

การทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค

Study on Ultrasonic Frying



นางสาวจรรยา
นางสาวน้ำผึ้ง
นายปรัชญา

เดี่ยวประทีป
เอกศรีสกุล
สายเนียม

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 58556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

วันที่เดือนปี ๗ ๖ อ.ค. ๒๕๔๖

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

บ.ที่สมัครนำใบใช้
i.....

การทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค

Study on Ultrasonic Frying

โดย

นางสาวจรรยา เตียวประทีป

นางสาวน้ำผึ้ง เอกศรีสกุล

นายปรัชญา สายเนียม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก

Study on Ultrasonic Frying

ผู้จัดทำ

1. นางสาวจริยา เตียวประทีป รหัสนักศึกษา 43010591
2. นางสาวน้ำผึ้ง เอกศรีสกุล รหัสนักศึกษา 43010668
3. นายปรัชญา สายเนียม รหัสนักศึกษา 43010688



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค

นางสาวจรรยา	เดี่ยวประทีป	รหัสนักศึกษา	43010591
นางสาวน้ำผึ้ง	เอกศรีสกุล	รหัสนักศึกษา	43010668
นายปรัชญา	สายเนียม	รหัสนักศึกษา	43010688
ผศ.ดร.มาฤดี	ผ่องพิพัฒน์พงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2546			

บทคัดย่อ

ในโครงการนี้เป็นการศึกษาการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค ตัวแปรที่เลือกศึกษามี 3 ตัวแปร ประกอบด้วยวิธีการทอด (แบบดั้งเดิม/แบบใช้อุลตราโซนิคที่ความถี่ 40 kHz), อุณหภูมิการทอด ($170^{\circ}\text{C}/190^{\circ}\text{C}$) และขนาดของตัวอย่าง ($\varnothing 1.55$ ซม./ $\varnothing 2.67$ ซม.) ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา คือ ไข่กรอกไก่ ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ประกอบด้วย 8 การทดลอง ในการนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรหลักและผลกระทบร่วมกันของตัวแปรต่อปริมาณความชื้น, ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น, อัตราส่วนการขยายตัวและค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอด จากการศึกษาพบว่า การทอดด้วยอุลตราโซนิคทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยกว่าการทอดแบบดั้งเดิม ในขณะที่ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น, อัตราส่วนการขยายตัวและค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงที่ได้มีค่าสูงกว่า นอกจากนี้ตัวแปรที่ศึกษายังส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

Study on Ultrasonic Frying

Jariya Taiwprateep

Nampung Akesrisakul

Pratya Sainium

Asst.Prof.Dr.Maradee Phongpipatpong Advisor

ABSTRACT

An applicate of Ultrasonic in food frying is investigated in this study. Three factors to consider include frying method (traditional/ultrasonic 40 kHz), sample size ($\text{Ø}1.55 \text{ cm.}/\text{Ø}2.67 \text{ cm.}$) and frying temperature ($170^{\circ}\text{C}/190^{\circ}\text{C}$). Sausage is used as sample. 2^3 factorial experiment giving the eight treatment combinations is used to determine the main effects and interaction effects on moisture content, oil uptake, expansion ratio and L-value of the products. The use of ultrasonic frying decrease product moisture but it increases in oil uptake, expansion and the L-value of the product. There are interaction effects between those factors. Therefore, it is important to understand the impact of there interactions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยครั้งนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้หลักการ แนวคิด คำแนะนำและความรู้ในด้าน การศึกษา การดำเนินงานวิจัย และอื่น ๆ อย่างต่อเนื่องมาตลอด และกราบขอบพระคุณ รศ.สาทิป รัต นภาสกร ที่ให้คำแนะนำและความคิดทั้งในการทำวิจัยและการดำเนินชีวิต รวมทั้งคุณอำนาจ กุตะคุ ที่ให้ คำแนะนำในส่วนของโรงประลองกำลังและยังรวมถึงคุณหทัยรัตน์ สกุลพวงที่ให้ความสะดวกในการ ยืมอุปกรณ์ทุกครั้งที่ต้องการ

ขอบพระคุณบริษัท ดี เอส ซี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องอุตสาหกรรม โซนิก และคุณสุรสิทธิ์ เลหาวีระพานิช ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องทอดไฟฟ้า

ขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำเนิดเราขึ้นมาทำวิจัยนี้ เป็นแรงผลักดันและเป็นกำลังใจ อันยิ่งใหญ่ให้เราก้าวเดินอย่างมั่นคง รวมถึงอาจารย์เชษฐา ชัยโหมและเพื่อน ๆ ที่มีคำพูดคอยกระตุ้นให้ กำลังใจเรา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	iv
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	v
กิตติกรรมประกาศ	vi
สารบัญ	vii
สารบัญตาราง	x
สารบัญรูป	xii
สัญลักษณ์	xv
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	
2.1 การทอด	3
2.1.1 วิธีการทอด	3
2.1.2 ระบบการทอด	4
2.1.3 ปრაกฏการณ์ที่เกิดระหว่างการทอด	6
2.1.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารทอด	14
2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารในกระบวนการทอด	15
2.1.6 ผลกระทบของความร้อนในการทอด	16
2.1.7 ไขมันและน้ำมัน	17
2.2 ทฤษฎีคลื่นอูลตราโซนิก	21
2.2.1 การเกิดคลื่นอูลตราโซนิก	21
2.2.2 เปียโซทรานสดิวเซอร์ (Piezo Transducer)	22
2.2.3 เปียโซอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค	23
2.2.4 ข้อควรรู้ในการใช้งานตัวส่งและตัวรับ	23
2.2.5 ประโยชน์การใช้งานของคลื่นอูลตราโซนิก	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 อุปกรณ์และการทดลอง		
3.1	การเตรียมตัวอย่าง	27
3.2	การเตรียมชุดเครื่องทอด	28
3.3	ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ	29
3.4	การวางแผนการทดลอง	32
3.5	การวิเคราะห์คุณลักษณะของไส้กรอก	35
3.5.1	การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น	35
3.5.2	การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น	35
3.5.3	การวิเคราะห์อัตราส่วนการขยายตัวของไส้กรอก	36
3.5.4	การวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง (L)	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย		
4.1	ผลการทดลอง	39
4.1.1	ผลการทดลองค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์	40
4.1.2	ผลการทดลองค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์	40
4.1.3	ผลการทดลองค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	41
4.1.4	ผลการทดลอง %ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง	42
4.2	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สภาวะต่าง ๆ ตามตารางการออกแบบ เชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	42
4.2.1	การวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์	42
4.2.2	การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์	47
4.2.3	การวิเคราะห์อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	52
4.2.4	การวิเคราะห์ค่าความสว่าง	57
4.3	ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิใจกลางของไส้กรอกและอุณหภูมิของน้ำมัน	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ		
5.1	สรุปผลการทดลอง	66
5.2	ข้อเสนอแนะ	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	70
ภาคผนวก ข	78
ภาคผนวก ค	80
ภาคผนวก ง	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	จุดที่เป็นควัน จุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันต่าง ๆ	18
ตารางที่ 3.1	แสดงเครื่องหมายที่ใช้ในตารางการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ³	33
ตารางที่ 3.2	แผนการทดลองการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ³	34
ตารางที่ 3.3	แสดงสภาวะการเตรียมตัวอย่าง	34
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลองค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์	40
ตารางที่ 4.2	ผลการทดลองค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์	40
ตารางที่ 4.3	ผลการทดลองค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	41
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลอง %ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง	42
ตารางที่ ก.1	ผลการทดลองค่าปริมาณน้ำที่หายไป	70
ตารางที่ ก.2	ผลการทดลองค่า % Moisture Content	71
ตารางที่ ก.3	ผลการทดลองค่าอัตราส่วนการขยายตัวตามเส้นผ่านศูนย์กลาง	71
ตารางที่ ก.4	แสดงค่าน้ำหนักของไส้กรอกก่อนทอดที่เวลาต่าง ๆ	72
ตารางที่ ก.5	แสดงค่าน้ำหนักของไส้กรอกหลังทอดที่เวลาต่าง ๆ	73
ตารางที่ ก.6	ผลการทดลองค่าอุณหภูมิใจกลางของไส้กรอก	74
ตารางที่ ก.7	ผลการทดลองค่าอุณหภูมิของน้ำมัน	75
ตารางที่ ก.8	ผลการทดลองค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ (L)	76
ตารางที่ ก.9	ผลการทดลองค่า a	76
ตารางที่ ก.10	ผลการทดลองค่า b	77
ตารางที่ ง.1	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้น โดยอ่านค่าตามอุณหภูมิ	86
ตารางที่ ง.2	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้น โดยอ่านค่าขนาดของไส้กรอก	87
ตารางที่ ง.3	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้น	87
ตารางที่ ง.4	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยอ่านค่าตามอุณหภูมิ	88
ตารางที่ ง.5	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยอ่านค่าตามขนาดของไส้กรอก	88
ตารางที่ ง.6	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการขยายตัว โดยอ่านค่าตามอุณหภูมิ	89
ตารางที่ ง.8	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการขยายตัว โดยอ่านค่าตามขนาดของไส้กรอก	90
ตารางที่ ง.9	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการขยายตัว	90
ตารางที่ ง.10	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง โดยอ่านค่าตามอุณหภูมิ	91
ตารางที่ ง.11	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง โดยอ่านค่าตามขนาดของไส้กรอก	91
ตารางที่ ง.12	แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารโดยใช้ความร้อนซึ่งเป็นที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เพราะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัส สี กลิ่นและรสชาติเฉพาะ การทอดอาศัยหลักการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางให้ความร้อน (น้ำมัน) ไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว เกิดการถ่ายเทของความร้อนและความชื้นระหว่างอาหารกับน้ำมัน การถ่ายเทเกิดขึ้นทั้งภายในและรอบ ๆ ชิ้นอาหาร ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของการทอดแบบจุ่มในน้ำมัน (Deep-Fat Frying) [1] นอกจากนี้การทอดยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในอาหาร ช่วยทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนและช่วยลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ลง การลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารทอดจะมีผลต่อการเก็บรักษากลิ่นรส เนื้อสัมผัส คุณค่าทางอาหาร เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารทอดที่ได้มีความชื้นต่ำจึงทำให้อายุการเก็บยาวนานขึ้น โดยทั่วไปอาหารมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน ประกอบด้วยช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันภายในเนื้ออาหาร เมื่ออาหารสัมผัสน้ำมันร้อนในระหว่างการทอด อาหารจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้น้ำและไอน้ำเคลื่อนตัวออกจากช่องว่างในอาหารและน้ำมันร้อนจะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ อาหารที่ผ่านการทอดจึงมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในระดับหนึ่ง และมีมวลลดลงเนื่องจากการสูญเสียความชื้น ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับการควบคุมปัจจัยการผลิต เช่น สภาวะการผลิต น้ำมันที่ใช้และลักษณะอาหาร ซึ่งส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอด [2]

จากการศึกษาโดยการนำคลื่นอัลตราโซนิก (ช่วงความถี่ 20-40 kHz) มาใช้กับงานทางด้านอาหาร พบว่าความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกสามารถส่งผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนเกิดเป็นช่องว่างภายใน เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและกายภาพ จึงได้มีผู้สนใจนำคลื่นอัลตราโซนิกไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอาหาร [3]

ปัจจุบันมีแนวโน้มของการนำคลื่นอัลตราโซนิก ไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น เช่น ในกระบวนการการสเตอริไลซ์, การสกัด, การเกิดผลึกและการทำความสะอาด เป็นต้น ส่วนการนำคลื่นเสียงอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้กับการทอดยังไม่ค่อยมีผู้ทำการศึกษา จึงเป็นที่น่าสนใจว่าคลื่นอัลตราโซนิกมีผลอย่างไรต่อการทอด จากการสืบค้นพบว่าบริษัทแห่งหนึ่งได้ผลิตเครื่องทอดที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกในช่วงความถี่ต่ำและได้ระบุว่า การทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกสามารถลดเวลาการทอด ประหยัดน้ำมันที่ใช้ทอดและยังทำให้อาหารมีลักษณะที่ดีขึ้นกว่าการทอดแบบธรรมดา [4]

ดังนั้นการใช้คลื่นอัลตราโซนิคกับการทอดจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและควรทำการศึกษาเพื่อให้ทราบข้อมูลเพิ่มเติมมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

ในโครงการนี้มีวัตถุประสงค์สำคัญ 2 ประการ คือ

1. ศึกษาวิธีการทอดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
2. ศึกษาผลของการใช้คลื่นอัลตราโซนิคต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษาจะทำการศึกษาเฉพาะในตัวอย่าง ดังนี้

1. ใช้ไส้กรอกไก่เป็นตัวอย่างในการศึกษา
2. ชิ้นอาหารที่ใช้ทอดมีขนาดสม่ำเสมอและทอดตัวอย่างครั้งละไม่เกิน 200 กรัม
3. ในการทอดจะใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิค (Ultrasonic) ที่มีความถี่เท่ากับ 40 kHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 การทอด

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนที่มีการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางให้ความร้อนไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว ตัวกลางที่ใช้ คือ น้ำมัน การทอดเป็นการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์ในอาหาร ทำให้ค่า Water activity ที่ผิวหน้าของอาหารหรือทั้งชิ้นลดลง อายุการเก็บของอาหารทอดขึ้นกับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมัน ในระหว่างการทอดมีการระเหยของน้ำออกจากชิ้นอาหารและมีการพองตัวของแป้งที่เกิดการเจลาติไนซ์ (gelatinization) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเฉพาะทางด้านเนื้อสัมผัสและรสชาติ เวลาที่ใช้ในการทอดจนได้ผลิตภัณฑ์จะใช้เวลานานมาก พบว่า อาหารจะสุกในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ (transient state) โดยที่อุณหภูมิของอาหารมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำมันอยู่มาก [2]

การทอดเป็นกรรมวิธีการแปรรูปที่แตกต่างจากวิธีอื่น ๆ โดยทั่วไปดังนี้ [5]

1. การทอดใช้เวลานานมาก ส่วนใหญ่จะเสร็จภายใน 5 นาที ทั้งนี้เนื่องจาก
 - 1.1 การทอดมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางให้ความร้อน คือ น้ำมันและอุณหภูมิของอาหารมาก
 - 1.2 ขนาดของชิ้นอาหารที่ใช้ในการทอดส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักน้อย
2. ผลิตภัณฑ์อาหารทอดโดยทั่วไปจะมีน้ำมันอยู่ในผลิตภัณฑ์ประมาณ 10-40% โดยน้ำหนัก
3. ผลิตภัณฑ์อาหารทอดจะมีคุณลักษณะความกรอบมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปชนิดอื่น
4. ตัวกลางส่งผ่านความร้อนที่ใช้ คือ น้ำมัน ซึ่งมีผลทำให้องค์ประกอบและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเฉพาะแตกต่างกับวิธีการแปรรูปอาหารอื่น ๆ

2.1.1 วิธีการทอด [2]

วิธีการทอดที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป มีอยู่ 2 วิธี คือ

2.1.1.1 การทอดแบบสัมผัส (Contact frying)

