	2.78	2.10	0.01	29.4	3.51
	3	2.28	0.05	5.0	2.78	2.04	0.05	5.7	3.51
	เฉลี่ย				2.78				
10 นาที	1	2.24	0.05	4.90	2.77	2.31	0.05	4.05	2.22
	2	2.28	0.05	4.95	2.75	2.13	0.05	3.80	2.26
	3	2.07	0.01	22.8	2.76	2.17	0.01	19.30	2.23
	เฉลี่ย				2.76				
15 นาที	1	2.50	0.05	1.9	0.94	2.21	0.05	2.1	1.18
	2	2.65	0.01	7.4	0.89	2.08	0.01	8.1	1.25
	3	2.10	0.01	6.1	0.93	2.02	0.01	7.7	1.22
	เฉลี่ย				0.92				
20 นาที	1	2.25	0.05	2.0	1.13	2.12	0.05	2.2	1.32
	2	2.54	0.01	7.7	0.97	2.20	0.01	8.9	1.29
	3	2.20	0.01	6.7	0.97	2.07	0.01	8.6	1.33
	เฉลี่ย				1.02				

ตาราง ก2. ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระของการให้ความร้อนแก่ชอล์ก (ต่อ)

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ กำลังส่ง 600 วัตต์									
การทดลอง	ตัวอย่าง	วันที่ 4				วันที่ 8			
		นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA	นน. ตัวอย่าง (กรัม)	[NaOH]	NaOH (มล.)	%FFA
ควบคุ่ม	1	2.28	0.10	7.4	8.31	2.48	0.10	11.9	12.28
	2	2.10	0.10	7.0	8.53	2.03	0.10	10.1	12.74
	3	2.04	0.10	6.7	8.41	2.10	0.10	10.3	12.50
	เฉลี่ย				8.42				
5 นาที	1	2.27	0.01	7.9	0.86	2.05	0.01	8.0	0.97
	2	2.06	0.01	7.4	0.89	2.16	0.01	8.6	0.99
	3	2.04	0.01	7.3	0.89	2.07	0.01	8.1	0.97
	เฉลี่ย				0.88				
10 นาที	1	2.15	0.01	7.7	0.89	2.21	0.01	8.3	0.93
	2	2.22	0.01	7.6	0.85	2.20	0.01	8.2	0.93
	3	2.10	0.01	7.4	0.88	2.12	0.01	8	0.94
	เฉลี่ย				0.87				
15 นาที	1	2.09	0.01	6.4	0.76	2.17	0.01	6.8	0.78
	2	2.20	0.01	6.5	0.73	2.30	0.01	6.9	0.74
	3	2.11	0.01	6.4	0.75	2.01	0.01	6.2	0.77
	เฉลี่ย				0.75				
20 นาที	1	2.09	0.01	6.1	0.72	2.21	0.01	6.6	0.74
	2	2.22	0.01	6.3	0.70	2.07	0.01	6.2	0.74
	3	2.28	0.01	6.4	0.70	2.14	0.01	6.3	0.73
	เฉลี่ย				0.71				

ตาราง ก3. ข้อมูลน้ำหนักก่อนและหลังการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นวิทยุ และข้อมูลการใช้พลังงาน

กำลังส่ง (วัตต์)	เวลา (นาที)	ตัวอย่าง	นน.เริ่มต้น (กรัม)	นน.สุดท้าย (กรัม)	พลังงานที่ใช้ (kWh)	พลังงานที่ใช้ (kJ)	
200	3	1	150.7	147.1	0.03	108	
		2	150.6	147.8	0.03		
	6	1	151.8	147.3	0.05	198	
		2	149.1	145.0	0.06		
	9	1	149.3	144.3	0.08	288	
		2	151.2	145.8	0.08		
	12	1	149.9	143.8	0.11	396	
		2	150.5	144.1	0.11		
	400	3	1	151.2	145.1	0.04	144
			2	150.9	145.2	0.05	
6		1	150.7	142.2	0.09	324	
		2	150.7	141.5	0.09		
9		1	150.9	139.9	0.12	432	
		2	151.8	140.2	0.13		
12		1	149.0	135.2	0.17	612	
		2	150.9	137.5	0.18		
600		3	1	150.7	144.3	0.05	180
			2	149.2	143.1	0.05	
	6	1	151.4	140.4	0.11	432	
		2	150.3	139.6	0.13		
	9	1	149.7	135.8	0.17	630	
		2	150.2	136.0	0.18		
	12	1	151.8	135.1	0.24	864	
		2	150.3	133.3	0.24		

