

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของอุณหภูมิ เวลาการทอด และความถี่คลื่น ต่อการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก
Effect of Temperature, Frying Duration and Frequency on Ultrasonic Frying



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **61728**
วันเดือนปี **21 ก.ค. 2549**

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของอุณหภูมิ เวลาการทอด และความถี่คลื่น ต่อการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค
Effect of Temperature, Frying Duration and Frequency on Ultrasonic Frying



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของอุณหภูมิ เวลาการทอด และความถี่คลื่น ต่อการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

Effect of Temperature, Frying Duration and Frequency on Ultrasonic Frying

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------|--------------|---------------|
| 1. นายไกรวุฒิ | คล้ายแจ้ง | รหัส 45015719 |
| 2. นายพิเชษฐ | คันจรรย์นนท์ | รหัส 45015732 |
| 3. นายสุรเชษฐ์ | ประดับมุก | รหัส 45015753 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. มาฤดี พ้องพิพัฒน์พงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. มรรคา จิโนรส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิ เวลาการทอด และความถี่คลื่น ต่อการทอดด้วยคลื่น อุลตราโซนิค		
นักศึกษา	นายไกรวุฒิ	คล้ายแจ้ง	รหัสประจำตัว 45015719
	นายพิเชษฐ	ตันจรรย์านนท์	รหัสประจำตัว 45015732
	นายสุรเชษฐ์	ประดับมุข	รหัสประจำตัว 45015753
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร		
ปีการศึกษา	2547		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มาฤดี	ห้องพัฒนพงศ์	
	อ. มนุรดา	จิโนรส	

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันได้มีการนำคลื่นเสียงอุลตราโซนิคมาประยุกต์ใช้ในงานอาหารหลายด้านด้วยกัน อาทิเช่น การสเตอริไรซ์ การสกัด การเกิดผลึก เป็นต้น แต่ในการนำมาประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการทอด นั้นยังมีการศึกษาน้อยมาก และจากโครงการวิจัยที่เกี่ยวกับเรื่องการทอดที่ผ่านมา ได้ให้ข้อมูลที่บ่งชี้ ถึงความเป็นไปได้ของการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิ ความถี่คลื่น และเวลา ต่อการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคที่สืบต่อจาก โครงการวิจัยที่ผ่านมา ในปีที่แล้ว การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดค่าตัวแปรออกเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย 27 การทดลอง ซึ่ง ประกอบด้วย การทอดแบบไม่ใช้คลื่นและการทอดรวมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิค ที่ความถี่ 28 kHz และ 40 kHz, อุณหภูมิที่ 140 °C, 170 °C และ 200 °C และระยะเวลาการทอด 2.5 นาที, 5 นาทีและ 7.5 นาที ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ แป้งผสมของแป้งสาลี, แป้งข้าวเจ้าและ แป้ง โกลิอัตราส่วน 1:1:1 แป้งผสมที่ผ่านการทอด ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณ ความชื้น, ปริมาณน้ำมัน, อัตราส่วนการขยายตัว และการเปลี่ยนแปลงสี จากการศึกษาพบว่า การทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิคมีผลให้ความชื้นของแป้งทอดลดลง, ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นและอัตรา ส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรมีค่ามากกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่น ส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าสีนั้น มีค่าน้อยกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่น นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการทอด นานขึ้นจะทำให้ค่าความชื้นที่ได้มีค่าลดลง ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น, อัตราส่วนการขยายตัวเชิง ปริมาตร และการเปลี่ยนแปลงของค่าสีมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Effect of Temperature, Frying Duration and Frequency on Ultrasonic Frying	
Student	Krivut Klaijang	Pichet Tunjariyanon
	Surachet Padubmok	
Field	Food Engineering	
Department	Food Engineering	
Faculty	Engineering	
Advisor	Asst. Prof. Dr. Maradee Phongpipatpong	Miss. Maturada Jinorose

ABSTRACT

At present, several applications of ultrasonic technology have been employed in food processing areas, such as sterilization, extraction and crystallization, however little has been done for frying. There was only study done last year on frying and indicated the possibility of ultrasonic frying. The aim of this study is to investigate the effect of temperature frying duration and ultrasonic frequency level on the characteristics of fried product. Mixed flours from wheat flour, rice flour and koki brand in the ratio of 1:1:1 were used as sample. The products were analyzed for their characteristics including moisture content, oil uptake, expansion ratio and color. It was found that ultrasonic frying resulted in a decreased in moisture content and L*-value of the product, and an increased in the oil uptake and expansion ratio, which yielded the higher values than the traditional frying. The higher temperature and longer during frying time caused an increase in oil uptake, expansion ratio and L-value of the product, but a decrease in moisture content.

กิตติกรรมประกาศ

จะไม่เป็นการเกินไปที่จะกล่าวคำขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับท่านอาจารย์มาฤดี ผ่อง
พิพัฒน์พงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและได้ช่วยเหลือเรื่องต่างๆ ทั้งด้านหลักการและวิธีการ รวมถึง
เป็นห่วงเป็นใยในเรื่องความปลอดภัยในชีวิตของผู้ทำการวิจัย ถึงแม้ในหลายๆ ครั้ง ผลงานจะไม่
เป็นไปตามเป้าหมายที่ได้วางเอาไว้ แต่ท่านอาจารย์ก็ไม่เคยเพิกเฉยหรือเมินหน้าหนี แต่กลับเต็มใจ
และทุ่มเทในการที่จะแก้ไขปัญหามจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ส่วนอาจารย์อีกท่านที่จะขาด
เสียไม่ได้เลยก็คือท่านอาจารย์มธุรดา จิโนรส ถึงแม้ท่านอาจารย์จะเพิ่งเข้ามาอยู่ในภาควิชาได้ไม่นาน
แต่สิ่งที่ได้ทำให้กับนักศึกษา ทั้งใ ว้านให้คำติชมหรือแนะนำในวิธีดำเนินการในด้านต่างๆ โดยไม่
เคยปฏิเสธ ทำให้เหมือนกับว่าท่านอาจารย์ได้เพิ่มความอบอุ่นในชีวิตให้มากยิ่งขึ้นตลอดเวลาที่อยู่ใน
สถาบันนี้ และขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน รวมถึงบุคคลากรทุกฝ่ายในภาควิชา ที่ได้ช่วย
เหลือและเอาใจใส่ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณนันท์ ภักดิ์ จิตขจรวิทย์ กลีโลไนน์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง
อุตสาหกรรมโทรคมนาคมตลอดการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่ได้ให้ความห่วงใย รวมถึงเอาใจใส่ต่อ
ชีวิตน้อยๆ ด้วยดีตลอดมา และขอขอบพระคุณหอสมุดกลางรวมทั้งห้องสมุดวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่มีความสำคัญยิ่งใน
การทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	IV
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	V
กิตติกรรมประกาศ	VI
สารบัญ	VII
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XI

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร	
2.1 การทอด	3
2.1.1 วิธีการทอด	4
2.1.2 ระบบการทอด	5
2.1.3 สิ่งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทอด	7
2.1.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพของอาหารทอด	12
2.1.5 ปัจจัยที่ทำให้อาหารรมน้ำมันมากในระหว่างการทอด	13
2.1.6 ผลกระทบต่ออาหาร	13
2.1.7 ไขมันและน้ำมัน	14
2.2 กลิ่นอุตสาหกรรม	19
2.2.1 ทฤษฎีกลิ่น	20
2.2.2 การเกิดกลิ่นอุตสาหกรรม	21
2.2.3 กลิ่นทรานส์-2-นonenal	21
2.2.4 กลิ่น 2-acetyl-1-pyrroline	22
2.2.5 กลิ่น 2-acetyl-3-pyrroline	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6 ประโยชน์การใช้งานของคลื่นอัลตราโซนิค	25
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 อุปกรณ์และการทดลอง	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	27
3.2 การวางแผนการทดลอง	28
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ	29
3.4 ขั้นตอนการทอด	30
3.5 การวัดค่าคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวอย่างอาหารก่อน และหลังการทอด	30
3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวอย่างอาหาร	32
3.6.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น	32
3.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น (Oil Uptake)	32
3.6.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนการขยายตัวของแป้ง (Expansion Ratio)	35
3.6.4 การวิเคราะห์ค่าสี	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลอง	38
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองที่สภาวะต่างๆ ตามการวางแผนการทดลอง	39
4.2.1 ผลการทดลองต่อค่าความชื้นของแป้งหลังทอด	40
4.2.2 ผลการทดลองต่อค่า % ความชื้นที่ลดลง	41
4.2.3 ผลการทดลองต่อค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น	42
4.2.4 ผลการทดลองต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร	43
4.2.5 ผลการทดลองต่อค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด	45
4.2.6 ผลการทดลองต่อค่าความเปลี่ยนแปลงของ L^*	46
4.3 ผลของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ทอด	48
4.3.1 ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์แป้งทอด	48
4.3.2 ค่า % ความชื้นที่ลดลงที่ได้	49
4.3.3 ค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่ได้	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4 ค่าความแตกต่างของค่า L^* ที่ได้	51
4.3.5 ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นที่ได้	52
4.3.6 ค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่ได้	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 ปัญหาที่พบขณะทำการทดลอง	54
5.3 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	57
ภาคผนวก ข.	64
ภาคผนวก ค.	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความหนืดและความถ่วงจำเพาะของ fat บางชนิด	15
ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิอุณหภูมิตั้งที่เป็นก้อนของน้ำมันและไขมันชนิดต่างๆ	15
ตารางที่ 2.3 แสดงจุดที่เป็นก้อน จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมันต่างๆ	16
ตารางที่ 3.1 แผนการออกแบบการทดลอง	28
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าของตัวอย่างแป้งก่อนทอด	38
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าของตัวอย่างแป้งหลังทอด	39
ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองค่าความชื้นแป้งก่อนทอด	65
ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองค่าความชื้นแป้งหลังทอด	65
ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร	67
ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองหาค่าสีก่อนทอด	70
ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด	71
ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนักก่อนทอดและหลังทอด	78
ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าปริมาณความชื้น	81
ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่า % ความชื้นที่ลดลง	82
ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น	83
ตารางที่ ค.4 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร	84
ตารางที่ ค.5 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด	85
ตารางที่ ค.6 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าความแตกต่างของ L*	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การส่งผ่านมวลและความร้อน	5
รูปที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการทอดแบบน้ำมันท่วม	8
รูปที่ 2.3 กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพอรุน	9
รูปที่ 2.4 ช่วงความถี่ต่างๆ ของคลื่นอุลตราโซนิค	19
รูปที่ 2.5 เมกคาอนิกลทรานสดิวเซอร์	21
รูปที่ 2.6 เปียโซทรานสดิวเซอร์	22
รูปที่ 2.7 แสดงปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก โดยขึ้นสารทำจากแร่ควอทซ์	25
รูปที่ 3.1 การเตรียมอุปกรณ์การทอด	30
รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการทดลอง	31
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความชื้นที่การทอด 140°C	40
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความชื้นที่การทอด 170°C	40
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความชื้นที่ลดลง ที่การทอด 170°C	41
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความชื้นที่ลดลง ที่การทอด 7.5 นาที	42
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นที่การทอด 2.5 นาที	42
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นที่การทอด 7.5 นาที	43
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่การทอด 170°C	43
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่การทอด 2.5 นาที	44
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่การทอด 7.5 นาที	44
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่การทอด 140°C	45
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของ L^*	46
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นจากการทดลอง กับค่าความชื้นจากสมการ (2)	48
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่ลดลงจากการทดลอง กับค่าความชื้นที่ลดลงจากสมการ (3)	49
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดจากการทดลอง กับค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดจากสมการ (4)	50
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ L^* จากการทดลอง กับค่าความแตกต่างของ L^* จากสมการ (5)	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจากการทดลอง กับค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจากสมการ (6)	52
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร จากการทดลองกับค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรจากสมการ (7)	53
รูปที่ ก.1 เครื่องให้ความร้อนแบบขดลวดไฟฟ้า	58
รูปที่ ก.2 เครื่องกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิก	58
รูปที่ ก.3 เครื่องผสมแป้ง	58
รูปที่ ก.4 data logger	59
รูปที่ ก.5 เทอร์โมคัปเปิล	59
รูปที่ ก.6 เครื่องชั่งน้ำหนักหน่วยกรัมทศนิยม 4 ตำแหน่ง	59
รูปที่ ก.7 ตู้อบ	60
รูปที่ ก.8 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์	60
รูปที่ ก.9 นาฬิกาจับเวลา	60
รูปที่ ก.10 ภาชนะสเตนเลส ตะแกรง ที่คืบ	61
รูปที่ ก.11 เครื่องรีดแป้ง	61
รูปที่ ก.12 อุปกรณ์ตัดแป้ง	61
รูปที่ ก.13 เครื่องวัดค่าสี (Colorimeter)	62
รูปที่ ก.14 เครื่องปั่น	62
รูปที่ ก.15 ถ้วยรอง ภาชนะอลูมิเนียม	62
รูปที่ ก.16 โถดูดความชื้น (Desicator)	63
รูปที่ ก.17 Zipper Bags	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การทอดเป็นการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากอาหารทอดจะให้คุณลักษณะเฉพาะในด้านกลิ่น รส และเนื้อสัมผัส กรรมวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก และจัดเป็นการถนอมอาหารอย่างหนึ่ง การทอดอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำมัน ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังอาหารเพื่อไปทำลายเอนไซม์และ ไล้ความชื้นในอาหาร เป็นผลให้ค่า Water Activity (a_w) ในอาหารลดลงด้วย อาหารจึงเกิดการเสื่อมเสียได้ช้าลง โดยทั่วไปการทอดจะมี 2 แบบ คือ การทอดแบบน้ำมันท่วม (Deep-fat frying) และการทอดแบบน้ำมันตื้น (Shallow frying) การทอดแบบน้ำมันท่วมมีข้อดีคือจะมีการนำความร้อนที่บริเวณผิวหน้าอาหาร ใกล้เคียงกันทุกด้าน ทำให้สีของอาหารที่ทอดเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ ส่วนการทอดแบบน้ำมันตื้นจะเหมาะสำหรับอาหารที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกนั้นกำลังเป็นที่สนใจและมีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ เช่น การสกัด การฆ่าเชื้อ การแตกผลึก เป็นต้น เนื่องจากการสั่นสะเทือนของคลื่นอุลตราโซนิกทำให้เกิดการกระตุ้นการถ่ายเทพลังงานและมวลดีขึ้น แต่การใช้คลื่นอุลตราโซนิกกับการทอดอาหารยังคงมีน้อยมาก จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า มีเพียงงานของจริยาและคณะ (2546) ซึ่งได้ทดลองการทอดไส้กรอกพร้อมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิก โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการทอด 170-190 °C และได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการทอดแบบไม่ใช้คลื่นพบว่า การทอดร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า นอกจากนั้นอัตราเร็วในการลดลงของค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นเร็วกว่า แต่ทว่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นมีมากกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของน้ำมันนั้นเกิดจากผลกระทบบรรยากาศระหว่างอุณหภูมิและความถี่ของคลื่นที่ใช้ จากการศึกษาสรุปว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำลงจะมีผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำมันมีแนวโน้มที่ลดลงดังนั้นในโครงการนี้จึงสนใจศึกษาการทอดร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกโดยใช้ช่วงอุณหภูมิต่างไปจากการทอดทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบการทอดแบบไม่ใช้คลื่นและการทอดร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิก
2. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และความถี่คลื่นที่ใช้ ต่อการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่คลื่นความถี่ 28 kHz และ 40 kHz ในการทอด

2. ใช้อุณหภูมิในการทอดที่ 140 – 200 °C
3. ใช้แป้งผสมเป็นตัวอย่างในการทอด
4. ใช้น้ำมันปาล์มเป็นตัวกลางในการทอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 การทอด [1]

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนที่มีการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางให้ความร้อนไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว และยังเป็นกรรมวิธีที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภคของอาหาร วัตถุประสงค์รองคือ การถนอมรักษาอาหาร โดยการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ เอนไซม์ และลดค่า Water activity ที่ผิวอาหารหรือตลอดชิ้นอาหาร ถ้าเป็นการทอดอาหารชิ้นบางๆ ความชื้นของอาหารหลังการทอดจะเป็นตัวกำหนดอายุของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งมีความชื้นอยู่ภายใน เช่น โคนัท ปลา อายุการเก็บรักษาเนื้อไก่ชุบแป้ง หรือหุบขนมปังป่นทอดจะสั้นเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของน้ำและน้ำมันในระหว่างการจัดเก็บรักษา จึงไม่นิยมผลิตอาหารเหล่านี้ในระดับอุตสาหกรรมและกระจายไปยังร้านค้าย่อย แต่นิยมผลิตในร้านค้าย่อยมากกว่า อาหารเหล่านี้สามารถเก็บรักษาโดยการแช่เย็น ได้นานหลายวัน อาหารซึ่งทอดให้แห้งอย่างทั่วถึง เช่น มันฝรั่งทอดกรอบ ขนมขบเคี้ยวประเภทข้าวโพดหรือมันฝรั่ง อาหารกึ่งสำเร็จรูปโดยการอัดผ่านเกลียวจะมีอายุการเก็บรักษานานถึง 12 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง และรักษาคุณภาพได้โดยการใช้บรรจุภัณฑ์และสภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสม

เมื่อบางอาหารลงในน้ำมันร้อน อุณหภูมิที่ผิวหน้าของอาหารจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและน้ำเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ผิวหน้าจึงเริ่มแห้ง แนวระนาบการระเหยจะเคลื่อนที่เข้าไปในอาหารและเกิดเปลือกนอกขึ้น อุณหภูมิที่ผิวอาหารจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันร้อน และอุณหภูมิภายในจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ถึง 100°C ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันและอาหารและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวจะเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทความร้อน ค่าการนำความร้อนของอาหารเป็นตัวควบคุมอัตราการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในอาหาร เปลือกนอกของอาหารทอดมีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งประกอบด้วยท่อแคปิลารีขนาดต่างๆ ความชื้นจะเคลื่อนที่ผ่านผิวอาหารและฟิล์มบางๆ ของน้ำมัน ความหนืดและความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำมันเป็นตัวกำหนดความหนาของฟิล์มซึ่งมีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลและความร้อน ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างความชื้นภายในอาหารและในน้ำมันจะเป็นตัวขับเคลื่อนความชื้นคล้ายกับในกรณีการทำแห้งด้วยความร้อน

ความแตกต่างระหว่างการทอดและการแปรรูปด้วยวิธีอื่นๆ มีดังนี้

1. ตัวกลางส่งผ่านความร้อนที่ใช้ คือ น้ำมัน โดยจะมีผลทำให้องค์ประกอบและลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่เหมือนกับกรรมวิธีการแปรรูปด้วยวิธีอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอด จะมีลักษณะทางกายภาพที่กรอบกว่าลักษณะทางกายภาพของการแปรรูปด้วยวิธีอื่น

3. การแปรรูปด้วยการทอดนั้นจะใช้เวลาที่สั้น เนื่องจาก

3.1 ลักษณะของอาหารที่ใช้ในการทอดนั้นมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักน้อย

3.2 อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการทอดมีความแตกต่างจากอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทอดมาก

ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการทอด

1. ชนิดของอาหาร
2. อุณหภูมิของน้ำมัน
3. วิธีทอดว่าเป็นแบบน้ำมันตื้น (Shallow frying) หรือน้ำมันท่วม (Deep – fat frying)
4. ความหนาของชิ้นอาหาร
5. ความต้องการในการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภค

อาหารซึ่งมีความชื้นอยู่ภายในจะถูกทอดจนกว่าจุดร้อนข้างที่สุดของอาหารจะได้รับความร้อนเพียงพอที่จะทำให้ลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนหรือเพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านประสาทสัมผัสได้ตามที่ต้องการ ปัจจัยเหล่านี้สำคัญมากสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์หรืออาหารอื่นๆ ที่อาจจะมีเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคอาศัยอยู่ได้

การคำนึงถึงปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์และความต้องการของผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิในการทอด การทอดที่อุณหภูมิสูงจะช่วยลดเวลาและช่วยเพิ่มอัตราการผลิต อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงจะเร่งให้น้ำมันกลายเป็นกรดไขมันอิสระซึ่งจะเปลี่ยนแปลงความหนืด สี และกลิ่นของน้ำมัน ทำให้ต้องเปลี่ยนน้ำมันบ่อยขึ้น จึงเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายสำหรับน้ำมัน การสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ในข้อที่ 2 เกิดจากการเดือดของอาหารอย่างรุนแรงที่อุณหภูมิสูงและการสูญเสียน้ำมันที่ติดขึ้นมากับไอน้ำ อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอะโครเลิน (acrolein) ซึ่งเป็นควันสีน้ำตาลเงินบนน้ำมันและทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้

ปัจจัยอีกข้อในการกำหนดอุณหภูมิในการทอดคือลักษณะความต้องการของผลิตภัณฑ์ การใช้อุณหภูมิสูงสำหรับทอดอาหารทำให้มีเปลือกนอกแห้งและมีความชื้นภายใน การเกิดเปลือกนอกอย่างรวดเร็วจะเป็นการปิดกั้นไม่ให้น้ำเคลื่อนที่ออกไปจากอาหาร และลดอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังด้านในอาหาร ชิ้นอาหารจะยังคงรักษาเนื้อสัมผัสที่นุ่มชื้นและกลิ่นรสของสารประกอบในอาหารไว้ได้ การทำให้อาหารแห้งโดยการทอดจะใช้การทอดที่อุณหภูมิต่ำกว่า จึงทำให้ระบวนการระเหยเคลื่อนที่ลึกลงไปในอาหารก่อนเกิดเปลือกนอก อาหารจึงแห้งก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงด้านกลิ่น สี ที่รุนแรง

2.1.1 วิธีทอด

วิธีการทอดทางอุตสาหกรรมที่สำคัญมี 2 วิธี ซึ่งจำแนกโดยวิธีการถ่ายเทความร้อนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

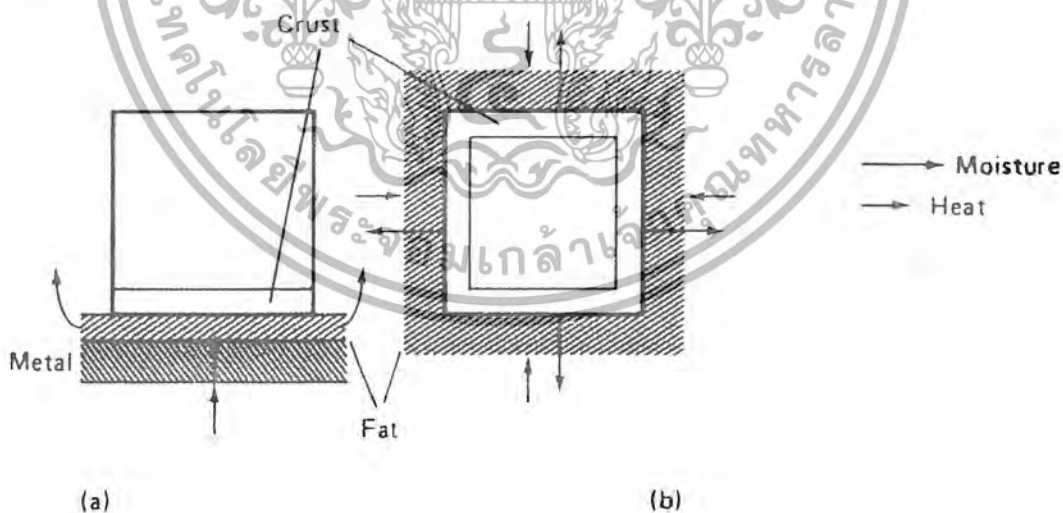
2.1.1.1 การทอดแบบน้ำมันตื้น (Shallow frying)

การทอดแบบน้ำมันตื้นเหมาะสำหรับอาหารที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอน ไช้ เบอร์เกอร์ และพายชนิดต่างๆ ความร้อนจากผิวของกระทะร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำมันบางๆ ไปยังอาหาร ดังแสดงในรูปที่ 2.1 a.