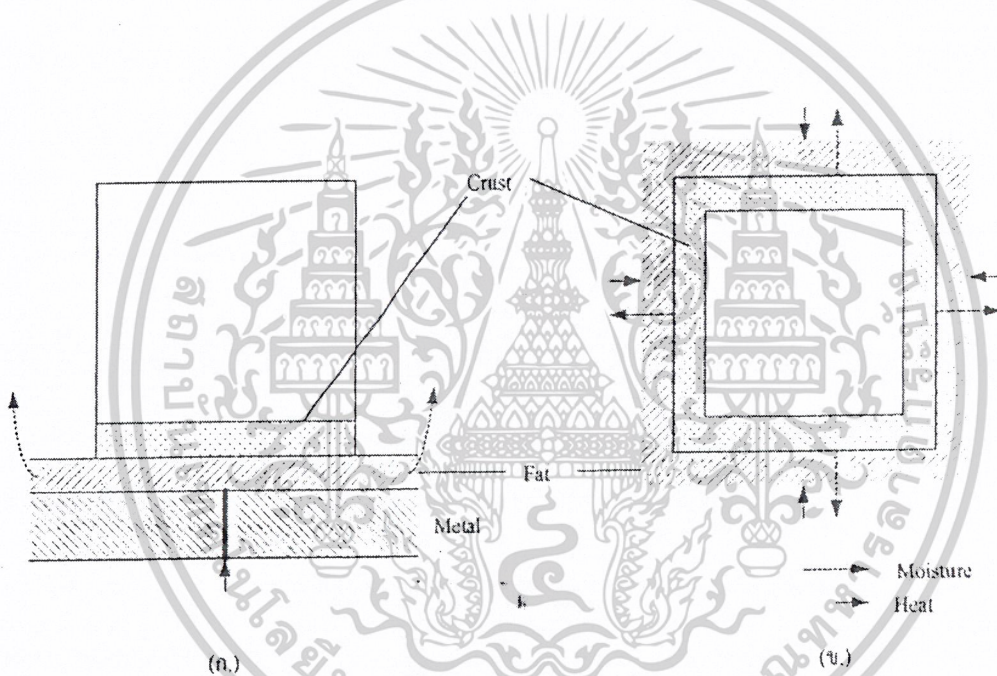
วิธีนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอนสไลด์ ไข่ เบอเร็กเกอร์ การส่งผ่านความร้อนจากผิวหน้าของกระทะที่ร้อนไปยังน้ำมัน ดังรูปที่ 2.1 (ก) ความหนาของชั้นน้ำมันที่สัมผัสกับอาหารจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอาหารเป็นสีน้ำตาล ขณะเดียวกันจะเกิดฟองจากไอน้ำที่ผิวหน้าอาหาร การทอดแบบสัมผัสนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสูง อยู่ในช่วง $200-450 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

2.1.1.2 การทอดแบบจุ่มในน้ำมัน (Deep-fat frying)

การส่งผ่านความร้อนโดยการทอดวิธีนี้ จะเกิดขึ้นทั้งการพาความร้อน (heat convection) ภายในน้ำมันร้อนและการนำความร้อน (heat conduction) ภายในชิ้นอาหาร ผิวหน้าของอาหารจะได้รับความร้อนในทุก ๆ ด้าน จึงทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและลักษณะปรากฏอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.1 (ข) ในช่วงแรกของการทอดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าประมาณ $200-300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ แต่เมื่อทอดไปนานขึ้นมีการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า เกิด vapor bubble รอบ ๆ ชิ้นอาหารเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น $800-1000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$



รูปที่ 2.1 การส่งผ่านมวลและความร้อน [2]

(ก) การทอดแบบสัมผัส (ข) การทอดแบบจุ่มในน้ำมัน

2.1.2 ระบบการทอด

ในกระบวนการทอดอาหารแบ่งระบบการทอดอาหารเป็น 2 ระบบ คือ [6]

2.1.2.1 ระบบการทอดแบบกะ (Batch Frying System) เป็นระบบการทอดที่มีขนาดเล็ก ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย นิยมใช้ในภัตตาคารเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสามารถทอดอาหารครั้งละน้อย ๆ หรือทอดเป็นชุด ๆ ได้ ปริมาณอาหารที่ทอดขึ้นอยู่กับขนาดเครื่องทอด ปริมาณน้ำมันและความชื้นของอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 ระบบการทอดแบบต่อเนื่อง (Continuous Frying System) เป็นระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรม มีขนาดใหญ่ ราคาแพง สามารถทอดอาหารอย่างต่อเนื่อง ได้คุณภาพของอาหารใกล้เคียงกัน เนื่องจากระบบควบคุมการทำงานเป็นระบบอัตโนมัติ

ระบบการทอดประกอบด้วยระบบย่อย ๆ 5 ระบบ คือ [2]

1. ระบบเครื่องมือและอุปกรณ์ (Mechanical System) เป็นระบบการส่งอาหารเข้าและออกจากร้าน้ำมัน โดยส่วนใหญ่จะเป็นสายพานเหล็กปลอดสนิมที่มีการหมุนเวียนการทำงานด้วยแรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ โดยที่ตำแหน่งและลักษณะการทำงานของสายพานแตกต่างกัน ไปขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

2. ระบบน้ำมัน (Fat System) จะเป็นภาชนะที่บรรจุน้ำมันสำรองและน้ำมันที่ใช้หมุนเวียนภายในเครื่องทอด โดยน้ำมันที่หมุนเวียนภายในเครื่องทอดจะช่วยควบคุมให้อุณหภูมิของน้ำมันสม่ำเสมอ

3. ระบบให้ความร้อน (Thermal System) เป็นระบบที่ให้ความร้อนกับน้ำมัน แบ่งย่อยเป็นรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

ก) ขดลวดต้านทานไฟฟ้า (Electric Immersion Heating Coils) เป็นวิธีที่ให้ความร้อนสัมผัสกับน้ำมัน โดยตรง ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูง แต่ไม่เป็นที่แพร่หลายเพราะต้นทุนค่าไฟฟ้ามีราคาแพง

ข) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นวิธีที่ให้ความร้อนโดยการถ่ายเทความร้อนจากท่อไอน้ำ (Steam Pipe) ไปยังน้ำมัน นิยมใช้กันมากเนื่องจากแก๊สหรือน้ำมันเตาที่เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำมีราคาถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ แต่ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะต่ำกว่าการใช้ขดลวดต้านทานไฟฟ้า

4. ระบบระบายอากาศ (Hooding and Ventilation System) เป็นระบบการดูดอากาศไอน้ำและควันที่ลอยขึ้นมาจากผิวหน้าเครื่องทอด ช่วยป้องกันการกั่นตัวของไอน้ำและป้องกันการอันตรายที่อาจเกิดจากน้ำมันกระเด็นออกจากเครื่องทอด และช่วยในด้านความสะอาดของผลิตภัณฑ์และบริเวณที่ติดตั้งเครื่องทอดได้เป็นอย่างดี

5. ระบบควบคุมการทำงาน (Control System) เป็นระบบการทำงานที่ทำให้สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการและสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิด แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

ก) Modulating System จะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2 องศาฟาเรนไฮต์

ข) On-off System สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 10 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งจะมีความละเอียดน้อยกว่าและถูกกว่าแบบ Modulating System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอด

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นและลักษณะเนื้อสัมผัสเฉพาะตัว การทอดแบบจุ่มในน้ำมัน (Deep-Fat Frying) มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิดเจลของแป้ง (Starch Gelatinization) การเสื่อมสภาพของโปรตีน (Protein Denaturation) การระเหยของน้ำ (Water Vaporization) และการเกิดเปลือกแข็งชั้นนอก (Crust Formation) ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอด คือ อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) การซึมซับของน้ำมัน (Oil Penetration) ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันกับอาหาร (Oil-Food Interactions) และการเสื่อมสภาพของน้ำมัน (Oil Degradation) [7]

2.1.3.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ การพาความร้อนและการนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนแบบการนำภายใต้สภาวะที่ไม่คงที่ (Unsteady State) เกิดขึ้นภายในอาหารแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับคุณสมบัติเชิงความร้อนของอาหาร ได้แก่ ค่าการแพร่ความร้อน การนำความร้อน ความจุความร้อนและความหนาแน่นของอาหาร ส่วนการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเกิดขึ้นระหว่างอาหารแข็งกับน้ำมัน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอาหารแข็งกับน้ำมันมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก เนื่องจากมีความเคลื่อนไหวอย่างรุนแรงของไอน้ำ (Vapor Bubble) ที่ออกจากชั้นอาหาร ปริมาณของกลุ่มไอน้ำรอบ ๆ ชั้นอาหารลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากความชื้นในอาหารลดลง ไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้ทำให้การศึกษาเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีความยุ่งยาก ในทางปฏิบัติจึงใช้วัสดุที่เป็นโลหะในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เพื่อใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของการผลิตอาหารแต่ค่าที่ได้มีความแตกต่างจากการทอดอาหารในน้ำมันจริง [1]

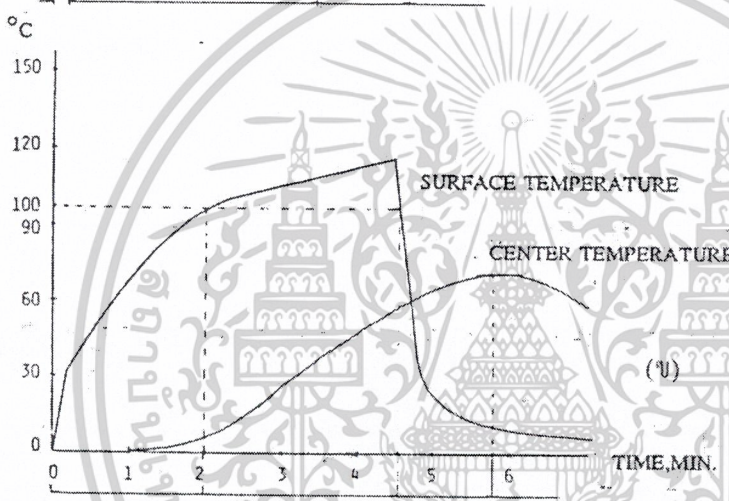
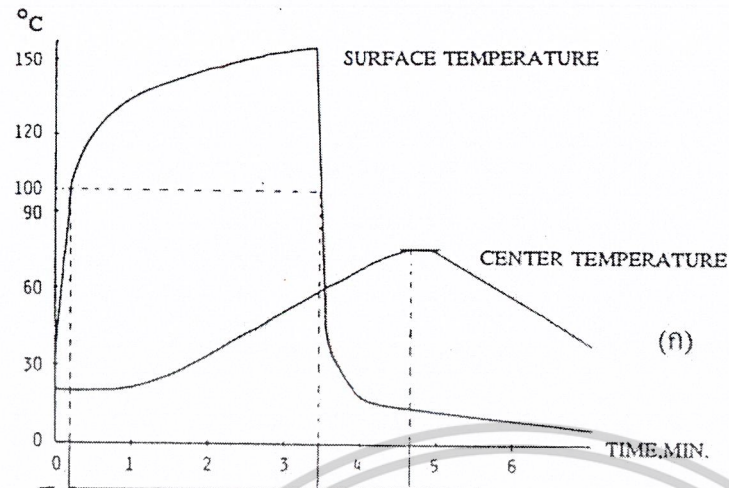
Hallstrom [8] ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการทอดเปรียบเทียบกับกรอบอาหารดังแสดงในรูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณความชื้นในกระบวนการให้ความร้อนจากการทอดแบบจุ่มในน้ำมันและการให้ความร้อนแบบอื่น ๆ ที่มีความคล้ายคลึงกัน โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ผิวหน้าและใจกลางอาหาร แบ่งได้เป็น 4 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับค่าความดันไอ ซึ่งในการทอดแบบจุ่มในน้ำมันมีค่าประมาณ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในช่วงนี้ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำมันและผิวหน้าของอาหาร ในการทอดแบบจุ่มในน้ำมันและการทอดแบบสัมผัส ผลคุณระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงจึงมีช่วงนี้สั้น แต่ในการอบแห้งมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำจึงมีช่วงนี้ยาวกว่า ช่วงแรกนี้เรียกว่า constant rate period ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่อุณหภูมิที่ผิวสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสหรืออุณหภูมิกระเปาะเป็ยก เรียกว่า falling rate period การสูญเสียความชื้นเนื่องจากการระเหยของน้ำและมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิด crust formation ซึ่งนิยามว่าเป็นส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้มีการเคลื่อนที่ของ 100°C isotherm เข้าไปในผลิตภัณฑ์และ crust ก็เป็นส่วนที่อยู่ด้านนอกของ 100°C isotherm เวลาในช่วงนี้ไม่ขึ้นกับวิธีการให้ความร้อนเนื่องจากเป็นช่วงที่มีการระเหยกลายเป็นไอ การเกิด crust formation ทำให้ภายในใจกลางอาหารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 3 ภายหลังจากให้ความร้อน พบว่าอุณหภูมิที่ผิวลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการพาความร้อนระหว่างอากาศกับผิวหน้าอาหาร แต่ภายในชิ้นอาหารมีการถ่ายเทแบบนำความร้อน (heat conduction) อย่างช้า ๆ จากภายในสู่ผิว จึงทำให้อุณหภูมิใจกลางชิ้นอาหารยังคงสูงกว่าผิวหน้าอาหาร ช่วงนี้สิ้นสุดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใจกลางมีค่าสูงสุดและช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่อุณหภูมิใจกลาง อาหารเริ่มลดลง ช่วงที่ 2 และ 3 เวลาในการทอดขึ้นกับขนาดและมิติของชิ้นอาหาร (dimension) ถ้าเป็นอาหารที่มีขนาดใหญ่และหนา จะมีช่วงที่ 2 และ 3 ยาวนานกว่าชิ้นบาง [8]

Farkas และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารเมื่อทอดแบบจุ่มในน้ำมัน อาหาร โดยส่วนมากมักมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักและมีตัวถูกละลายปะปนอยู่เล็กน้อย ดังนั้นจุดเดือดของของเหลวในตัวอย่างอาหารจึงมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ เมื่อน้ำระเหยออกจากอาหารมากขึ้น อุณหภูมิของอาหารจึงสูงกว่าจุดเดือด สรุปขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทอดได้ 4 ส่วน คือ

1. Initial heating เกิดขึ้นในช่วงเวลาดั้ง ๆ ไม่กี่วินาที อุณหภูมิที่ผิวของอาหารจะเพิ่มขึ้นสู่จุดเดือดของของเหลว มีการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนตามธรรมชาติระหว่างน้ำมันและอาหาร และยังไม่มีการระเหยของน้ำที่ผิวอาหาร
2. Surface boiling เป็นช่วงที่เริ่มมีการระเหยของน้ำที่ผิวอาหาร การถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลงเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นในน้ำมัน และมีการฟอรัมตัวของ crust เริ่มต้นที่ผิวหน้าอาหาร
3. Falling rate น้ำจากภายในอาหารแพร่ออกสู่ภายนอกมากขึ้น อุณหภูมิที่ตรงกลางชิ้นอาหารสูงขึ้นเข้าสู่จุดเดือดของของเหลว มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและกายภาพของอาหาร เช่น การเกิด Gelatinization ของแป้ง และการสุก ในส่วนของ core region มีการฟอรัมตัวของ crust มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมีน้ำระเหยออกไปมากพอสมควรแล้วการถ่ายเทของไอน้ำที่ผิวหน้าจะลดลง
4. Bubble end-point อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง ไม่มี bubble ที่ผิวหน้าเมื่อยังคงทอดต่อไป ทำให้ความหนาของ crust เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิระหว่างกระบวนการผลิต [8]

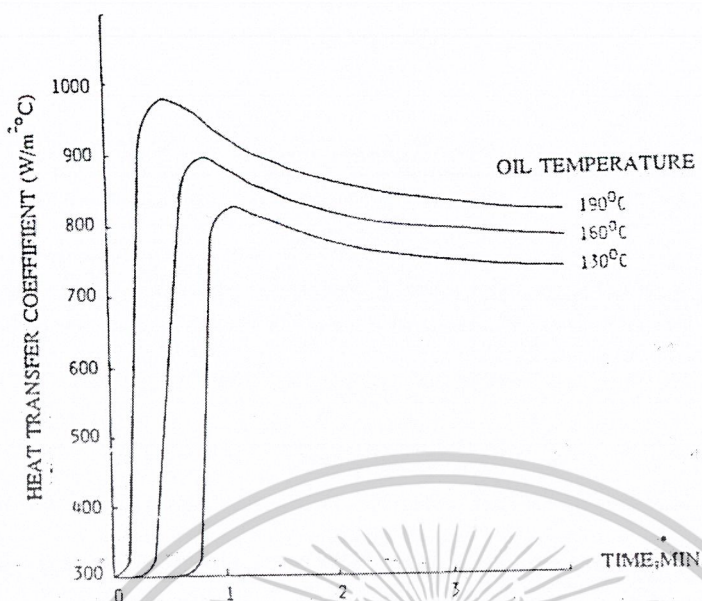
(ก) การทอด (ข) การอบแห้ง

Hallstrom [8] ได้แยกพิจารณาการถ่ายเทความร้อนเป็น 2 ส่วน คือ

2.1.3.1.1 การถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางสู่ผิวหน้าอาหาร