ตาราง ค4. ข้อมูลน้ำหนักก่อนและหลังการให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยคลื่นไมโครเวฟ และข้อมูลการใช้พลังงาน

กำลังส่ง (วัตต์)	เวลา (นาที)	ตัวอย่าง	นน.เริ่มต้น (กรัม)	นน.สุดท้าย (กรัม)	พลังงานที่ใช้ (kWh)	พลังงานที่ใช้ (kJ)	
200	3	1	150.5	143.9	0.01	54	
		2	151.3	144.8	0.02		
	6	1	150.3	139.7	0.03	90	
		2	152.5	141.9	0.02		
	9	1	149.6	134.4	0.04	144	
		2	151.0	136.2	0.04		
	12	1	150.2	125.9	0.06	216	
		2	151.8	127.6	0.06		
	400	3	1	150.7	130.1	0.03	108
			2	150.8	130.0	0.03	
		6	1	151.6	124.5	0.07	252
			2	150.9	122.7	0.07	
9		1	150.2	114.8	0.10	378	
		2	151.2	116.0	0.11		
12		1	150.5	106.3	0.12	468	
		2	150.1	107.3	0.14		
600		3	1	150.3	123.4	0.05	180
			2	150.7	126.5	0.05	
		6	1	150.5	115.9	0.09	324
			2	150.5	116.0	0.09	
	9	1	150.7	106.3	0.13	486	
		2	149.9	105.2	0.14		
	12	1	149.4	102.0	0.18	648	
		2	150.1	101.8	0.18		

ตาราง ก5. ข้อมูลน้ำหนักก่อนและหลังการให้ความร้อนแก่ช่อปาล์มด้วยกำลังส่ง 600 วัตต์ และ
ข้อมูลการใช้พลังงาน

ชนิดคลื่น	เวลา (นาที)	ตัวอย่าง	นน.เริ่มต้น (กรัม)	นน.สุดท้าย (กรัม)	พลังงานที่ใช้ (kWh)	พลังงานที่ใช้ (kJ)
คลื่นวิทยุ	5	1	604.7	580.3	0.12	432
		2	599.2	574.8	0.12	
	10	1	598.9	561.4	0.19	702
		2	601.9	567.0	0.2	
	15	1	603.7	561.9	0.28	990
		2	600.4	561.1	0.27	
	20	1	594.9	545.2	0.31	1152
		2	604.7	551.6	0.33	
คลื่น ไมโครเวฟ	5	1	599.6	563.6	0.08	288
		2	602.2	562.3	0.08	
	10	1	608.0	531.5	0.15	540
		2	602.4	530.1	0.15	
	15	1	606.3	506.3	0.23	846
		2	603.6	502.1	0.24	
	20	1	598.5	470.7	0.29	1062
		2	601.8	477.2	0.30	

ตาราง ก6. ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิของผลปาล์มหลังผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุที่กำลังส่ง 400 วัตต์

เวลา	ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)					เฉลี่ย
		ตำแหน่ง					
		T1	T2	T3	T4		
ควบคุม	1	31.6	31.5	31.6	31.7	31.6	
	2	31.4	31.5	31.5	31.5		
	3	31.7	31.5	31.6	31.6		
	4	31.5	31.6	31.6	31.6		
3 นาที	1	57.7	54.1	55.7	55.7	53.0	
	2	51.4	51.0	51.5	51.3		
	3	57.3	54.5	56.1	56.4		
	4	49.4	48.6	48.2	49.0		
6 นาที	1	63.5	62.5	64.5	61.2	62.7	
	2	66.2	66.7	65.4	66.8		
	3	65.3	60.6	61.1	62.0		
	4	59.5	59.4	60.2	59.0		
9 นาที	1	76.2	70.7	73.6	72.2	71.1	
	2	64.6	65.4	65.1	66.3		
	3	71.4	76.8	73.3	75.4		
	4	71.9	71.1	73.9	70.0		
12 นาที	1	72.4	77.5	76.8	73.4	75.2	
	2	76.8	75.5	76.6	77.7		
	3	74.5	71.9	74.5	73.5		
	4	76.3	74.8	76.2	75.0		