ความหนาของชั้นน้ำมันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของผิวหน้าอาหาร ถ้าชั้นน้ำมันบางฟองไอน้ำเดือดจะทำให้อาหารเคลื่อนที่ขึ้นลงบนผิวร้อนของกระทะ การกระจายความร้อนจึงไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผิวหน้าของอาหาร ที่ทอดแบบน้ำมันตื้นมีสีน้ำตาล ไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามวิธีทอดแบบนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสูง จะอยู่ในช่วงประมาณ $200-450 \text{ W/m}^2\text{K}$

2.1.1.2 การทอดแบบน้ำมันท่วม (Deep – fat frying)

การถ่ายเทความร้อนในการทอดแบบน้ำมันท่วมเป็นทั้งการพาความร้อนในน้ำมันร้อนและการนำความร้อนสู่ภายในอาหาร ผิวอาหารทั้งหมดจะได้รับความร้อนใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดสีและลักษณะภายนอกที่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 b. การทอดแบบน้ำมันท่วมเหมาะสำหรับอาหารทุกรูปปร่าง แต่อาหารที่มีรูปปร่างไม่แน่นอนจะจมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีรูปปร่างแน่นอน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก่อนเกิดการระเหยเท่ากับ $250-300 \text{ W/m}^2\text{K}$ และเพิ่มขึ้นเป็น $800-1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ เนื่องจากเทอเบิลนซ์ของไอน้ำที่หนีออกจากอาหาร อย่างไรก็ตามถ้าอัตราการระเหยสูงเกินไปจะเกิดฟิล์มบางๆ ของไอน้ำอยู่บนผิวอาหารทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง



รูปที่ 2.1 การส่งผ่านมวลและความร้อน [1]

a. การทอดแบบน้ำมันตื้น b. การทอดแบบน้ำมันท่วม

2.1.2 ระบบการทอด [2]

2.1.2.1 ระบบการทอดแบบทอดเป็นช่วงๆ (Batch Frying System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นระบบการทอดที่นิยมใช้กันทั่วไปทั้งในครัวเรือนเอง รวมไปถึงการนำไปใช้ในโรงแรม หรือภัตตาคารเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสาเหตุที่ระบบการทอดนั้นใช้พื้นที่ไม่มากในการในการติดตั้งอุปกรณ์ มีขนาดเล็ก โดยระบบนี้สามารถทอดอาหารได้คราวละน้อยๆ หรือสามารถทำการทอดเป็นชุดๆ ได้ ส่วนปริมาณอาหารที่ใช้ในการทอดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องทอด ปริมาณน้ำมันและความชื้นของอาหาร

2.1.2.2 ระบบการทอดแบบต่อเนื่อง (Continuous Frying System)

เป็นระบบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่มีขนาดการผลิตที่มาก เนื่องจากการทอดในระบบการทอดแบบต่อเนื่องนั้น ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก และมีราคาแพง แต่มีข้อดีคือ สามารถทำการทอดได้ทีละมากๆ อย่างต่อเนื่อง โดยยังสามารถคงคุณภาพของอาหารให้ใกล้เคียงกันได้ เนื่องจากระบบการควบคุมเป็นแบบอัตโนมัติ

ระบบการทอดประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

1. ระบบเครื่องมือและอุปกรณ์ (Mechanical System)

เป็นระบบที่ใช้ในการลำเลียงวัตถุดิบที่จะใช้ในการทอดไปทอดและนำขึ้นมาจากน้ำมัน โดยส่วนใหญ่จะใช้สายพานที่ทำมาจากเหล็กที่ไม่เกิดสนิม โดยมีการเคลื่อนที่ของสายพานที่อาศัยกำลังงานจากมอเตอร์ โดยที่การจัดวางตำแหน่งและลักษณะการทำงานของสายพานจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการทอดแต่ละชนิด

2. ระบบน้ำมัน (Fat System)

จะเป็นภาชนะที่บรรจุน้ำมันสำรองและน้ำมันที่ใช้หมุนเวียนภายในเครื่องทอด โดยการหมุนเวียนของน้ำมันภายในเครื่องทอดจะช่วยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่สม่ำเสมอ

3. ระบบให้ความร้อน (Thermal System)

เป็นระบบที่ให้ความร้อนแก่น้ำมันสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น

3.1 ขดลวดต้านทานไฟฟ้า (Electric Immersion Heating)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนสัมผัสกับน้ำมัน โดยตรง ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูง แต่ไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักเนื่องจากต้นทุนในการใช้ค่าไฟฟ้ามีสูง

3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนโดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากท่อไอน้ำไปยังน้ำมัน วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากไอน้ำที่ใช้ได้มาจากการให้ความร้อนโดยการไต้แก๊สหรือการใช้ น้ำมันเตา ซึ่งมีราคาถูก ทำให้ใช้ต้นทุนต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนต่ำกว่าการใช้ขดลวดต้านทานไฟฟ้า

4. ระบบระบายอากาศ (Hoarding and Ventilation System)

เป็นการดูดอากาศ ไอน้ำ และควันที่ลอยขึ้นมาจากผิวหน้าของเครื่องทอด ช่วยป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำอีกทั้งป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากน้ำมันที่กระเด็นออกมาจากเครื่องทอด และช่วยในด้านความสะอาดของผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงบริเวณที่ติดตั้งเครื่องทอดได้เป็นอย่างดี

5. ระบบควบคุมการทำงาน (Control System)

เป็นระบบการทำงานที่ทำให้สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการ และสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด

2.1.3 สิ่งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทอด

การทอดเป็นกระบวนการการแปรรูปอาหารที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นและลักษณะเนื้อสัมผัสเฉพาะตัว ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดคือ อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) การแทรกซึมของน้ำมัน (Oil Penetration) ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันกับอาหาร (Oil - Food Interactions) และการเสื่อมสภาพของน้ำมัน (Oil Degradation)

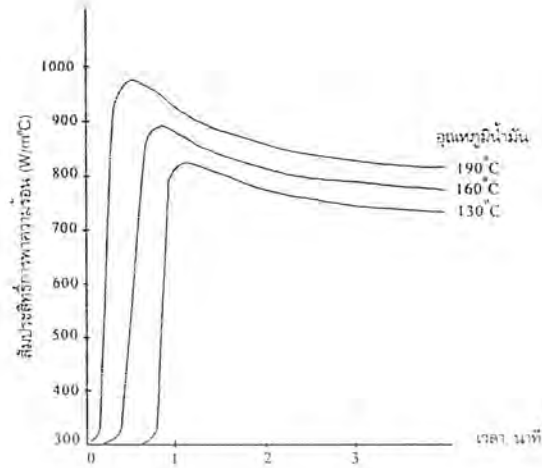
2.1.3.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ การพาความร้อนและการนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนแบบภายใต้การสภาวะไม่คงที่ เกิดขึ้นภายในอาหารที่มีลักษณะแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงความร้อนของอาหาร ได้แก่ ค่าการแพร่ความร้อน การนำความร้อน ความจุความร้อน และความหนาแน่นของอาหาร ส่วนการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเกิดขึ้นระหว่างอาหารแข็งกับน้ำมัน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอาหารแข็งกับน้ำมันมีความยุ่งยากซับซ้อนมากเนื่องจากการเคลื่อนไหวย่างรุนแรงของไอน้ำ (Vapor Bubble) ที่ออกจากชั้นอาหาร ปริมาณของกลุ่มไอน้ำรอบๆ ชั้นอาหารลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากความชื้นในอาหารลดลง ไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้ทำให้การศึกษาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีความยุ่งยาก ในทางปฏิบัติจึงใช้วัสดุที่เป็นโลหะในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เพื่อใช้ในกระบวนการต่างๆ ของการผลิตอาหาร แต่ค่าที่ได้มีความแตกต่างจากการทอดอาหารในน้ำมันจริง

โดยสามารถแยกพิจารณาการถ่ายเทความร้อนออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. การถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางสู่ผิวหน้าอาหาร

เป็นการพาความร้อนจากน้ำมันไปยังผิวหน้าอาหาร ในการทอดแบบน้ำมันตื้นมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงก่อนที่จะมีการระเหยของน้ำเท่ากับ $250 - 300 \text{ W/m}^2\text{K}$ แต่ในขณะที่มีการระเหยฟองอากาศที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการปั่นป่วนในน้ำมัน เป็นผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปมีฟิล์มของไอน้ำอยู่รอบๆ ชั้นอาหารมากขึ้น จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง



รูปที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการทอดแบบน้ำมันท่วม [2]

2. การถ่ายเทความร้อนภายในอาหาร

การถ่ายเทความร้อนภายในอาหาร โดยหลักๆ แล้วเป็นการนำความร้อนแต่ก็อาจมีการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำด้วย ความหนาของ Crust มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นอาหาร หลังจากอุณหภูมิที่ผิวสูงถึง 100°C ประมาณ ได้ว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ในช่วงนี้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มีค่าสูงมีความสำคัญน้อยกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

2.1.3.2 การถ่ายเทมวล

1. การถ่ายเทมวลขึ้น

ในอาหารโดยทั่วไปมีการสูญเสียน้ำออกจากอาหารจาก 2 แหล่ง คือ เป็นการระเหยน้ำออกจาก Crust และการสูญเสียขึ้นเนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) ลดลง การระเหยของน้ำที่เกิดขึ้นภายใน Crust ขณะที่ทอดอาหารในน้ำมันร้อน จะมีการส่งผ่านความร้อนไปยังผิวหน้าอาหาร ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนประกอบด้วยคาปิลลารีที่มีขนาดแตกต่างกันไป เมื่อมีการระเหยน้ำจะระเหยออกจากคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่ก่อน และภายในอาหารมีการเคลื่อนที่ของน้ำมายังผิวหน้าอาหาร อาจมีกลไกหลายรูปแบบโดยสรุปกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพรุนโดยคำนึงถึงเฉพาะการเคลื่อนที่ของน้ำภายในช่องว่างของโครงสร้างของสารดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวผ่านรูพรุนเนื่องจากแรงคาปิลลารี เมื่อปริมาณน้ำในอาหารลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านคาปิลลารีและรูเปิดเล็กๆ อาจเกิดขึ้นภายใต้สภาพไอเป็นส่วนใหญ่

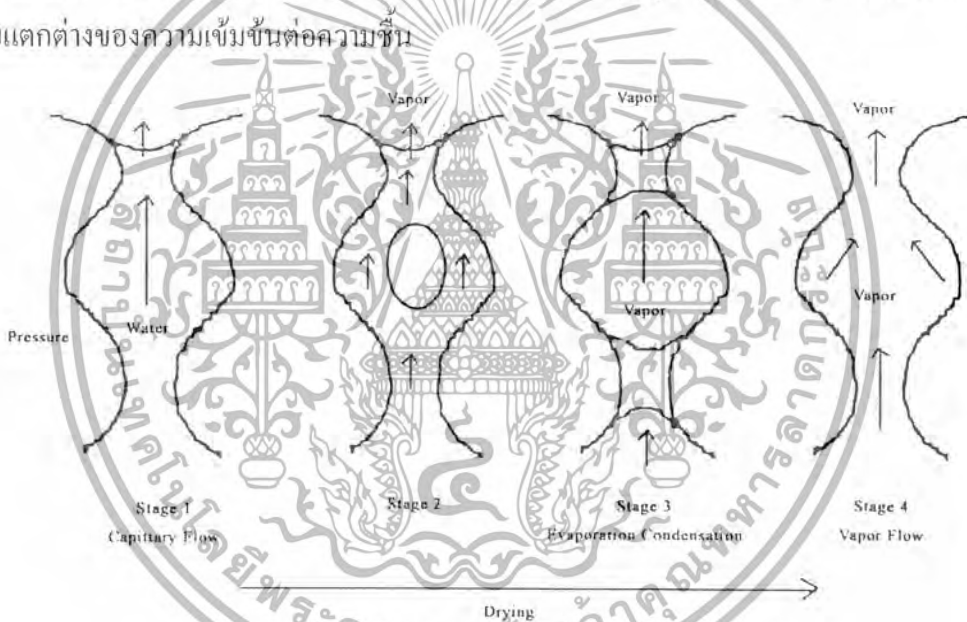
2. การแพร่ของของเหลวเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นภายในชั้น

อาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การแพร่ของไอน้ำภายในช่องว่างของอาหารเกิดจากความแตกต่างของความดันไอ และน้ำจะระเหยกลายเป็นไอ

กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพอรุน อาจอธิบายได้ดังรูปที่ 2.3 ในขั้นตอนแรกการถ่ายเทของน้ำจะอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งเกิดจากการแพร่ออกสู่ภายนอก เนื่องจากความเข้มข้นที่ต่างกัน เกิดเป็นช่องว่างอากาศภายในรูพอรุนแทนที่ความชื้นที่สูญเสียไป ระหว่างนี้การถ่ายเทของน้ำจะถูกดึงเข้าไปด้วยแรงดึงผิวเกาะไปตามผนังของรูพอรุน จากนั้นจะมีน้ำในรูพอรุน ทั้งในสภาวะของเหลวและไอ ไอน้ำบางส่วนจะถูกควบแน่นเป็นของเหลวที่บริเวณคอขวดของรูพอรุน ในขั้นตอนที่ 3 น้ำบางส่วนจะระเหยกลายเป็นไอและบางส่วนเคลื่อนที่เกาะไปตามผนังจนกระทั่งเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายที่น้ำระเหยและเคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำ จากลักษณะการถ่ายเทของไอน้ำในวัสดุพอรุนเห็นได้ว่าไม่มีทฤษฎีใดทฤษฎีหนึ่งที่อธิบายได้ครอบคลุมกระบวนการทั้งหมดได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นต่อความชื้น



รูปที่ 2.3 กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพอรุน [2]

การสูญเสียน้ำอีกส่วนหนึ่งเนื่องมาจากความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง เช่น ในกรณีให้ความร้อนแก่ชิ้นเนื้อด้วยอุณหภูมิและเวลาระดับหนึ่ง พบว่ามีการเสื่อมสภาพของโปรตีน (Protein denaturation) โดยการจับตัวกันทำให้น้ำถูกบีบตัวออกมาภายนอก แต่ถ้ามีส่วนผสมที่เป็นแป้งประกอบอยู่ด้วย น้ำจะถูกดูดซับด้วยส่วนผสมเหล่านี้ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงที่อุณหภูมิสูง

2. การดูดซับของน้ำมัน

กลไกการถ่ายเทน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยังมีความเข้าใจน้อยมาก แต่ก็มีงานวิจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษาและให้ข้อสังเกตไว้มากมาย น้ำมันเข้าไปในอาหาร โดยไปแทนที่ในช่องว่างระหว่างเซลล์และตามผนังเซลล์ แต่ไม่ได้อธิบายว่าเกิดขึ้นได้อย่างไรและเมื่อไหร่ ความพรุนของ Potato chips เป็นเหตุให้อินทรีย์มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนจากน้ำมันที่อุณหภูมิสูง ไขมันบางส่วนที่ถูกกักอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่อขึ้น และเมื่อไขมันเคลื่อนที่ออกไป น้ำมันจึงเข้าไปแทนที่ เมื่อทอดอาหาร ความชื้นในอาหารจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำเมื่อผิวหน้าแห้งและมีเกรเดียนต์ความดัน จึงทำให้น้ำมันที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าเข้าสู่ภายในได้ตามผิวหน้าที่ถูกทำลาย เมื่อนำอาหารออกจากเครื่องทอดได้มีผู้ใช้ ESEM (Environment Scanning Electron Microscope) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ tortilla chips ระหว่างการทอด พบว่ามีน้ำมันเกาะตัวที่ผิวหน้า โดยทันทีที่อาหารสัมผัสกับน้ำมัน และแพร่เข้าไปในอาหาร และได้เสนอแนะว่าถ้าหากนำอาหาร chips ออกจากเครื่องทอดขณะที่อาหารยังเพิ่มอุณหภูมิอยู่ น้ำมันถูกดูดซับเข้าไปเพียง 15% เท่านั้น ส่วนที่เหลือจับตัวอยู่ที่ผิวหน้าและเข้าสู่ภายในเมื่ออาหารเย็นตัวลง แรงตึงผิวมีผลต่อการดูดซับของน้ำมันในการทอดมันฝรั่ง ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก capillary force

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาถึงการดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์นั้น จะกล่าวถึงกลไกที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. การเข้าไปแทนที่น้ำที่ระเหยไป (replacement of moisture) มีงานวิจัยหลายงานที่สนับสนุนว่าน้ำมันแทนที่ความชื้นที่สูญเสียไประหว่างการทอด เมื่อเริ่มกระบวนการทอดที่ผิวนอกของอาหารที่ประกอบด้วยน้ำอิสระและ bound water เมื่ออาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นเริ่มระเหยและความเข้มข้นของน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ผิวนอกเริ่มแห้งและเกิด Crust ความชื้นด้านในจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำออกจากอาหารตามคาปีลลารีและช่องของอาหาร น้ำมันจะเกาะและเข้าสู่อาหารตามช่องว่างนั้น โดยปริมาณน้ำมันที่ดูดซับมีสัดส่วน โดยตรงกับความชื้นที่ระเหยไป

2. กลไกการสูญเสียความชื้นสามารถสรุปได้ดังนี้ เมื่ออุณหภูมิของน้ำในอาหารสูงถึงจุดเดือด เซลล์เหล่านี้จะถูกทำลายทำให้เกิดช่องว่างในอาหาร น้ำมันจะถูกดูดซับเข้าช่องว่างเหล่านี้ น้ำมันเพิ่มขึ้น โดยการลดความดันภายในเนื่องจากการสูญเสียความชื้น และหลังจากทำให้เย็นเนื่องจากการเกิดสูญญากาศจากการควบแน่นของไอน้ำ

3. การเกิด Crust formation นั้นมีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของน้ำมันเป็นอย่างมาก เนื่องจากพบว่าน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหาร โดยส่วนใหญ่มักพบในรูปของ Crust

4. Interfacial tension เมื่อเริ่มจุ่มชิ้นอาหารลงในน้ำมัน น้ำมันที่เกาะอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของอาหารมี interfacial tension ระหว่างผิวหน้าอาหารกับกับน้ำมันมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำมันด้วยกันเอง เมื่อเวลาผ่านไป interfacial tension ระหว่างอาหารกับน้ำมันจะลดลงจนต่ำกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำมันกับน้ำมัน น้ำมันที่ผิวหน้าอาหารจึงเคลื่อนตัวเข้าไปภายใน

5. ความเป็นรูพรุน (Porosity) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับของน้ำมันของผลิตภัณฑ์ ความเป็นรูพรุนเริ่มต้นของอาหารมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ และในระหว่างการทอดทั้งค่าความพรุนและค่าการดูดซับน้ำมันจะเพิ่มขึ้นและมีผลต่อกันและกัน

6. Capillary rise เป็นสัดส่วน โดยตรงกับ interfacial tension และ contact angle และผกผันกับ porosity

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของน้ำมันประกอบด้วย

1. คุณภาพของน้ำมันและองค์ประกอบของน้ำมัน องค์ประกอบในที่นี้หมายถึง by-products และ residues ที่ถูกดูดซับเข้าไป การดูดซับของน้ำมันและการเสื่อมสภาพของน้ำมันมากขึ้นเมื่อเวลาการทอดเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง น้ำมันสกัดจากอาหารทอดมีปริมาณ โพลีเมอร์ที่สูงกว่าน้ำมันที่อยู่ในเครื่องทอด surface-active agents ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดออกซิเดชัน มีผลต่อการดูดซับน้ำมัน และ surfactants บางชนิดที่เกิดขึ้นในน้ำมันร้อนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำมันกับอาหาร โดยไปลดแรงตึงผิวของ immiscible materials แต่จะพบในน้ำมันที่เสื่อมคุณภาพเท่านั้น

2. อุณหภูมิในการทอด เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น มีผลให้ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับลดลง แต่บางงานวิจัยก็รายงานว่าปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำมัน การทอดที่ความดันสูงทำให้การดูดซับน้ำมันน้อยลง เมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อมวลเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์เป็นเส้นตรง ถ้าหากผิวหน้าของอาหารขรุขระซึ่งเป็นกรรเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้การดูดซับน้ำมันมากขึ้น

3. ปริมาณความชื้น มีงานวิจัยหลายชิ้นให้ข้อสรุปว่ามีปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปเป็นสัดส่วน โดยตรงกับรากที่สองของเวลาที่ใช้ทอด ถ้าวัตถุดิบมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำมันสูง ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นและปริมาณน้ำมันเป็นเส้นตรงในผลิตภัณฑ์ Potato chips ปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันที่ดูดซับ แต่งานวิจัยอื่น ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ เพราะเนื่องจากมีการเติม Additive บางชนิดลงในอาหาร เช่น Alginates และ cellulose มีผลให้การดูดซับน้ำมันและการสูญเสียความชื้นลดลง

4. องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันเริ่มต้นสูง มีการดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์มาก ยกเว้นผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อ ปลา การเติมปริมาณ โปรตีนจากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์ โคนัทสามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้ แต่จะมีจุดวิกฤตอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าเติมมากกว่าค่านี้ มีผลทำให้การดูดซับน้ำมันเกิดขึ้นได้ การเตรียมมันฝรั่งในสารละลายเกลือร้อนสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การเตรียมตัวอย่างก่อนการทอด การลวกหรือการลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นของอาหารก่อนการทอด ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำมันในอาหารลดลง การล้างด้วย oil containing emulsifier ตามด้วยการใช้ไอน้ำ ทำซ้ำๆ กันหลายๆ ครั้ง ช่วยลดการดูดซับของน้ำมันได้ การแช่แข็งและการอบแห้งบางส่วน (Predrying) จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณการดูดซับน้ำมันน้อยลงจากการทำแห้งแบบเยือกแข็งทำให้การดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้น

6. Surface Treatment and Interfacial Tension การเคลือบผิวอาหารด้วย Hydrocolloid จะช่วยยับยั้งการดูดซับน้ำมันในระหว่างการทอดได้ การชุบแป้ง (Batter และ Breading) มีผลต่อการดูดซับน้ำมันของอาหาร เช่น ปลาชุบแป้งจะดูดซับน้ำมันได้น้อยกว่าปลาไม่ชุบแป้ง เนื่องจากแป้งจะช่วยลดการสูญเสียไอน้ำ

7. Gel Strength and Crust โครงสร้างอาหารที่สำคัญมีผลต่อการดูดซับน้ำมัน Gel Strength ที่แข็งแรง จะช่วยลดการดูดซับน้ำมันได้ เนื่องจากเป็นตัวกั้นการเคลื่อนที่ของน้ำ Crust ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดจะเป็นที่สะสมของน้ำมัน

8. ความพรุน มีความสัมพันธ์กับการดูดซับน้ำมันของอาหารทอดโดยตรงเนื่องจากความพรุนของอาหารแสดงถึงสัดส่วนของช่องว่างภายในอาหาร ซึ่งมีผลต่อการดูดซับน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนสามารถควบคุมได้โดยใช้ฟิล์มจากสารธรรมชาติหุ้มรอบๆ ผิว

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพของอาหารทอด

ในระหว่างการทอด มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในอาหารดังนี้

1. เกิดการระเหยของน้ำในอาหาร
2. ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น จนถึงระดับที่ต้องการและมีการพอร้มตัวของเมล็ดแป้ง เกิด gelatinization ภายในอาหาร จนกระทั่งอาหารสุกและมีความกรอบ
3. การที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาล
4. การดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์
5. เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอาหารขณะกำลังทอด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการลอยหรือจมตัวของชิ้นอาหารในการทอด

ลักษณะโครงสร้างของอาหารทอดโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ส่วน

1. surface เป็นส่วนที่มีความกรอบมีสีเหลือง เนื่องจากมีการสูญเสียไอน้ำระหว่างการทอด เมื่ออุณหภูมิของอาหารเท่ากับจุดเดือดของของเหลวที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเรียกว่าปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (mallard reaction) ความเข้มของสีจะมากขึ้นหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการทอดและองค์ประกอบที่ผิว ในส่วนนี้มีปริมาณความชื้นประมาณ 3%

2. Crust ระหว่างการทอดมีการระเหยของน้ำกลายเป็นไอทำให้เกิดการพอร้มตัวของ Crust

เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดสูงกว่า 155°C Crust ประกอบไปด้วยช่องว่างและรูพรุนต่างๆเป็นจำนวนมาก

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากและมีน้ำมันเข้าไปอยู่ในช่องว่างเหล่านี้แทนที่น้ำที่ระเหยออกไปอาหารทอดแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัวและมีปริมาณน้ำมันระดับหนึ่ง ขึ้นกับสัดส่วนของ Crust/core

3. core เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลาง มีความชื้นสูงและอาหารสุกเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันเข้าไปภายใน ในการทอดแบบการจมในน้ำมัน มีส่วน core ปรากฏอยู่ตลอดเวลาการทอดยกเว้นอาหารที่เป็นแผ่นบางๆ เช่น potato chips จะมีเฉพาะส่วน Crust

2.1.5 ปัจจัยที่ทำให้อาหารอมน้ำมันมากในระหว่างการทอด

2.1.5.1 เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทอด

การทอดที่ใช้อุณหภูมิต่ำนั้นทำให้ต้องใช้เวลาในการทอดนาน ทำให้อาหารที่นำมาทอดนั้นมีการอมน้ำมันมากกว่าการทอดที่ใช้อุณหภูมิสูง ภาชนะที่ใช้ทอดควรเป็นภาชนะโลหะหนักซึ่งนำความร้อนได้ดี และไม่ควรรี้อาหารลงไปทอดครั้งละมากๆ เพราะจะทำให้อุณหภูมิจากกลางที่ใช้ในการทอดลดลง

2.1.5.2 พื้นที่ผิวของอาหารที่สัมผัสกับน้ำมัน

อาหารที่มีขนาดชิ้นที่ใหญ่จะมีการอมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีขนาดชิ้นที่เล็กและอาหารที่มีผิวหน้าขรุขระ หรือมีรูพรุน จะอมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีผิวเรียบ ที่เป็นเช่นนี้เพราะมีพื้นที่ที่สัมผัสกับน้ำมันมากกว่า

2.1.5.3 ส่วนผสมของอาหาร

อาหารจำพวกที่มีแป้ง ไขมัน และน้ำตาลมาก จะอมน้ำมันมากขึ้นตามส่วนประกอบที่มีในอาหารที่ใช้ในการทอด

2.1.5.4 จุดที่เป็นควีนของไขมัน

อาหารจะอมน้ำมันได้มากขึ้นเมื่อใช้น้ำมันที่มีจุดเป็นควีนต่ำ

2.1.6 ผลกระทบต่ออาหาร

การทอดเป็นหน่วยปฏิบัติการที่มีลักษณะเฉพาะคือ เป็นการนำผลิตภัณฑ์จากหน่วยปฏิบัติการหนึ่งไปใช้ในอีกหน่วยปฏิบัติการ คือ ใช้น้ำมันที่รับความร้อนในหน่วยหนึ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้อาหารในอีกหน่วยหนึ่ง ผลกระทบของการทอดต่ออาหารในเรื่องคุณภาพอาหารจึงเกี่ยวข้องกับน้ำมันและความร้อนที่ใช้ในการทอดอาหาร

2.1.6.1 ผลกระทบของความร้อนต่อน้ำมัน

การให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทำให้น้ำมันเกิดออกซิเดชันได้เนื่องจากมีความชื้นและออกซิเจนเคลื่อนที่ออกมาจากอาหารระหว่างการทอด นอกจากนั้นยังเกิดสารระเหยประเภทคาร์บอนิล กรดไฮดรอกซี กรดคีโต และกรดอีพอกซี ทำให้น้ำมันมีสีคล้ำและมีกลิ่นเหม็น โมเลกุลของน้ำมันจะเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันในสภาพไม่มีออกซิเจนและให้โพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลสูงหรือให้สารประกอบไซคลิกทำให้น้ำมันมีความหนืดสูง ซึ่งมีผลไปลดค่า

เอกสารนี้เป็นสมบัติทางปัญญาที่ควรได้รับการคุ้มครองและทำให้เอกสารดูซับซ้อนขึ้นโดยขั้นตอนการดำเนินงานที่รัดกุมยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกซิไดซ์วิตามินที่ละลายได้ในไขมันทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เรตินอลแคโรทีนอยด์ โทโคเฟอรอลจะถูกทำลายไปและทำให้สีและกลิ่นของน้ำมันเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามการที่โทโคเฟอรอลถูกออกซิไดซ์เองจะมีผลในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันได้ เรื่องนี้มีความสำคัญมากเพราะน้ำมันที่ใช้ในการทอดส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันพืชซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งเกิดออกซิเดชันได้ง่าย กรดลิโนเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกายสูญเสียไป มีผลทำให้สมดุลของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวเปลี่ยนไป