เป็นการพาความร้อนจากน้ำมันไปยังผิวหน้าอาหาร ในการทอดแบบจุ่มในน้ำมันมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงก่อนที่จะมีการระเหยของน้ำเท่ากับ $250-300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ แต่ในขณะที่มีการระเหย bubble ที่เกิดขึ้นทำให้มีความปั่นป่วนในน้ำมัน เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป มีฟิล์มของไอน้ำอยู่รอบ ๆ ชิ้นอาหารมากขึ้น จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง รูปที่ 2.3 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในการทอดแบบจุ่มในน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการทอดแบบจุ่มในน้ำมัน [8]

2.1.3.1.2 การถ่ายเทความร้อนภายในอาหาร

การถ่ายเทความร้อนภายในโดยหลักแล้วเป็นการนำความร้อน แต่ ก็อาจมีการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำด้วย ความหนาของ crust มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นอาหาร หลังจากอุณหภูมิที่ผิวสูงถึง 100°C ประมาณได้ว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ในช่วงนี้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มีค่าสูงมีความสำคัญน้อยกว่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ [8]

2.1.3.2 การถ่ายเทมวล

2.1.3.2.1 การถ่ายเทความชื้น

ในอาหาร โดยทั่วไป มีการสูญเสียน้ำออกจากอาหารจาก 2 แหล่ง คือ เป็นการระเหยน้ำออกจาก crust และการสูญเสียน้ำเนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity, WHC) ลดลง [8] การระเหยของน้ำเกิดขึ้นภายใน crust ขณะที่ทอดอาหารในน้ำมันร้อน จะมีการส่งผ่านความร้อนไปยังผิวหน้าอาหาร ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนประกอบด้วยคาปิลลารีที่มีขนาดแตกต่างกันไป เมื่อมีการระเหย น้ำจะระเหยออกจากคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่ก่อน และภายในอาหารมีการเคลื่อนที่ของน้ำมายังผิวหน้าอาหาร อาจมีกลไกหลายรูปแบบ Singh, R.P. [1] ได้สรุปกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพรุน โดยคำนึงเฉพาะการเคลื่อนที่ของน้ำภายในช่องว่างของโครงสร้างของสารดังนี้

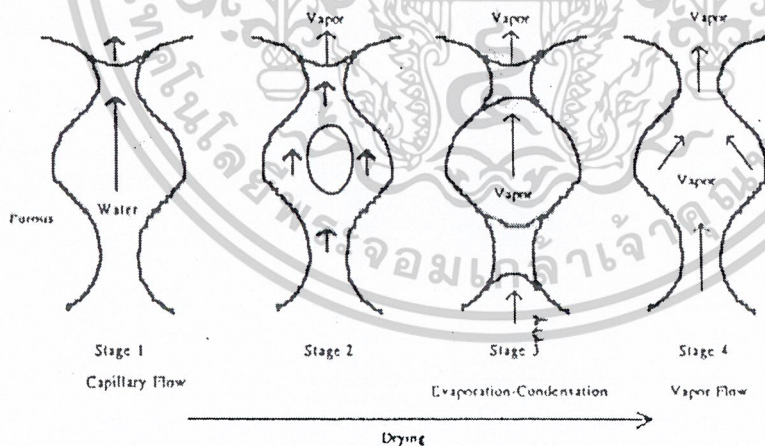
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) การเคลื่อนที่น้ำในรูปของเหลวผ่านรูพรุนเนื่องจากแรงคาปิลลารี (capillary force) เมื่อปริมาณน้ำในอาหารลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านคาปิลลารีและรูเปิดเล็ก ๆ อาจเกิดขึ้นภายใต้สภาพไอน้ำเป็นส่วนใหญ่

ข) การแพร่ของของเหลวเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นภายในชั้นอาหาร

ค) การแพร่ของไอน้ำภายในช่องว่างของอาหารเกิดจากความแตกต่างของความดันไอ (vapor diffusion) และน้ำจะระเหยกลายเป็นไอ

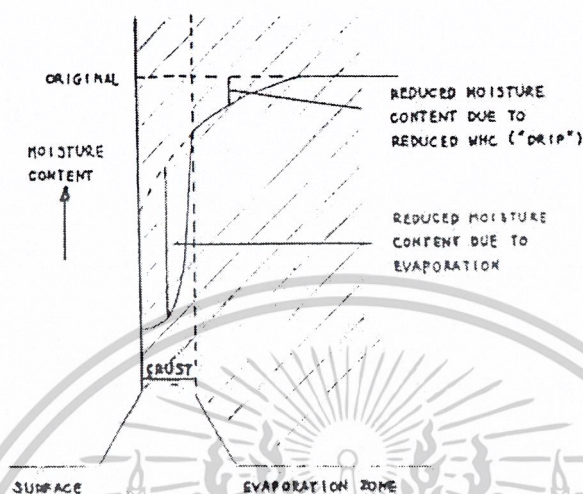
กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพรุน อาจอธิบายได้ดังรูปที่ 2.4 ในขั้นตอนแรกการถ่ายเทของน้ำจะอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งเกิดจากการแพร่ออกสู่ภายนอก เนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เกิดเป็นช่องว่างอากาศภายในรูพรุนแทนที่ความชื้นที่สูญเสียไป ระหว่างนี้การถ่ายเทของน้ำจะถูกดึงเข้าไปด้วยแรงตึงผิวเกาะไปตามผนังของรูพรุน จากนั้นน้ำในรูพรุนจะมีทั้งในสถานะของเหลวและไอ ไอน้ำบางส่วนจะถูกควบแน่นเป็นของเหลวที่บริเวณคอขวดของรูพรุน ในขั้นตอนที่ 3 ในรูปที่ 2.4 น้ำบางส่วนจะระเหยกลายเป็นไอและบางส่วนเคลื่อนที่เกาะไปตามผนังจนกระทั่งเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายที่น้ำระเหยและเคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำ จากลักษณะการถ่ายเทของน้ำในวัสดุพรุนเห็นได้ว่าไม่มีทฤษฎีใดทฤษฎีหนึ่งที่สามารถอธิบายได้ครอบคลุมกระบวนการทั้งหมดได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น [10]



รูปที่ 2.4 กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพรุน [10]

การสูญเสียอีกส่วนหนึ่งเนื่องมาจากความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง เช่นในกรณีให้ความร้อนแก่ชิ้นเนื้อด้วยอุณหภูมิและเวลาระดับหนึ่ง พบว่ามีการเสื่อมสภาพของโปรตีน (protein denaturation) โปรตีนจับตัวกันทำให้น้ำ (drip) ถูกบีบตัวออกมาภายนอก แต่ถ้ามีส่วนผสมที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเป็งประกอบอยู่ด้วย น้ำจะถูดูดซับด้วยส่วนผสมเหล่านี้ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงที่อุณหภูมิสูง โปรไฟล์ของความชื้นเป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โปรไฟล์ของความชื้นในชิ้นเนื้อที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง [8]

2.1.3.2.2 การดูดซับของน้ำมัน

กลไกการถ่ายเทของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยังมีความเข้าใจน้อยมาก แต่ก็มึงานวิจัยต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาและให้ข้อสังเกตไว้มากมาย Pinthus, E.J. [11] สังเกตว่าน้ำมันเข้าไปในอาหาร โดยไปแทนที่ในช่องว่างระหว่างเซลล์และตามผนังเซลล์ แต่ไม่ได้อธิบายว่าเกิดขึ้นได้อย่างไรและเมื่อไหร่ Brown, H.P. [12] อธิบายว่าความพรุนของ potato chips เป็นเหตุให้อิน้ำมันมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนจากน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง อินน้ำมันบางส่วนที่อยู่กักอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่ออินน้ำเคลื่อนที่ออกไป น้ำมันจึงเข้าไปแทนที่ Gamble, M.H. [13] ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อทอดอาหาร ความชื้นภายในอาหารจะเปลี่ยนเป็นอินน้ำ เมื่อผิวหน้าแห้งและมีเกรเดียนต์ความดัน จึงทำให้น้ำมันที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าเข้าสู่ภายในได้ตามผิวหน้าที่ถูกทำลายเมื่อนำอาหารออกจากเครื่องทอด McDonough [14] ใช้ ESEM (environment scanning electron microscope) ศึกษาการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของ tortilla chips ระหว่างทอด พบว่ามีน้ำมันเกาะตัวที่ผิวหน้าอาหารโดยทันทีที่อาหารสัมผัสกับน้ำมัน และแพร่เข้าไปในอาหาร Matz, S.A. [15] เสนอแนะว่า ถ้าหากนำ chips ออกจากเครื่องทอดขณะที่อุณหภูมิของอาหารยังเพิ่มขึ้นอยู่ น้ำมันถูกดูดซับเข้าไปเพียง 15% เท่านั้น ส่วนที่เหลืออยู่จับตัวที่ผิวหน้าและเข้าสู่ภายในเมื่ออาหารเย็นตัวลง Pinthus, E.J. [11] กล่าวว่า แรงดึงผิวมีผลต่อการดูดซับของน้ำมันในการทอดมันฝรั่ง ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก capillary force Moreira, R.G. [16] สังเกตพบว่า tortilla chips ที่ทอดเป็นเวลา 5 วินาที มีลักษณะค่อนข้างยืดหยุ่นและมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันเกาะที่ผิวหน้าและ tortilla chips ทอดเป็นเวลา 60 วินาที มีความกรอบมากกว่า เนื่องจากน้ำมันถูกดูดซับเข้าไปโดย capillary force ในช่วงที่เย็นตัวลง จึงมีลักษณะผิวหน้าแห้ง และมีปริมาณน้ำมันสูง

จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาถึงการดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์นั้น Pinthus, E.J. [11] ได้สรุปกลไกที่เกิดขึ้นดังนี้

1. การเข้าไปแทนที่น้ำที่ระเหยไป (replacement of moisture) มีงานวิจัยหลายงานที่สนับสนุนว่าน้ำมันแทนที่ความชื้นที่สูญเสียไประหว่างการทอด เมื่อเริ่มกระบวนการทอดที่ผิวด้านนอกของอาหารประกอบด้วยน้ำอิสระและ bound water เมื่ออาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นเริ่มระเหยและความเข้มข้นของน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ผิวด้านนอกเริ่มแห้งและเกิด crust ความชื้นด้านในจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำออกจากอาหารตามคาпилลารีและช่องของอาหาร น้ำมันจะเกาะและเข้าสู่อาหารตามช่องว่างนั้น โดยปริมาณน้ำมันที่ดูดซับมีสัดส่วนโดยตรงกับความชื้นที่ระเหยไป

2. กลไกการสูญเสียความชื้นสามารถสรุปได้ดังนี้ เมื่ออุณหภูมิของน้ำในอาหารสูงถึงจุดเดือด เซลล์เหล่านี้จะถูกทำลายทำให้เกิดช่องว่างในอาหาร น้ำมันจะถูกดูดซับเข้าช่องว่างเหล่านี้ น้ำมันเพิ่มขึ้นโดยการลดความดันภายในเนื่องจากการสูญเสียความชื้น และหลังจากทำให้เย็นเนื่องจากการเกิดสุญญากาศจากการควบแน่นของไอน้ำ

3. การเกิด crust formation นั้นมีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของน้ำมันเป็นอย่างมาก เนื่องจากพบว่าน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหาร โดยส่วนใหญ่มักปรากฏอยู่ในรูป crust

4. interfacial tension เมื่อเริ่มจุ่มชิ้นอาหารในน้ำมันน้ำมันที่เกาะอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของอาหาร มี interfacial tension ระหว่างผิวหน้าอาหารกับน้ำมันมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำมันด้วยกันเอง เมื่อเวลาผ่านไป interfacial tension ระหว่างอาหารและน้ำมันจะลดลงจนต่ำกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำมันกับน้ำมัน น้ำมันที่ผิวหน้าอาหารจึงเคลื่อนที่เข้าไปภายใน

5. ความเป็นรูพรุน (porosity) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับของน้ำมันของผลิตภัณฑ์ ความเป็นรูพรุนเริ่มต้นของอาหารมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ และในระหว่างการทอดทั้งค่าความเป็นรูพรุนและการดูดซับน้ำมันจะเพิ่มขึ้นและมีผลต่อกันและกัน

6. Capillary rise เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ interfacial tension และ contact angle และผกผันกับ porosity

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของน้ำมันประกอบด้วย

1. คุณภาพของน้ำมันและองค์ประกอบของน้ำมัน องค์ประกอบใน

ที่นี้หมายถึง by-products และ residues ที่ถูกดูดซับเข้าไป การดูดซับของน้ำมันและการเสื่อมสภาพของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันมากขึ้นเมื่อเวลาการทอดเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง น้ำมันสกัดจากอาหารทอดมีปริมาณ โพลีเมอร์สูงกว่าน้ำมันที่อยู่ในเครื่องทอด surface-active agents ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดออกซิเดชัน มีผลต่อการดูดซับน้ำมัน และ surfactants บางชนิดที่เกิดขึ้นในน้ำมันร้อนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำมันกับอาหาร โดยไปลดแรงตึงผิวของ immiscible materials แต่จะพบเฉพาะในน้ำมันที่เสื่อมคุณภาพเท่านั้น

2. อุณหภูมิในการทอด เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น มีผลให้ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับลดลง แต่บางงานวิจัยก็รายงานว่าปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำมัน การทอดที่ความดันสูงทำให้การดูดซับน้ำมันน้อยลง เมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อมวลเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์เป็นเส้นตรง ถ้าหากผิวหน้าของอาหารขรุขระ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้การดูดซับน้ำมันมากขึ้น

3. ปริมาณความชื้น มีงานวิจัยหลายชิ้นให้ข้อสรุปว่าปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปเป็นสัดส่วน โดยตรงกับรากที่สองของเวลาที่ใช้ทอด ถ้าวัตถุดิบมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำมันสูง ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นและปริมาณน้ำมันเป็นเส้นตรง ในผลิตภัณฑ์ potato chips ปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันที่ดูดซับ Gamble, M.H. [13] แต่งานวิจัยอื่น ๆ ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ เพราะเนื่องจากมีการเติม Additive บางชนิดลงในอาหาร เช่น Alginates และ Cellulose มีผลให้การดูดซับน้ำมันและการสูญเสียความชื้นลดลง

4. องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันเริ่มต้นสูง มีการดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์มาก ยกเว้นผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อ ปลา การเติมปริมาณ โปรตีนจากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์ โค้นท์สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้ แต่จะมีจุดวิกฤตอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าเติมมากกว่าค่านี้ มีผลทำให้การดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้นได้ การเตรียมมันฝรั่งในสารละลายเกลือร้อนสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้เช่นกัน

5. การเตรียมตัวอย่างก่อนการทอด การลวกหรือการลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นของอาหารก่อนการทอด ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำมันลดลง การล้างด้วย oil containing emulsifier ตามด้วยการใช้ไอน้ำ ทำซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง ช่วยลดการดูดซับของน้ำมันได้ การแช่แข็งและการอบแห้งบางส่วน (Predrying) จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณการดูดซับน้ำมันน้อยลง การทำแห้งแบบเยือกแข็งทำให้การดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

8. ความพรุน มีความสัมพันธ์กับการดูดซับน้ำมันของอาหารทอดโดยตรง เนื่องจากความพรุนเริ่มต้นของอาหารแสดงถึงสัดส่วนของช่องว่างภายในอาหาร ซึ่งมีผลต่อการดูดซับน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนสามารถควบคุมได้โดยใช้ฟิล์มจากสารธรรมชาติหุ้มรอบ ๆ ผิว

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารทอด [5]

ในระหว่างการทอด มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในอาหารดังนี้

2.1.4.1 เกิดการระเหยของน้ำในอาหาร

2.1.4.2 ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น จนถึงระดับที่ต้องการและมีการฟอร์มตัวของเมล็ดแป้ง เกิด gelatinization ภายในชิ้นอาหาร จนกระทั่งอาหารสุกและมีความกรอบ

2.1.4.3 การที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาล

2.1.4.4 การดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์

2.1.4.5 เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอาหารขณะกำลังทอด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการลอยหรือจมของชิ้นอาหารในการทอด

Guillaumin, R. [17] อธิบายลักษณะโครงสร้างของอาหารทอดโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.6 คือ

1. surface เป็นส่วนที่มีความกรอบ มีสีเหลือง เนื่องจากมีการสูญเสียไอน้ำระหว่างการทอดเมื่ออุณหภูมิของอาหารเท่ากับจุดเดือดของของเหลวที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (maillard reaction) ความเข้มของสีจะมากขึ้นหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการทอดและองค์ประกอบที่ผิว ในส่วนนี้มีปริมาณความชื้นประมาณ 3%