ตาราง ก7. ข้อมูลอุณหภูมิของผลปาล์มหลังผ่านการให้ความร้อน

กำลังส่ง	เวลา / ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)				
		S1	S2	S3	S4	เฉลี่ย
คลื่นวิทยุ						
200	3 นาที	36.8	41.4	40.5	42.3	40.2
	6 นาที	45.7	44.8	47.4	48.5	46.6
	9 นาที	51.4	53.4	53.4	52.8	52.7
	12 นาที	57.4	54.5	55.2	54.2	55.3
400	3 นาที	55.8	51.3	56.1	48.8	53.0
	6 นาที	62.9	66.3	62.3	59.5	62.7
	9 นาที	73.2	65.4	74.2	71.7	71.1
	12 นาที	75.0	76.7	73.6	75.6	75.2
600	3 นาที	60.2	54.3	51.4	50.4	54.1
	6 นาที	78.7	74.3	75.3	78.4	76.7
	9 นาที	75.5	75.5	79.8	80.4	77.8
	12 นาที	77.7	79.5	85.5	85.8	82.1
คลื่นไมโครเวฟ						
200	3 นาที	55.5	60.2	56.3	59.7	57.9
	6 นาที	71.3	66.4	68.5	69.2	68.8
	9 นาที	72.7	66.8	72.8	73.2	71.4
	12 นาที	78.9	80.1	75.6	73.5	77.0
400	3 นาที	65.7	68.1	64.7	57.7	64.0
	6 นาที	72.9	69.6	75.5	74.6	73.2
	9 นาที	86.1	84.7	90.8	87.9	87.4
	12 นาที	122.9	124.9	116.9	131.5	124.0
600	3 นาที	78.6	74.5	74.7	72.0	74.9
	6 นาที	112.9	105.8	110.1	105.3	108.5
	9 นาที	160.5	152.8	152.7	145.9	153.0
	12 นาที	193.6	187.5	185.0	183.3	187.3

ตาราง ก8. ข้อมูลอุณหภูมิของผลปาล์มหลังผ่านการให้ความร้อนแก่ช่อปาล์มที่กำลังส่ง 600 วัตต์

ชนิดคลื่น	เวลา / ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)				
		S1	S2	S3	S4	เฉลี่ย
คลื่นวิทยุ	5 นาที	52.2	56.6	57.0	53.6	54.8
	10 นาที	64.7	64.9	68.9	62.7	65.3
	15 นาที	72.2	75.7	68.1	70.2	71.5
	20 นาที	80.2	71.5	72.1	73.4	74.3
คลื่นไมโครเวฟ	5 นาที	79.7	73.5	79.6	71.6	76.1
	10 นาที	81.2	79.3	83.3	76.6	80.1
	15 นาที	88.3	84.5	81.2	87.7	85.4
	50 นาที	84.5	93.4	94.3	91.1	90.8


ภาคผนวก ง

บทความที่เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ

IICBE INT'L CONFERENCE


**INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOLOGICAL,
CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL SCIENCES
(BCES-2014)**

**JAN. 21-22, 2014
PATONG BEACH, PHUKET (THAILAND)**



**Editors:
Dr. Saji Baby
Prof. Dr. P. S. Sandhu**

ISBN 978-93-82242-68-0



www.iicbe.org

Sterilization of Oil Palm Fruit Using Radio-Frequency Heating

Attapon Choto, Chakrit Thongurai, Nattawan Kladaew and Montep Kiatweerasakul

Abstract—The objective of this research is to study on the sterilization of oil palm fruits by radio-frequency (RF) heating in term of enzymatic inactivation. Oil palm fruits were heated by the RF applicator at different frequency, and periods of heating also be varied. The experimental results revealed that the increase in RF frequency and duration of heating causes the increasing of mesocarp temperature. From experimental results, it showed that the optimum condition of RF heating in order of interrupting the enzymatic reaction was at 27.12 MHz and 6 minutes of operating, which can increase the mesocarp temperature to 329.5 K. The obtained energy efficiency at this condition was 19.12 %. The tested oil palm fruits can be stored for 4 days in ambient condition with the increase of free fatty acid is acceptable. On the basis of experimental results, it can be showed that RF could inhibit the increasing of free fatty acid in oil palm fruits, however this process should be studied further.