2.1.6.2 ผลกระทบของความร้อนต่ออาหารทอด

วัตถุประสงค์หลักของการทอดคือ การปรับปรุงสี กลิ่น และรสในเปลือกนอกของอาหาร โดยอาศัยปฏิกิริยาเมลลาร์ดและการดูดซับสารระเหยจากน้ำมัน ปัจจัยหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสีและกลิ่นของอาหารได้แก่

1. ชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการทอด
2. อายุและประวัติด้านความร้อนของน้ำมัน
3. อุณหภูมิและเวลาในการทอด
4. ขนาดและลักษณะผิวหน้าของอาหาร
5. การจัดการหลังการทอด

2.1.7 ไขมันและน้ำมัน (3)

ไขมันและน้ำมันเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอริน ไขมันจะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ส่วนน้ำมันจะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ไขมันและน้ำมันจะมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกัน กรดไขมันที่มีในไขมันและน้ำมันอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือคนละชนิดก็ได้ ไขมันหรือน้ำมันจากสัตว์มีกรดไขมันที่อิ่มตัวอยู่มากและมักเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ไขมันและน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ ไขมันในเนื้อสัตว์ ไขมันในไข่แดง ไขมันในนมและน้ำมันหมู ส่วนไขมันและน้ำมันจากพืชมีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก (ยกเว้นน้ำมันมะพร้าว) ได้แก่ น้ำมันรำ น้ำมันถั่ว น้ำมันมะกอก น้ำมันข้าวโพด น้ำมันดอกคำฝอย และน้ำมันดอกทานตะวัน เป็นต้น

2.1.7.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไขมัน

1. เมื่อบริสุทธิ์จะปราศจากสี กลิ่น และรส
2. ไม่ละลายในน้ำ (ยกเว้นน้ำมันงา) และแอลกอฮอล์ที่เย็น ละลายในแอลกอฮอล์ที่ร้อนได้เล็กน้อย
3. ไขมันจะหลอมละลายเมื่อได้รับความร้อน โดยจะค่อยๆ อ่อนตัวหลอมละลาย ทั้งนี้เพราะไขมันประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิด จุดหลอมเหลวของไขมันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่มีอยู่ในไขมัน กรดไขมันชนิดที่ไม่อิ่มตัวมีจุดหลอมเหลวต่ำ ยังมีจำนวนพันธะคู่มากใน โมเลกุล จุดหลอมเหลวก็ยิ่งต่ำ กรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีโมเลกุลยาว จะมีจุดหลอม

เหลวสูงกว่ากรดไขมันชนิดอิ่มตัวโมเลกุลสั้น

4. ความถ่วงจำเพาะของไขมันและน้ำมัน ไขมันและน้ำมันทุกชนิดมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 โดยจะแสดงได้ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความหนืดและความถ่วงจำเพาะของ fat บางชนิด

ชนิดของ fat	ความถ่วงจำเพาะ	ความหนืด ที่ 37.8 ^o C
น้ำมันมะกอก	0.9158	46.68
น้ำมันจากเมล็ดฝ้าย	0.9187	35.88
น้ำมันถั่วเหลือง	0.9228	28.49
น้ำมันมะพร้าว	0.9226	29.79
น้ำมันปาล์ม	0.9190	30.92
น้ำมันหมู	0.9138	44.41

5. เมื่อเผาจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเกิน 250 °C จะมีการสลายตัวได้สารที่มีกลิ่น เรียกว่า อะโครลีน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกลีเซอริน อะโครลีน เป็นสารที่ระเหยได้ ทำให้ผู้ที่อยู่ใกล้เคียงรู้สึกแสบตา และทำให้อาหารมีกลิ่นที่ไม่น่ารับประทาน

อุณหภูมิที่ทำให้ไขมันหรือน้ำมันเป็นควันเรียกว่า จุดที่เป็นควัน (Smoking point) ไขมันหรือน้ำมันจากสัตว์จะมีจุดเป็นควันต่ำกว่าน้ำมันพืช อุณหภูมิที่เป็นควันนี้ใช้ทดสอบความบริสุทธิ์ของไขมันได้ น้ำมันและไขมันแต่ละชนิดจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่างกัน ในการทอดอาหารควรเลือกใช้น้ำมันที่มีอุณหภูมิที่เป็นควันสูง เพื่อป้องกันการเกิดอะโครลีน อุณหภูมิเป็นควันของน้ำมันและไขมันชนิดต่างๆ แสดงได้ตามตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิอุณหภูมิที่เป็นควันของน้ำมันและไขมันชนิดต่างๆ (ต่อ)

ชนิดของน้ำมัน	อุณหภูมิที่เป็นควัน (°C)	กรดไขมันอิสระ (%)
น้ำมันหมูใช้นานกว่า 5 ชั่วโมง	190	0.61
น้ำมันมะกอก	170	0.92
น้ำมันถั่วลิสง	149 – 162	1.64 – 1.10
น้ำมันมะพร้าว	138	1.90
เนย	208	0.28

อุณหภูมิเป็นควันของไขมันนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันและไขมันสัตว์แล้วยังขึ้นอยู่กับสิ่งอื่นๆ อีกดังนี้

1. ปริมาณกรดไขมันอิสระ ถ้าในน้ำมันมีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูง จะมี

อุณหภูมิที่เป็นควันต่ำ เช่น น้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิก ร้อยละ 1.0 สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไขมันทุกชนิด จึงมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำสุด น้ำมันที่ใช้แล้วมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำลงก็ด้วยเหตุผลเดียวกัน นั่นคือเมื่อน้ำมันได้รับความร้อน โมเลกุลของไขมันก็จะสลายตัวเป็นกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันจึงมีปริมาณของกรดไขมันอิสระมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่เป็นควันต่ำลง

2. การสัมผัสกับอากาศ ถ้าน้ำมันสัมผัสกับอากาศได้มากขึ้น อุณหภูมิที่เป็นควันของน้ำมันจะลดลง ดังนั้นการทอดอาหารในภาชนะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะทำให้จุดเป็นควันของน้ำมันลดต่ำลงเร็วกว่าน้ำมันที่ใช้ทอดในภาชนะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า

3. เศษอาหารที่ปะปนในน้ำมัน เช่น แป้ง จะทำให้อุณหภูมิที่เป็นควันของน้ำมันต่ำลงเร็วขึ้น ฉะนั้น น้ำมันที่ใช้แล้วควรกรองเอาเศษอาหารออกเสียก่อนที่จะทอดในคราวต่อไป จะช่วยให้น้ำมันทอดอาหารได้นานขึ้น

ถ้าน้ำมันได้รับความร้อนสูงขึ้นเรื่อยๆ จากจุดเป็นควัน (smoking point) น้ำมันอาจลุกเป็นไฟได้ เรียกจุดนี้ว่า จุดเริ่มติดไฟหรือจุดวาบไฟ (flash point) และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอีกก็จะลุกเป็นไฟได้ เรียกจุดนี้ว่าจุดลุกเป็นไฟ (fire point) ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงจุดที่เป็นควัน จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมันต่างๆ

น้ำมัน	จุดที่เป็นควัน		จุดวาบไฟ		จุดติดไฟ	
	°F	°C	°F	°C	°F	°C
น้ำมันลินสีดดิบ (raw)	325	163	540	287	667	353
น้ำมันลินสีดบริสุทธิ์	320	160	588	309	680	360
น้ำมันมะกอกดิบ (virgin)	391	199	610	321	682	361
น้ำมันถั่วเหลือง (บีบ)	357	181	564	296	664	351
น้ำมันถั่วเหลือง (สกัด)	410	210	603	317	670	354
น้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์	492	256	618	326	673	356

6. ไขมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ โดยเฉพาะเมื่อมีแสงและความชื้นจะไดกรดไขมันอิสระเกิดขึ้น และจะเปลี่ยนเป็นอัลดีไฮด์ และกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้มีกลิ่นเหม็นและรสชาติที่เปลี่ยนไป เรียกการเกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า การเหม็นหืน (rancid)

7. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (spontaneous oxidation) น้ำมันที่กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก เช่น น้ำมันลินสีดจะถูกเติมออกซิเจนได้ง่าย เกิดสารที่เป็นของแข็งไม่เปียกน้ำ ใช้ผสมในสีทาบ้านและเชลแล็ก เรียกน้ำมันพวกนี้ว่า น้ำมันชักแห้ง (drying oil)

2.1.7.2 บทบาทของไขมันและน้ำมันในการประกอบอาหาร

ไขมันและน้ำมันที่ใช้ในการประกอบอาหารมีความสำคัญดังนี้

1. ช่วยเพิ่มรสชาติของอาหารให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เป็นตัวนำความร้อนที่ทำให้อาหารสุก ช่วยหล่อลื่น ไม่ให้อาหารติดภาชนะที่ใช้ทอดและช่วยให้อาหารมีสีสวยด้วย อาหารที่ทอดด้วยน้ำมันมากส่วนใหญ่มักจะมีสีน้ำตาล ต้องใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 177 – 201 °C ในการเลือกน้ำมันสำหรับทอดจึงต้องคำนึงถึงจุดที่เป้นควันด้วย [3]

ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีผลต่อการดูดซับน้ำมันของอาหาร ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในอาหารทอดจะคล้ายคลึงกับในกรณีการอบ

ผลกระทบของการทอดต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหารขึ้นอยู่กับชนิดของกรรมวิธีที่ใช้ การใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดเปลือกนอกเร็วและปิดกั้นบริเวณผิวหน้าของอาหารไว้ ทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยลงและยังคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการส่วนใหญ่ไว้ได้ นอกจากนี้ยังเกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการเก็บรักษาน้อย เนื่องจากผู้บริโภคมักบริโภคอาหารหลังการทอดไม่นาน เช่น มีรายงานการสูญเสียไลซีน 17% ในปลาทอดและเพิ่มเป็น 25% เมื่อใช้น้ำมันที่ถูกทำลายด้วยความร้อน ตับทอดในน้ำมันดินจะสูญเสียไทอามีน 15% และไม่มีโฟเลทเหลืออยู่ การสูญเสียวิตามินซีในอาหารทอดน้อยกว่าอาหารต้ม วิตามินจะสะสมกันในรูปกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิกเนื่องจากมีความชื้นต่ำ ในขณะที่วิตามินซีจะถูกไฮโดรไลซ์และเปลี่ยนเป็นกรด 2, 3 -ไดคิโดกลูโคนิก ถ้าใช้วิธีต้ม

การทอดให้อาหารแห้งเพื่อลดอนุมูลอิสระจะทำให้เกิดการสูญเสียสารอาหารมากขึ้น โดยเฉพาะวิตามินที่ละลายได้ในไขมัน เช่น วิตามินอี ซึ่งถูกดูดซับโดยน้ำมันระหว่างการทอดจะถูกออกซิไดซ์ในระหว่างการเก็บรักษา Bunnell และคณะ พบการสูญเสียวิตามินอี 77% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องนานเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ปฏิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นที่อัตราใกล้เคียงกันแม้จะเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า มันฝรั่งทอดเกิดการสูญเสียวิตามินอี 74% ภายใต้การแช่เยือกแข็งในระยะเวลาใกล้เคียงกัน วิตามินที่ละลายน้ำซึ่งไวต่อความร้อนหรือออกซิเจนก็ถูกทำลายโดยการทอดในสถานะที่ได้กล่าวมาแล้ว คุณภาพโปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดปฏิริยาเมลลาร์ดของกรดอามิโนในเปลือกนอก มีรายงานการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตและเกลือแร่ปริมาณน้อยมาก และคาดว่าคงเกิดการสูญเสียไม่มากนัก ปริมาณไขมันในอาหารที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดซับน้ำมัน แต่ยากที่จะชี้ถึงคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณการดูดซับน้ำมันในอาหาร

ได้มีการทดลองให้ความร้อนแก่ไขมัน โดยมีหรือไม่มีออกซิเจนด้วยอุณหภูมิ 200 – 300 °C ส่วนใหญ่เป็นเวลาหลายวัน โดยไม่ได้ใส่อาหารลงไปทอดด้วย เมื่อนำไขมันไปเลี้ยงสัตว์ทดลอง ปรากฏว่า ให้ผลเป็นพิษและขัดขวางการเจริญเติบโต โมเลกุลใหญ่ที่เกิดจากการต่อกันของโมเลกุลไขมัน (polymerization) ที่อุณหภูมิสูงๆ นี้จะไม่สามารถดูดซึมได้ในทางเดินอาหาร

ได้มีผู้นำเอาน้ำมันที่ใช้ทอดในอุตสาหกรรมมาเลี้ยงหนู โดยใช้ในปริมาณ 20% ซึ่งปรากฏว่าไม่ขัดขวางการเจริญเติบโต แสดงว่าไขมันที่ใช้ในการทดลองในห้องทดลองกับไขมันที่ใช้ในการทอดจริงๆ นั้นแตกต่างกัน การทดลองในสภาพการปกติที่ใช้ในไขมันนั้นๆ จึงมีความสำคัญ

การสำรวจไขมันที่ใช้ในการทอดในอุตสาหกรรมอาหาร ปรากฏว่าบางแห่งสามารถทำให้น้ำมันที่ทอดนั้นคงสภาพอยู่ได้ แต่บางแห่งใช้น้ำมันอย่างไม่ถูกต้องทำให้น้ำมันเสียสภาพ

ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซึมไขมันที่ใช้ทอดอาหาร พบว่าในน้ำมันที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอาหารจะมีค่าไอโอดีนลดลงมาก มีกรดไขมันอิสระและสารอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำมันเดิมเมื่อทอดลงในมันฝรั่งทอดก็ได้ผลเช่นเดียวกัน คือกรดไขมันอิสระในไขมันที่สกัดจากมันฝรั่งทอดจะมีมากกว่าในน้ำมันเดิมที่ใช้ทอด ภายหลังจากการใช้ทอดมันฝรั่ง 10 ชั่วโมงปรากฏว่า กรดลิโนเลอิกในไขมันสกัดจากมันฝรั่งทอดนั้นจะต่ำกว่าในน้ำมันเดิม เนื่องจากส่วนประกอบของไขมันที่ถูกดูดซึมนั้นอาจจะเจือจางลงด้วยสารไขมันที่มีอยู่ในอาหารที่ทอดนั้น จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงในไขมันที่ถูกดูดซึมได้ยาก

มันฝรั่งทอดมีน้ำมากกว่าโดนนัทและส่วนผสมแป้งเหลวประเภทใช้ทอด เกิดการสูญเสียความชื้นจากฟองอากาศของอากาศเคลื่อนที่เข้าสู่ไขมันในรูปของไอน้ำ เมื่อมีน้ำในน้ำมันเพิ่มขึ้นกรดไขมันอิสระก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จากการทอดโดนนัทในอุตสาหกรรม เมื่อทอดลงทอดไปเรื่อยๆ โดยมีการเติมน้ำมันใหม่เป็นระยะๆ น้ำมันที่ใช้ทอดจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงถึง 0.74% ได้มีการเปรียบเทียบการทอดโดนนัทและมันฝรั่ง โดยใช้น้ำมันจากแหล่งเดียวกัน ปรากฏว่าน้ำมันที่ใช้ทอดมันฝรั่งแล้วจะมีค่าไอโอดีนต่ำกว่า มีกรดไขมันอิสระมากกว่า และจุดมีควันสูงกว่าน้ำมันทอดโดนนัท แต่น้ำมันที่ใช้ทอดโดนนัทจะมีสีต่ำกว่า เมื่อมีการทดลองเปรียบเทียบการทอดมันฝรั่งกับแป้งผสมทอดก็ให้ผลเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามแป้งผสมทอดจะมีกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น และจุดมีควันต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจนกว่า สีนํ้ามันจากการทอดแป้งผสมจะคล้ำลงอย่างชัดเจน ส่วนน้ำมันที่มาจากการทอดมันฝรั่งจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย การที่น้ำมันจากแป้งผสมทอดมีสีต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนและการที่กรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นมากเพราะในแป้งผสมนั้นมีไขมันแดงประกอบอยู่ด้วย ฟอสโฟลิปิดในไขมันแดงอาจจะแพร่กระจายลงไปสู่น้ำมันแล้วเกิดการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง

ในระหว่างการทอดที่อุณหภูมิสูงๆ จะเกิดการต่อกันของโมเลกุลไขมัน ทำให้ความข้นหนืดของน้ำมันที่ใช้เพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ อย่างไรก็ตามถ้ามีการใช้น้ำมันทอดอย่างถูกต้อง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

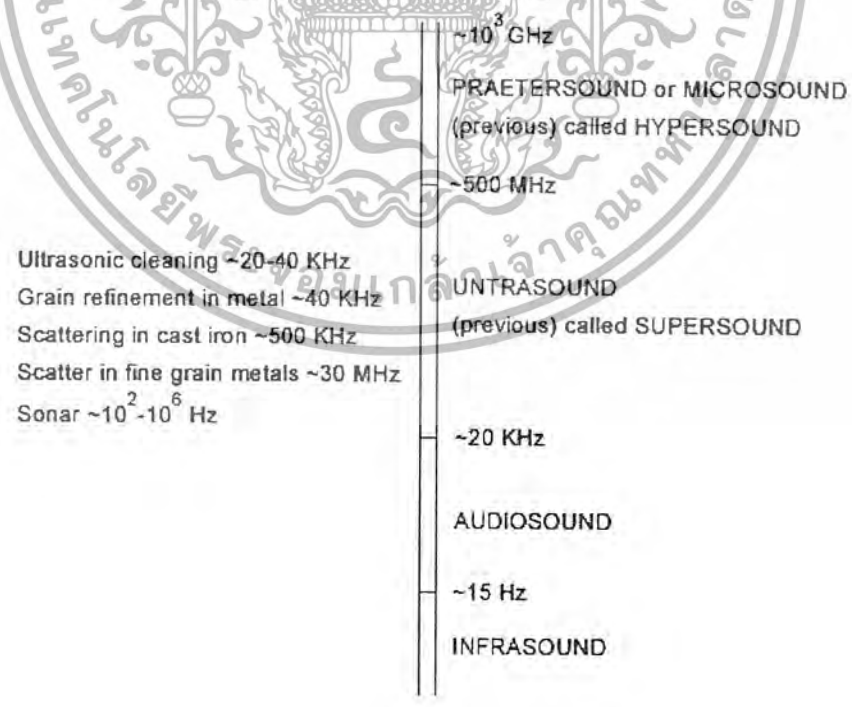
โดยทั่วไปแล้ว ถ้าการทอดอาหารยังนาน การดูดซึมไขมันจะยิ่งมากขึ้น แต่มีข้อยกเว้นอยู่บ้าง เช่น การใช้อุณหภูมิสูงทอดอาหารจะทำให้สารในส่วนผสมแข็งตัวหรือผิวนอกของอาหารแข็งซึ่งจะไปป้องกันการดูดซึมไขมันแม้จะทอดนานก็ตาม อาหารบางอย่างอาจสูญเสียไขมันไปในช่วงการทอด เช่น เนื้อหมูคอกขนมปังปิ้งทอด และไขมันจากไก่ สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ทอดนั้นจะมีผลต่อการดูดซึมไขมันของอาหาร โดยทางอ้อม ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำก็จำเป็นต้องใช้เวลาทอดนาน จึงจะเกิดสีน้ำตาลตามต้องการได้ ดังนั้นการดูดซึมจึงมากขึ้น เมื่อทอดโดนนัทที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 170°C , 185°C และ 200°C การดูดซึมไขมันจะไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามสีของโดนนัทที่ทอดจะแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทอดโดนัทโดยควบคุมปัจจัยอย่างอื่นให้เหมือนกันหมด โดนัทที่มีพื้นผิวหน้ามากกว่าจะดูดซึมน้ำมันได้มากกว่า ในการทำโดนัท ถ้าต้องการเพิ่มพื้นผิวหน้าอาจทำได้โดยยืดก้อนแป้งและทำให้มีรอยแฉกร้าวบนพื้นผิวหน้าก้อนแป้ง โดนัทที่คลึงหนากว่าจะมีพื้นผิวหน้าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโดนัทหน้าหนักของโดนัท ในการทอดแป้งผสม การดูดซึมน้ำมันจะลดลงอย่างมากถ้าไม่ใส่ผงฟูลงในแป้งผสมนั้นเพราะเมื่อไม่ใส่ผงฟู พื้นผิวหน้าของแป้งผสมทอดนั้นจะลดลงมาก ชนิดและอัตราส่วนของเครื่องปรุงในอาหารนั้นๆ อาจมีผลต่อการดูดซึมน้ำมันด้วย ถ้าเพิ่มไขมันหรือน้ำตาลใน โดนัทจะมีผลให้การดูดซึมน้ำมันมากขึ้น การเพิ่มไข่จะทำให้ก้อนแป้งนุ่มขึ้น ขนมนดูดซึมน้ำมันได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้าม การแข็งตัวของโปรตีนในไข่จะลดการดูดซึมน้ำมันลง ดังนั้นผลรวมขั้นสุดท้ายจึงมาจากผลทั้งสองซึ่งเป็นไปในทางกลับกันนี้ รวมทั้งผลจากปัจจัยอย่างอื่นๆ การเติม ไข่ลงในแป้งผสมใช้ทอดที่ไม่มีสารช่วยให้นุ่มประกอบอยู่ด้วย จะทำให้การดูดซึมน้ำมันลดลง

2.2 คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic) [4]

คลื่นอัลตราโซนิก หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 20 Hz จนถึง 20 KHz เท่านั้น ดังนั้นแล้วคลื่นอัลตราโซนิกจึงหมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่เสียงสูงกว่า 20 KHz จนถึง 10⁴ GHz โดยคลื่นที่มีความถี่มากกว่า 10⁴ GHz และมีแอมพลิจูด (Amplitude) สูงๆ จะเรียกว่า "ไฮเปอร์ซาวด์"



รูปที่ 2.4 ช่วงความถี่ต่างๆ ของคลื่นอัลตราโซนิก [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ทฤษฎีคลื่น [5]

เพื่อที่จะเข้าใจกลไกการทำงานของคลื่น Ultrasonic ได้นั้น จำเป็นต้องมีพื้นฐานความเข้าใจในเรื่องคลื่นเสียงว่ามันเกิดขึ้นได้อย่างไร และมันสามารถเดินทางผ่านตัวนำหรือตัวกลางได้อย่างไร

ในพจนานุกรมนั้นให้คำจำกัดความคลื่นเสียงว่าเป็นการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนส่งผ่านตัวกลางที่สามารถยืดหยุ่นได้ เช่น ของแข็ง ของเหลว หรืออากาศ

คลื่นเสียงจะกำเนิดขึ้นได้นั้น ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ของตัวกลางนำคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นซ้ำหลายๆ ครั้ง (Repeat) หรือแค่ครั้งเดียว (Single) เช่น การเกิดฟ้าผ่า (Shock) หรือการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน (Vibration)

การเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณ Cone ของเครื่องกระจายเสียงวิทยุ (Radio Speaker) นั้น เป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับการอธิบายการสั่นสะเทือน (Vibration) ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวทางกลขณะที่ Cone ของ Speaker เคลื่อนที่ถอยหลังและเดินหน้านั้น อากาศทางด้านหน้าของ Cone จะถูกอัดตัวและขยายตัวเพื่อทำให้ได้คลื่นเสียงออกมา ซึ่งเดินทางตามอากาศมาเรื่อยๆ จนกระทั่งจะหายไปที่สุดในที่สุด โดยส่วนมากเรามักจะรู้จักคลื่นเสียงว่าเป็นคลื่นแบบหนึ่งซึ่งกำเนิดจากการเคลื่อนไหวทางกล

คลื่นเสียงอีกแบบที่กำเนิดจากปรากฏการณ์ "Shock" เช่น ฟ้าผ่า นั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความจุของอากาศอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นผลมาจากการคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ในอากาศ ตัวอย่างอื่นของการ "Shock" นี้ จะเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่น Single Compression ที่แพร่กระจายออกไปจากแหล่งกำเนิด

สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิคมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียง ไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเฉพาะ เรื่องนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง ยิ่งคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด (ที่ทำให้เสียงนั้นออกมา) ของตัวกำเนิดเสียงความถี่นั้น เช่น คลื่นความถี่ 300 Hz ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตรเศษๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ทำให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียง โดยทั่วไปคลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่น แต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิค ตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ของคลื่น 40 KHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มม.เท่านั้นซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ทำให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มากคลื่นเสียงจะไม่มีกรเลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบๆ หรือที่เราเรียกว่า มีทิศทาง

การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิคทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความหนาของวัตถุ โดยส่งแกว่งระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น คลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้ว ถ้าวัดความถี่ที่ใช้ก็มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 KHz เพราะที่ความถี่สูงขึ้นมาอากาศจะ

คุณคลื่นเสียงเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ซึ่งต้องการรัศมีทำการสั้นๆ ก็อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz ขณะที่ความถี่เป็น GHz (10Hz) ก็มีใช้กันในหลายๆ การใช้งานที่ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่อากาศ

อุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานในรูปอื่นให้มาเป็นพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกกระจายไปในอากาศได้หรือแปลงพลังงานทางกลให้มาเป็นพลังงานในรูปอื่นได้นั้น

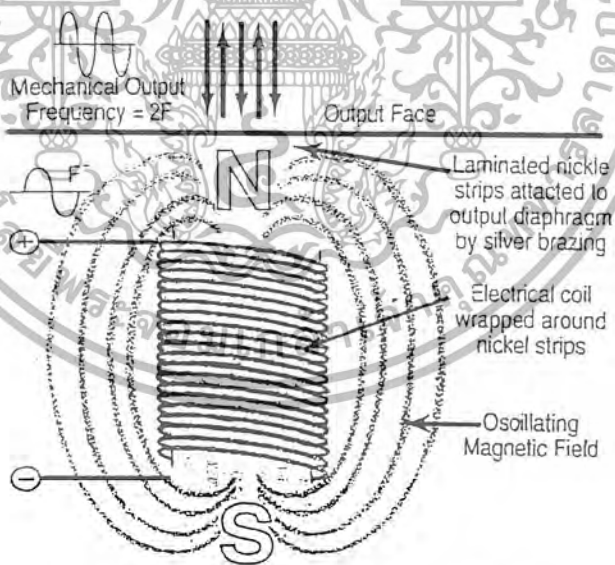
2.2.2 การเกิดคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกนี้สามารถสร้างได้โดยตัวทรานสดิวเซอร์ ซึ่งทรานสดิวเซอร์คือ อุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