2. crust ระหว่างการทอดมีการระเหยของน้ำกลายเป็นไอ ทำให้เกิดการฟอร์มตัวของ crust เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดสูงกว่า 155°C crust ประกอบด้วยช่องว่างและรูพรุนต่าง ๆ เป็นจำนวนมากและมีน้ำมันเข้าไปอยู่ในช่องว่างเหล่านี้แทนที่น้ำที่ระเหยออกไปอาหารทอดแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัวและมีปริมาณน้ำมันระดับหนึ่ง ขึ้นกับสัดส่วนของ crust/core เช่น potato chips 40% potato sticks 35% French fried 8-10% fried shrimps 12-15% และ doughnuts 20-25%

3. core เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลาง มีความชื้นสูงและอาหารสุกเนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันเข้าไปภายใน ในการทอดแบบจมน้ำมัน มีส่วน core ปรากฏอยู่ตลอดเวลาการทอด ยกเว้นอาหารที่เป็นแผ่นบาง ๆ เช่น potato chips จะมีเฉพาะส่วน crust

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

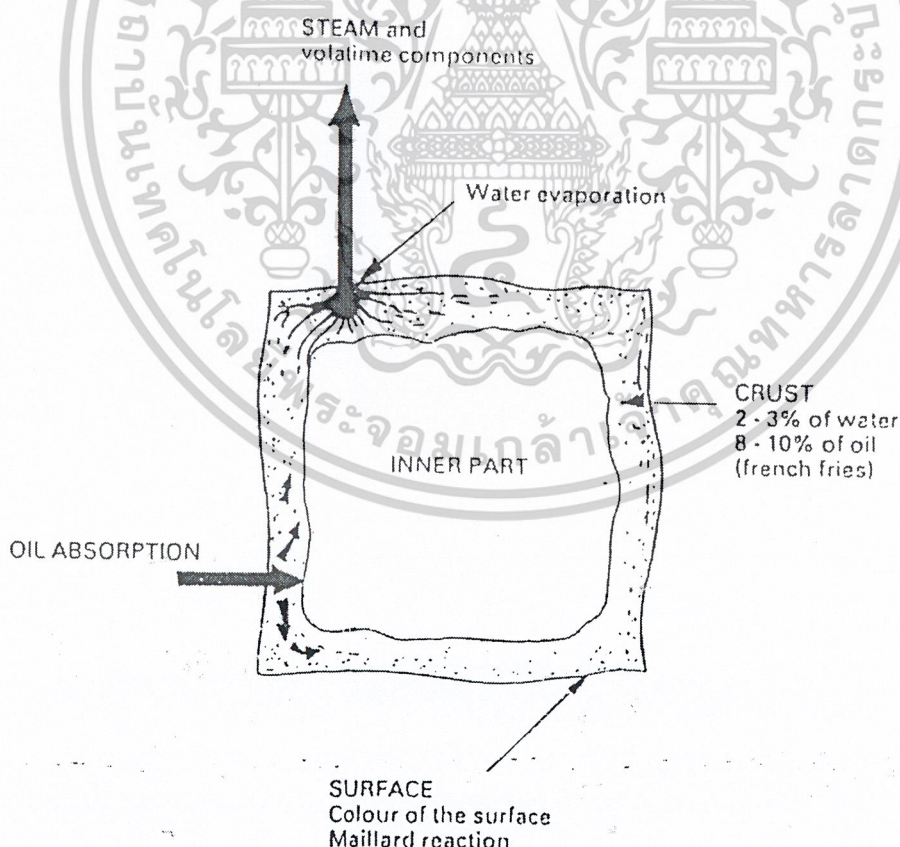
2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารในกระบวนการทอด [18]

การทอดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมาก มีตัวแปรมากมายที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารทอด โดยพิจารณาเป็น 3 ส่วนดังนี้

2.1.5.1 สภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันและเวลาที่ใช้ทอด และวิธีการทอด เป็นแบบจุ่มในน้ำมันหรือการทอดแบบสัมผัส โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการทอดมีค่าประมาณ 163-193°C ขึ้นกับชนิดของอาหารที่ทอด การเลือกอุณหภูมิที่ใช้สำหรับทอดอาจพิจารณาจากข้อกำหนด ลักษณะและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของผู้บริโภค การทอดที่ใช้อุณหภูมิสูงจะลด เวลาการทอดให้สั้นลงและทำให้อัตราการทอดเร็วขึ้น

2.1.5.2 น้ำมันที่ใช้ทอด ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมัน สารปนเปื้อน และองค์ประกอบในน้ำมัน การทอดที่อุณหภูมิน้ำมันสูงจะเป็นตัวเร่งให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพเร็วเนื่องจาก กรดไขมันอิสระมากขึ้น และยังทำให้สี กลิ่นและความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนไป

2.1.5.3 ตัวอาหาร ได้แก่ การเตรียมอาหารก่อนการทอด สัดส่วนของน้ำหนักรอาหารต่อ ปริมาณน้ำมัน และสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหาร ซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้า ไปในอาหาร



รูปที่ 2.6 ลักษณะทั่วไปของอาหารที่ทอดแบบจุ่มในน้ำมัน [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 ผลกระทบของความร้อนในการทอด

ในการทอดจะมีการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปที่น้ำมัน และความร้อนจากน้ำมันถ่ายเทไปยังอาหาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารและน้ำมัน

2.1.6.1 ผลกระทบของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำมัน [2]

การให้ความร้อนกับน้ำมันเป็นเวลานานที่อุณหภูมิสูง ๆ เวลาทอดจะทำให้ความชื้นและออกซิเจนออกจากอาหาร ซึ่งสาเหตุของการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบบางอย่าง เช่น volatile carbonyls, hydroxyl acids, keto acids และ epoxy acids ซึ่งสิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติ น้ำมันมีสีเข้มและความหนืดเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันจะสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (anti-oxidant) อยู่ในน้ำมันตามธรรมชาติ เช่น โทโคฟีรอล (tocopherols)

2.1.6.2 ผลกระทบของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหาร[2]

จุดประสงค์หลักของการทอด คือ เพื่อพัฒนาสี กลิ่น รสของอาหาร โดยที่คุณภาพของอาหารจะถูกพัฒนา โดยพิจารณาจากการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) และการดูดซับของ volatile compound ของน้ำมัน ปัจจัยหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของสีและกลิ่นรสในอาหารทอด คือ

- ก. ชนิดของน้ำมันที่ใช้ทอด
- ข. อายุการเก็บของน้ำมันที่ใช้ทอด
- ค. อุณหภูมิและเวลาในการทอด
- ง. ขนาดและผิวหน้าของอาหาร
- จ. วิธีปฏิบัติภายหลังการทอด

2.1.7 ไขมันและน้ำมัน

ไขมันเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอริน ไขมันจะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ส่วนน้ำมันจะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ไขมันและน้ำมันจะมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกัน โดยไขมันหรือน้ำมันจากสัตว์มีกรดไขมันที่อิ่มตัวอยู่มากและมักเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งได้แก่ ไขมันในเนื้อสัตว์ ไขมันในไข่ ไขมันในนม และน้ำมันหมู ส่วนไขมันและน้ำมันพืชมีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มากเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง (ยกเว้นน้ำมันมะพร้าว) เช่น น้ำมันรำ น้ำมันถั่ว น้ำมันมะกอก น้ำมันข้าวโพด น้ำมันดอกคำฝอยและน้ำมันดอกทานตะวัน [19]

2.1.7.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไขมันและน้ำมัน

2.1.7.1.1 เมื่อบริสุทธิ์จะปราศจากสี กลิ่นและรส

2.1.7.1.2 ไม่ละลายน้ำ (ยกเว้นน้ำมันงา) และแอลกอฮอล์ที่เย็น แต่จะละลายในแอลกอฮอล์ที่ร้อนได้เล็กน้อย ละลายได้ดีในคลอโรฟอร์ม อีเทอร์ คาร์บอนไดซัลไฟด์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์และปิโตรเลียมอีเทอร์

2.1.7.1.3 ไขมันจะหลอมละลายเมื่อได้รับความร้อน ไขมันจะค่อย ๆ อ่อนตัวหลอมละลาย ทั้งนี้เพราะไขมันประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิด จุดหลอมเหลวของไขมันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่มีอยู่ในไขมัน กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีจุดหลอมเหลวต่ำ ยังมีจำนวนพันธะคู่มากในโมเลกุล จุดหลอมเหลวก็ยิ่งต่ำ กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีโมเลกุลยาวจะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากรดไขมันชนิดอิ่มตัวโมเลกุลสั้น

2.1.7.1.4 ความถ่วงจำเพาะของไขมันและน้ำมัน ไขมันและน้ำมันทุกชนิดมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 ความถ่วงจำเพาะของไขมันชนิดต่าง ๆ มีดังนี้

เนย	ไม่ต่ำกว่า 0.905	ที่ 40°C
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	ประมาณ 0.917-9.18	ที่ 25°C
น้ำมันข้าวโพด	ประมาณ 0.919-0.921	ที่ 25°C
น้ำมันหมู	ประมาณ 0.931-0.932	ที่ 15°C
น้ำมันมะกอก	ประมาณ 0.916-0.918	ไม่ระบุอุณหภูมิ

2.1.7.1.5 เมื่อให้ความร้อนกับน้ำมัน จะเกิดกรดไขมันอิสระขึ้นถ้าน้ำมันได้รับความร้อนจนอุณหภูมิเกิน 250 จะมีการสลายตัวได้สารที่มีกลิ่น เรียกว่า อะโครลีน (acrolein) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอริน อะโครลีนเป็นสารที่ระเหยได้ ทำให้อาหารมีกลิ่นไม่น่ารับประทาน

อุณหภูมิที่ทำให้ไขมันหรือน้ำมันเป็นควัน เรียกว่า จุดที่เป็นควัน (smoking point) ไขมันหรือน้ำมันจากสัตว์มีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำกว่าน้ำมันพืช อุณหภูมิที่เป็นควันนี้ใช้ทดสอบความบริสุทธิ์ของไขมันได้ ไขมันแต่ละชนิดสลายตัวที่อุณหภูมิต่างกัน ในการทอดอาหารควรเลือกใช้น้ำมันที่มีอุณหภูมิที่เป็นควันสูง เพื่อป้องกันการเกิดอะโครลีน

อุณหภูมิเป็นควันของ ไขมัน นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันและไขมันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสิ่งอื่น ๆ อีกดังนี้

ก) ปริมาณของกรดไขมันอิสระ น้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจะมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำ เช่น น้ำมันมะพร้าว มีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำ เมื่อได้รับความร้อนทำให้โมเลกุลของไขมันสลายตัวเป็นกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันจึงมีปริมาณของกรดไขมันอิสระมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่เป็นควันต่ำลง

ข) การสัมผัสกับอากาศ ถ้าน้ำมันสัมผัสกับอากาศมากขึ้น อุณหภูมิที่เป็นควันของน้ำมันจะลดลง ดังนั้นการทอดอาหารในภาชนะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่จะทำให้จุดเป็นควันของน้ำมันลดต่ำลงเร็วกว่าน้ำมันที่ทอดภายในภาชนะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค) เศษอาหารที่ปะปนในน้ำมัน เช่น แป้ง จะทำให้อุณหภูมิที่เป็นควันของน้ำมันต่ำลงเร็วขึ้น ฉะนั้นน้ำมันที่ใช้แล้วควรกรองเอาเศษอาหารออกเสียก่อนที่จะทอดครั้งต่อไป จะช่วยให้น้ำมันทอดอาหารได้นานขึ้น

ถ้าน้ำมันได้รับความร้อนสูงขึ้นเรื่อย ๆ จากจุดเป็นควัน น้ำมันอาจลุกเป็นไฟได้ เรียกจุดนี้ว่าจุดที่เริ่มติดไฟหรือจุดวาบไฟ (flash point) และถ้าอุณหภูมิน้ำมันสูงขึ้นอีกจะลุกเป็นไฟได้ เรียกจุดนี้ว่า จุดลุกเป็นไฟ (fire point) อุณหภูมิของจุดทั้งสามนี้แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จุดที่เป็นควัน จุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันต่าง ๆ [19]

น้ำมัน	จุดที่เป็นควัน (°C)	จุดวาบไฟ (°C)	จุดติดไฟ (°C)
น้ำมันละหุ่งบริสุทธิ์	200	298	335
น้ำมันละหุ่งปราศจากน้ำ	176	299	337
น้ำมันข้าวโพดดิบ (crude)	178	294	346
น้ำมันข้าวโพดบริสุทธิ์	227	326	359
น้ำมันลิบสตีคดิบ	163	287	353
น้ำมันลิบสตีคบริสุทธิ์	160	309	360
น้ำมันมะกอกดิบ (virgin)	199	321	361
น้ำมันถั่วเหลือง (บีบ)	181	296	351
น้ำมันถั่วเหลือง (สกัด)	210	317	354
น้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์	256	326	356

2.1.7.1.6 ไขมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ โดยเฉพาะเมื่อมีแสงและความชื้น จะได้กรดไขมันอิสระเกิดขึ้น และจะเปลี่ยนเป็นอัลดีไฮด์ และกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้มีกลิ่นเหม็นและรสชาติเปลี่ยนไป เรียกว่าเกิดการเหม็นหืน (rancid)

2.1.7.1.7 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อเกิดไฮโดรไลซ์ไขมันด้วยกรด หรือ เอนไซม์จะได้กรดไขมันกับกลีเซอรอล

2.1.7.1.8 การทำให้เกิดสบู่ (saponification) เป็นปฏิกิริยาของไขมันกับด่างแก่ เช่น NaOH หรือ KOH จะได้สบู่

2.1.7.1.9 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (saponification oxidation) น้ำมันที่มีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก เช่น น้ำมันลินสีด จะถูกเติมออกซิเจนได้ง่ายเกิดสารเป็นของแข็งไม่เปียกน้ำ ใช้ผสมในสีทาบ้าน เรียกน้ำมันพวกนี้ว่า น้ำมันชักแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7.2 บทบาทของไขมันและน้ำมันในการประกอบอาหาร

ไขมันที่ใช้ในการประกอบอาหารมีความสำคัญดังนี้คือ ช่วยเพิ่มรสชาติของอาหารได้ดีขึ้นและเป็นตัวนำความร้อนที่ทำให้อาหารสุก ช่วยหล่อลื่นไม่ให้อาหารติดภาชนะที่ใช้ทอด และช่วยให้อาหารมีสีสวยด้วย อาหารที่ทอดด้วยน้ำมันมากส่วนใหญ่จะมีสีน้ำตาล ต้องใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 177-201°C การเลือกน้ำมันสำหรับการทอดจึงต้องคำนึงถึงจุดที่เป็นควันของไขมันด้วย เพราะไขมันที่ใช้ทอดต้องไม่สลายตัวเป็นควันก่อน ไขมันและน้ำมันต่างชนิดกันจะทำให้อาหารมีรสชาติต่างกัน ข้อสำคัญที่สุดไขมันที่ใช้ต้องไม่มีกลิ่นหืน และอาหารต้องไม่อมน้ำมันมาก เพราะจะทำให้อาหารเสียรสชาติ

2.1.7.2.1 ปัจจัยที่ทำให้อาหารอมน้ำมันมากเวลาทอด ได้แก่

1. เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ทอด เนื่องจากการทอดที่อุณหภูมิต่ำต้องใช้เวลานาน ทำให้อาหารอมน้ำมันมาก ภาชนะที่ใช้ทอดควรเป็นภาชนะโลหะหนักซึ่งนำความร้อนได้ดี และไม่ใส่อาหารลงไปทอดครั้งละมาก ๆ เพราะทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง
2. พื้นที่ผิวของอาหารที่สัมผัสน้ำมัน อาหารชิ้นใหญ่จะอมน้ำมันมากกว่าชิ้นเล็ก และอาหารที่มีผิวหน้าขรุขระจะอมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีผิวเรียบ เพราะมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำมันมากกว่า
3. ส่วนผสมของอาหาร อาหารที่มีแป้ง ไขมันและน้ำตาลมากจะอมน้ำมันมากขึ้นตามส่วนประกอบ
4. จุดที่เป็นควันของไขมัน การเลือกใช้ชนิดของน้ำมันที่แตกต่างกัน จะมีจุดที่เป็นควันต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดควันสูง ๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีการอมน้ำมันน้อย