Keywords—Sterilization, Palm fruit, Radio-frequency, Free Fatty Acid.

I. INTRODUCTION

HIGH content of free fatty acid (FFA) in crude palm oil is the most problems for the palm oil mill. After harvesting, oil palm delivered to mill early before the high rate increasing of FFA will be occurred.

Sterilization is a step in the milling process, which objects to inactivate the naturally occurring enzymes in the palm fruits which split the oil to FFA and encourage remove the fruit from the bunch [1]. Conventional sterilization of oil palm in the palm oil mill is wet process which uses steam and hot water. The oil palms are subjected to high pressure at 15-45 psi for 90 minutes and the temperature more than 100°C [2], [3]. However, steam sterilization process has produced much waste water. Thus the high cost of water treatment was imperative to rigorous environmental standard. The milling process always practiced stringent control on the process in order to produce

crude palm oil (CPO) with acceptable specifications, especially on parameter such as moisture and FFA content. High FFA content is inevitable since wet processes are engaged and the presence of water will promote hydrolysis of oil to FFA [4]

RF is a new tool for high temperature process which is rapid and uniform heating including decrease sintering temperature. RF is a range within electromagnetic spectrum which covers a frequency between 1 to 300 MHz. Microwave are similar to RF in their heating behavior but it has a higher frequency range [5]. In addition, the difference between RF and microwave is principally of technology. In RF, the product to be heated is placed between the electrodes plates while in microwave, heating occurs within metal chamber such as microwave oven [6].

In an RF heating process, the RF generator produce an electric field between electrodes where the alternating energy causes polarization, and where the molecules in the product continuously reorient themselves to face opposite poles [7]. When an alternating electric field is applied to material, it causes movement of positive ions in the material towards negative regions of electric field and the movement of negative ions towards positive regions of electric field [8]. The movement of ions in this characteristic is referred to as ionic depolarization and is principally resistance heating as found in OH. Heating occurs due to electric field is not static, with polarity continually changing at high frequencies (e.g. 13.56, 27.12 and 40.68 MHz for RF). However, irregardless of the frequency, the continued alternated of polarity in the electrical field leads to the oscillation of ions forwards and backwards in the product with the effect of this being the internal generation of heat within the product by friction of dipolar molecules such as water in a product [8], [9].

The aim of this research was to monitoring the feasibility of the beneficence of RF heating as a primary stage of the small milling process for enzymatic denatured which could be reduce increasing rate of FFA, extensively store will not be problem of milling process.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

A. Materials

The oil palm fruits were collected from Songkla and nearby. The experiments conducted within 24 hrs after harvested. The experiments were carried out on 150 g of fruitlets which is detached by slight push of the finger from the bunch.

Attapon Choto is with the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112 Thailand (e-mail: attapon_choto@hotmail.com).

Chakrit Thongurai is with the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112 Thailand (e-mail: chakrit.t@psu.ac.th).

Nattawan Kladaew is with the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112 Thailand (e-mail: nattawan.k@psu.ac.th).

Montep Kiatweerasakul is with the Department of Electricity Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112 Thailand (e-mail: montep.k@psu.ac.th).

B. Radio-Frequency heating

The heating process was carried out by using a RF application unit. It consists of RF generator and RF applicator which matching network and parallel plate electrodes are the major parts of it. The dimension of parallel plate are $16 \times 28 \text{ cm}^2$. The distance from the bottom to the top electrode was 4 cm. The RF generator has operating frequency of 13.56 and 27.12 MHz respectively.

The oil palm fruits were placed between two plate electrodes, then heated by RF unit at 500 watt for 3, 6, 9 and 12 minutes respectively. The temperature and temperature distribution were measured before and after heating by using infrared camera (Model FLIR i3, FLIR Systems, Inc.)

The energy efficiency of RF used in the study was also investigated by comparing the energy provided of RF and following equation:

$$Q_{\text{generated}} = P \times t \quad (1)$$

Where $Q_{\text{generated}}$ is energy generated (kJ), P is transmission power (W) and t is retention time (s).