2.2.3 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducers)

อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ซึ่งสามารถแปลงพลังงานกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกกระจายไปในวัตถุตัวกลาง หรือจากพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกแปลงไปเป็นพลังงานกลซึ่งสามารถทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้จากตัวทรานสดิวเซอร์นั้น โดยทรานสดิวเซอร์ที่ทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกมี 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

2.2.3.1 เมคคานิคทรานสดิวเซอร์ (Mechanical Transducers)



รูปที่ 2.5 เมคคานิคทรานสดิวเซอร์ [5]

2.2.3.2 อิเล็กโตรแมคคานิคัลทรานสดิวเซอร์ (Electromechanical Transducers)

อิเล็กโตรแมคคานิคัลทรานสดิวเซอร์ จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง ที่ใช้กันอยู่มี 4 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
1. แบบมูฟวี่งคอยล์ (Moving Coil)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

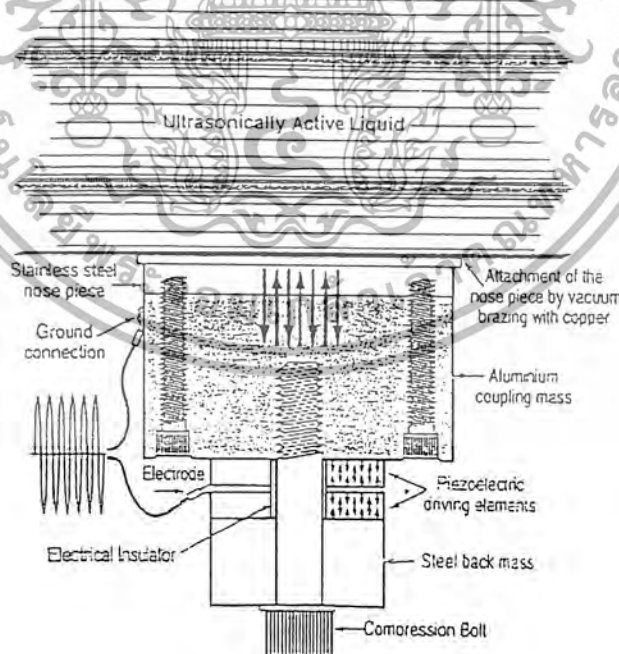
2. แบบอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic)
3. แบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)
4. แบบเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

ในการให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคที่กล่าวมานั้น แบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ แบบเพียโซอิเล็กทริก เพราะหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก โดยจะกล่าวถึงการกำเนิดคลื่นแบบเพียโซอิเล็กทริก เท่านั้น

2.2.4 เพียโซทรานสดิวเซอร์ (Piezo Transducer)

โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยชิ้นสารเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric element) ซึ่งสามารถทำได้จากสารหลายชนิด เช่น ผลึกแควอทซ์ (Quartz), แบเรียมติทานเทต (Bariumtitanate) เกลือร์อ็อคเซล (Rochelle salt) ฯลฯ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ชิ้นสารเพียโซอิเล็กทริกที่ทำมาจากแบเรียมติทานเทต ซึ่งได้จากการผสมสารติทานเนียมกับแบเรียมคาบอเบท ที่อุณหภูมิประมาณ $1300 - 1400^{\circ}\text{C}$ และผลิตรออกมาในรูปของชิ้นสารเซรามิกซึ่งจะเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยส่วนใหญ่

จากชิ้นเซรามิกนี้จะถูกประกบด้วยแผ่น 2 แผ่น ซึ่งส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นเงิน เพื่อต่อเป็นขาของอิเล็กโตรดนั่นเอง ด้านข้างหนึ่งของแผ่นแผ่นจะถูกยึดเพื่อไม่ให้เกิดการสั่น ส่วนอีกด้านจะยึดกับแผ่นไดอะแฟรมซึ่งสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้ โดยแผ่นไดอะแฟรมนี้จะถูกสร้างให้มีลักษณะคล้ายเส้นซ์ เพื่อรวมคลื่นให้มีความเร็วสูงขึ้น



รูปที่ 2.6 เพียโซทรานสดิวเซอร์ [5]

โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบหลัก 2 อย่าง คือ ตัวส่ง (Transmitter) และ ตัวรับ (Receiver)

ตัวส่ง (Transmitter)

คืออุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ถูกออกแบบเจาะจงมาให้แปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ให้แก่วัมัน ให้ออกมาเป็นคลื่นเสียงย่านอุลตราโซนิค หน้าที่ของตัวส่งจึงคล้าย ๆ กับเป็นลำโพง

ตัวรับ (Receiver)

คืออุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ถูกออกแบบเจาะจงมาให้แปลงคลื่นเสียงย่านอุลตราโซนิคที่มาตกกระทบตัวมัน ให้ออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า หน้าที่ของตัวรับจึงคล้าย ๆ กับเป็นไมโครโฟน อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์แบบเซรามิกที่มีจำหน่ายกันจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ให้เลือกตั้งแต่ 23 kHz ขึ้นไปจนถึง 40 kHz แต่ที่พบบ่อยกันบ่อยก็มี 23 kHz, 25 kHz, และ 40 kHz โดยความถี่ 40 kHz เป็นรุ่นที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีทิศทางดีกว่า

2.2.4.2 การทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวรับและตัวส่ง [4]

เมื่อเซรามิก ได้รับสัญญาณแรงดันมาตกกระทบตัวมัน จะทำให้เซรามิก โกงงอ ซึ่งทำให้เกิดการอัดอากาศโดยรอบ เกิดเป็นคลื่นเสียงขึ้นมา ดังนั้นถ้าเราป้อน ไฟฟ้าเป็นช่วงๆ (Electrical pulse) จากออสซิลเลเตอร์ โดยทั่วไปกำลังที่เอาต์พุตที่ออกมาจะตกลงประมาณ 10% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ แต่กำลังเอาต์พุตจะมีค่าสูงสุดที่ค่าโดยประมาณก็ต่อเมื่อความถี่ทางกลธรรมชาติของชิ้นสารเซรามิกนั้นๆ ส่วนที่ความถี่อื่นๆ นั้น กำลังของเอาต์พุตก็จะมีค่าลดลง

ส่วนการทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวรับมีการทำงานตรงกันข้ามกับตัวส่ง กล่าวคือ เมื่อมีคลื่นเสียงที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นสารเซรามิกมากระทบ จะทำให้ชิ้นสาร โกงงอไปมา ทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าในคร่อมขั้วทั้งสองของตัวมันได้

คุณสมบัติโดยทั่วไปของคลื่นเสียงอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกก็คือ มีความต้านทานไฟตรงสูงมากอาจมีค่าถึง 100 M เรียกว่าถ้าเอาวัสดุชนิดนี้มาตั้งสเกลวัดค่าความต้านทานสูงๆ เข็มจะไม่กระดิกเลย แต่ในขณะที่มันทำงานค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง

2.2.4.3 ข้อควรระวังในการใช้งานตัวส่งและตัวรับ

เนื่องจากสเปกตรอดจนรายละเอียดต่าง ๆ ของอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์หาได้ยาก ดังนั้นจึงสามารถที่จะสรุปสิ่งที่ควรระวังในขั้นต้นของอุปกรณ์อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานดังนี้

1. ไม่ควรให้ตัวทรานสดิวเซอร์ได้รับการกระแทกหรือตกจากที่สูง เพื่อป้องกันโครงสร้างภายในไม่ให้เกิดความเสียหาย

2. ทรานสดิวเซอร์ที่มีขายกัน โดยทั่วไปจะทนแรงดันตกคร่อมตัวมันสูงสุดได้ไม่เกินกว่า 20 V ดังนั้นขนาดของสัญญาณที่จะป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์ก็ควรจะต้องอยู่ในขีดจำกัดอัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความถี่เรโซแนนซ์ (ความถี่ที่ตัวมันทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด) ของความถี่วิทยุ 40 kHz ที่มีขาข่ายกันโดยทั่วไปจะผิดพลาดไปไม่เกิน ± 1 kHz และมีแถบความถี่ (Bandwidth) ประมาณ 4.5 kHz สำหรับตัวส่ง และมีแถบความถี่ประมาณ 5 kHz สำหรับตัวรับ จะเห็นได้ว่าแถบความถี่ของตัวรับจะกว้างกว่าของตัวส่งอยู่เล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่าตัวรับจะสามารถรับความถี่ทั้งหมดที่ออกมาจากตัวส่งได้

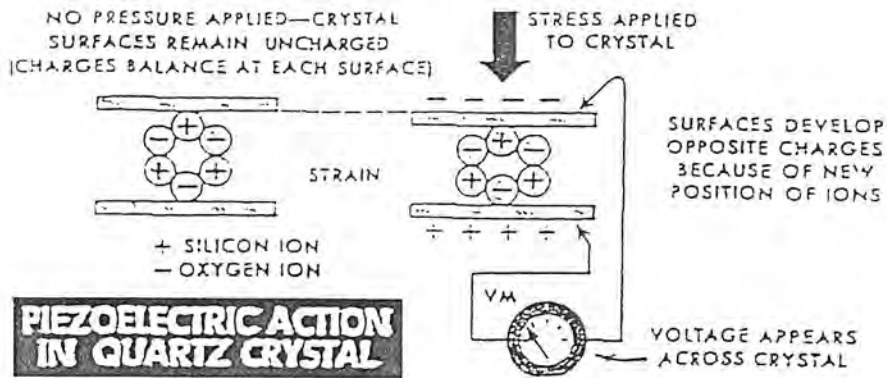
4. อุณหภูมิใช้งานของตัวทรานสดิวเซอร์ควรรักษาอยู่ในช่วง -20°C ถึง 60°C

5. ทั้งตัวส่งและตัวรับจะมีทิศทางการแผ่คลื่นกันมากกล่าวคือ ที่ตำแหน่งเบนจากแนวแกนของตัวส่งไปประมาณ 30° ความแรงของคลื่นเสียงที่ถูกส่งออกไปจะลดลงจากแนวแกนประมาณ 10 dB ในทำนองเดียวกันถ้าคลื่นเสียงพุ่งเข้ามาในแนวที่เบี่ยงเบนไปจากแนวแกนของตัวรับไปประมาณ 30° ความไวหรือขนาดแรงดันที่ออกมาจะลดลงไปประมาณ 10 dB ด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการใช้งานที่เป็นการควบคุมระยะไกลในที่โล่งแจ้งจึงควรพยายามให้ทั้งตัวรับและตัวส่งอยู่ในแนวที่พุ่งตรงเข้าหากันให้มากที่สุด อย่างไรก็ตามในกรณีที่อยู่ในห้องอาจจะเบี่ยงเบนจากกันได้เล็กน้อย เพราะคลื่นเสียงอุลตราโซนิกสามารถสะท้อนกับกำแพง พื้น และวัตถุที่อยู่ในห้อง ทำให้คลื่นเสียงเข้าไปหาตัวรับได้หลายทาง

2.2.5 เปียโซอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค (5)

ปรากฏการณ์เนเปียโซอิเล็กทริก สามารถอธิบายได้คือ เมื่อสภาวะปกติยังไม่มี ความดันหรือคลื่นมาตกกระทบกับชิ้นสารเซรามิก ประจุไฟฟ้าซึ่งอยู่ในชิ้นสารจะเกิดการสมดุล ทำให้แผ่นเพลาที่มีประจุลบอยู่มีศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากับ ซึ่งผลรวมของประจุไฟฟ้าบนแผ่นเพลาที่มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อมีความดันหรือคลื่นมาตกกระทบชิ้นสารเซรามิก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นสารคือ เกิดมีประจุตรงข้ามขึ้นบนแผ่นเพลาที่ประกบชิ้นสารเซรามิกอยู่ซึ่งผลของประจุไฟฟ้าตรงข้ามนี้ทำให้เกิดเป็นแรงดันตลคร่วมบนแผ่นเพลาทั้งสอง ขนาดของแรงดันตลคร่วมนี้จะขึ้นอยู่กัขนาดของความดันหรือคลื่นที่มาตกกระทบชิ้นสารเซรามิกที่โค้งงอไปมา

ทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกสามารถเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างพลังงานกลกับพลังงานไฟฟ้า ในกรณีการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล คือ ตัวส่งคลื่นอุลตราโซนิกซึ่งการทำงานก็เหมือนเราป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งอาจมีความถี่ในช่วง 20-100 kHz แรงดันที่ป้อนนี้จะทำให้ชิ้นสารเซรามิกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยด้านหนึ่งของชิ้นสารเซรามิกจะถูกกดกับแผ่นไดอะแฟรม เมื่อชิ้นสารเซรามิกเกิดการบิดตัวไปมาจะทำให้แผ่นไดอะแฟรมนี้อัดกับอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นความถี่เดียวกับสัญญาณที่ป้อนเข้า ซึ่งคลื่นที่ผลิตได้จะมีกำลังเอาต์พุตสูงสุดเมื่อความถี่ที่ป้อนเข้ามาตรงกับความถี่เรโซแนนท์ ซึ่งเป็นความถี่ทางกลธรรมชาติของชิ้นสารเซรามิก ขึ้นกับส่วนความถี่อื่นๆ นอกเหนือจากนี้ทำให้มีกำลังลดลงว่าความถี่เรโซแนนท์มาก



รูปที่ 2.7 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก โดยขึ้นสารทำจากแร่ควอตซ์ [5]

2.2.6 ประโยชน์การใช้งานของคลื่นอัลตราโซนิค [4]

1. การนำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control)
2. เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยการทำให้ น้ำมีการสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูง
3. เครื่องวัดความหนาของวัตถุ โดยส่งคลื่นระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา
4. เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล
5. ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งของอวัยวะบางส่วนภายในร่างกาย
6. ใช้ทดสอบการรั่วของท่อ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จริยา เคียวประทีป และคณะ [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับควรรอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค โดยใช้เกณฑ์การทอดคั้นที่ อุณหภูมิที่ใช้ทอด 170°C , 190°C โดยการเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้คลื่นที่ 40 kHz ในการทอดกับไม่ใช้คลื่นในการทอด ใช้น้ำมันปาล์มและใส่กรอกไก่ในการทอด สำหรับผลที่ได้ทำให้ทราบว่า การใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการทอดนั้นจะมีปริมาณความชื้นน้อยกว่าการไม่ใช้คลื่น ส่วนผลของปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นนั้นจะใ้ว่าการทอดโดยไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิสูงจะมีปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ แต่การทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิต่ำจะมีปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการทอดด้วยอุณหภูมิสูง ส่วนอัตราการพองตัวนั้น ทั้งแบบการทอดแบบธรรมดาและการทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ใส่กรอกเล็กจะมีอัตราการขยายตัวมากกว่าใส่กรอกขนาดใหญ่ ถ้าสีที่ได้ของการทอดแบบธรรมดาที่อุณหภูมิ 170°C จะมีค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 190°C แต่การทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิต่ำทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง

พรสวรรค์ บำรุงสวัสดิ์ และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิคต่อการแช่ข้าวในกระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า โดยการนำปลายข้าวมาทำการแช่ในน้ำสะอาดด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ

คือ 1:1, 1:2 และ 1:3 เป็นเวลา 20, 40 และ 60 นาที ภายใ้คลื่นความถี่ที่ระดับ 0, 28 และ 40 kHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปแสดงต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ และปริมาณไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอวีโปรตีนที่มีในของแข็ง ผลการทดลองถูกนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบาย ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยวิธี Multiple Regression แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่ในรูปแบบสมการกำลังสองโพลีโนเมียล มีค่าสหสัมพันธ์ทางสถิติ ที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี จากการศึกษาพบว่าระดับความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิกในช่วง 15 - 30 kHz สามารถแยกปริมาณของแข็งออกได้มากที่สุด พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์โปรตีนในของแข็งที่ได้กลับมี ค่าลดลง การใช้อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:1 จะได้ปริมาณของแข็งมากกว่าเมื่อใช้อัตราส่วน ของน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้คลื่นอุลตราโซนิกอาจสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในขั้นตอนการล้างข้าว และแฉ่ข้าว

C.A. Miles. [7] ได้มีการทดสอบการละลายเนื้อหมูแช่แข็งและปลาแช่แข็งด้วยคลื่นอุลตราโซนิก โดยกำหนดความเข้มของคลื่นที่ใช้ในการละลายอาหารแช่แข็ง โดยทำการวัดการดูดซับของคลื่นที่ดี ที่สุด ใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นของการเกิดจุด freezing point จึงใช้คลื่นอุลตราโซนิกจาก 0.22 – 3.3 MHz และ ความเข้ม 3 W/cm² ปัญหาที่เกิดขึ้นคือระยะเริ่มต้นจะเกิด cavitations ที่ความถี่ต่ำประมาณ 500 kHz และ ที่ความเข้มประมาณ 0.5 W/cm² ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ให้ความร้อนที่ผิวหน้า

Da - Wen Sun และ Bing Li [8] กล่าวว่าพลังของคลื่นอุลตราโซนิกพิสูจน์ให้เห็นถึงความมี ประโยชน์ในการควบคุมการเกิดผลึก ดังนั้นในการศึกษาพลังของอุลตราโซนิกจึงนำมาประยุกต์ใช้กับ การแช่แข็ง โดยผลดีที่ได้แสดงให้เห็นถึงอัตราการแช่แข็งของตัวอย่างมันฝรั่ง แล้วปรับปรุงการใช้ คลื่นอุลตราโซนิกเทียบกับการไม่ใช้อุลตราโซนิก อุลตราโซนิกจะช่วยให้อัตราการแช่แข็งดีขึ้น ใน งานนี้อัตราการแช่แข็งเร็วที่สุดคือการใช้พลังงาน 15.85 W และใช้เวลา 2 นาที

Dietrich Knorr และคณะ [9] กล่าวถึงการนำเอาคลื่นอุลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในงานอาหาร โดยในการทดลองของเราจะใช้ cavitations ช่วยในการยับยั้งสปอร์โดยใช้ร่วมกับการใช้ออน้ำพ่น โดยตรงในการศึกษาและพัฒนาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับดาวเกิด cavitations ที่มีค่ามากที่สุด และการ ใช้อุลตราโซนิกในการกรองและการสกัดสารละลายของแข็ง เช่น การนำเอาคลื่นอุลตรา โซนิกไปใช้ ในกระบวนการกรองของการทำงานบีบีวี ทำให้การกรองดีขึ้น ความสามารถในการสกัดเพิ่มมากขึ้น 0.5 %

บทที่ 3

อุปกรณ์และการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัตถุดิบ

1. แป้งสาลี
2. แป้งข้าวเจ้า
3. แป้งประกอบอาหาร ตราโกกิ
4. น้ำมันปาล์มโอดีอิน

อุปกรณ์ (แสดงในภาคผนวก ก.)

1. เครื่องให้ความร้อนแบบขดลวดไฟฟ้า [PRANKE Model FTeco4]
2. เครื่องกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิคความถี่คลื่น 28 kHz และ 40 kHz [D.S.C. Group]
3. เครื่องผสมแป้ง [KirchenAid Model ksm90]
4. Data logger [Agilent Model 34970A]
5. เทอร์โมคัปเปิล
6. เครื่องชั่งน้ำหนักหน่วยกรัมทศนิยม 4 ตำแหน่ง [Yamato Model HB-120]
7. ตู้อบ [Memmert Model 400]
8. เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ [MACOH]
9. นาฬิกาจับเวลา [CASIO G-SHOCK Model DW-6100]
10. ภาชนะสเตนเลส ตะแกรง ที่คืบ
11. เครื่องรีดแป้ง [MARCATO Model ampia 150]
12. อุปกรณ์ตัดแป้ง
13. เครื่องวัดค่าสี [JUKI COLOR Model JR 801]
14. เครื่องปั่น [PHILIPS Model comfort HR 1721]
15. ถ้วยรอง ภาชนะอลูมิเนียม
16. โถดูดความชื้น
17. Zipper Bags [DIAMOND]

3.2 การวางแผนการทดลอง

ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อการทอดร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่เวลาต่างกันและต้องการเปรียบเทียบกับการทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก จึงกำหนดตัวแปรที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วย ความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิก, อุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ และเวลาที่ใช้ในการทอด

ตัวแปรที่ศึกษามีดังนี้

1. ความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิก

- 0 kHz
- 28 kHz
- 40 kHz

2. อุณหภูมิของน้ำมัน

- 140 °C
- 170 °C
- 200 °C

3. เวลาที่ใช้ในการทอด

- 2.5 นาที
- 5 นาที
- 7.5 นาที

แผนการทดลองแบบ Full Factorial ประกอบด้วย 3x3x3 รวมเป็น 27 การทดลอง 1 การทดลองทำ 2 ซ้ำดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการออกแบบการทดลอง

No.	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ความถี่คลื่น (kHz)
1	140	2.5	0
2	140	5	0
3	140	7.5	0
4	170	2.5	0
5	170	5	0
6	170	7.5	0
7	200	2.5	0
8	200	5	0
9	200	7.5	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แผนการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

No.	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ความถี่คลื่น (kHz)
10	140	2.5	28
11	140	5	28
12	140	7.5	28
13	170	2.5	28
18	200	7.5	28
19	140	2.5	40
20	140	5	40
21	140	7.5	40
22	170	2.5	40
23	170	5	40
24	170	7.5	40
25	200	2.5	40
26	200	5	40
27	200	7.5	40

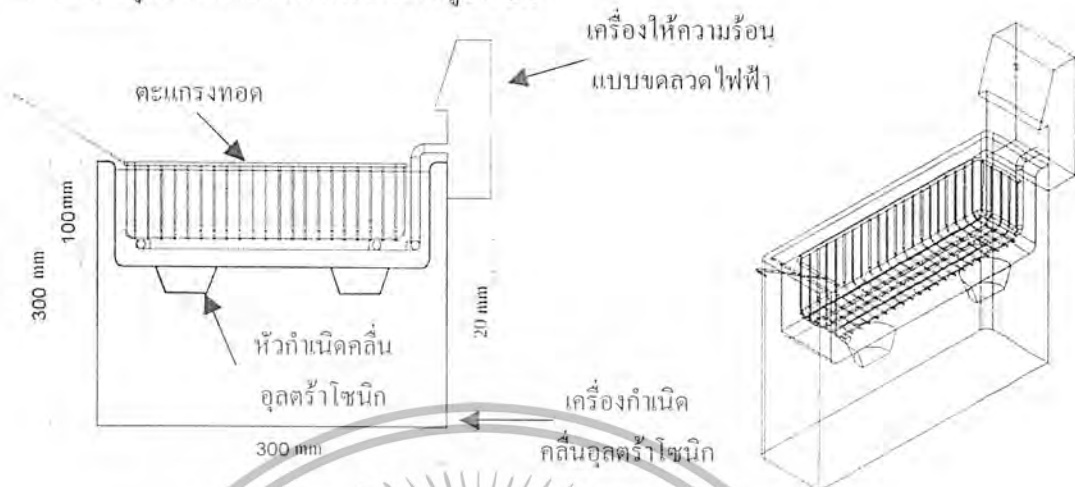
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

- ผสมแป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า และแป้งประกอบอาหาร ตราโลโก้ อย่างละ 100 กรัม
- เตรียมน้ำ 175 กรัม และนำไปผสมให้เข้ากับแป้งที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องผสมแป้ง โดยค่อยๆ เติมน้ำลงไปใช้เวลา 1 นาที จากนั้นใช้เวลาผสมแป้ง 3 นาที โดยเลือกใช้ความเร็วในการผสมเป็นเบอร์ 1 ความเร็วรอบ 58 rpm
- นำแป้งที่ได้มานวดให้เป็นก้อนใช้เวลา 5 นาที
- นำแป้งที่นวดแล้วใส่ Zipper Bags
- เมื่อจะทำการทอดนำแป้งที่ปั้นเป็นก้อนเข้าเครื่องรีดแป้ง โดยตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่เครื่องรีดแป้งให้เป็นเบอร์ 1 จะได้แป้งเป็นแผ่นหนา 3 มม.
- ตัดแป้งให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมด้วยอุปกรณ์ตัดแป้งให้มีขนาด กว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว จำนวน 10 ชิ้น
- นำแป้งที่ได้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง บันทึกค่าที่ได้
- ทำการวัดปริมาตร ค่าความชื้น และค่าสีของแป้ง ($L^* a^* b^*$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการทอด

1. เตรียมอุปกรณ์การทอด ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเตรียมอุปกรณ์การทอด

2. นำเทอร์โมมิเตอร์ไปตั้งในอ่างน้ำมันเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำมันในขณะที่ทำการทอด
3. เติมน้ำมันใส่ลงในเครื่องทอด 3 ลิตร
4. เปิดสวิตช์เครื่องทอดไฟฟ้าและสวิตช์ของเครื่องอุณหภูมิตัววัดอุณหภูมิให้ได้ตามที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบการทดลอง
5. เมื่ออุณหภูมิได้ตามค่าที่ต้องการแล้ว ให้นำตัวอย่างแข็งที่เตรียมไว้ลงทอดในน้ำมันที่สภาวะการทดลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1
6. เมื่อครบตามเวลาแล้ว ให้นำชิ้นมาสะเด็ดน้ำมันเป็นเวลา 2 นาที
7. นำแบ่งที่ได้หลังทอดไปวัดค่าความชื้น ค่าปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลง ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการขยายตัว โดยปริมาตร และค่าสี
8. สังเกตและบันทึกลักษณะการเปลี่ยนแปลงระหว่างเป็่งก่อนทอดและหลังทอด

3.5 การวัดค่าคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวอย่างอาหารก่อนและหลังการทอด