น้ำมันที่ใช้ทอดแล้วมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น คือ มีปริมาณของกรดไขมันอิสระมากขึ้น ค่าไอโอดีนลดต่ำลง จุดที่เป็นควันและจุดหลอมเหลวต่ำลง สีของน้ำมันดำขึ้น และน้ำมันจะเหนียวขึ้น น้ำมันที่ใช้แล้วควรกรองเศษเล็ก ๆ ออก ควรเก็บไว้ในที่เย็น ปราศจากอากาศ และแสงเพื่อช่วยยืดอายุของการทอดของน้ำมันให้มากขึ้น

2.1.7.2.2 วิธีการเลือกใช้น้ำมัน

การเลือกใช้น้ำมันทอดผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด จะมีผลถึงการยอมรับของผู้บริโภค ความคงตัวของผลิตภัณฑ์รวมทั้งต้นทุนการผลิตด้วย ดังนั้นการเลือกใช้น้ำมันที่ใช้ทอดควรคำนึงถึงลักษณะดังนี้

1. น้ำมันที่ใช้ทอด เช่น น้ำมันสัตว์ (จากหมูหรือวัว), น้ำมันพืช (น้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันข้าวโพด, ฝ้าย)

2. กรรมวิธีการผลิตน้ำมัน เช่น การผลิตด้วยวิธีการเติมไฮโดรเจน (hydrogenated) หรือวิธีการทำให้บริสุทธิ์ (refined)

3. คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมัน เช่น จุดหลอมเหลว (melting point), จุดขุ่น (congeal point) หรือความหนาแน่น (density)

ดังนั้นการเลือกใช้น้ำมันต้องศึกษาว่า สามารถใช้ได้กับอุณหภูมิและเวลาทอดผลิตภัณฑ์หรือไม่ มิฉะนั้นในระหว่างการทอดน้ำมันอาจเสื่อมคุณภาพได้ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (oxidation) หรือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระสูงมากขึ้นรวมทั้งกลิ่นรส และเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยปกติน้ำมันที่ใช้ทอดจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 177-200°C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 200°C น้ำมันจะเปลี่ยนเป็นพวกกรดไขมันอิสระเป็นจำนวนมากและน้ำมันมีความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

ในทางการค้าจึงมีการเลือกน้ำมันแต่ละชนิดให้กับชนิดของอาหาร เช่น ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ นิยมใช้น้ำมันหมูผ่านกรรมวิธีการเติมไฮโดรเจน (hydrogenated lard) การทอดผลิตภัณฑ์ขนมโคนมักจะใช้น้ำมันหมูผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์ (refined lard) สำหรับอุตสาหกรรมมันฝรั่งทอดนิยมใช้น้ำมันข้าวโพดซึ่งน้ำมันนี้สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางกับอาหารชนิดต่าง ๆ ในอาหารแช่แข็งใช้น้ำมันฝ้ายผ่านกรรมวิธีการเติมไฮโดรเจน (hydrogenated cottonseed oil) แต่ น้ำมันที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์มไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเพราะมักเกิดฟองและกลิ่นผิดปกติ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [5] แต่พนัก [20] ได้กล่าวแนวทางการเลือกใช้น้ำมันพืชในการทอดไว้ว่าหากทอดน้ำมันมาก ใช้ความร้อนสูง (Deep Frying) ควรใช้น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวตำแหน่งเดียว เช่น น้ำมันปาล์มโอเลอิน ไม่ควรใช้น้ำมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง เช่น น้ำมันถั่วเหลือง เพราะอาจเกิดอนุมูลอิสระได้ง่ายและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และหากต้องใช้น้ำมันทอดอาหารซ้ำหลายครั้ง ควรกรองหรือขจัดเศษตะกอนอาหารออกให้หมด เพื่อลดการเกิดอนุมูลอิสระ

นอกจากนี้ในน้ำมันปาล์มโอเลอินยังมีวิตามินอีในปริมาณสูง ซึ่งป้องกันเส้นเลือดตีบและยังช่วยลดการสังเคราะห์โคเลสเตอรอลในร่างกายได้ ดีกว่าน้ำมันที่ไม่มีวิตามินอี

การยืดอายุของน้ำมันที่ใช้ทอด ทำได้โดยการนำขึ้นอาหารหรือส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ใหม่ออกจากน้ำมัน เพราะจะเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำมันมีกลิ่นและสีเปลี่ยนแปลงไป ความหนืดของน้ำมันจะมีความสัมพันธ์ต่อการส่งผ่านความร้อนที่เหมาะสมและการดูดซับน้ำมันของอาหาร ความหนืดที่ถูกต้องควรมีการกำหนดไว้เป็นมาตรฐานหรือทำการวัดจากค่ากรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ไม่ควรเกิน 0.4% ขณะใช้ทอดสามารถป้องกันการเกิดฟองในน้ำมัน ได้ โดยการเติมสารเมทิลซิลิโคน (methyl silicone) [2]

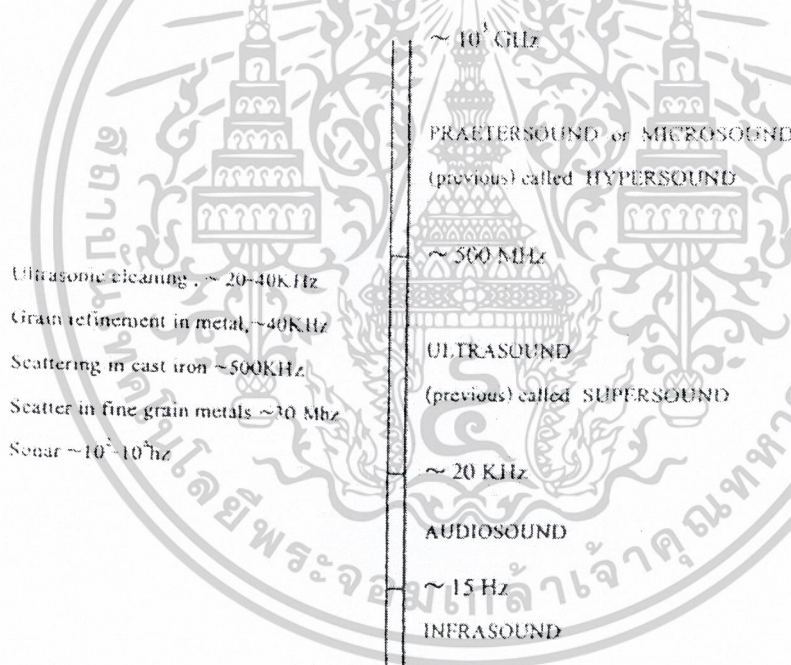
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีคลื่นอุลตราโซนิค (Ultrasonic) [21]

คลื่นอุลตราโซนิค (Ultrasonic) คือ คลื่นเสียงที่อยู่เหนือกว่าขีดจำกัดที่มนุษย์สามารถได้ยินหรือรับฟังได้ ความถี่ของคลื่นเสียงนั้นเป็นสิ่งที่แสดงถึงระดับ (Pitch) หรือความสูงต่ำ (Tone) ของตัวมันเอง โดยที่ความถี่ต่ำจะให้ระดับเสียงที่ต่ำ (Bass Tone) ความถี่สูงจะให้ระดับเสียงที่สูง (Treble Tone)

คลื่นเสียงอุลตราโซนิค (Ultrasonic) นั่นก็คือคลื่นเสียงที่มีระดับเสียงและความถี่สูงเกินกว่าความสามารถของมนุษย์จะรับฟังได้ด้วยหู ความถี่ที่สูงกว่า 18 kHz โดยทั่วไปจะพิจารณาให้เป็นคลื่นอุลตราโซนิค (Ultrasonic) เสียงนี้จะส่งผ่านของเหลวด้วยพลังที่เหมาะสม ซึ่งโดยปกติเป็น 5-10 วัตต์ต่อตารางนิ้วของพื้นที่ที่สะอาด

คั้งนั้นคลื่นอุลตราโซนิค (Ultrasonic) จึงหมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 18 kHz จนถึง 10000 kHz โดยที่คลื่นที่มีความถี่มากกว่า 10000 kHz และมีแอมพลิจูด (Amplitude) สูง ๆ จะเรียกว่า ไฮเปอร์ซาวด์



รูปที่ 2.7 แสดงถึงช่วงความถี่ต่าง ๆ ของคลื่นอุลตราโซนิคที่ถูกนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ

2.2.1 การเกิดคลื่นอัลตราโซนิค

คลื่นอัลตราโซนิคนี้สามารถสร้างได้โดยตัวทรานสดิวเซอร์ ซึ่งทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หลักการที่ใช้สร้างเครื่องอุลตราโซนิคมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

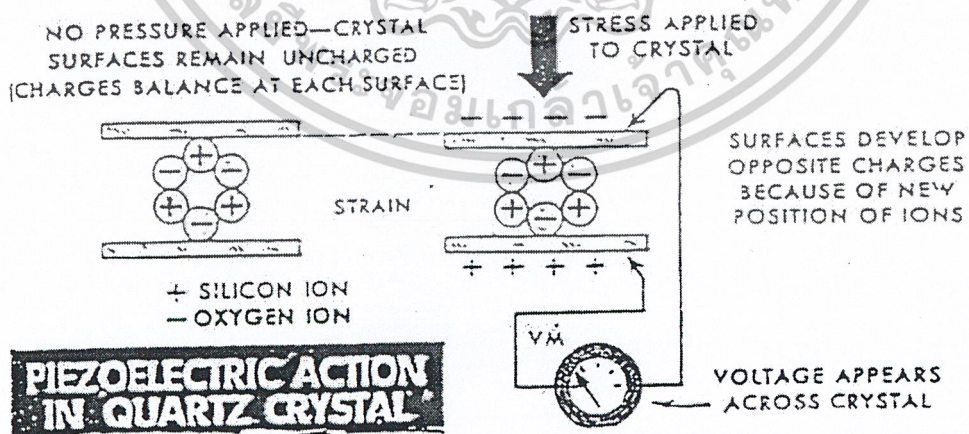
1. แบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezo-electric transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล โดยมีความถี่เรโซแนนท์คงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง
2. แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostrictive transducer) ซึ่งเปลี่ยนไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้นอยู่
3. แบบอิเล็กโตรสตริกทีฟ (Electrostrictive transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับกล

ในการให้กำเนิดคลื่นอุลตราโซนิคทั้ง 3 แบบนี้ แบบแรกจะเป็นที่นิยมมากที่สุด เพราะหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะแบบนี้เท่านั้น

2.2.2 เพียโซทรานสดิวเซอร์ (Piezo Transducer)

โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยชิ้นสารเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric element) ซึ่งสามารถทำได้จากสารหลายชนิด เช่น ผลึกแร่ควอทซ์ (Quartz), แบเรียมไทตาเนท (Bariumtitanate), เกลือร็อกเชล (Rochelle salt) ฯลฯ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ชิ้นสารเพียโซอิเล็กทริกที่ทำมาจากแบเรียมไทตาเนท ซึ่งได้จากการผสมสารติตาเนียมกับแบเรียมคาบอเนท ที่อุณหภูมิประมาณ 1300-1400°C และผลิตออกมาในรูปของชิ้นสารเซรามิกซึ่งจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยส่วนใหญ่

จากชิ้นเซรามิกนี้จะถูกประกบด้วยแผ่นเพลท 2 แผ่น ซึ่งส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นเงิน เพื่อต่อเป็นขาของอิเล็กโตรดนั่นเอง ด้านข้างหนึ่งของแผ่นเพลทจะถูกยึดเพื่อไม่ให้เกิดการสั่น ส่วนอีกด้านจะยึดกับแผ่นไดอะแฟรมซึ่งสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้ โดยแผ่นไดอะแฟรมนี้จะถูกสร้างให้มีลักษณะคล้ายเลนซ์ เพื่อรวมคลื่นให้มีความเร็วสูงขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก โดยชิ้นสารทำจากแร่ควอทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 เปียโซอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค

ปรากฏการณ์แบบเปียโซอิเล็กทริก สามารถอธิบายได้ คือ เมื่อสภาวะปกติยังไม่มี ความดันหรือคลื่นมาตกกระทบกับชิ้นสารเซรามิก ประจุไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายในชิ้นสารจะเกิดการสมดุล ทำให้ แผ่นเพลาทเงินที่ประกบอยู่มีศักย์ไฟฟ้าที่เท่า ๆ กัน ซึ่งผลรวมของประจุไฟฟ้าบนแผ่นเพลาทมีค่าเท่ากับ ศูนย์ แต่เมื่อมีความดันหรือคลื่นเสียงมาตกกระทบชิ้นสารเซรามิก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทาง ภายภาพของชิ้นสาร คือ เกิดมีประจุตรงข้ามขึ้นบนแผ่นเพลาทที่ประกบชิ้นสารเซรามิกอยู่ ซึ่งผลของ ประจุไฟฟ้าตรงข้ามนี้ทำให้เกิดเป็นแรงดันตกคร่อมแผ่นเพลาททั้งสอง ขนาดของแรงดันตกคร่อมนี้จะ ขึ้นอยู่กับความดันหรือคลื่นที่มาตกกระทบชิ้นสารเซรามิกที่โง่งงอไปมา

ทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างพลังงาน กลกับพลังงานไฟฟ้า ในกรณีการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล คือ ตัวส่งคลื่นอัลตรา โซนิคซึ่งการทำงาน คือ เมื่อเราป้อนแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งอาจมีความถี่ในช่วง 20-100 kHz แรงดันที่ป้อนนี้จะทำให้ชิ้นสารเซรามิกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยที่ด้านหนึ่งของชิ้นสารเซรามิก จะถูกกดกับแผ่น ไดอะแฟรม เมื่อชิ้นสารเซรามิกเกิดการบิดตัวไปมาจะทำให้แผ่นไดอะแฟรมอัดกับ อากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นความถี่เดียวกับสัญญาณที่ป้อนเข้า ซึ่งคลื่นที่ผลิตได้จะมีกำลังเอาต์พุตสูงสุด เมื่อความถี่ที่ป้อนเข้ามาตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นความถี่ทางกลตามธรรมชาติของสารเซรามิก ชิ้นนั้น ส่วนความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากนี้จะทำให้มีค่าลดลงกว่าความถี่เรโซแนนซ์มาก

2.2.4 ข้อควรรู้ในการใช้งานตัวส่งและตัวรับพอที่จะสรุปเป็นแนวทางใช้งานดังนี้

1. ไม่ควรให้ตัวทรานสดิวเซอร์ได้รับการกระแทกหรือตกจากที่สูง เพื่อป้องกัน โครงสร้างภายในไม่ให้เกิดการเสียหายได้
2. ทรานสดิวเซอร์ทั่วไปที่มีขายกันอยู่นั้นจะสามารถทนแรงดันตกคร่อมตัวมันสูงสุด ได้ไม่เกิน 20 Volt ดังนั้นขนาดของสัญญาณที่ป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ก็ควรอยู่ในขีดจำกัดอัน นี้
3. ความถี่เรโซแนนซ์(ความถี่ที่ตัวมันสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด) ของทรานสดิวเซอร์ 40 kHz ที่มีขายอยู่ทั่วไปจะผิดพลาดไม่เกิน 1 kHz และมีความถี่ประมาณ 4.5kHz สำหรับตัวส่งและรับจะมีแถบความถี่ประมาณ 5 kHz สำหรับตัวรับ จะเห็นได้ว่าแถบความถี่ของตัวรับ จะมีความกว้างกว่าตัวส่งเล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจได้ว่าทรานสดิวเซอร์ตัวนั้นจะสามารถรับความถี่ทั้งหมด ที่ส่งออกมาจากทรานสดิวเซอร์ที่ตัวส่งได้
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำงานของตัวทรานสดิวเซอร์อยู่ที่ช่วง -20°C - 60°C
5. ทั้งทรานสดิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับ จะมีทิศทางที่คล้ายคลึงมาก กล่าวคือที่ตำแหน่ง