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{fiber}} + Q_{\text{palm oil}} + Q_{\text{water}} + Q_{\text{vaporization}} \quad (2)$$

Where Q_{total} is total energy absorbed (kJ), Q_{fiber} is energy absorbed of fiber in palm fruit, $Q_{\text{palm oil}}$ is energy absorbed of palm oil (kJ), Q_{water} is energy absorbed of water in palm fruit (kJ) and $Q_{\text{vaporization}}$ is energy of vaporization of water in palm fruit (kJ).

$$\text{efficiency}(\%) = \frac{Q_{\text{total}}}{Q_{\text{generated}}} \times 100\% \quad (3)$$

C. Free Fatty Acid Content of Palm Oil Analysis

The FFA content of extracting oil palm was analyzed according to AOCS Official Method Ca 5a-40 [10].

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Temperature Distribution

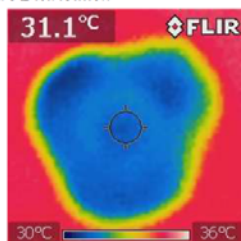


Fig.1. Temperature distribution within oil palm fruits prior to RF heating.

Fig.1. presents the typical internal temperature distribution of oil palm fruits before to heated by RF. The red background of thermal images represents temperature of surroundings, and the blue side demonstrates temperature distribution of oil palm fruits.

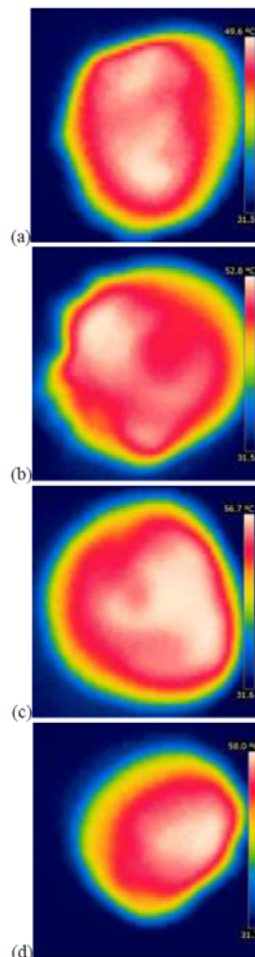


Fig.2. Temperature distribution within oil palm fruits after RF heating at 13.56 MHz. The heating time were (a) 3 minute (b) 6 minute (c) 9 minute and (d) 12 minute respectively

The temperature distribution within oil palm fruits after RF heating at 13.56 and 27.12 MHz are presented in Figs.2-3, respectively. The blue background of thermal images represents temperature of surroundings. A transition from green to pink rings showed that oil palm fruits had a higher internal temperature than at surface due to convective heat transfer between the oil palm fruits and surrounding. Heat conduction within oil palm fruits, resulting from a higher surface temperature next to the surroundings, would generate a temperature gradient inside an oil palm fruits.

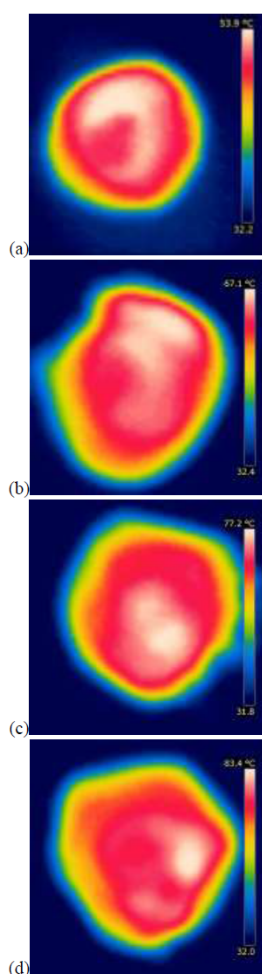


Fig.2. Temperature distribution within oil palm fruits after RF heating at 27.12 MHz. The heating time were (a) 3 minute (b) 6 minute (c) 9 minute and (d) 12 minute respectively

TABLE I
EFFECT OF RF HEATING FREQUENCY AND TIME ON MESOCARP TEMPERATURE OF OIL PALM FRUIT AT 500 WATT

Retention time (min)	Temperature of mesocarp (K)	
	13.56 MHz	27.12 MHz
3	316.9	320.5
6	319.9	329.5
9	325.3	335.5
12	330.0	336.6

B. Sterilization of Oil Palm Fruitlet

The mesocarp temperature of RF heating oil palm fruit was showed in Table I, the result indicated that mesocarp temperature of palm fruits increases correspondingly as frequency and retention time. The maximum temperature reaches 336.6 K by using 27.12 MHz within 12 minutes.