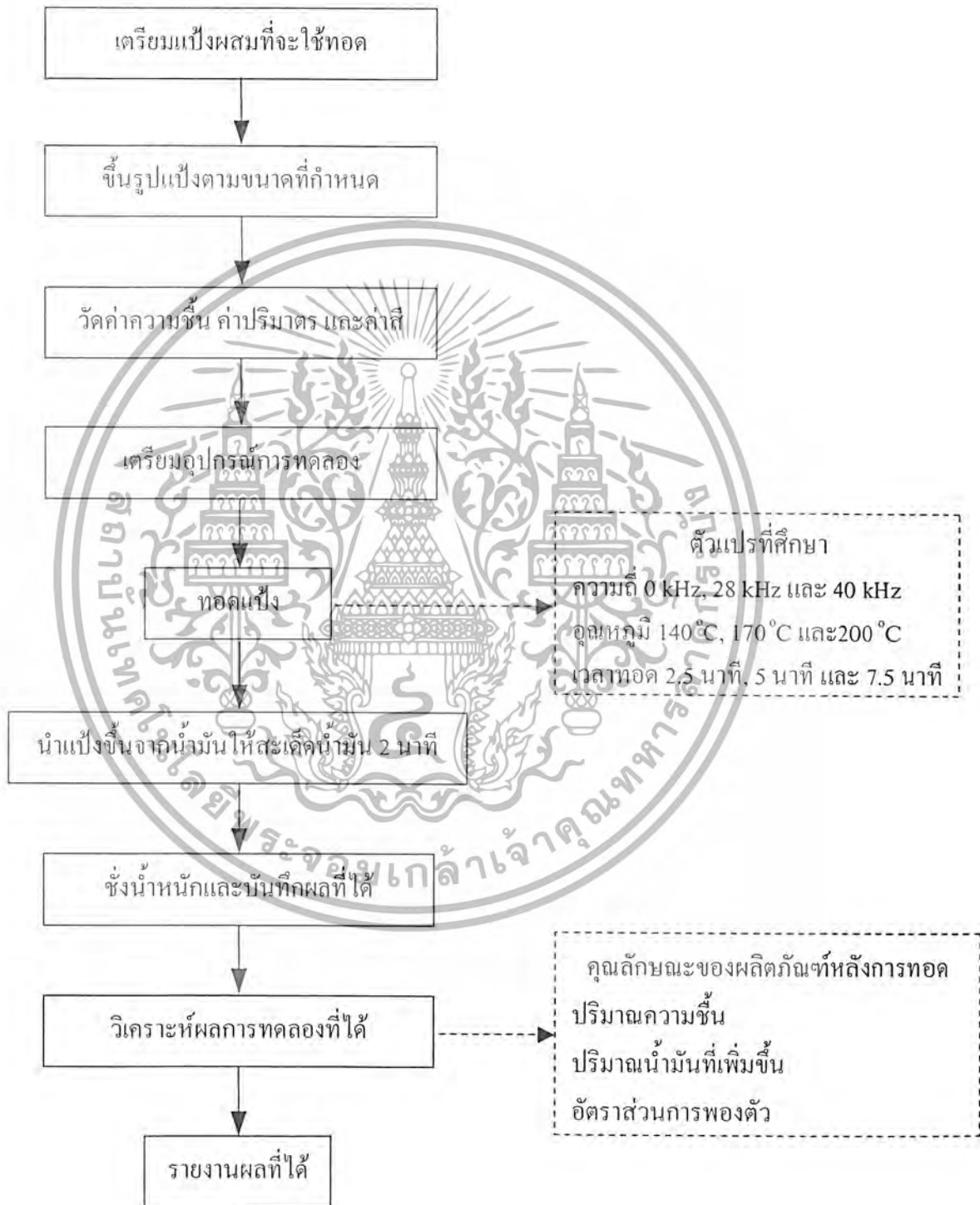
ตัวอย่างก่อนทอด

- ค่าความชื้น
- ค่าปริมาตร
- ค่าสี

ตัวอย่างหลังการทอด

- ค่าความชื้น

- ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่ม
- ค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร
- ค่าสี



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวอย่างอาหาร

3.6.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (A.O.A.C, 1990)

- ขั้นตอนการหาความชื้น
 - นำแป้งที่ทอดแล้ว 3 ชิ้น มาปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น
 - ชั่งน้ำหนักแป้งที่ปั่นแล้ว 2 กรัม บันทึกถ่วงน้ำหนักที่ได้
 - นำไปเข้าตู้อบโดยใช้อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 - เมื่อครบตามเวลาแล้วนำตัวอย่างที่ได้มาชั่งน้ำหนัก และบันทึกถ่วงน้ำหนักที่ได้
- การคำนวณ

$$\% \text{ ความชื้นมาตรฐานเปียก} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100$$

- ตัวอย่างการคำนวณ
ใช้ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 140 °C เวลาการทอด 2.5 นาที คลื่นความถี่ที่ 28 kHz
ความชื้นแป้งก่อนทอด

$$\% \text{ ความชื้นมาตรฐานเปียก} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100$$

$$= \frac{2.1790 - 1.2836}{2.1790} \times 100$$

$$= 41.1335 \% \text{ มาตรฐานเปียก}$$

แสดงว่ามีค่าความชื้นแป้งก่อนทอด 41.1335 % มาตรฐานเปียก

3.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น (Oil Uptake)

จากการที่ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณน้ำมัน โดยวิธีทางเคมีได้ ดังนั้นการหาค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างอาหารหลังทอด จึงต้องอาศัยการหาปริมาณน้ำมันจากการคำนวณ สมดุลมวล และกำหนดสมมติฐานที่สำคัญ 2 ข้อ คือ

- ปริมาณน้ำหนักแห้งของตัวอย่างอาหารก่อนและหลังการทอดมีค่าคงที่
- ในการทอดปริมาณความชื้นจะมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำมันในตัวอย่างอาหารจะมีค่าเพิ่มขึ้น

- ขั้นตอนการหาปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนทอดและหลังทอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของแป้ง นำค่าที่ได้มาใช้
- การคำนวณ

กำหนดให้

X_1 = ความชื้นของแป้งก่อนทอด (% มาตรฐานเปียก)

X_2 = ความชื้นของแป้งหลังทอด (% มาตรฐานเปียก)

A_1 = น้ำหนักแป้งก่อนทอด (กรัม)

A_2 = น้ำหนักแป้งหลังทอด (กรัม)

W_1 = ปริมาณน้ำของแป้งก่อนทอด (กรัม)

W_2 = ปริมาณน้ำของแป้งหลังทอด (กรัม)

DM_1 = น้ำหนักแห้งแป้งก่อนทอด (กรัม)

DM_2 = น้ำหนักแห้งแป้งหลังทอด (กรัม)

- หาปริมาณน้ำของแป้งก่อนทอดจาก

$$W_1 = \frac{X_1}{100} \times A_1$$

- หาปริมาณน้ำหนักแห้งของแป้งก่อนทอดจาก

$$DM_1 = A_1 - W_1$$

- หาปริมาณน้ำของแป้งหลังทอดจาก

$$W_2 = \frac{X_2}{100} \times A_2$$

- จากสมมติฐาน ปริมาณน้ำหนักแห้งก่อนและหลังการทอดจะมีค่าที่ดั่งนั้น

$$DM_2 = DM_1$$

- หา % ความชื้นที่ลดลงจาก

$$\% \text{ ความชื้นที่ลดลง} = \frac{W_1 - W_2}{DM_1} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทา % Oil Uptake จาก

$$\% \text{ Oil Uptake} = \frac{A_2 - W_2 - DM_1}{DM_1} \times 100$$

• ตัวอย่างการคำนวณ

ใช้ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C เวลาการทอด 2.5 นาที คลื่นความถี่ที่ 28 kHz
 แป้งก่อนทอดมีน้ำหนัก 35.8992 กรัม มีความชื้น 41.1335 % มาตรฐานเปียก
 แป้งหลังทอดมีน้ำหนัก 27.9948 กรัม มีความชื้น 21.9648 % มาตรฐานเปียก

$$\text{ตัวอย่างก่อนทอดมีน้ำ } W_1 = \frac{X_1}{100} \times A_1$$

$$= \frac{41.1335}{100} \times 35.8992 = 14.7666 \text{ กรัม}$$

$$\text{ตัวอย่างก่อนทอดมีน้ำหนักแห้ง } DM_1 = A_1 - W_1$$

$$= 35.8992 - 14.7666 = 21.1326 \text{ กรัม}$$

$$\text{ตัวอย่างหลังทอดมีน้ำ } W_2 = \frac{X_2}{100} \times A_2$$

$$= \frac{21.9648}{100} \times 27.9948 = 6.1490 \text{ กรัม}$$

$$\text{ตัวอย่างหลังทอดมีน้ำหนักแห้ง } DM_2 = DM_1 = 21.1326 \text{ กรัม}$$

$$\% \text{ ความชื้นที่ลดลง} = \frac{W_1 - W_2}{DM_1} \times 100$$

$$= \frac{14.7666 - 6.1490}{21.1326} \times 100 = 40.7787 \%$$

$$\% \text{ Oil Uptake} = \frac{A_2 - W_2 - DM_1}{DM_1} \times 100$$

$$= \frac{27.9948 - 6.1490 - 21.1326}{21.1326} \times 100 = 3.3749 \%$$

แสดงว่ามีการดูดซึมน้ำมันเข้าไปในแป้งเพิ่มขึ้น 3.3749 % ในขณะที่ความชื้นของอาหารลดลง

จากเดิม 40.7787% ของน้ำหนักแห้งอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 การวิเคราะห์หัตถตราส่วนการขยายตัวของแป้ง (Expansion Ratio)

- ขั้นตอนการวิเคราะห์หัตถตราส่วนการขยายตัวของแป้ง
 - เตรียมภาชนะอลูมิเนียมที่ทราบปริมาตรแน่นอน คือ 71.1027 cm³
 - นำภาชนะอลูมิเนียมมาใส่จานเต็ม ทำการเคาะ 4 ครั้ง นำไปชั่งและจดบันทึกน้ำหนัก

น้ำหนักที่ได้ เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของงาจาก

$$\rho_{\text{งา}} = \frac{m_{\text{งา}}}{V_{\text{กระบอกอลูมิเนียม}}}$$

ครึ่ง

- เเทงออกบางส่วนของกระบอกใส่ในถ้วยรอง
- นำแป้งทอดที่ได้มาใส่ในกระบอกแล้วเทลงในถ้วยรองจนเต็มกระบอก แล้วเคาะ 4 ครั้ง
- ปาดงาส่วนที่เกินให้พอดีกับปากกระบอก
- นำงาที่ไม่ได้ถูกใช้ไปชั่งและบันทึกค่าที่ได้ ทำทั้งหมด 3 ตัวอย่าง
- การคำนวณหาปริมาตรแป้งทอดจาก

$$V_{\text{แป้งทอด}} = \frac{m_{\text{ที่ใส่ได้}}}{\rho_{\text{งา}}}$$
- หาปริมาตรแป้งก่อนทอดจาก

$$V = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{หนา}$$
- หาค่าอัตราส่วนการขยายตัวของแป้งจาก

$$\text{ร้อยละอัตราส่วนการขยายตัว} = \frac{\text{ปริมาตรแป้งหลังทอด} - \text{ปริมาตรแป้งก่อนทอด}}{\text{ปริมาตรแป้งก่อนทอด}} \times 100$$

- ตัวอย่างการคำนวณ

ใช้ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C เวลาการทอด 5 นาที คลื่นความถี่ที่ 28 kHz

น้ำหนักถ้วยรอง 14.6597 กรัม น้ำหนักกระป๋อง 10.3258 กรัม น้ำหนักงา 48.3187 กรัม

$$\text{ความหนาแน่นงา } \rho_{\text{งา}} = \frac{m_{\text{งา}}}{V_{\text{กระบอกอลูมิเนียม}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{48.3187}{71.1027} = 0.6796 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรแป้งทอด } V_{\text{แป้งทอด}} &= \frac{m_{\text{ที่กลั่น}}}{\rho_{\text{fl}}} \\ &= \frac{\text{น้ำหนักสารรวมถ้วยรอง - ถ้วยรอง}}{\rho_{\text{fl}}} \end{aligned}$$

$$= \frac{19.5187 - 14.6597}{0.6796} = 7.1498 \text{ cm}^3$$

$$\text{ปริมาตรแป้งก่อนทอด } V = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{หนา}$$

$$= 2.54 \times 2.54 \times 0.3 = 1.9355 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการขยายตัวของแป้งทอด} &= \frac{\text{ปริมาตรแป้งหลังทอด} - \text{ปริมาตรแป้งก่อนทอด}}{\text{ปริมาตรแป้งก่อนทอด}} \times 100 \\ &= \frac{7.1498 - 1.9355}{1.9355} \times 100 = 269.4033 \end{aligned}$$

แสดงว่าการขยายตัวของแป้งทอดร้อยละ 269.4033 หรือแสดงว่าแป้งทอดขยายตัวเพิ่มขึ้น 2.7 เท่า

3.7.4 การวิเคราะห์ค่าสี

ค่าที่ได้จากการวัดมีทั้งหมด 3 ค่า คือ L* a* b* โดยค่าทั้ง 3 ค่านี้เป็นค่าสีที่อยู่ในระบบ C.I.E LAB

ความหมายของค่าสีในระบบ C.I.E LAB

ค่า L* (lightness) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสว่าง โดยยิ่ง L* ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 0 มากเท่าไรสีก็จะมีความมืดมากเท่านั้น

ค่า a* เป็นค่าแสดงความเป็นสีแดงหรือสีเขียว โดย

a* เป็นบวก แสดงความเป็นสีแดง

a* เป็นลบ แสดงความเป็นสีเขียว

ค่า b* เป็นค่าแสดงความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน โดย

b* เป็นบวก แสดงความเป็นสีเหลือง

b* เป็นลบ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนการหาค่าสี่

- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องวัดค่าสี่
- ทำการตั้งค่ามาตรฐานด้วยแผ่นตั้งค่ามาตรฐาน
- ตรวจสอบค่าที่แผ่นมาตรฐานว่าตรงกับค่าที่อ่านได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์หรือไม่ ถ้าไม่ตรงให้ทำการตั้งค่าใหม่

- เมื่อตั้งค่าเรียบร้อยแล้ว นำแป่งที่ต้องการวัดมาวางลงบนช่องสำหรับวัดค่าสี่
- วัดค่าแป่งทั้งหมด 3 จุด ในแต่ละชั้นแป่งทอด โดยการสุ่มจุดที่จะทำการวัด
- ให้วัดค่าสี่ของแป่งทั้งหมด 3 ชั้น ในแต่ละการทดลอง
- เมื่อวัดครบแล้วให้จดบันทึกค่า $L \cdot a \cdot b$ ที่แสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

- การคำนวณ

- หาค่าความแตกต่างระหว่างค่าสี่ทั้งหมด หรือ total difference (E^*) ได้จาก

$$E^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}$$

- ตัวอย่างการคำนวณ

ใช้ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 140°C เวลาการทอด 2.5 นาที คลื่นความถี่ที่ 0 kHz

$$E^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \left[(98.83 - 106.27)^2 + (-1.62 - (-2.09))^2 + (5.64 - 5.04)^2 \right]^{1/2}$$

$$= 7.48$$

แสดงว่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงของสี่ทั้งหมด 7.48

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่างแป้งก่อนทอดแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าของตัวอย่างแป้งก่อนทอด

ตัวแปรที่นำมาวัดค่าก่อนทอด	ค่าที่ได้จากการวัด
ค่าความชื้น (% wb)	39.2258 - 41.6715
น้ำหนัก (gm)	29.4947 - 35.8992
ขนาด (cm x cm x cm)	2.54 x 2.54 x 0.3
ปริมาตร (cm ³)	1.9355
ค่าสี	
L	106.27 - 103.98
a	-2.09 - 0.78
b	3.73 - 5.04

4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเป็งหลังการทอดที่สภาวะต่างๆ

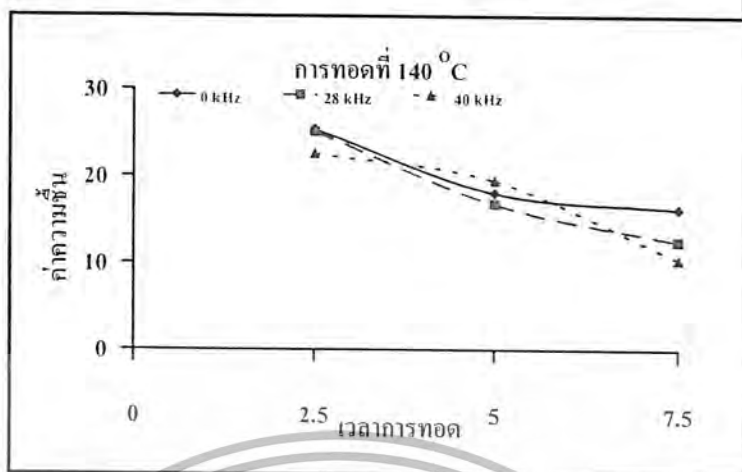
ผลการวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่างเป็งหลังการทอดที่สภาวะต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าของตัวอย่างเป็งหลังทอด

No.	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ความถี่ คลื่น (kHz)	ความชื้น เป็งทอด (%) wb)	% ความชื้น ที่ลดลง	% oil up take	อัตราส่วน การขยายตัว	ค่าสีที่เปลี่ยน แปลงทั้ง หมด	ΔL^*
1	140	2.5	0	25.3344	28.5640	6.0394	113.6589	7.48	7.0019
2	140	5	0	18.0269	41.8948	2.9900	165.2268	8.66	5.3907
3	140	7.5	0	16.2198	44.1420	5.3802	191.8407	9.04	7.3730
4	170	2.5	0	24.0638	32.2649	1.8590	109.5611	8.96	7.6699
5	170	5	0	17.1249	43.9559	0	150.8986	10.74	9.0239
6	170	7.5	0	11.1050	52.0172	0.2726	185.7840	10.91	8.7510
7	200	2.5	0	20.3632	38.0586	3.5776	204.4026	11.55	10.1761
8	200	5	0	7.9954	55.5143	3.9013	280.7928	12.63	11.6963
9	200	7.5	0	2.0100	62.2949	9.6287	185.6979	13.55	12.7135
10	140	2.5	28	25.0333	34.0932	7.0440	217.2078	4.41	4.0336
11	140	5	28	16.7695	47.7762	9.6857	215.4542	5.32	4.1748
12	140	7.5	28	12.4807	54.2828	9.3450	220.1601	6.79	5.6009
13	170	2.5	28	22.6920	38.4514	7.0584	226.4880	7.48	6.6506
14	170	5	28	12.8909	53.9598	7.5520	246.9109	9.57	6.8963
15	170	7.5	28	9.4197	58.0416	13.7992	223.5357	10.44	8.9758
16	200	2.5	28	21.9649	40.7786	3.3748	266.3505	9.81	7.1921
17	200	5	28	7.3038	60.8539	14.5037	230.1524	11.07	9.6711
18	200	7.5	28	2.8098	66.5014	16.7266	249.3741	10.96	10.0130
19	140	2.5	40	22.5478	39.3801	10.1361	109.4817	4.63	2.0773
20	140	5	40	19.4502	45.4246	7.7501	185.7797	5.70	6.5867
21	140	7.5	40	10.4071	58.4332	11.9969	180.0775	6.83	5.6325
22	170	2.5	40	19.1528	45.8279	8.1245	199.0042	7.09	5.3750
23	170	5	40	12.3481	56.7518	4.2827	163.1272	8.32	6.6637
24	170	7.5	40	7.3585	62.7524	9.4096	209.5827	8.77	7.6350
25	200	2.5	40	19.0205	45.5380	10.2892	242.3455	8.97	7.8648
26	200	5	40	11.8085	56.6248	10.6677	248.8810	9.43	8.7079
27	200	7.5	40	4.3150	66.2224	15.7607	296.4090	10.90	10.3855

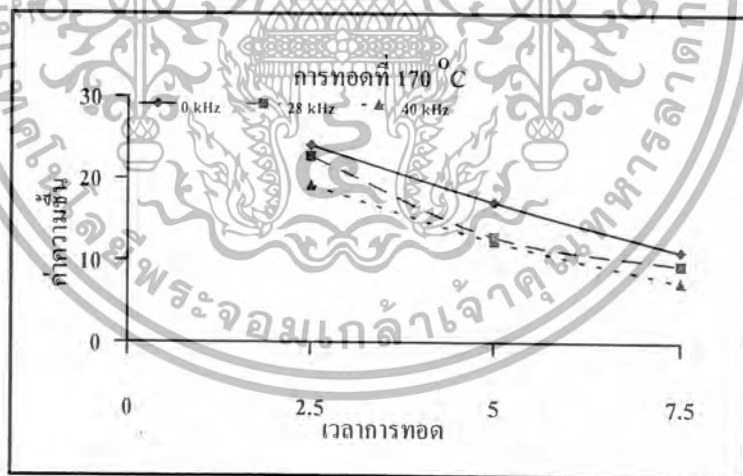
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการทดลองต่อค่าความชื้นของแป้งหลังทอด



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความชื้นที่การทอด 140 °C

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า สำหรับการทอดที่ใช้อุณหภูมิ 140 °C พบว่าในช่วงแรกของการทอดเป็นเวลา 2.5 นาที ตัวอย่างแป้งหลังทอดแบบใช้คลื่นอุลตราโซนิกกับแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกจะมีค่าความชื้นใกล้เคียงกัน แต่เมื่อใช้เวลาในการทอดที่นานค่าความชื้นของการทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกจะมีค่าความชื้นที่มากกว่าการทอดแบบที่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก



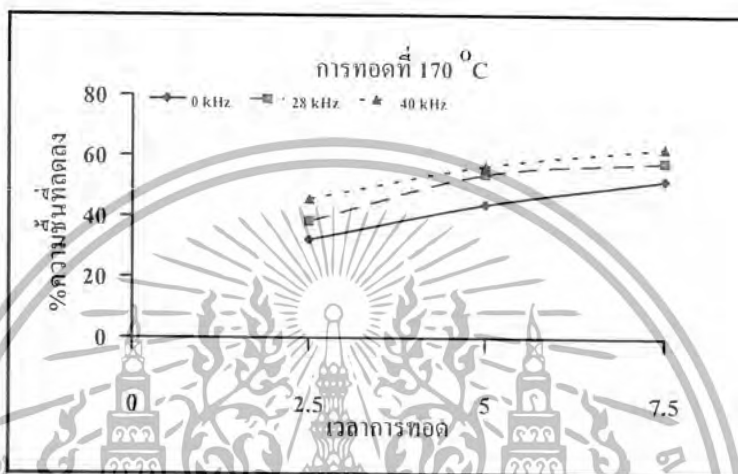
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความชื้นที่การทอด 170 °C

เมื่อใช้อุณหภูมิการทอดที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความชื้นของการทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกมีค่ามากกว่าการทอดแบบใช้คลื่นอุลตราโซนิก ทุกช่วงอุณหภูมิและความถี่ที่มีค่าสูงจะได้แป้งทอดที่มีความชื้นน้อยที่สุด (ดังรูปที่ 4.2) แสดงว่าการทอดแบบใช้คลื่นอุลตราโซนิกมีผลต่อค่าความชื้น ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะการใช้คลื่นอุลตราโซนิกในการทอด ทำให้การถ่ายเทความร้อนไปยังชิ้นอาหาร ได้ดีขึ้น เนื่องจากความถี่ของคลื่นเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ทำให้การกระจายเป็นลักษณะปั่นป่วน เกิดการถ่ายเทพลังและมวลได้ดี จึงทำให้ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้คลื่นอุลตราโซนิกมีค่าน้อยกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก

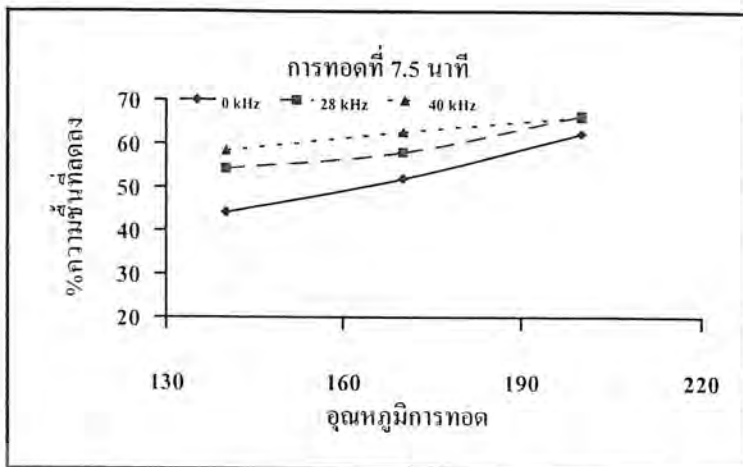
4.2.2 ผลการทดลองต่อค่า % ความชื้นที่ลดลง



รูปที่ 4.3 กราฟแสดง % ความชื้นที่ลดลง ที่การทอด 170 °C

เมื่อเริ่มต้นความชื้นของแป้งก่อนทอดมีค่าประมาณ 39.2258 - 41.6715 % จากการทอดที่สภาวะต่างๆ พบว่า การทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกจะมีการลดลงของปริมาณความชื้นน้อยกว่าการทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่ทุกช่วงเวลาของการทอด และการทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่ความถี่ 40 kHz จะทำให้ปริมาณความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่ความถี่ 28 kHz (ดังรูปที่ 4.3) และจากผลการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ พบว่าค่า % ความชื้นที่ลดลง จะมีแนวโน้มที่คล้ายกับการทอดที่อุณหภูมิ 170 °C

ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะคลื่นอุลตราโซนิกมีความถี่ในการทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นสะเทือนและเกิดการกลายเป็นไอน้ำระเหยออกจากชิ้นอาหาร ได้ดี จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงมีค่ามากกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก นอกจากนั้น การทอดที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลให้ปริมาณความชื้นที่ลดลงมีค่ามากขึ้นด้วย

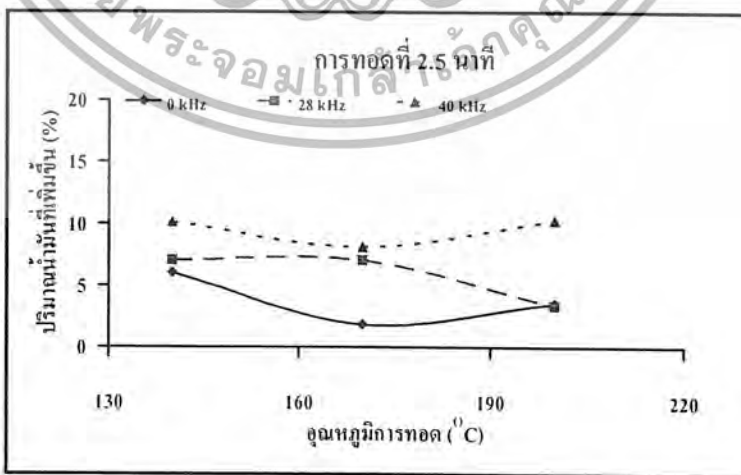


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความชื้นที่ลดลง ที่การทอด 7.5 นาที