เบี่ยงเบนจากแนวแกนของตัวส่งประมาณ 30° ความแรงของคลื่นเสียงที่ถูกส่งออกไปจะลดออกจาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกนประมาณ 10 เดซิเบล ในทำนองเดียวกันถ้าคลื่นเสียงพุ่งเข้ามาในแนวแกนที่เบี่ยงออกไปจากแนวแกนของตัวรับไปประมาณ 30° ความไวหรือขนาดของแรงดันที่ได้รับก็จะลดลงไป 10 เดซิเบล เช่นเดียวกัน ดังนั้นการใช้งานที่เป็นการควบคุมระยะไกลในที่โล่งแจ้งจึงควรพยายามทำให้ทั้งตัวรับและตัวส่งอยู่ในแนวที่พุ่งตรงเข้าหากันให้มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่อยู่ในห้องอาจเบี่ยงจากกันได้มากขึ้นเล็กน้อย เพราะคลื่นเสียงอุตราโซนิกสามารถสะท้อนกับกำแพง พื้น และวัตถุที่อยู่ในห้อง ทำให้คลื่นเสียงเข้าไปหาตัวรับได้หลายทิศทาง

2.2.5 ประโยชน์การใช้งานของคลื่นอุตราโซนิก

คลื่นอุตราโซนิกเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้สามารถเล็งคลื่นไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง ยิ่งขึ้นมีความถี่สูงขึ้น ความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นมากกว่าช่องเปิด (ที่ให้เสียงนั้นออกมา) ของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นั้น เช่น คลื่นความถี่ 300 Hz จะมีความยาวคลื่นประมาณ 1 เมตรเศษๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องเปิดให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมากมาย คลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียง ทำให้เกิดการกระจายออกนอกทิศทาง แต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาจนอยู่ในย่านอุตราโซนิกอย่างเช่น 40 kHz ซึ่งจะมีความยาวคลื่นเพียง 8 mm. เท่านั้น ซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มาก คลื่นเสียงจะไม่มี การเลี้ยวเบนที่ขอบ คลื่นนั้นจึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบๆ หรือที่เราเรียกว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทาง

การมีทิศทางของคลื่นอุตราโซนิกนั้น ทำให้เราสามารถใช้งานได้หลายอย่าง เช่น

1. การนำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (ultrasonic remote control)
2. เครื่องล้างอุปกรณ์ (ultrasonic cleaner) โดยทำให้น้ำมีการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูง
3. เครื่องวัดความหนาของวัตถุ โดยส่งแก่ระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา
4. เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล
5. ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนของร่างกาย
6. ใช้ทดสอบการรั่วของท่อ

โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นกับการใช้งาน เช่น ถ้าคลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้ว ความถี่ที่ใช้ก็มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 kHz เพราะที่ความถี่สูงขึ้นไปนี้ อากาศจะดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มมากขึ้นทำให้ระดับของความแรงคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ ซึ่งต้องการรัศมีทำการสั้นๆ อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz -10MHz ขณะที่ความถี่เป็นจิกะเฮิรท์ก็มีการใช้กันหลาย ๆ การใช้งานที่ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่ในอากาศ

ส่วนในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการใช้คลื่นอุตราโซนิกมาใช้ประโยชน์ ดังนี้ [3]

1. การสเตอริไรซ์ ใช้ทำความสะอาดในระบบสเตอริไรซ์ ที่การทำความสะอาดธรรมดาไม่สามารถเข้าถึงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสกัด ช่วยในการสกัดสารด้วยตัวทำละลายซึ่งจะช่วยเพิ่มแรงในการซึมผ่านให้กับตัวทำละลาย เพิ่มการถ่ายเทมวลที่ผิวหน้าของตัวที่นำมาสกัด ทำให้ผนังเซลล์ที่ผิวของพืชแยกออก จึงแยกสารที่ต้องการออกมาได้ เช่น การสกัดน้ำตาลจากหัวบีท (sugar beet)

3. การเกิดผลึก คลื่นอุลตราโซนิคได้ถูกตรวจสอบแล้วว่าเป็นประโยชน์อย่างมากในกระบวนการตกผลึก ช่วยในการสร้างและเจริญเติบโตในการเกิดคริสตอล (Crystal) ช่วยในการเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation rate) เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งและไอศกรีม ทำให้ผลึกน้ำแข็ง (ice crystal) เล็กลง ช่วยลดการถูกทำลายของเซลล์ ทำให้ไอศกรีมแข็งขึ้น ยืดติดกับไม้ไอศกรีมได้ดีกว่าปกติ

4. กระบวนการออกซิเดชัน ตัวอย่างของการใช้คลื่นอุลตราโซนิคที่ใช้กับกระบวนการออกซิเดชัน คือ อาหารหมัก เช่น ไวน์ ทำให้แอลกอฮอล์และเอสเทอร์เข้าสู่สมดุล โดยใช้คลื่นอุลตราโซนิคที่ 1MHz และที่ประสบความสำเร็จมาก คือ วิสกี้ (ซึ่งจัดเป็นเอกสารสิทธิ์) สามารถช่วยลดเวลาการหมักลงให้น้อยกว่า 1 ปี

5. การกำจัดก๊าซ ช่วยลดหรือละลายก๊าซในของเหลว เป็นก๊าซที่ไม่ต้องการในกระบวนการผลิต สำหรับอาหารที่มีความหนืดสูงนั้น การกำจัดก๊าซจะทำได้ยาก เช่น ช็อกโกแลต

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mellema. [6] ได้สรุปถึงกลไกของปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น (Oil Uptake) ในอาหารที่ทอดแบบจุ่ม (deep-fat) ผลของการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับอาหารที่มีลักษณะเหมือน french Fries น้ำมันจะซึมผ่านเข้าไปหลังจากนำอาหารขึ้นจากการทอด การลดลงของน้ำมันในอาหาร สามารถทำได้โดยการสะเด็ดน้ำมันอย่างรวดเร็วหลังจากนำอาหารขึ้นจากการทอด น้ำมันที่ติดไปกับอาหารจะถูกดูดไปอยู่ในโพรงที่บริเวณเปลือกก่อนที่จะไหลออกมา

สาเหตุของการซึมแพร่ของน้ำมันไปยังโพรงในเปลือกของอาหารเกิดขึ้นมากเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของชั้นภายนอกของอาหารที่ถูกทอดเป็นสิ่งสำคัญ ในทางกลับกันการลดลงของ Oil uptake ทำได้โดยการปรับปรุงชั้นภายนอกของอาหาร

Saguy และ Dana [22] ได้กล่าวถึงผลกระทบทางโภชนาการของอาหารทอดว่า การทอดเป็นวิธีการทำอาหารที่ราคาถูก เร็ว และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ในการทำอาหารแบบ deep fat frying เป็นข้อสำคัญที่ได้เปรียบกว่าวิธีอื่น ความร้อนที่อยู่ด้านในอาหาร (crust region) ที่ต่ำกว่า 100°C ในเวลาที่สั้น และวิตามินที่ละลายได้ในน้ำไม่สูญหาย ดังนั้นเราจึงคาดหมายว่า heat-sensitivity vitamins จะเสื่อมลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบ ต้ม ซึ่งจะรักษาวิตามินที่ละลายในไขมันให้คงอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาพบว่า ผลกระทบทางลบของ Trans Fatty Acids (TFA) ของ Serum lipoproteins (โปรตีน+ไขมัน) และการเพิ่มของความเสียดต่อโรคหัวใจ เป็นเหตุให้มีแนวโน้มที่จะลดปริมาณ margarine และน้ำมัน ปริมาณ TFA ในน้ำมันทอด เป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากการ Hydrogenation ของน้ำมัน บางส่วนจำเป็น เพื่อปรับปรุงความเสียดของน้ำมัน จากการศึกษพบว่า แม้ว่าปริมาณ TFA น้อยกว่า 1% ใน Non Hydrogenation Oil ระดับของน้ำมันทอดสามารถเพิ่มขึ้นถึง 50% เนื่องจาก Partially Hydrogenation Oil

จากการทบทวน โครงสร้างที่ซับซ้อนของการทอดและมองถึงความสัมพันธ์ที่มีต่อกันระหว่าง กลไกของการดูดซับน้ำมัน, ปริมาณน้ำมัน ได้ความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ระหว่างการทอด สุขภาพและ โภชนาการ ได้ข้อสรุปดังนี้ การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ทางกายภาพและเคมีเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิส ออกซิเดชัน อุณหภูมิสูง ระยะเวลาการทอด การสลายตัวของความร้อน ความเสียดภาพ ของน้ำมันเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อเป็นการป้องกันการเสื่อมของน้ำมัน

Sonicstech [4] ซึ่งเป็นผู้จำหน่ายเครื่องทอดแบบอุลตราโซนิค โดยนำหลักการของคลื่นอุลตราโซนิคมาใช้ร่วมกับของเหลวที่ใช้ทอดและอนุภาคของน้ำมันและคลื่นอุลตราโซนิค ได้แสดงผลว่าคลื่นอุลตราโซนิคสามารถทำให้เครื่องปรุงเข้าไปได้มากซึ่งรวมไปถึง frying film ถ้าในกรณีทอดไก่อุปกรณ์ขึ้นนี้สามารถให้ความร้อนเข้าไปถึงข้างในกระดูกรวมไปถึงส่วนที่มีเนื้อมาก ซึ่งมีอัตราใช้คลื่นอุลตราโซนิคในระดับต่ำ ฉะนั้นสามารถลดเวลาการทำอาหารได้และรักษาความชื้นที่อยู่ภายใน ประหยัดน้ำมันที่ทอดเช่นเดียวกับการเพิ่มรสชาติและยังสามารถหน่วงเวลาการเกิด oxygenation ซึ่งจะประโยชน์ต่อผู้บริโภค

บทที่ 3

อุปกรณ์และการทดลอง

3.1 การเตรียมตัวอย่าง

วัตถุดิบ

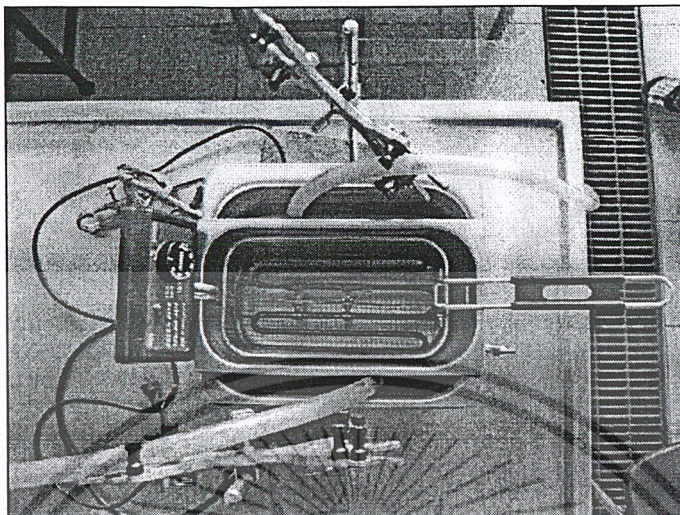
1. ไม้กรอกไก่
2. น้ำมันปาล์ม

วัสดุและเครื่องมือ (ภาคผนวก ค แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้)

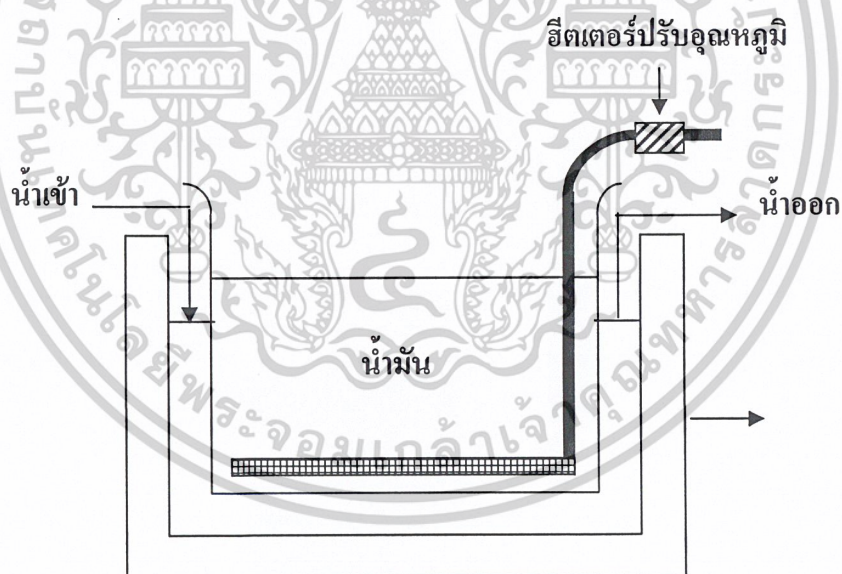
1. เครื่องอุตสาหกรรม 40 Hz.
2. เครื่องทอดไฟฟ้า
3. สายยางเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ความยาว 2 เมตร จำนวน 2 เส้น
4. Thermocouple 4 เส้น
5. Data Logger
6. เครื่องชั่งน้ำหนักหน่วยกรัม ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
7. ตู้อบ Oven
8. Desicator
9. เครื่องวัดสี (Colorimeter)
10. เวอร์เนียร์พลาสติก
11. ถังพลาสติก ขางรีด
12. นาฬิกาจับเวลา
13. ตระแกรง ที่ครีป
14. มีด เขียง
15. เข็ม ด้าย กรรไกร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมชุดเครื่องทอด



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์การทอด



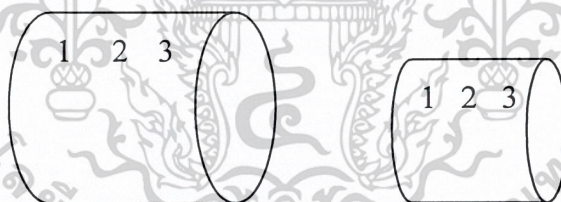
รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพชุดอุปกรณ์การทอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพเครื่องทอดแบบ Deep-fat frying ขนาด $30 \times 24.5 \times 15$ ซึ่งมีฮีตเตอร์ขนาด 2.3 กิโลวัตต์ ติดตั้งอยู่ด้านล่างภายในเครื่องทอด มีปั๊มปรับอุณหภูมิการทอด เครื่องทอดถูกนำไปวางไว้ในอ่างอุณหภูมิต่ำไซนิกขนาด 11 ลิตร ซึ่งมีน้ำอยู่ภายในเพื่อเป็นตัวกลางส่งสัญญาณคลื่นมายังเครื่องทอด ในขณะที่เดียวกันน้ำทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทอด เพื่อไม่ให้อุณหภูมิการทำงานของท่านสควิเซอร์สูงเกินไป โดยควบคุมไม่ให้เกิน 50°C

3.3 ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ

1. เตรียมไส้กรอกไก่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $2.67 \pm 0.20\text{cm}$. ยาว $2.67 \pm 0.20\text{cm}$. จำนวน 54 ชิ้น
2. เตรียมไส้กรอกไก่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1.55 \pm 0.15\text{cm}$. ยาว $1.55 \pm 0.15\text{cm}$. จำนวน 54 ชิ้น
3. นำไส้กรอกไปแช่น้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งที่มีหน่วยชั่งเป็นกรัมและมีทศนิยม 3 ตำแหน่งแล้วบันทึกข้อมูล
4. วัดขนาดของไส้กรอกโดยใช้เวอร์เนียพลาสติก บันทึกค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของไส้กรอกแต่ละขนาดตามลำดับ โดยทำการบันทึกค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมด 3 ครั้ง แสดงได้ดังรูปที่ 3.13