Fig.4. shows the percentage increments of FFA of oil palm fruit that carried out by 13.56 MHz, 500 Watt RF-heated oil palm fruit compared between heating and non-heating. The results shown that increments rate of FFA of oil palm heated by RF lower than non-heating oil palm fruits. However, consider on the percentage increment of FFA to be hardly different between non-heating and heating for temperature at 316.9 K. Therefore temperature lower than 316.9 K cannot halted enzymatic reaction.

Fig.5. present the percentage increments of FFA of oil palm fruit that carried out by 27.12 MHz, 500 Watt RF-heated oil palm fruit. The results indicated that temperature higher than 320.5 K can reduce increment rate of FFA. The increasing of FFA in heated oil palm fruits above 335.5 K rarely increase when compared with non-heating oil palm fruits.

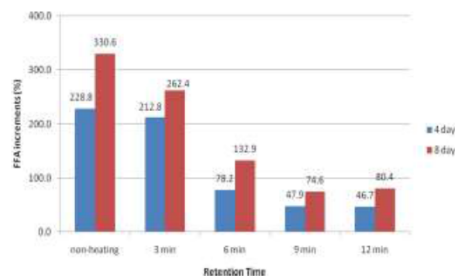


Fig.4.The percentage increments of FFA content at 13.56 MHz RF-heated of oil palm fruitlet.

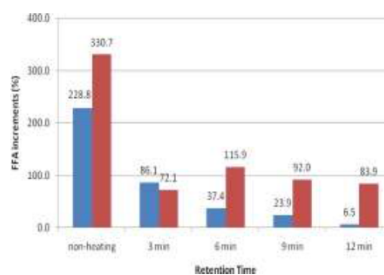


Fig.5.The percentage increments of FFA content at 27.12 MHz RF-heated of oil palm fruitlet.

As a result of FFA data mentioned above, RF sterilization system can be halted enzymatic reaction. It could be retained

International Conference on Biological, Chemical and Environmental Sciences (BCES-2014) Jan. 21-22, 2014 Patong Beach, Phuket (Thailand)
THE EFFICIENCY OF RF HEATING ON PALM FRUITS AT 500WATT

	Retention Time (min)							
	13.56 MHz				27.12 MHz			
	3	6	9	12	3	6	9	12
Energy absorbed of fiber (kJ)	0.92	1.48	1.91	2.473	1.48	2.37	3.07	3.16
Energy absorbed of palm oil (kJ)	1.05	1.67	2.17	2.808	1.68	2.70	3.48	3.58
Energy absorbed Of water in palm fruit (kJ)	15.87	15.87	15.87	15.871	15.87	15.87	15.87	15.87
Energy of vaporization of water in palm fruit (kJ)	8.95	13.47	18.33	26.418	8.95	13.47	18.33	26.42
Total energy absorbed (kJ)	26.80	32.49	38.28	47.57	27.98	34.41	40.75	49.03
Energy generated (kJ)	90.00	180.00	270.00	360.00	90.00	180.00	270.00	360.00
Efficiency (%)	29.78	18.05	14.18	13.21	31.09	19.12	15.09	13.62

oil palm fruit until 4 day, advantages for pressing tarried oil palm fruit.

C. Energy efficiency of RF sterilization

RF heating of oil palm fruits, energy efficiency was generated by the transmission power of the RF and absorbed by oil palm fruits. Table II presents the energy data calculated in experimental.

The results shown that value of energy efficiency decrease as the RF exposure duration increase. The efficiency of RF for 13.56 and 27.12 MHz at duration time 3, 6, 9 and 12 minutes shown in Table II.