ส่วนผลของเวลาที่ต่อการทอดนั้นพบว่า เมื่อใช้เวลากการทอดนานขึ้น ค่า %ความชื้นของแป้งทอดที่ลดลงจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งทอดที่ทอดเป็นเวลา 7.5 นาที ระหว่างการทอดแบบใช้คลื่นอัลตราโซนิคกับการทอดที่ค่าความถี่สูงมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.4

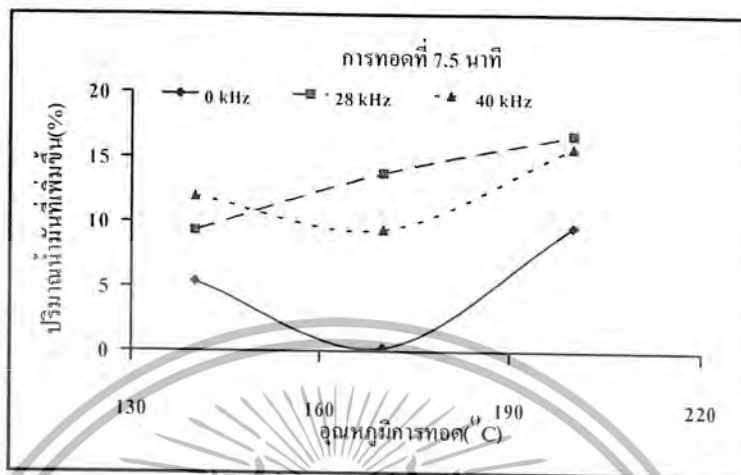
4.2.3 ผลการทดลองคือค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

จากการทดลองพบว่าที่ทุกอุณหภูมิของการทอด การทอดแบบไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคมีปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการทอดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค และพบว่าเมื่อทอดด้วยความถี่ที่สูงขึ้นแป้งจะดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 140 °C กับ 200 °C นั้นพบว่าในช่วงระยะเวลาแรก การทอดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ต่ำจะมีปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าที่ความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นที่การทอด 2.5 นาที

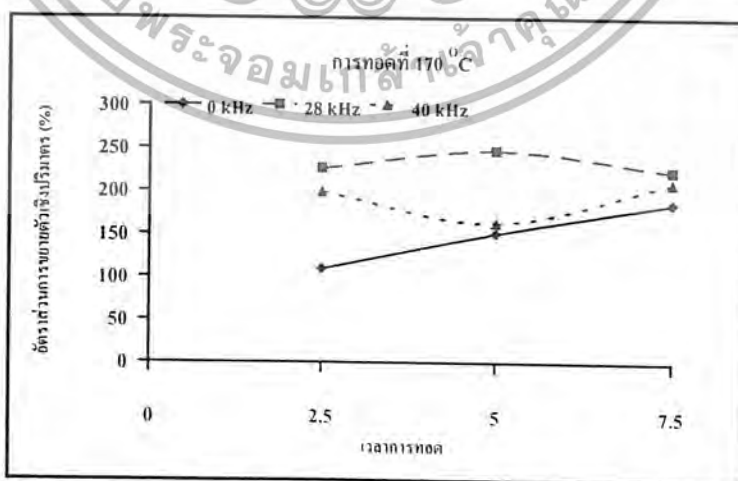
แต่เมื่อทอดนานขึ้นปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดที่ความถี่ต่ำจะมีค่ามากกว่าการทอดที่ความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงว่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากผลกระทบร่วมกันของ อุณหภูมิ ความถี่ และเวลาอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจากการทอด 7.5 นาที

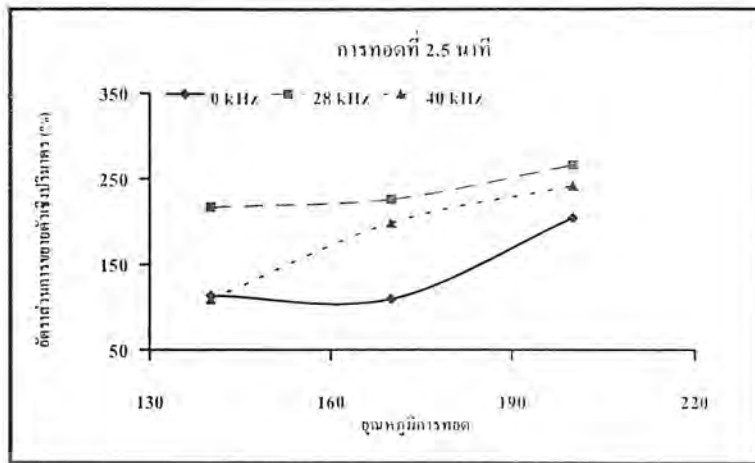
การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคมีปริมาณมากกว่าการทอดแบบ ไม่ใช้คลื่นนั้น อาจเป็นเพราะคลื่นอัลตราโซนิคเป็นคลื่นที่มีความถี่สูง ทำให้โมเลกุลของน้ำมันเกิดการสั่นสะเทือน สามารถแทรกตัวเข้าไปในชิ้นอาหารได้ดี ทำให้ปริมาณน้ำมันมีค่าเพิ่มมากกว่าการทอดแบบ ไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิค

4.2.4 ผลการทดสอบต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่การทอด 170 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



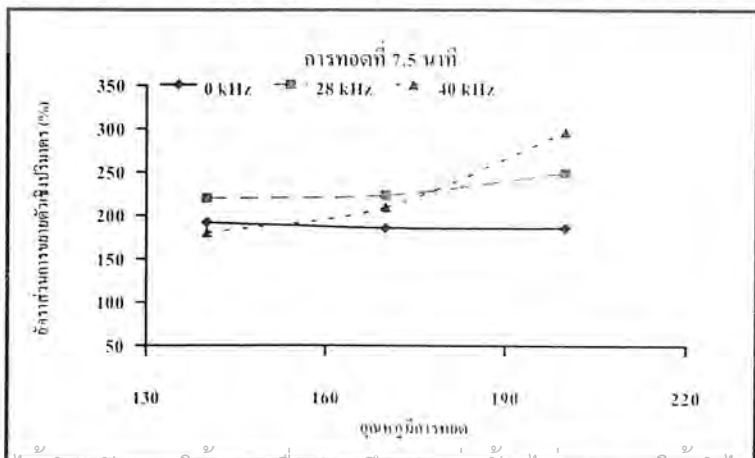
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่การทอด 2.5 นาที

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคจะให้ผลิตภัณฑ์แป้งทอดที่มีอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่ต่ำกว่าแป้งที่ได้จากการทอดร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิค ส่วนแป้งที่ได้จากการทอดแบบใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่มีความถี่สูงจะมีอัตราส่วนการขยายตัวที่ต่ำกว่าที่ความถี่ต่ำ

เมื่อพิจารณาในช่วงแรกของการทอด การทอดที่ความถี่สูงสามารถส่งผ่านความร้อนไปยังอาหารได้เร็วกว่า น้ำที่อยู่ในบริเวณผิวหน้าของแป้งสามารถระเหยได้เร็ว ในขณะที่เดียวกันจะเกิดการหดตัวที่ผิวหน้าทำให้น้ำไม่สามารถซึมแพร่สู่ผิวหน้าได้คือ แป้งทอดที่ได้จึงมีลักษณะที่ไม่ค่อยพอง ในขณะที่การทอดที่ความถี่ต่ำ อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราเร็วของการซึมแพร่ของน้ำเกิดขึ้นด้วยอัตราที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้แป้งทอดที่ได้มีลักษณะที่พองกว่า

กล่าวคือ การทอดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 28- kHz จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะพองมากกว่าการทอดที่ความถี่สูง และการทอดแบบไม่ใช้คลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.8

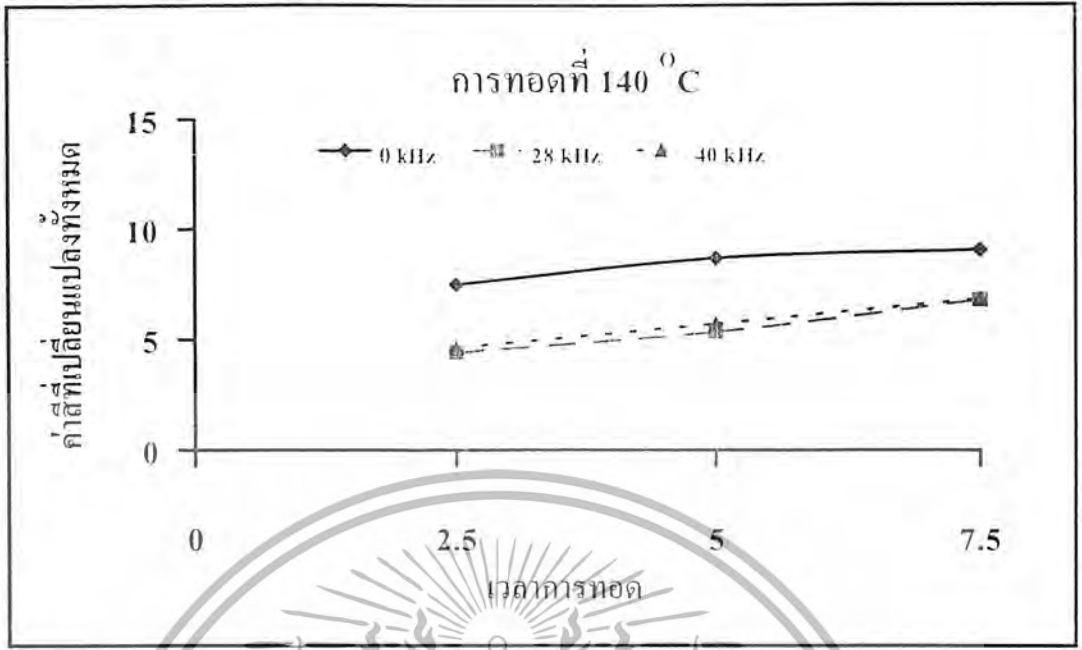
แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อระยะเวลาการทอดนานขึ้น แป้งทอดที่อุณหภูมิและความถี่สูงจะมีอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรมากกว่าการทอดที่ความถี่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ส่วนอุณหภูมิจะไม่ค่อยมีผลต่ออัตราการขยายตัวเชิงปริมาตรมากนัก ยกเว้นการทอดที่ความถี่ 40 kHz



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่การทอด 7.5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลการทดลองต่อค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่การทอด 140 °C

การเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่า L* หรือความเข้มของสีแป็งทอด จากการทดลองพบว่า การทอดแบบไม้อัดคลื่นจะมีค่าสีที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าการทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิก และการทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิกทั้งที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำจะมีค่าของสีที่เปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10

เมื่อใช้เวลาและอุณหภูมิในการทอดเพิ่มมากขึ้น จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีมากขึ้นด้วย เป็นที่น่าสังเกตว่า แม้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกจะมีปริมาณน้ำมันเพิ่มมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดแบบไม้อัดคลื่น แต่การเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นนั้นมีน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ การสันตะเหือนของคลื่นช่วยยับยั้งการเกิดไขมันของอนไซม์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสี สีของแป็งทอดจากการทอดร่วมกับการใช้คลื่น จึงมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่น้อยกว่านับเป็นผลดีต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรักษาสีให้ใกล้เคียงกับสภาพก่อนทอด แต่การสันตะเหือนของคลื่นทำให้น้ำมันสามารถซึมผ่านเข้าไปในรูพรุนของเนื้ออาหารหรือตะสมใน Crust ได้ง่าย จึงทำให้ปริมาณน้ำมันมีมากกว่าการทอดแบบไม้อัดคลื่น

4.2.6 ผลการทดลองต่อค่าความเปลี่ยนแปลงของ L*



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของ L*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 การทอดที่กำหนดอุณหภูมิ 140 °C, 170 °C และ 200 °C จะได้แนวโน้มของกราฟจะเป็นไปในแนวเดียวกัน คือ การทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุตราโซนิกจะมีค่าสัที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าการทอดโดยใช้คลื่นอุตราโซนิก และการทอดโดยใช้คลื่นอุตราโซนิกทั้งที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำจะมีค่าของสัที่เปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน

ส่วนผลของเวลาที่มีผลต่อการทอด พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทอดสั้น ค่าสัที่เปลี่ยนแปลงจะมีค่าน้อย แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทอดมากขึ้นค่าสัที่เปลี่ยนแปลงก็จะมากขึ้นด้วย

จากการทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุตราโซนิกที่มีค่าสัที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าการทอดโดยใช้คลื่นอุตราโซนิก อาจเป็นเพราะการนำเอาคลื่นอุตราโซนิกมาใช้นั้น เป็นการกระตุ้นให้ความชื้นในอาหารออกไปเร็วทำให้เกิดเปลือกนอกเร็วและปิดกั้นผิวหนังของอาหารไว้ ทำให้ชั้นอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่นอุตราโซนิก



4.3 ผลของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสภาวะการทอดกับลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการทอด

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 นำไปสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับค่าตัวแปรที่ทำการศึกษา โดยใช้วิธี Multiple Regression ซึ่งแสดงผลที่ได้จะเห็นถึงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการ โพลีโนเมียลอันดับ 2 ดังสมการ

$$Y_i = B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 \quad \text{----- (1)}$$

ค่า Y_i คือค่าคุณลักษณะต่างๆ ของแป้งที่ได้หลังการทอดที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ค่าความชื้นที่ลดลง ค่าความแตกต่างของ L^* และค่าการเปลี่ยนแปลงของสีทั้งหมด

ค่า X_1 = อุณหภูมิ (140 - 200 °C)

X_2 = เวลาการทอด (2.5 - 7.5 นาที)

X_3 = ความถี่คลื่น (0 - 40 kHz)

ค่า B_{ij} = ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรในสมการที่ 1

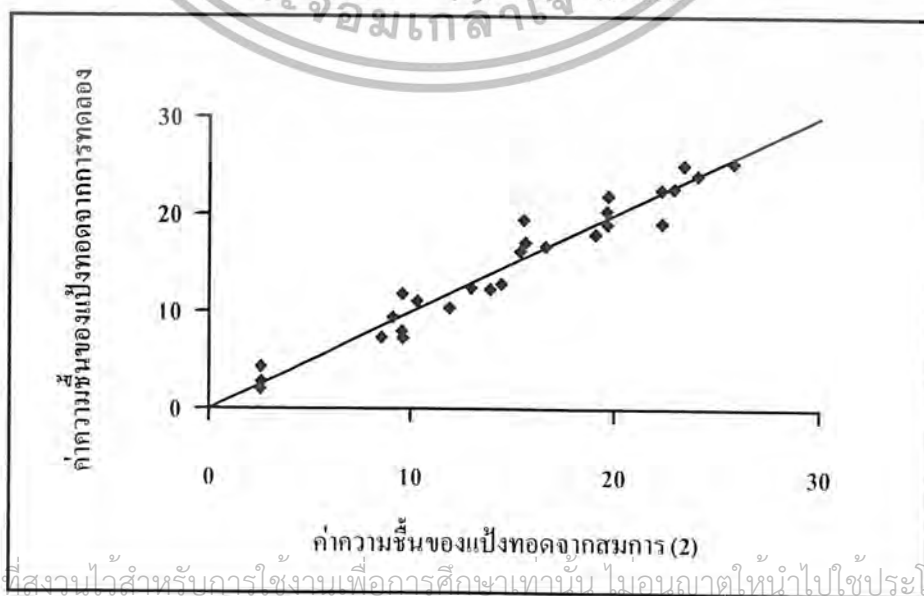
4.3.1 ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์แป้งทอด

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างอุณหภูมิ (X_1) เวลาการทอด (X_2) และความถี่คลื่น (X_3) กับค่าความชื้นที่ได้ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.1)

ปริมาณความชื้นของแป้งทอด

$$= 0.4632 X_1 - 1.3335 X_2 - 0.2892 X_3 - 0.0015 X_1^2 + 0.2418 X_2^2 + 9.1266 E-05 X_3^2 - 0.0225 X_1 X_2 + 0.0015 X_1 X_3 - 8.2466 E-05 X_2 X_3 \quad \text{----- (2)}$$

$R^2 = 0.9486$, Std. Error = 1.8876



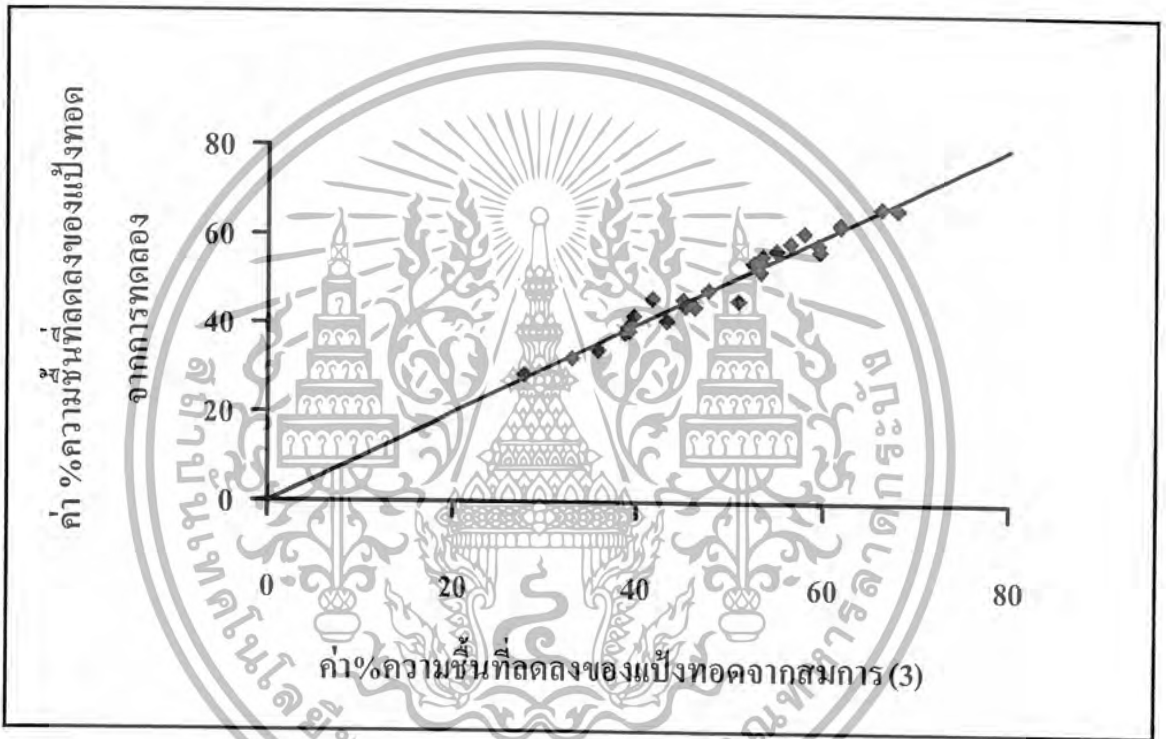
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นจากการทดลองกับค่าความชื้นจากสมการ (2)

4.3.2 ค่า %ความชื้นที่ลดลงที่ได้

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างอุณหภูมิ (X_1) เวลาการทอด (X_2) และความถี่คลื่น (X_3) กับค่า %ความชื้นที่ลดลงที่ได้ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ (แสดงในภาคผนวก ค.2)

$$\begin{aligned}
 \text{ความชื้นที่ลดลงของแป้งทอด (\%)} &= 0.0192X_1 + 5.9845X_2 + 0.5971X_3 + 0.0003X_1^2 \\
 &\quad - 0.5075X_2^2 - 0.0004X_3^2 + 0.0185X_1X_2 - 0.0021X_1X_3 \\
 &\quad - 0.0012X_2X_3 \qquad \qquad \qquad \text{----- (3)}
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 0.9627 \quad \text{Std. Error} = 2.4705$$



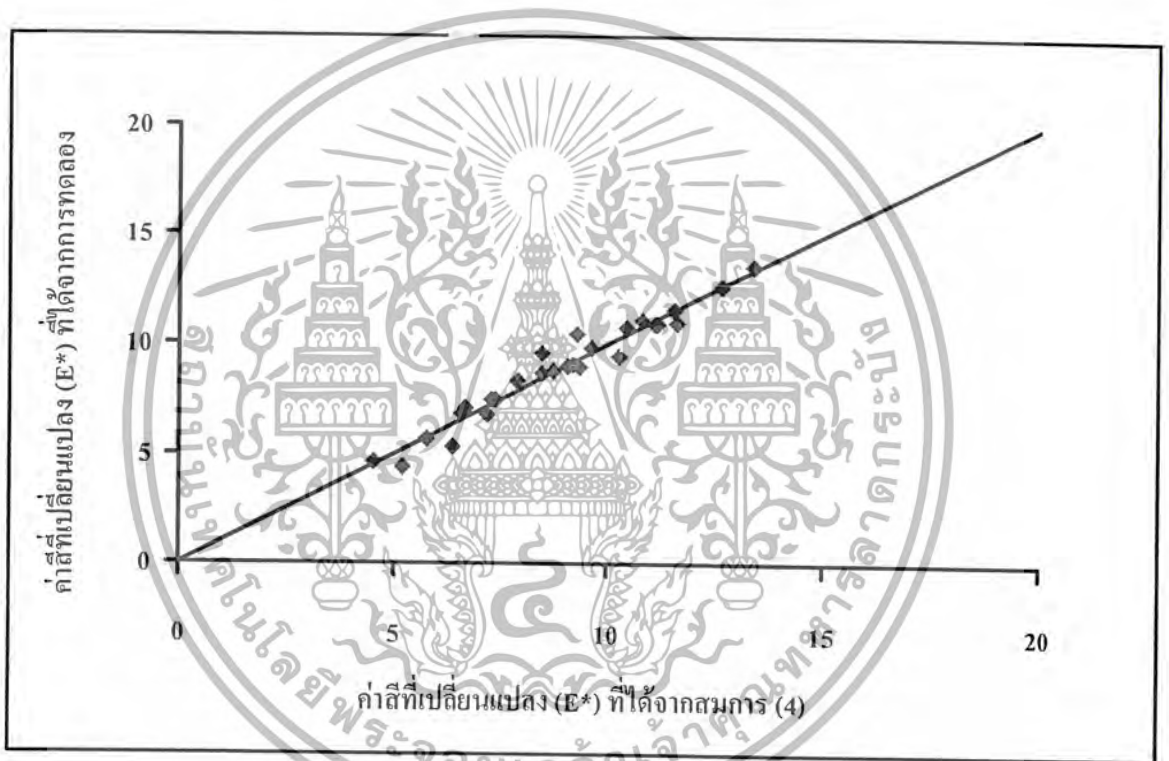
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %ความชื้นที่ลดลงจากการทดลองกับค่า %ความชื้นที่ลดลงจากสมการ (3)

4.3.3 ค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่ได้

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างอุณหภูมิ (X_1) เวลาการทอด (X_2) และความถี่คลื่น (X_3) กับค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่ได้ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ (แสดงในภาคผนวก ค.5)

$$\begin{aligned} \text{ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง (E}^*) &= 0.0227X_1 + 0.6567X_2 - 0.1144X_3 + 0.0001X_1^2 - 0.0298X_2^2 \\ &+ 0.0006X_3^2 + 3.4207E-05X_1X_2 + 0.0001X_1X_3 \\ &+ 0.0012X_2X_3 \end{aligned} \quad \text{----- (4)}$$

$R^2 = 0.9541$, Std. Error = 0.6076



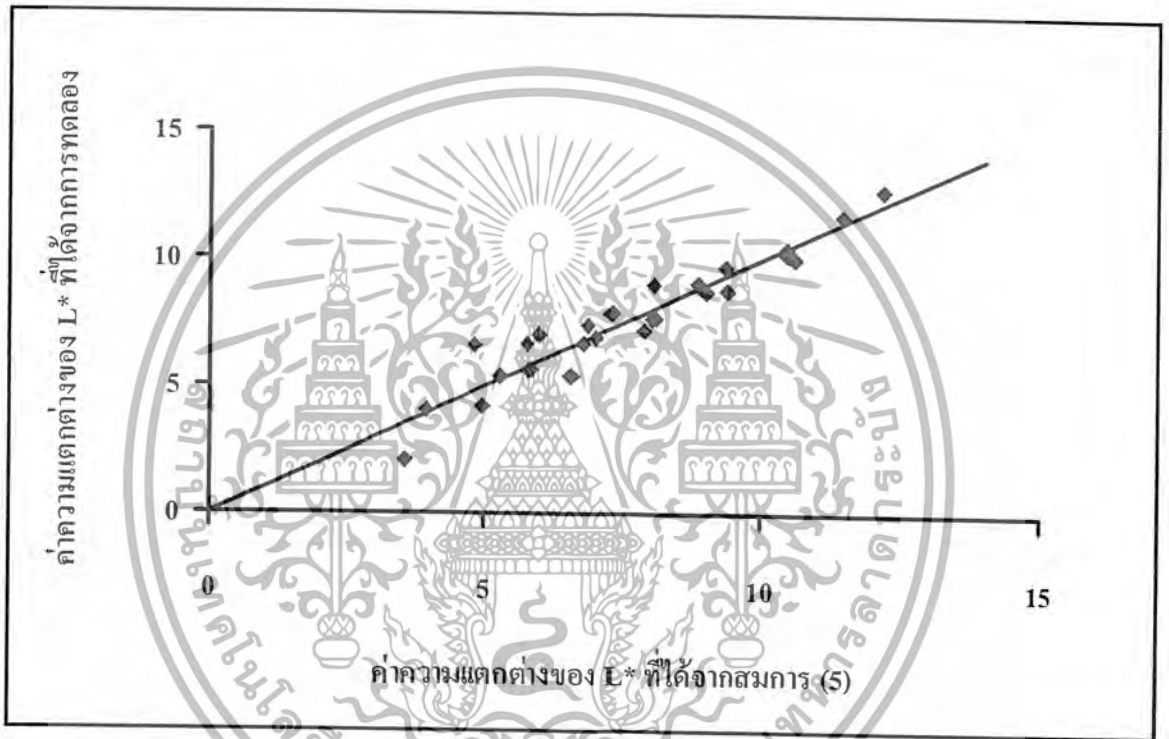
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่เปลี่ยนแปลง (E*) จากการทดลองกับค่าสีที่เปลี่ยนแปลง (E*) จากสมการ (4)