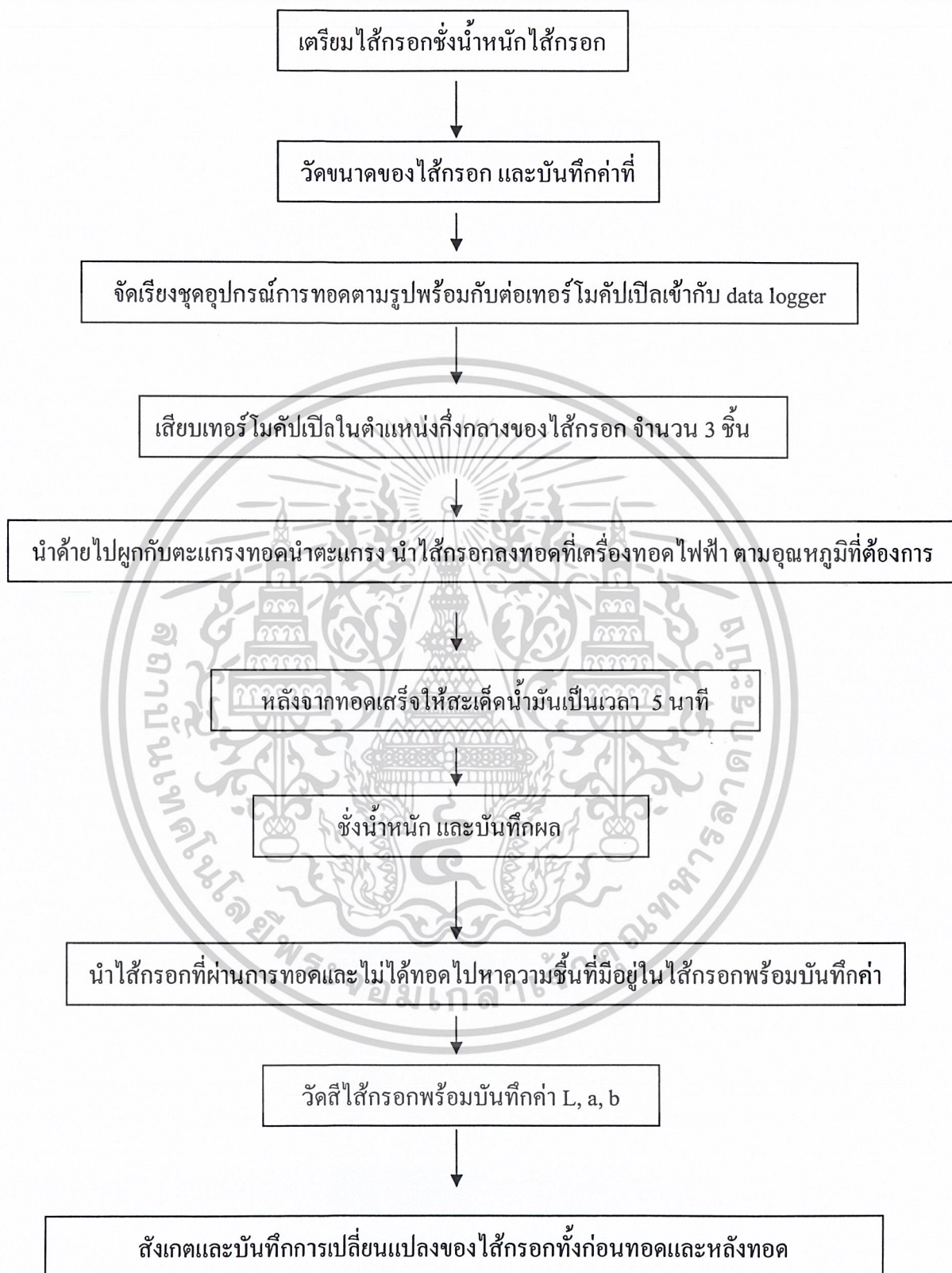
รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งที่บันทึกค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอก

5. จัดเรียงชุดอุปกรณ์การทอดตามรูปที่ 3.12
6. นำเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 4 เส้น ต่อเข้ากับ Data logger
7. นำค้ายร้อยเข้ากับไส้กรอกโดยพยายามให้ค้ายอยู่ตรงกลางของเส้นผ่านศูนย์กลางไส้กรอกโดยใช้ไส้กรอก 3 ชิ้น ทำอย่างนี้อีก 1 เส้น
8. จากนั้นนำไปผูกกับตะแกรงทอดโดยผูกให้อยู่ในระดับเดียวกัน เสียบเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งกึ่งกลางของไส้กรอกทั้ง 3 ชิ้น ชิ้นละ 1 เส้น และควรจะเป็นไส้กรอกที่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง ที่ทำการทอด ส่วนเทอร์โมคัปเปิลเส้นสุดท้ายให้จุ่มลงในน้ำมันเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำมันขณะที่ทำการทอด
9. จดบันทึกอุณหภูมิของไส้กรอกเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เปิดสวิตช์ขดลวดความร้อนของเครื่องทอดไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 170 และ 190 องศาเซลเซียสตามเงื่อนไขการทดลอง ตั้งอุณหภูมิของเครื่องทอดตามที่กำหนด
11. เมื่อขดลวดร้อนได้อุณหภูมิตามต้องการนำไปใส่กรอกที่มีเทอร์โมคัปเปิลเสียบอยู่ลงทอดภายในระยะเวลาที่กำหนด
12. ขณะที่ทำการทอดให้จับบันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในใส่กรอกและน้ำมันทุกๆ 1 นาที
13. หลังจากทอดใส่กรอกจนได้เวลาตามที่ต้องการแล้วให้ทำการสะเด็ดน้ำมันเป็นเวลา 5 นาที
14. นำใส่กรอกที่สะเด็ดน้ำมันแล้วไปชั่งน้ำหนักที่เครื่องชั่งเดิมบันทึกผลไว้เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนทอด
15. นำใส่กรอกที่ผ่านการทอดและไม่ได้ผ่านการทอดไปหาความชื้นที่มีอยู่ในใส่กรอกพร้อมทั้งบันทึก
16. หลังจากนั้นนำใส่กรอกไปวัดสีที่เครื่องวัดสีพร้อมทั้งบันทึกค่า L , a , b เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น
17. สังเกตและบันทึกลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของใส่กรอกเปรียบเทียบระหว่างใส่กรอกก่อนทอดและหลังทอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวางแผนการทดลอง

ในการศึกษาการทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันเริ่มต้น, ขนาดของไส้กรอก และการใช้อุลตราโซนิค ผลจากตัวแปรที่ศึกษาหรือลักษณะของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความชื้นของไส้กรอก, การดูดซับน้ำมันของไส้กรอก, การขยายตัวของไส้กรอก, อุณหภูมิของไส้กรอก ขณะทอดและปริมาณน้ำของไส้กรอกที่หายไป โดยใช้การวางแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มีตัวแปรที่ศึกษา 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปรประกอบด้วย 2 ระดับ จึงเรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ซึ่งการทดลองร่วมของตัวแปรทั้ง 8 [23]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์กับการวิจัย โดยแบ่งค่าตัวแปรที่ศึกษา 3 ตัวแปรดังนี้

1. อุณหภูมิของน้ำมันเริ่มต้น
 - 170 องศาเซลเซียส
 - 190 องศาเซลเซียส
2. ขนาดของไส้กรอง
 - ขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.55 ± 0.15 cm. ยาว 1.55 ± 0.15 cm
 - ขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.67 ± 0.20 cm. ยาว 2.67 ± 0.20 cm.
3. การใช้ชุดตราโซนิค
 - การใช้ชุดตราโซนิค
 - การไม่ใช้ชุดตราโซนิค

ตารางที่ 3.1 แสดงเครื่องหมายที่ใช้ในตารางการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

ตัวแปร	สัญลักษณ์	
	-	+
การใช้ชุดตราโซนิค	ไม่ใช้	ใช้
ขนาดของไส้กรอง	เล็ก	ใหญ่
อุณหภูมิของน้ำมันเริ่มต้น ($^{\circ}$ C)	170	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³

การทดลองที่	การใช้สูตร้าโซนิค	ขนาดของไส้กรอก	อุณหภูมิของน้ำมันเริ่มต้น (°C)
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

ตารางที่ 3.3 แสดงสถานะการเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่	การใช้สูตร้าโซนิค	ขนาดของไส้กรอก	อุณหภูมิของน้ำมันเริ่มต้น (°C)
1	ใช้	ใหญ่	170
2	ใช้	ใหญ่	190
3	ใช้	เล็ก	170
4	ใช้	เล็ก	190
5	ไม่ใช้	ใหญ่	170
6	ไม่ใช้	ใหญ่	190
7	ไม่ใช้	เล็ก	170
8	ไม่ใช้	เล็ก	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไส้กรอก

3.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

แสดงการคำนวณ

$$\text{Moisture Ratio} = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

โดย M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ (% มาตรฐานแห้ง)

M_o คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (% มาตรฐานแห้ง)

M_e คือ Moisture Equilibrium ($M_e = 0$)

(การหาค่าความชื้นแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

ตัวอย่างการคำนวณ ไส้กรอกขนาดเล็ก ใช้อุลตราโซนิก อุลทราของน้ำมัน 170°C ที่น้ำหนักที่ 2

ปริมาณความชื้นที่น้ำหนักที่ 1 = 48.26 % มาตรฐานแห้ง

ปริมาณความชื้นเริ่มต้น = 59.13 % มาตรฐานแห้ง

$$\text{Moisture Ratio} = \frac{48.26}{59.13} = 0.816$$

แสดงว่าไส้กรอกมีปริมาณความชื้นเหลือ 0.816 หรือ 81.6% จากค่าความชื้นเริ่มต้น

3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น (Oil Uptake)

วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างก่อนทอด
- 2) ตัวอย่างหลังทอด
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนัก

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างก่อนทอดและหลังทอดมาชั่งน้ำหนัก บันทึก
2. จากการวิเคราะห์ความชื้นของตัวอย่าง นำค่ามาใช้
3. การคำนวณ

ตัวอย่างก่อนทอดมีร้อยละความชื้นของผลิตภัณฑ์ (มาตรฐานเปียก) X_1 % มีน้ำหนักก่อนทอด A_1 กรัม

ตัวอย่างหลังทอดมีร้อยละความชื้นของผลิตภัณฑ์ (มาตรฐานเปียก) X_2 % มีน้ำหนักหลังทอด A_2 กรัม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างก่อนทอดมีน้ำหนักแห้ง $= A_1 - W_1 = DM_1$ กรัม

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

ตัวอย่างหลังทอดมีน้ำหนักแห้ง $= DM_1$ กรัม

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

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

ตัวอย่างการคำนวณ ใช้ใส่กรอกขนาดเล็ก ใช้อุลตราโซนิก อุณหภูมิของน้ำมัน 170°C ที่นาที่ที่ 1
 น้ำหนักของตัวอย่างก่อนทอด 4.02 กรัม %mc ของตัวอย่างก่อนทอด 59.13%
 น้ำหนักของตัวอย่างหลังทอด 3.732 กรัม %mc ของตัวอย่างหลังทอด 48.26%

ตัวอย่างก่อนทอดมีน้ำ $(W_1) = \frac{59.13}{100} \times 4.02 = 2.377$ กรัม

ตัวอย่างก่อนทอดมี $DM_1 = 4.02 - 2.377 = 1.643$ กรัม

ตัวอย่างหลังทอดมีน้ำ $(W_2) = \frac{48.26}{100} \times 3.732 = 1.801$ กรัม

ตัวอย่างหลังทอดมี $DM = 1.643$ กรัม

% น้ำที่หายไป $= \frac{2.377 - 1.801}{1.643} \times 100 = 35.056\%$

% Oil Uptake $= \frac{3.732 - 1.801 - 1.643}{1.643} \times 100 = 17.527\%$

แสดงว่าใส่กรอกมีปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น 17.527%

3.5.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนการขยายตัวของใส่กรอก (Expansion Ratio)

วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างก่อนทอด
- 2) ตัวอย่างหลังทอด
- 3) เวอร์เนีย

วิธีการทดลอง

1. ใช้เวอร์เนียวัดความยาวและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างก่อนทอด ซึ่งตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 3 จุดที่ต้องวัดค่า บันทึกค่า
2. ใช้เวอร์เนียวัดความยาวและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างหลังทอด ซึ่งตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 3 จุดที่ต้องวัดค่า บันทึกค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำค่าที่บันทึกของความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางมาหาค่าเฉลี่ย
4. นำค่ามาคำนวณหาปริมาตร

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \times L$$

5. การคำนวณการขยายตัวของตัวอย่างตามปริมาตร

$$\% \text{Expansion Ratio} = \frac{\text{ปริมาตรของตัวอย่างหลังทอด} - \text{ปริมาตรของตัวอย่างก่อนทอด}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างก่อนทอด}} \times 100$$

%Expansion Ratio คือ ร้อยละของอัตราส่วนการขยายตัว

ตัวอย่างการคำนวณ ใช้กรอกขนาดเล็ก ใช้อุลตราโซนิก อุณหภูมิของน้ำมัน 170°C ที่น้ำหนักที่ 1
 d เฉลี่ยของตัวอย่างก่อนทอด 1.748 cm. d เฉลี่ยของตัวอย่างหลังทอด 1.918 cm.
 l เฉลี่ยของตัวอย่างก่อนทอด 1.634 cm. l เฉลี่ยของตัวอย่างหลังทอด 1.547 cm.

$$V_{\text{ก่อนทอด}} = \frac{\pi \times (1.748)^2}{4} \times 1.634 = 3.92 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{หลังทอด}} = \frac{\pi \times (1.918)^2}{4} \times 1.547 = 4.47 \text{ cm}^3$$

$$\% \text{Expansion Ratio}(V) = \frac{4.47 - 3.92}{3.92} \times 100 = 14.03\%$$

แสดงว่า ใช้กรอกมีอัตราส่วนการขยายตัว 14.03 %

3.5.4 การวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง (L)

วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างก่อนทอด
- 2) ตัวอย่างหลังทอด
- 3) เครื่องวัดสี

วิธีการทดลอง

1. ค่าสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำตัวอย่างวางที่ช่องแสง กค F10 เพื่ออ่านค่า บันทึก ทำเช่นนี้จนครบทุกตัวอย่าง
3. การคำนวณ

$$\% \text{ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง} = \frac{L \text{ ของตัวอย่างก่อนทอด} - L \text{ ของตัวอย่างหลังทอด}}{L \text{ ของตัวอย่างก่อนทอด}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ใส้กรอกขนาดเล็ก ใช้อุณหภูมิต่ำ ใช้น้ำมัน 170°C ที่น้ำหนักที่ 1

L ของตัวอย่างก่อนทอด 41.374

L ของตัวอย่างหลังทอด 39.272

$$\% \text{ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง} = \frac{41.374 - 39.272}{41.374} \times 100 = 5.08\%$$

แสดงว่า ใส้กรอกมีร้อยละค่าความสว่างลดลง 5.08% จากเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลการทดลอง

จากการดำเนินการทดลองการทอดตามสภาวะต่าง ๆ ที่กำหนดในตารางที่ 3.3 โดยกำหนดสัญลักษณ์เพื่อใช้แทนสภาวะของการทดลองดังนี้

S - ใส้กรอกขนาดเล็ก

L - ใส้กรอกขนาดใหญ่

Y - การทอดโดยใช้อุลตราโซนิก

N - การทอดโดยไม่ใช้อุลตราโซนิก

170 - อุณหภูมิของน้ำมัน 170°C

190 - อุณหภูมิของน้ำมัน 190°C

ตัวอย่าง SY170 หมายความว่า การทอดใส้กรอกขนาดเล็ก โดยใช้อุลตราโซนิก ที่อุณหภูมิของน้ำมัน 170°C ผลที่ได้เป็นดังนี้

4.1.1 ผลการทดลองค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture Ratio)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์

time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.816	0.974	0.83	0.841	0.861	0.954	0.884	0.887
3	0.826	0.748	0.771	0.777	0.89	0.942	0.858	0.889
4	0.738	0.774	0.698	0.672	0.85	0.853	0.808	0.907
5	0.592	0.757	0.667	0.581	0.824	0.841	0.747	0.837
6	0.688	0.71	0.64	0.619	0.815	0.803	0.78	0.881
7	0.615	0.701	0.65	0.603	0.753	0.796	0.743	0.865
8	0.572	0.646	0.597	0.569	0.603	0.811	0.708	0.846

4.1.2 ผลการทดลองค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ (%Oil Uptake)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์

time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
1	17.527	19.151	-	11.025	17.885	2.189	15.424	14.209
2	12.634	13.499	26.552	12.948	11.322	1.354	13.073	12.621
3	17.971	18.569	29.092	18.327	14.817	9.767	16.818	5.648
4	29.091	29.265	23.37	24.852	15.224	5.743	25.115	11.358
5	13.67	13.469	18.238	14.32	13.338	7.805	15.602	3.097
6	16.423	19.116	12.564	13.327	16.756	4.572	15.486	3.024
7	16.738	17.129	13.477	11.655	31.412	-2.497	18.423	1.415
8	31.906	32.076	18.234	16.938	5.133	-9.449	18.599	8.833