IV. CONCLUSION

The present study shows that oil palm fruits can be stabilized by heating oil palm with RF to inactivate enzymatic reaction. In this study, the optimal condition of RF heating in order of interrupting the enzymatic reaction was at 27.12 MHz and 6 minutes. The tested oil palm fruits can be stored for 4 days in ambient condition with the increase of free fatty acid is acceptable. The obtained energy efficiency of RF at this condition was 19.12 %. On the basis of experimental results, it can be showed that RF heating could inhibit the increasing of FFA in oil palm fruits, however this process should be studied further.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Graduate School of the Prince of Songkla University (PSU), Hat Yai. The technical contents presented are supported by the Specialized R&D Center for Alternative Energy from Palm Oil and Oil Crops, as well as from the Department of Chemical Engineering, Faculty of engineering, Prince of Songkla University, and are also deeply appreciated.

REFERENCES

- [1] J. J. Olie, T. D. Tjeng, "The Extraction of Palm Oil," The Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 1974, pp. 29-35.
- [2] M. C. Chow and A. N. Ma, "Processing of fresh palm fruits using microwave," Microwave Power Electromagnetic Energy, vol. 40, no. 3, April 2007, pp. 165-173
- [3] K. Sivasolby, "Palm oil milling technology," Advances in Palm Oil Research, vol. 1, Bangi, 2000, pp. 745-775.
- [4] S. F. Cheng, L. Mohd Nor and C.H. Chuah, "Microwave pretreatment: A clean and dry method for palm oil production," Industrial Crops and Products, vol. 34, no. 1, April 2011, pp. 967-971.
- [5] S. Ryyanen, "Electromagnetic Properties of Food Materials: A Review of the Basic Principles," Journal of Food Engineering, vol. 26, no. 4, 1995, pp.409-429.
- [6] A. K. Datta and P. M. Davidson, "Microwave and radio frequency processing," Journal of Food Science, vol.65, 2000, pp.32-41.
- [7] P. Piyasen, C. Dussault, T. koutchma, H. S. Ramaswamy and G. B. Awuah, "Radio frequency heating of food: principles, applications and related properties-a review," Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 43, 2003, pp. 567-606.
- [8] C. R. Buefler, "Dielectric properties of food and microwave materials," Microwave Cooking and Processing, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993, pp. 46-69.
- [9] F. Marra, L. Zhang and J. G. Lyng, "Radio frequency treatment of food: Review of recent advances," Journal of Food Engineering, vol. 91, 2009, pp.479-508.
- [10] AOCS Official Method Ca 5a-40: Free fatty acids, American Oil Chemists' Society, Boulder, Urbana, 2009.

Attapon Choto was born in Songkhla, Thailand, in 1990. He received the B.Eng. degree in Chemical Engineering from Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, in 2011. He current research interest is RF techniques for agricultural application.

Chakrit Thongurai was born in Prachuaphirikhan, Thailand, in 1955. He received the B.Sc. degree from Chulalongkorn University, Thailand, the D.E.A. degree in chemical engineering from Institute of Chemical Engineering, Toulouse, France, and the D.Ing. in chemical engineering from Institute of Chemical Engineering, Toulouse, France.

He joined the Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, as an Associate Professor. His current research interest is biodiesel.

Nattawan Kladkeaw was born in Ratchaburi, Thailand, in 1981. She received B.Eng. from Mahidol University, Thailand, and PhD in petrochemical technology from Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, Thailand.

She joined the Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, as a lecturer. Her current research interest is CO₂ capture and renewable energy.

Montep Kiatweerasakul was born in Bangkok, Thailand, in 1962. He received B.Eng. and M.E. degrees in Electrical Engineering from Prince of Songkla University, Thailand in 1985 and 1991, respectively, the M.Phil. degree in Electronic and Electrical Engineering from the University of Leeds, UK, in 2000, the Ph.D. degree in Electronic and Computer Engineering from Brunel University, UK, in 2004.

Since April 1985, he has been a lecturer at the Department of Electrical Engineering, Prince of Songkla University. His interests include RF and microwave system design, RFID, electronic measurement instrument, and microcontroller applications.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นาย อรรถพล โชโต	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5410120111	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุน DOE ระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พ.ศ. 2555

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Attapon Choto, Chakrit Thongurai, Nattawan Kladkaew and Montep Kiatweerasakul. 2014. Sterilization of Oil Palm Fruit Using Radio-Frequency Heating. 2014. International Conference on Biological, Chemical and Environmental Sciences (BCES-2014), Jan. 21-22, 2014, Patong Beach, Phuket, Thailand.