4.3.4 ค่าความแตกต่างของค่า L^* ที่ได้

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างอุณหภูมิ (X_1) เวลาการทอด (X_2) และความถี่คลื่น (X_3) กับค่าความแตกต่างของค่า L^* ที่ได้ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ (แสดงในภาคผนวก ก.6)

$$\begin{aligned} \text{ค่าความแตกต่างของค่า } L^* &= 0.0155X_1 - 0.0153X_2 - 0.0829X_3 + 0.0002X_1^2 - 0.0209X_2^2 \\ &+ 0.0011X_3^2 + 0.0028X_1X_2 - 0.0003X_1X_3 \\ &+ 0.0072X_2X_3 \end{aligned} \quad \text{----- (5)}$$

$$R^2 = 0.9149 \quad \text{Std. Error} = 0.8434$$



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของ L^* จากการทดลองกับค่าความแตกต่างของ L^* จากสมการ (5)

จาก 4.3.1 - 4.3.4 จะเห็นว่า ความสัมพันธ์ในรูปแบบโพลีโนเมียลกำลังสอง สามารถนำมาใช้อธิบายผลของสภาวะการทอดต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์แป้งทอดได้เป็นอย่างดี

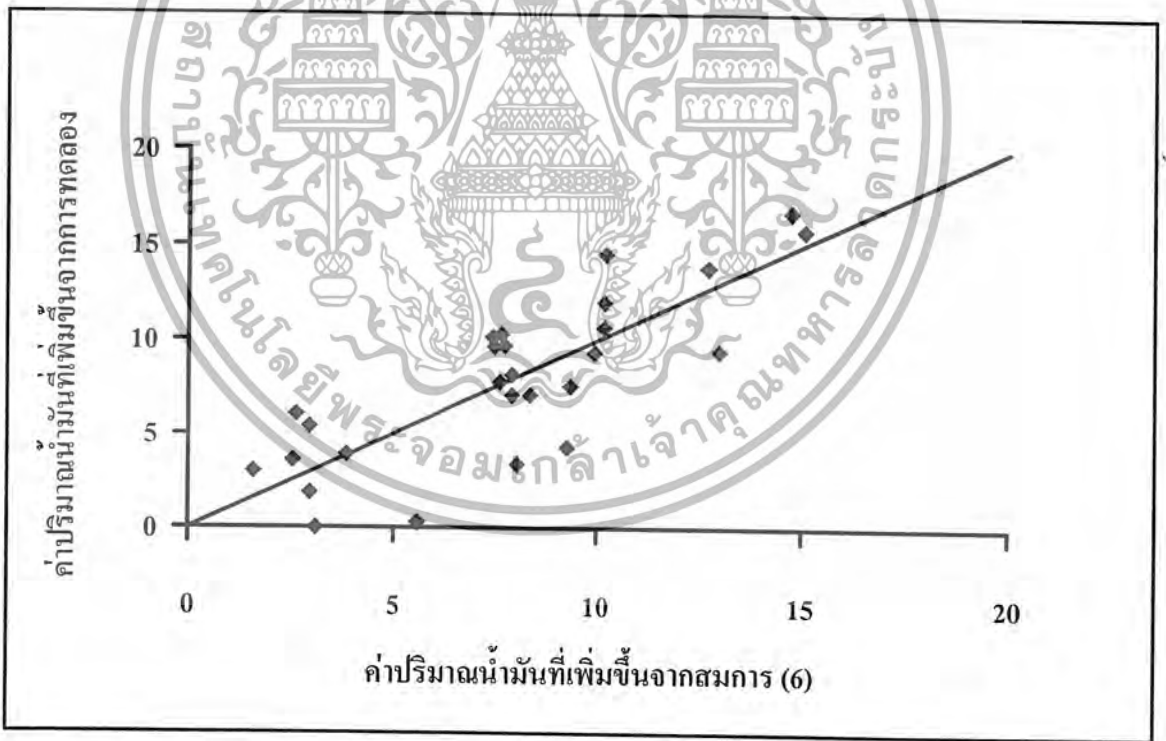
แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำสมการในรูปแบบดังกล่าวข้างต้นมาใช้อธิบายปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนการขยายตัวของแป้งทอดนั้น มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ดีนัก และค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ (1) แสดงในรูป 4.16 และ 4.17 ทั้งนี้อาจเกิดจากผลกระทบของตัวแปรอื่นจึงทำให้แบบจำลองที่ได้ใช้ในการอธิบายค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนการขยายตัวทั้งหมดได้ไม่ดีนัก

4.3.5 ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นที่ได้

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างอุณหภูมิ (X_1) เวลาการทอด (X_2) และความถี่คลื่น (X_3) กับค่า ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นที่ได้ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ (แสดงในภาคผนวก ก.3)

$$\begin{aligned} \text{ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น} &= 0.1012X_1 - 4.0107X_2 + 0.3034X_3 - 0.0004X_1^2 + 0.1899X_2^2 \\ &\quad - 0.0058X_3^2 + 0.0155X_1X_2 + 0.0001X_1X_3 \\ &\quad + 0.0121X_2X_3 \end{aligned} \tag{6}$$

$R^2 = 0.6641$, Std. Error = 3.1458



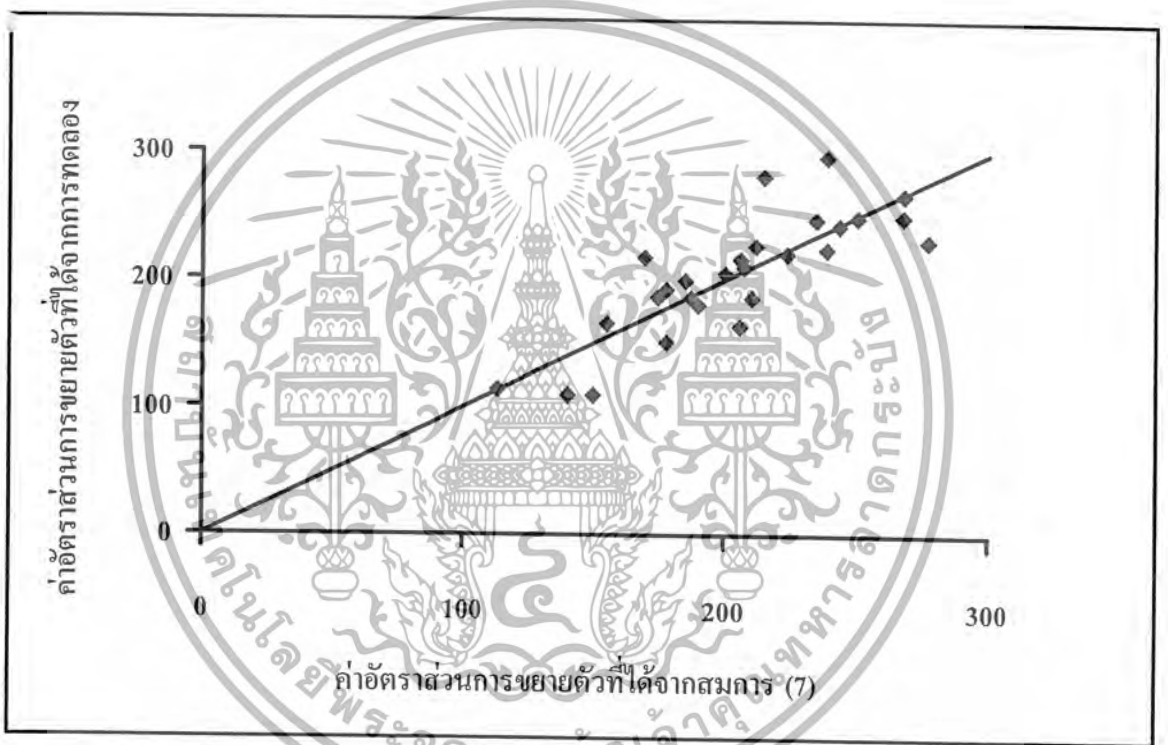
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองกับค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจากสมการ (6)

4.3.6 ค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่ได้

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างอุณหภูมิ (X_1) เวลาการทอด (X_2) และความถี่คลื่น (X_3) กับค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรที่ได้ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ (แสดงในภาคผนวก ก.4)

$$\begin{aligned} \text{ค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร} &= -0.6928X_1 + 53.4176X_2 + 4.3506X_3 + 0.0076X_1^2 \\ &\quad -1.5109X_2^2 - 0.1110X_3^2 - 0.1815X_1X_2 + 0.0068X_1X_3 \\ &\quad - 0.0746X_2X_3 \end{aligned} \tag{7}$$

$R^2 = 0.6807$, Std. Error = 33.0636



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรจากการทดลอง กับค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรจากสมการ (7)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการทอดการทอด โดยพิจารณาคุณสมบัติทางด้านความชื้น, ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น, อัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร และค่าสีที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างอาหาร โดยใช้อุณหภูมิในการทอดที่ 140 - 200 °C ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ คือ 0, 28 และ 40 kHz เวลาในการทอดที่ใช้ คือ 2.5, 5 และ 7.5 นาที สามารถสรุปได้ดังนี้

- การนำคลื่นอัลตราโซนิกร่วมมาใช้ในการทอดจะทำให้ความชื้นของตัวอย่างอาหารลดลงได้มากกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่น ที่ทุกช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดลอง

- การทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่ามากกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่น และปริมาณการเพิ่มของน้ำมันนั้น เกิดจากผลกระทบร่วมกันของความถี่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ทอด

- การทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้อัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรมีค่ามากกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่น

- การทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจะช่วยรักษาสีของผลิตภัณฑ์ให้คงเดิมหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าสีน้อยกว่าการทอดแบบไม่ใช้คลื่น

5.2 ปัญหาที่พบขณะทำการทดลอง

1. จากการทดลองในช่วงแรกที่ใช้แป้งทอดเป็นทรงกลม พบว่า เกิดการระเบิดของแป้งขณะทอดที่อุณหภูมิสูง ทำให้เป็นอันตรายเป็นอย่างมากสำหรับผู้ที่อยู่บริเวณรอบๆ

2. ช่วงเวลาในการใช้ห้องทดลองมีจำกัดและยุ่งยากต่อการติดต่อขอใช้ห้องนอกเวลาราชการ ทำให้ตัวอย่างในการทดลองเกิดการเสื่อมเสีย ซึ่งเป็นอุปสรรคในการทดลอง ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย รวมทั้งสิ้นเปลืองน้ำมันในการทอด

3. เครื่องวัดค่าสีที่ใช้ในการวัดค่ามีอายุการใช้งานมานาน อาจเป็นเหตุให้หลอดไฟที่ใช้วัดค่าสีนั้นเกิดการเสื่อมสภาพ อีกทั้งแผ่นมาตรฐานในการตั้งค่ามาตรฐานเกิดการชำรุด จึงอาจทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนในการวัดค่า

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องอุตสาหกรรมที่ใช้ทอดควรจะมีระบบการหล่อเย็นและควบคุมอุณหภูมิ เพื่อป้องกันการเสียหายของตัวกำเนิดคลื่นอุตสาหกรรม
2. ขดลวดความร้อนที่ใช้ในการให้ความร้อนกับน้ำมัน ควรมีความแม่นยำในการควบคุมและปรับตั้งอุณหภูมิในการใช้งาน เพื่อให้อุณหภูมิคงที่



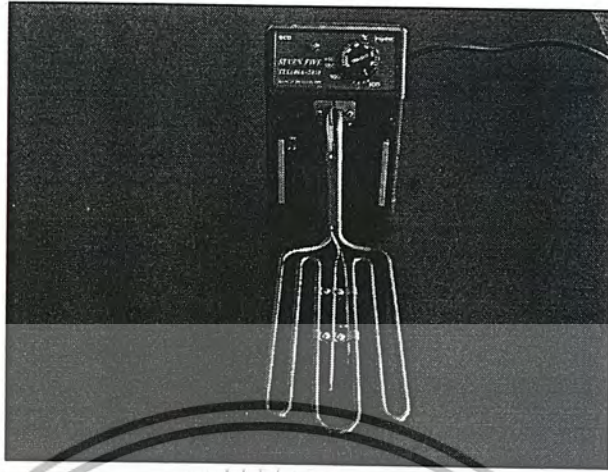
เอกสารอ้างอิง

- [1] วิไล รังสาตทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพมหานคร : บริษัทเท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน จำกัด. หน้า 312 – 323
- [2] จริญญา เตียวประทีป, น้ำผึ้ง เอกศรีสกุล และ ปรัชญา สายเนียม. 2546. การทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก. ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ชาลี มลิซ้อน. 2542. ผลของการเคลือบแป้งและเคลือบขมนมปิ้งต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์และน้ำมัน ระบุ: การทอดแบบ Deep Fat Frying. ปัญหาพิเศษ ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] รักธรรม อุตตโรทัยและสุชัย วชิรวารการ. 2542. การใช้อัลตราโซนิกเซนเซอร์วัดระดับของเหลวในถัง. ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] ธนวัฒน์ หาธานี. 2541. เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก. ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] พรสวรรค์ บำรุงสวัสดิ์, วินัย พร้อมวงษ์ และ เอกพล เต็มแดน ไทย. 2546. ผลของคลื่นอุลตราโซนิกต่อการแช่แข็งในการผลิตแป้งข้าวเจ้า. ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] Miles, C.A., Morley, M.J. and Rendell, M., 1999. "High power ultrasonic thawing of frozen foods". Journal of Food Engineering, Vol.39 : 151-159
- [8] Li, B. and Sun, D., 2003. "Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing". Journal of Food Engineering, Vol.57 : 337-345
- [9] Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V. and Lee, D., 2004. "Applications and potential of ultrasonic in food processing". Trends in Food Science and technology, Vol.15 : 261-266



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

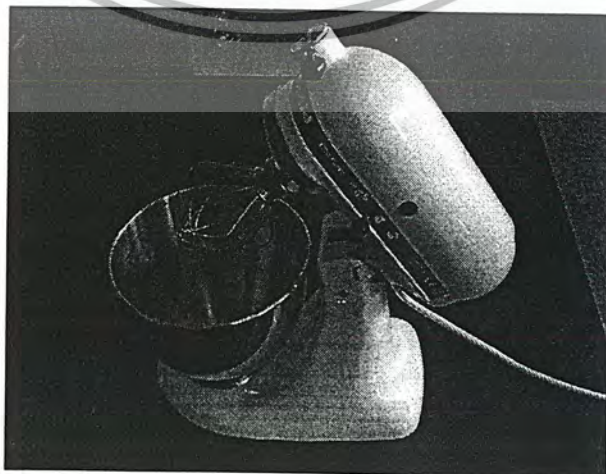
ก. แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้



รูปที่ ก.1 เครื่องให้ความร้อนแบบขดลวดไฟฟ้า



รูปที่ ก.2 เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก

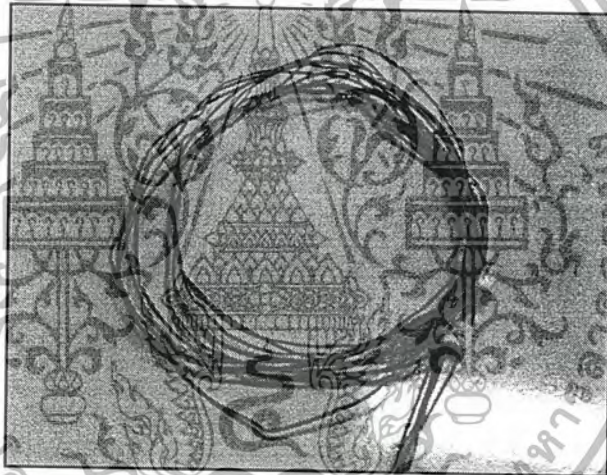


รูปที่ ก.3 เครื่องผสมแป้ง

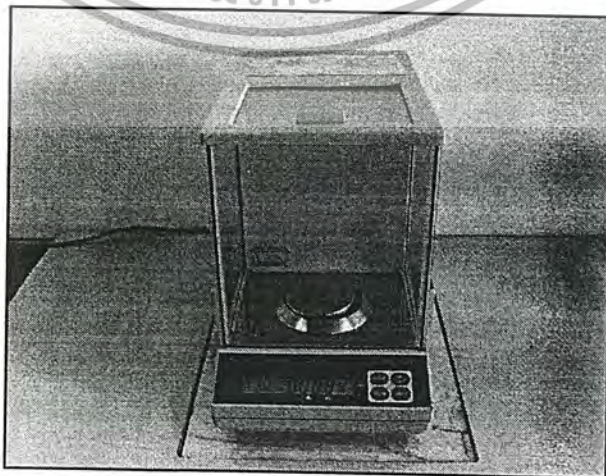
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ ก.3 เครื่องผสมแป้ง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



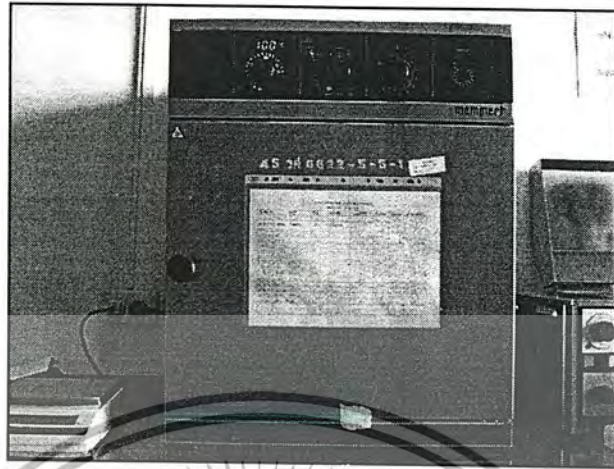
รูปที่ ก.4 data logger



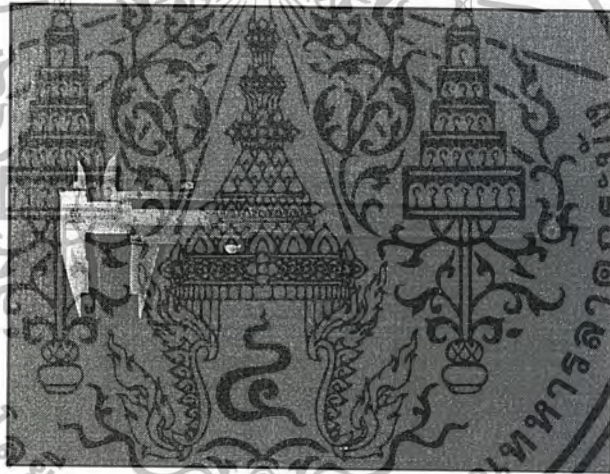
รูปที่ ก.5 เทอร์โมคัปเปิล



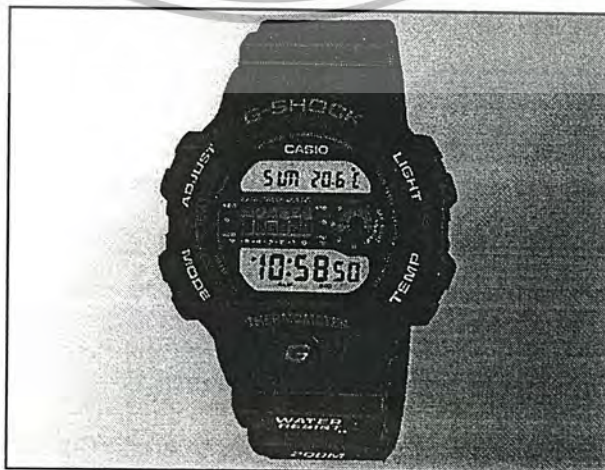
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ก.6 เครื่องชั่งน้ำหนักหน่วยกรัมที่ศูนย์ 4 ตำแหน่งนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 ตู้อบ

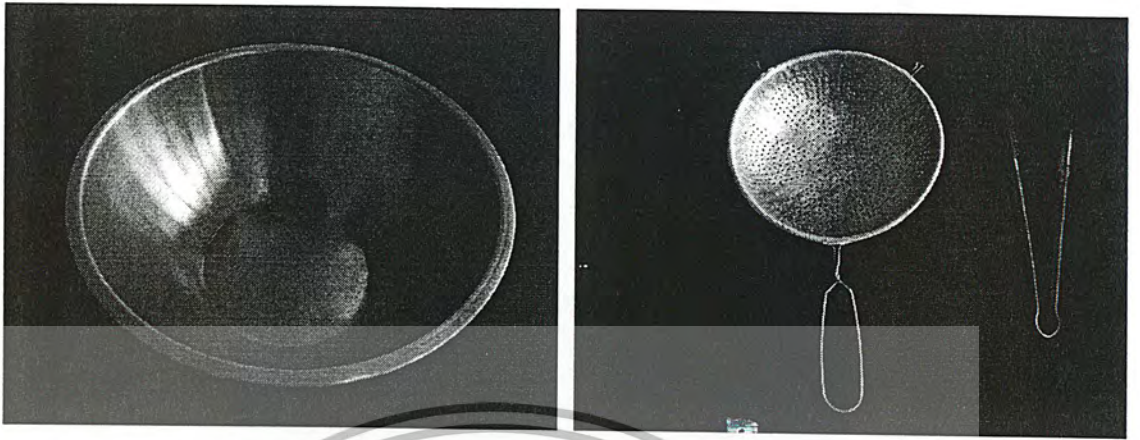


รูปที่ ก.8 เวย์ร์เนียร์คาร์ปเปอร์

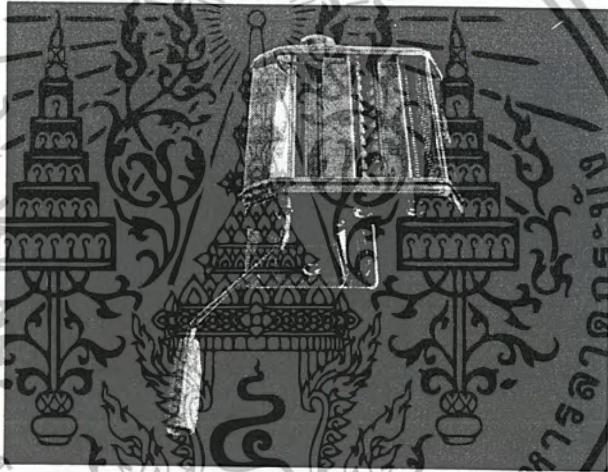


รูปที่ ก.9 นาฬิกาจับเวลา

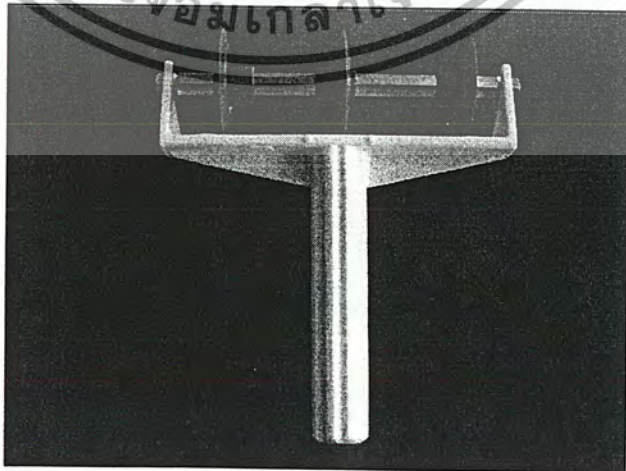
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ ก.9 นาฬิกาจับเวลา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.10 ภาชนะสเตนเลส ตะแกรง ที่ก๊ีบ

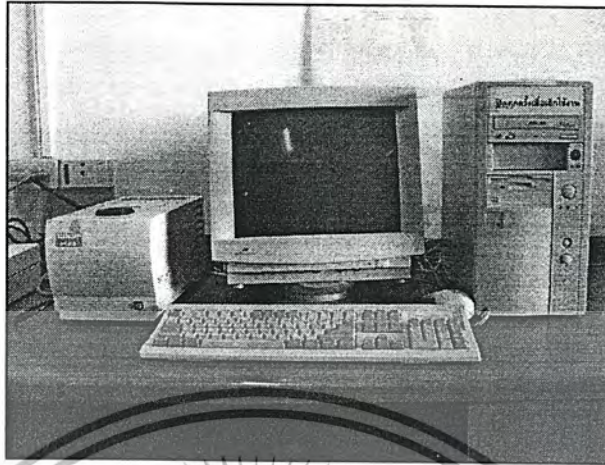


รูปที่ ก.11 เครื่องรีดแป้ง



รูปที่ ก.12 อุปกรณ์ตัดแป้ง

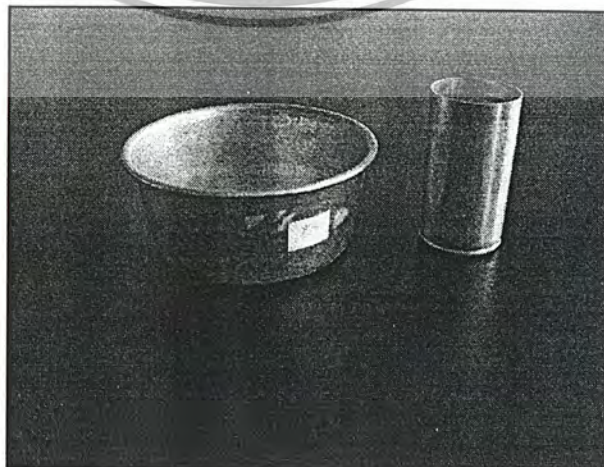
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



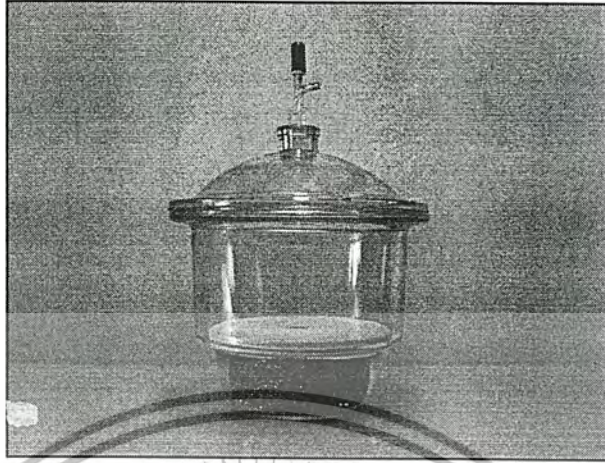
รูปที่ ก.13 เครื่องวัดค่าสี (Colorimeter)



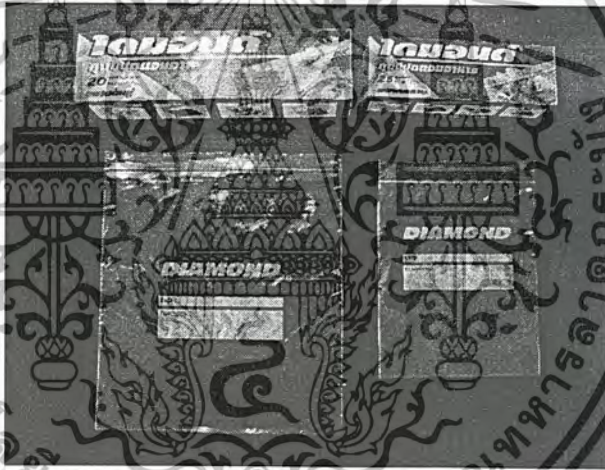
รูปที่ ก.14 เครื่องปั่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ ก.15 ด้วยเรื่อง ภาชนะอุดมึนเหนียว อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.16 โถดูดความชื้น (Desicator)



รูปที่ ก.17 Zipper Bags

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ผลการทดลอง

ข.1 ผลการทดลองค่าความชื้นแฉะก่อนทอด

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองค่าความชื้นแฉะก่อนทอด

No.	ครั้งที่	ความชื้นแฉะ (% wb)	เฉลี่ย (% wb)
1 - 9	1	38.1211	39.2258
	2	40.3306	
10 - 18	1	40.5364	41.1335
	2	41.7306	
19 - 27	1	41.5788	41.6715
	2	41.7641	

ข.2 ผลการทดลองค่าความชื้นแฉะหลังทอด

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองค่าความชื้นแฉะหลังทอด

No.	ครั้งที่	ความชื้นแฉะทอด (% wb)	เฉลี่ย (% wb)
1	1	25.5620	25.3344
	2	25.1068	
2	1	18.2389	18.0269
	2	17.8149	
3	1	16.9733	16.2198
	2	15.4664	
4	1	23.8351	24.0638
	2	24.2926	
5	1	16.8358	17.1249
	2	17.4140	
6	1	10.6832	11.1050
	2	11.5269	
7	1	20.5750	20.3632
	2	20.1515	

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองค่าความชื้นแฉ่งหลังทอด (ต่อ)

No.	ครั้งที่	ความชื้นแฉ่งทอด (% wb)	เฉลี่ย (% wb)
8	1	7.7621	7.9954
	2	8.2287	
9	1	2.0951	2.0100
	2	1.9248	
10	1	25.4299	25.0533
	2	24.6766	
11	1	15.8411	16.7695
	2	17.6919	
12	1	12.5280	12.4807
	2	12.4334	
13	1	22.4886	22.6920
	2	22.8955	
14	1	13.7887	12.8909
	2	11.9931	
15	1	9.4523	9.4197
	2	9.3871	
16	1	22.1145	21.9649
	2	21.8153	
17	1	7.9045	7.3038
	2	6.7030	
18	1	2.6363	2.8098
	2	2.9832	
19	1	22.6262	22.5478
	2	22.4694	
20	1	19.8467	19.4502
	2	19.0537	
21	1	9.9388	10.4071
	2	10.8754	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อขึ้นต้นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองค่าความชื้นแฉ่งหลังทอด (ต่อ)

No.	ครั้งที่	ความชื้นแฉ่งทอด (% wb)	เฉลี่ย (% wb)
22	1	18.8624	19.1528
	2	19.4432	
23	1	12.4648	12.3481
	2	12.2313	
24	1	7.3787	7.3585
	2	7.3382	
25	1	18.8715	19.0205
	2	19.1696	
26	1	11.9598	11.8085
	2	11.6572	
27	1	4.2549	4.3150
	2	4.3751	

ข.3 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร

No.	ชั้นที่	ปริมาตรแฉ่งทอด (cm ³)	เฉลี่ย (cm ³)	อัตราส่วนการขยายตัว
1	1	4.1569	4.1353	113.6589
	2	3.1602		
	3	5.0889		
2	1	4.6471	5.1334	165.2268
	2	5.3599		
	3	5.3932		
3	1	5.3992	5.6485	191.8407
	2	5.5190		
	3	6.0274		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ปริมาตรแบ่งทอด (cm ³)	เฉลี่ย (cm ³)	อัตราส่วนการขยายตัว
4	1	4.2247	4.0560	109.5611
	2	4.0995		
	3	3.8439		
5	1	4.4048	4.8561	150.8986
	2	5.2270		
	3	4.9364		
6	1	5.1778	5.5313	185.7840
	2	5.4723		
	3	5.9438		
7	1	6.2837	5.8917	204.4026
	2	5.4072		
	3	5.9841		
8	1	7.0481	7.3702	280.7928
	2	7.3270		
	3	7.7354		
9	1	6.0943	5.5296	185.6979
	2	5.3867		
	3	5.1079		
10	1	5.7345	6.1395	217.2078
	2	6.7871		
	3	5.8969		
11	1	6.5077	6.1056	215.4542
	2	3.7618		
	3	8.0472		
12	1	6.5668	6.1966	220.1601
	2	6.2076		
	3	5.8155		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ปริมาตรแบ่งทอด (cm ³)	เฉลี่ย (cm ³)	อัตราส่วนการขยายตัว
13	1	5.9592	6.3191	226.4880
	2	5.7051		
	3	7.2930		
14	1	6.0756	6.7144	246.9109
	2	5.9328		
	3	8.1348		
15	1	5.9269	6.2620	223.5357
	2	7.4601		
	3	5.3989		
16	1	7.1498	7.0906	266.3505
	2	6.1382		
	3	7.9840		
17	1	6.9576	6.3900	230.1524
	2	6.6083		
	3	5.6042		
18	1	7.4403	6.7621	249.3741
	2	5.9589		
	3	6.8870		
19	1	4.3295	4.0545	109.4817
	2	4.1589		
	3	3.6750		
20	1	5.2834	5.5312	185.7797
	2	6.3701		
	3	4.9401		
21	1	5.5390	5.4208	180.0775
	2	5.0308		
	3	5.6927		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ปริมาตรแบ่งทอด (cm ³)	เฉลี่ย (cm ³)	อัตราส่วนการขยายตัว
22	1	5.3212	5.7872	199.0042
	2	5.8158		
	3	6.2245		
23	1	5.6411	5.0928	163.1272
	2	4.4337		
	3	5.2035		
24	1	5.9347	5.9919	209.5827
	2	5.7461		
	3	6.2950		
25	1	6.1706	6.6260	242.3455
	2	6.5559		
	3	7.1516		
26	1	7.4124	6.7525	248.8810
	2	6.4857		
	3	6.3595		
27	1	6.7850	7.6724	296.4090
	2	7.2662		
	3	8.9661		

ข.4 ผลการทดลองหาค่าสีก่อนทอด

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองหาค่าสีก่อนทอด

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
1 - 9	1	1	106.53	-2.42	4.98
		2	106.34	-2.10	5.15
		3	105.95	-1.74	4.98
		เฉลี่ย	106.27	-2.09	5.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองหาค่าสีก่อนทอด (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
10 - 18	1	1	106.53	-2.42	4.98
		2	106.34	-2.10	5.15
		3	105.95	-1.74	5.07
	เฉลี่ย		106.27	-2.09	5.07
19 - 27	1	1	105.34	0.74	4.08
		2	102.71	0.62	3.54
		3	103.89	0.99	3.56
	เฉลี่ย		103.98	0.78	3.73

ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
1	1	1	97.71	-2.93	5.39	1	1	1	99.46	-0.26	9.77
		2	97.78	-3.27	5.54		2	2	98.93	-0.39	9.36
		3	97.70	-2.85	5.37		3	3	98.98	-0.30	9.29
	2	1	101.59	-1.87	6.65	2	1	1	100.43	-0.19	9.07
		2	97.31	-1.16	5.15		2	2	97.28	0.03	5.41
		3	102.19	-0.65	6.46		3	3	97.91	-0.76	7.32
	3	1	97.95	-0.87	4.75	3	1	1	99.15	-0.50	8.43
		2	98.32	-0.29	5.59		2	2	98.01	0.43	10.19
		3	98.94	-0.66	5.85		3	3	97.77	-0.26	9.73
	เฉลี่ย		98.83	-1.62	5.64	เฉลี่ย		98.66	-0.24	8.73	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*		
3	1	1	100.41	2.20	10.70	4	1	1	96.91	-1.39	6.69		
		2	97.07	-1.12	6.55			2	95.93	-1.60	5.80		
		3	97.87	2.02	9.19			3	94.23	-1.58	4.47		
	2	1	98.40	-0.02	8.36		2	1	102.00	1.47	11.42		
		2	101.59	0.57	11.75			2	94.08	-1.25	4.57		
		3	99.10	-0.01	10.67			3	101.37	2.73	11.35		
	3	1	98.66	1.16	10.55		3	1	101.05	1.72	11.27		
		2	96.91	-1.39	6.69			2	96.48	0.15	6.36		
		3	95.93	-1.60	5.80			3	101.05	1.19	10.04		
	เฉลี่ย			98.44	0.20		8.92	เฉลี่ย			98.12	0.16	8.00

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*		
5	1	1	96.24	1.86	7.85	6	1	1	97.60	3.38	10.09		
		2	97.15	2.15	8.74			2	94.80	-1.32	5.17		
		3	94.65	1.50	7.37			3	96.35	2.84	8.59		
	2	1	96.80	1.54	8.07		2	1	99.78	4.36	12.50		
		2	96.80	0.76	8.05			2	96.00	-0.52	7.13		
		3	97.33	1.92	8.79			3	98.45	3.59	10.51		
	3	1	96.62	1.57	8.02		3	1	95.14	1.54	6.68		
		2	96.26	0.24	7.17			2	99.45	4.12	11.96		
		3	98.30	2.35	9.91			3	95.19	1.51	6.84		
	เฉลี่ย			96.68	1.54		8.22	เฉลี่ย			96.97	2.17	8.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*		
7	1	1	94.81	0.10	6.37	8	1	1	93.39	0.12	7.87		
		2	94.88	0.60	6.59			2	94.14	-0.44	7.75		
		3	94.81	-0.15	6.48			3	94.16	-0.22	6.00		
	2	1	96.29	1.08	8.52		2	1	93.08	-1.02	5.02		
		2	96.06	1.43	9.49			2	93.34	-1.18	5.02		
		3	94.61	0.20	6.35			3	94.22	-1.02	7.12		
	3	1	94.89	0.35	6.46		3	1	93.84	-0.38	5.55		
		2	96.08	-2.51	9.19			2	93.29	-0.18	5.38		
		3	96.70	2.42	9.96			3	95.13	1.64	8.05		
	เฉลี่ย			95.46	0.95		7.71	เฉลี่ย			93.84	-0.30	6.42

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*		
9	1	1	93.21	-0.26	5.37	10	1	1	105.39	-2.02	8.26		
		2	93.21	-1.45	4.64			2	101.90	-1.61	5.31		
		3	91.45	-2.15	3.77			3	101.42	-1.39	5.51		
	2	1	93.21	-0.26	5.47		2	1	104.50	-4.30	9.12		
		2	92.97	-1.28	4.62			2	99.64	-1.80	3.85		
		3	92.23	-2.20	4.22			3	100.54	-2.08	4.64		
	3	1	92.32	-1.07	3.94		3	1	101.62	-1.70	6.84		
		2	93.62	0.46	6.13			2	103.44	-1.25	7.31		
		3	92.64	-2.08	4.04			3	99.43	-1.97	4.11		
	เฉลี่ย			92.76	-1.14		4.69	เฉลี่ย			101.99	-2.01	6.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
11	1	1	106.81	-0.69	10.54
		2	99.33	-0.81	6.00
		3	99.13	0.12	5.41
	2	1	100.60	0.89	7.06
		2	100.40	1.38	5.02
		3	100.08	1.30	4.86
	3	1	100.24	-0.85	6.74
		2	103.99	-0.65	8.96
		3	105.95	0.12	8.81
	เฉลี่ย			101.84	0.09

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
12	1	1	105.24	0.38	13.56
		2	98.38	-1.30	6.03
		3	97.59	-0.70	4.69
	2	1	98.09	-0.86	5.75
		2	96.02	0.40	4.42
		3	106.86	-0.53	12.70
	3	1	101.96	1.45	9.42
		2	99.77	0.11	6.39
		3	98.98	-0.82	6.63
	เฉลี่ย			100.32	-0.21

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	
13	1	1	98.48	-1.20	5.60	
		2	97.04	-1.42	5.29	
		3	101.79	0.45	9.15	
	2	1	98.36	-0.38	6.16	
		2	96.82	-1.68	5.63	
		3	98.86	0.82	7.58	
	3	1	103.78	1.04	11.30	
		2	99.07	-1.50	5.96	
		3	98.65	-0.47	5.70	
	เฉลี่ย			99.21	-0.48	6.93

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
14	1	1	99.56	2.27	9.68
		2	97.95	2.74	7.80
		3	98.09	2.93	8.97
	2	1	97.67	3.11	8.91
		2	98.30	2.38	9.31
		3	100.26	2.92	10.38
	3	1	99.97	2.31	10.38
		2	100.91	1.64	10.24
		3	97.79	1.67	7.53
	เฉลี่ย			98.94	2.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
15	1	1	97.77	1.63	8.32	16	1	1	96.67	1.79	6.96
		2	97.07	1.47	7.89			2	101.79	3.90	13.07
		3	96.45	1.40	5.73			3	98.60	1.88	9.65
	2	1	95.62	1.87	6.30		2	1	96.45	-0.09	6.82
		2	96.18	1.51	6.34			2	98.39	2.91	9.90
		3	96.85	2.16	7.50			3	99.69	3.90	11.69
	3	1	100.17	2.28	11.20		3	1	97.70	-0.64	6.94
		2	95.62	0.63	6.07			2	96.76	1.84	7.00
		3	94.88	1.52	5.06			3	101.62	3.89	13.57
	เฉลี่ย			96.73	1.61		7.16	เฉลี่ย			98.63

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*		
17	1	1	94.84	0.35	4.75	18	1	1	95.09	0.10	6.20		
		2	95.45	1.39	5.47			2	95.65	0.40	6.01		
		3	94.75	2.57	9.16			3	95.23	0.58	6.45		
	2	1	95.05	0.28	5.97		2	1	95.76	-0.04	6.20		
		2	97.15	2.10	8.18			2	95.34	0.18	6.40		
		3	96.58	1.87	7.90			3	95.88	-0.21	6.48		
	3	1	95.65	0.63	7.00		3	1	95.19	-0.54	5.91		
		2	96.58	1.42	7.53			2	96.59	0.61	7.86		
		3	97.91	2.17	9.04			3	95.96	0.16	6.78		
	เฉลี่ย			96.00	1.42		7.22	เฉลี่ย			95.63	0.14	6.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
19	1	1	101.58	-2.42	6.00
		2	105.49	-1.90	7.66
		3	103.36	-1.02	7.15
	2	1	101.26	-2.44	8.06
		2	99.23	-3.15	4.95
		3	99.98	-1.81	5.46
	3	1	102.45	-2.74	7.80
		2	102.71	-2.64	6.38
		3	100.32	-1.36	5.63
	เฉลี่ย			101.82	-2.16
20	1	1	101.33	0.20	7.20
		2	98.15	-0.32	6.59
		3	79.90	0.21	5.52
	2	1	99.06	-0.72	6.36
		2	100.93	0.50	7.14
		3	98.97	-0.04	6.03
	3	1	97.65	-0.45	6.98
		2	100.46	0.56	6.26
		3	97.73	-0.16	5.67
	เฉลี่ย			97.13	-0.02

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
21	1	1	95.81	0.77	5.51
		2	99.43	0.86	7.68
		3	98.19	1.29	6.58
	2	1	96.93	0.66	5.98
		2	98.80	0.62	7.78
		3	97.95	0.37	6.73
	3	1	98.78	-0.44	8.89
		2	98.85	-0.19	8.90
		3	98.37	0.63	6.99
	เฉลี่ย			98.12	0.51
22	1	1	96.50	0.60	7.30
		2	98.23	1.53	7.64
		3	97.95	1.02	7.09
	2	1	99.44	1.49	9.27
		2	98.75	0.94	8.04
		3	101.30	1.16	9.88
	3	1	98.53	0.68	8.32
		2	96.14	1.35	6.62
		3	98.68	1.22	8.54
	เฉลี่ย			98.39	1.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
23	1	1	95.38	0.59	7.02	24	1	1	95.31	0.01	6.06
		2	97.88	1.92	8.66			2	95.79	1.95	7.48
		3	94.57	1.21	6.24			3	94.93	0.36	6.41
	2	1	97.45	1.75	8.42		2	1	98.78	3.08	10.93
		2	97.60	2.75	8.93			2	95.81	-0.06	7.16
		3	98.93	2.45	9.97			3	96.14	0.36	7.27
	3	1	96.43	2.02	7.36		3	1	95.65	0.16	6.78
		2	98.12	2.18	9.36			2	94.83	0.73	6.02
		3	97.10	1.60	7.89			3	97.15	2.31	8.82
	เฉลี่ย			97.05	1.83		8.21	เฉลี่ย			96.04

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*
25	1	1	96.32	2.34	8.13	26	1	1	95.30	-0.96	5.81
		2	95.11	-0.99	6.03			2	95.90	2.49	7.55
		3	94.15	-0.51	5.03			3	93.03	-1.70	4.74
	2	1	98.13	2.89	10.63		2	1	95.99	3.10	8.70
		2	93.86	-0.98	5.30			2	94.75	-0.42	5.52
		3	97.78	1.50	9.61			3	95.19	0.53	7.37
	3	1	97.05	2.24	9.10		3	1	94.40	-1.48	4.94
		2	94.65	-0.99	6.45			2	95.19	1.21	6.72
		3	95.17	-0.32	6.36			3	94.58	-1.46	5.07
	เฉลี่ย			95.80	0.58		7.40	เฉลี่ย			94.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าสีหลังทอด (ต่อ)

No.	ชั้นที่	ครั้งที่	L*	a*	b*	
27	1	1	92.89	-0.61	4.57	
		2	93.72	-0.45	4.61	
		3	94.07	-0.09	4.93	
	2	1	93.27	-1.40	3.90	
		2	92.96	-0.76	4.06	
		3	93.37	-0.37	4.07	
	3	1	92.51	-0.62	4.10	
		2	92.60	-0.97	4.26	
		3	93.24	-0.20	4.22	
		เฉลี่ย		93.18	-0.61	4.30

ข.6 ผลการทดลองค่าน้ำหนักก่อนทอดและหลังทอด

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองค่าน้ำหนักก่อนทอดและหลังทอด

No.	น้ำหนักก่อนทอด (g)	น้ำหนักหลังทอด (g)
1	34.2112	29.5280
2	32.3400	24.6935
3	31.0793	23.7579
4	31.3946	25.5932
5	32.5552	23.7858
6	33.7017	23.1034
7	31.6341	25.0050
8	33.6043	23.0635
9	32.8739	22.3518
10	30.4788	25.6257
11	31.4215	24.3760
12	29.7297	21.8652
13	29.4947	24.0441
14	30.2932	22.0175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนักก่อนทอดและหลังทอด (ต่อ)

No.	น้ำหนักก่อนทอด (g)	น้ำหนักหลังทอด (g)
15	30.1874	22.3254
16	35.8992	27.9948
17	32.4357	23.5857
18	32.5474	23.0108
19	32.8844	27.2751
20	33.7406	26.3261
21	30.2781	22.0771
22	31.8845	24.8725
23	32.6374	22.6489
24	32.1655	22.1575
25	33.7674	26.8248
26	34.1135	24.9690
27	34.3543	24.2426



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าปริมาณความชื้น

Regression Statistics	
Multiple R	0.973957854
R Square	0.948593901
Adjusted R Square	0.87019119
Standard Error	1.887630321
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	1183.510383	131.5011536	36.90588918	2.05874E-09
Residual	18	64.13666809	3.563148227		
Total	27	1247.647051			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A
อุณหภูมิ	0.46323858	0.055907531	8.28579935	1.481E-07
เวลา	-1.33352988	1.715144779	-0.7775028	0.4469613
ความถี่	-0.28923673	0.182518467	-1.5846984	0.1304461
อุณหภูมิ ²	-0.0014979	0.000270983	-5.527678	3.007E-05
เวลา ²	0.2418065	0.122674512	1.97112255	0.0642839
ความถี่ ²	-9.1267E-05	0.002353843	-0.0387734	0.9694978
อุณหภูมิ*เวลา	-0.02254266	0.007049972	-3.1975528	0.0049893
อุณหภูมิ*ความถี่	0.0014693	0.000876977	1.67540907	0.1111381
เวลา*ความถี่	-8.2466E-05	0.010606959	-0.0077747	0.9938823

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่า % ความชื้นที่ลดลง

Regression Statistics	
Multiple R	0.981184904
R Square	0.962723816
Adjusted R Square	0.890601067
Standard Error	2.470487637
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	2837.318814	315.257646	51.65355997	1.39049E-10
Residual	18	109.859565	6.103309165		
Total	27	2947.178379			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A
อุณหภูมิ	0.019151041	0.073170505	0.261731709	0.796499836
เวลา	5.984482154	2.244742483	2.665999418	0.0157469
ความถี่	0.597087817	0.238876019	2.499572032	0.022327873
อุณหภูมิ ²	0.000344683	0.000354656	0.971880092	0.343990217
เวลา ²	-0.507546941	0.160553611	-3.161230307	0.005403561
ความถี่ ²	-0.000408442	0.003080656	-0.132582893	0.895994145
อุณหภูมิ*เวลา	0.018548834	0.009226843	2.010312103	0.059626196
อุณหภูมิ*ความถี่	-0.002103492	0.001147768	-1.832681136	0.083445493
เวลา*ความถี่	-0.001202524	0.013882147	-0.086623744	0.931926936

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

Regression Statistics	
Multiple R	0.814948965
R Square	0.664141815
Adjusted R Square	0.459315955
Standard Error	3.145828356
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	352.2471103	39.13856781	3.954894329	0.007139347
Residual	18	178.1322488	9.896236043		
Total	27	530.3793591			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A
อุณหภูมิ	0.101241736	0.093172638	1.086603728	0.291549557
เวลา	-4.010740531	2.858372755	-1.403155177	0.177585523
ความถี่	0.303444845	0.304175963	0.9975964	0.331697918
อุณหภูมิ ²	-0.00041597	0.000451606	-0.921092193	0.369183344
เวลา ²	0.189913369	0.20444308	0.928930285	0.365215843
ความถี่ ²	-0.005756755	0.003922794	-1.467513902	0.159492644
อุณหภูมิ*เวลา	0.015529468	0.011749124	1.321755436	0.202803061
อุณหภูมิ*ความถี่	0.000125213	0.001461525	0.085672832	0.932672269
เวลา*ความถี่	0.012101399	0.017677017	0.684583772	0.502326922

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร

Regression Statistics	
Multiple R	0.825040821
R Square	0.680692356
Adjusted R Square	0.483222291
Standard Error	33.0636345
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	41948.385	4660.931666	4.26355189	0.004941757
Residual	18	19677.67068	1093.203926		
Total	27	61626.05567			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A
อุณหภูมิ	-0.692788028	0.979273403	-0.707451081	0.488345515
เวลา	53.41758106	30.04238673	1.778073811	0.092289031
ความถี่	4.350602479	3.196983978	1.360845881	0.1903589
อุณหภูมิ ²	0.007633114	0.004746516	1.608151128	0.125200665
เวลา ²	-1.510855752	2.148760363	-0.703129012	0.490970534
ความถี่ ²	-0.111040778	0.041229788	-2.693217311	0.014864173
อุณหภูมิ*เวลา	-0.18151672	0.123486943	-1.469926417	0.158844911
อุณหภูมิ*ความถี่	0.006804579	0.015361083	0.442975225	0.663061378
เวลา*ความถี่	-0.074553465	0.185790949	-0.401276085	0.692940648

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าสี่ที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด

Regression Statistics	
Multiple R	0.976783928
R Square	0.954106842
Adjusted R Square	0.878154327
Standard Error	0.60759918
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	2271.662718	252.4069687	683.7022089	5.96388E-20
Residual	18	6.645181743	0.369176764		
Total	27	2278.3079			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A
อุณหภูมิ	0.022713203	0.017995775	1.262140878	0.223007279
เวลา	0.656722367	0.552078736	1.189544759	0.249680338
ความถี่	-0.114381558	0.058749889	-1.946923836	0.067320187
อุณหภูมิ ²	0.000138839	8.72251E-05	1.591733361	0.128853576
เวลา ²	-0.029755923	0.039487039	-0.75356176	0.460856497
ความถี่ ²	0.000556506	0.000757666	0.73450045	0.472104786
อุณหภูมิ*เวลา	3.42072E-05	0.002269278	0.015074061	0.988138921
อุณหภูมิ*ความถี่	0.000132047	0.000282285	0.467778921	0.645556485
เวลา*ความถี่	0.00117008	0.003414217	0.342708171	0.735787602

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ตารางแสดงผลของตัวแปรการทอดต่อค่าความแตกต่างของ L*

Regression Statistics	
Multiple R	0.956502042
R Square	0.914896156
Adjusted R Square	0.82151667
Standard Error	0.843402769
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	137.6465018	15.29405576	21.50070121	1.36543E-07
Residual	18	12.80390816	0.711328231		
Total	27	150.45041			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A
อุณหภูมิ	0.015459379	0.024979767	0.618876005	0.543751642
เวลา	-0.015342328	0.766335357	-0.020020384	0.98424737
ความถี่	-0.082877917	0.081550174	-1.016281304	0.322961978
อุณหภูมิ ²	0.00015273	0.000121076	1.261436623	0.223254998
เวลา ²	-0.020850638	0.054811592	-0.380405636	0.708096158
ความถี่ ²	0.001119493	0.001051709	1.064451554	0.301195825
อุณหภูมิ*เวลา	0.002846125	0.003149963	0.90354225	0.378171869
อุณหภูมิ*ความถี่	-0.000295182	0.000391838	-0.753326192	0.46099451
เวลา*ความถี่	0.007164993	0.004739243	1.511843355	0.147931785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้