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (%Expansion Ratio)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์

Time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
1	13.956	2.396	-	8.483	12.949	15.41	11.067	21.216
2	21.611	16.725	22.294	24.314	29.367	13.023	15.898	15.678
3	45.916	37.7	26.489	79.23	16.525	31.591	26.672	20.625
4	86.745	61.438	61.462	89.702	31.318	50.418	32.695	29.803
5	104.319	89.588	127.684	134.385	34.296	44.974	43.597	32.215
6	118.801	91.506	163.597	149.673	84.182	67.831	55.93	38.235
7	124.064	173.909	182.706	236.43	81.497	64.355	85.898	53.101
8	171.324	179.839	169.282	251.374	76.339	83.02	111.924	51.743

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการทดลอง %ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลอง %ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง

time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5.080	6.729	5.223	8.862	1.432	1.609	1.253	2.942
2	7.435	11.901	5.818	15.133	1.592	2.701	1.322	2.889
3	8.111	11.834	6.638	18.322	1.240	3.030	2.956	4.240
4	6.966	8.880	7.108	18.311	3.419	4.164	2.967	4.288
5	7.227	11.628	5.533	16.426	4.332	6.184	3.940	3.172
6	5.192	6.888	4.469	15.128	4.838	5.025	4.691	4.987
7	5.549	3.393	2.669	12.937	5.646	6.095	1.132	5.847
8	4.022	3.580	3.284	13.513	5.702	4.990	3.618	5.238

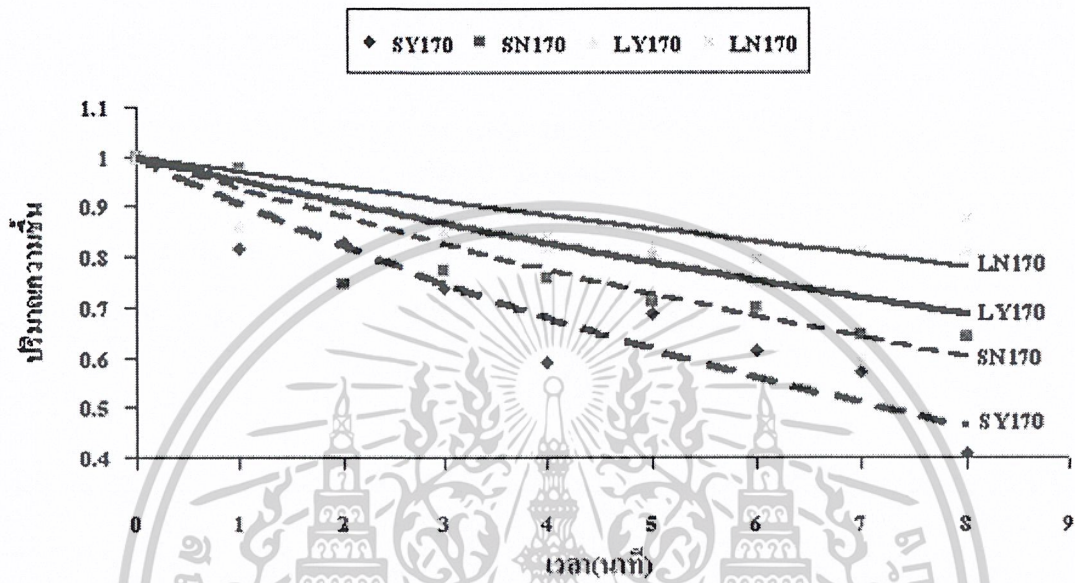
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สถานะต่าง ๆ ตามตารางการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³

จากการดำเนินการทดลองโดยการทอดตามสถานะต่าง ๆ ที่กำหนด ให้ผลของคุณลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

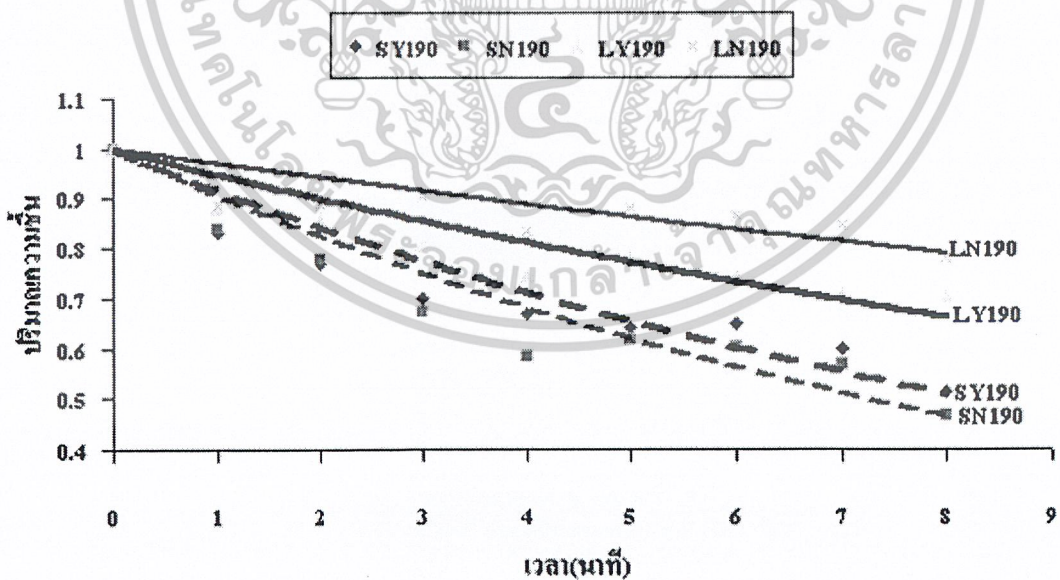
4.2.1 การวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture Ratio)

ผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาพลอตกราฟได้ดังนี้

กราฟแสดงปริมาณความชื้นของไม้ที่อบที่อุณหภูมิ 170 °C ที่เวลาต่างๆ



กราฟแสดงค่าปริมาณความชื้นของไม้ที่อบที่อุณหภูมิ 190 °C ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่สภาวะการทอดต่างๆ

ก) อุณหภูมิ 170°C

ข) อุณหภูมิ 190°C

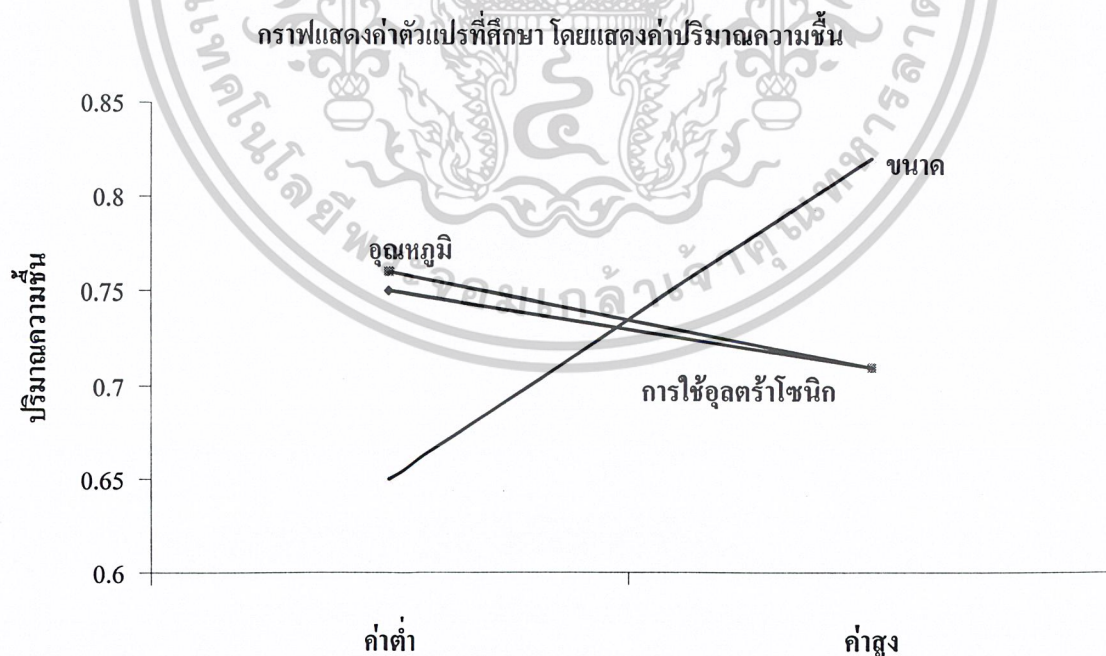
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.1(ก) เป็นการทอดไส้กรอกที่อุณหภูมิ 170°C ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกัน ผลที่ได้ คือ การทอดไส้กรอกขนาดเล็กจะเหลือค่าปริมาณความชื้นน้อยกว่าไส้กรอกขนาดใหญ่ และการทอดแบบวิธีธรรมดาจะมีค่าปริมาณความชื้นที่เหลือในผลิตภัณฑ์มากกว่าการทอดแบบการใช้อุลตราโซนิก และเมื่อใช้เวลาทอดนานมากขึ้นค่าปริมาณความชื้นที่เหลือก็จะเริ่มคงที่

จากกราฟรูปที่ 4.1(ข) เป็นการทอดไส้กรอกที่อุณหภูมิ 190°C ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกัน ผลที่ได้ คือ การทอดไส้กรอกขนาดเล็กจะเหลือความชื้นน้อยกว่าไส้กรอกขนาดใหญ่ ที่เป็นเช่นนี้ อาจจะเป็นเพราะการทอดไส้กรอกขนาดเล็กด้วยอุลตราโซนิกที่อุณหภูมิสูงเกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เร็วเกินไป จนทำให้ผิวของไส้กรอกเกิดสภาพแข็ง (case hardening) เป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทความชื้นจากภายในสู่ผิวอาหารจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูง และการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่แบบวิธีธรรมดาจะได้ค่าปริมาณความชื้นมากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ด้วยอุลตราโซนิก แต่การทอดไส้กรอกขนาดเล็กโดยวิธีธรรมดากลับเหลือความชื้นน้อยกว่าการทอดแบบด้วยอุลตราโซนิก และเมื่อใช้เวลาทอดนานมากขึ้นค่าปริมาณความชื้นก็จะเริ่มคงที่

นำข้อมูลที่หน้าที่ 5 มาวิเคราะห์ผลกระทบของค่าตัวแปรที่ศึกษา

4.2.1.1 ผลของสถานะการทอด (Main Effects)



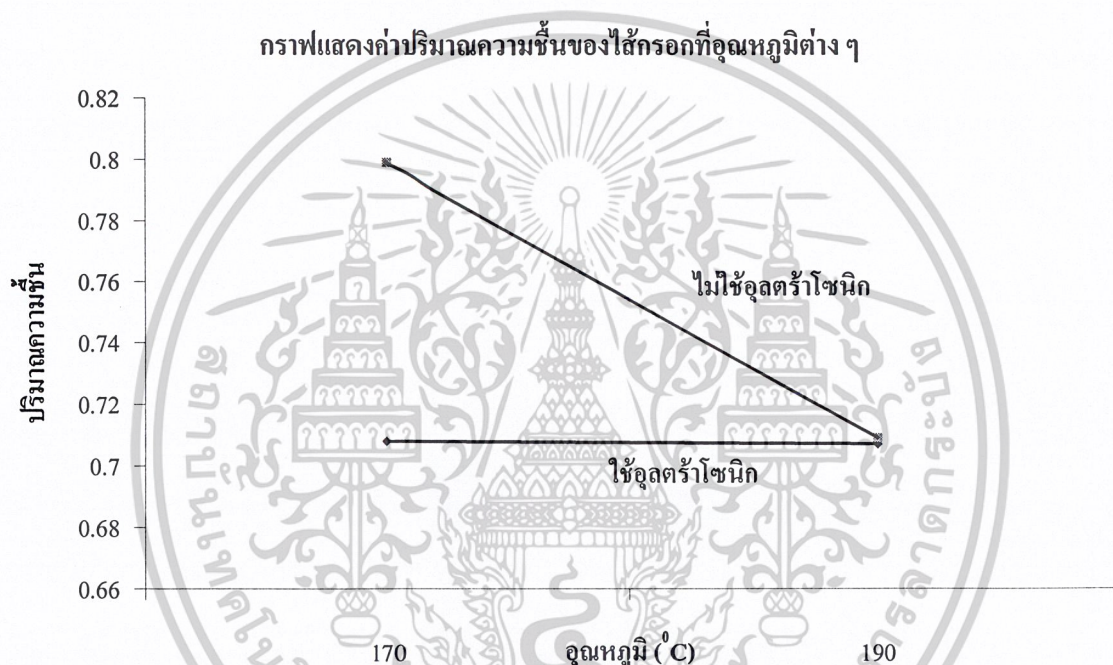
รูปที่ 4.2 ผลของสถานะการทอดต่อปริมาณความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 4.2 จะได้ว่า การทอดไส้กรอกขนาดเล็กจะมีปริมาณความชื้นน้อยกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ ในขณะที่การทอดด้วยวิธีธรรมดาหรือการทอดที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าปริมาณความชื้นมากกว่าการทอดด้วยอุลตราโซนิกหรือการทอดที่อุณหภูมิสูง

4.2.1.2 ผลร่วมกันของสถานะการทอด (Interaction Effects)

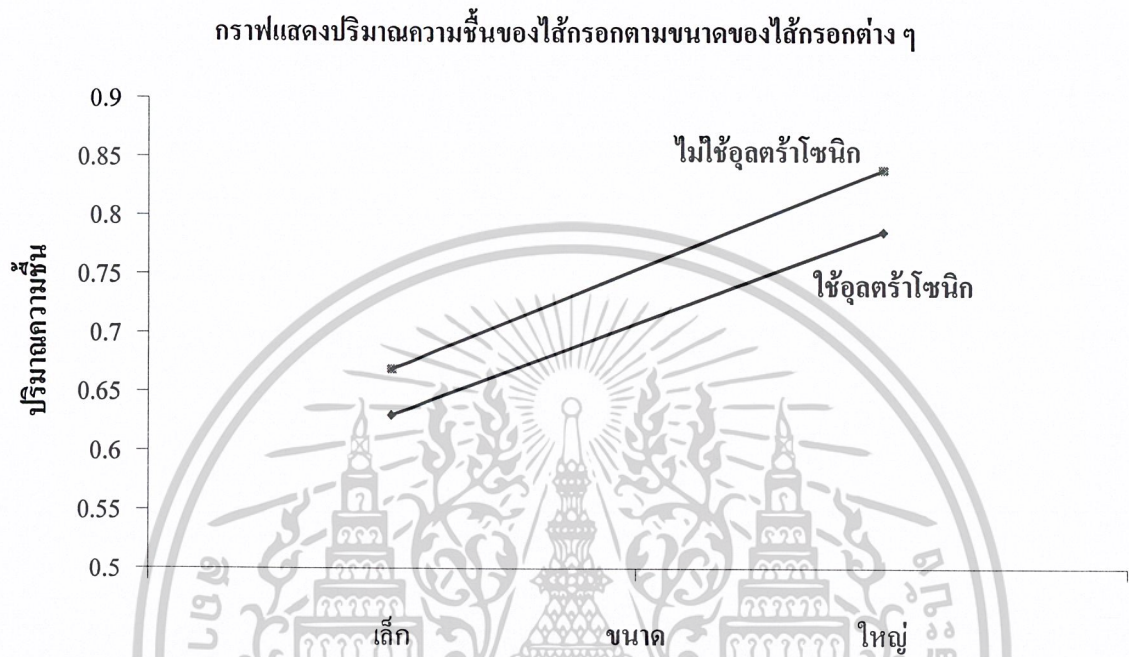
4.2.1.2.1 ผลร่วมกันของการใช้อุลตราโซนิกกับอุณหภูมิ (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าปริมาณความชื้นของไส้กรอกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากกราฟรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าในการทอดด้วยวิธีธรรมดา ที่อุณหภูมิต่ำ 170°C เป็นเวลา 5 นาที ผลผลิตแห้งที่ได้มีปริมาณความชื้นมากกว่าผลผลิตแห้งที่ทอดที่อุณหภูมิสูง 190°C ในขณะที่การทอดด้วยอุลตราโซนิกที่อุณหภูมิต่ำ 170°C และอุณหภูมิสูง 190°C เป็นเวลา 5 นาทีเช่นกัน ค่าปริมาณความชื้นของผลผลิตแห้งที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าการใช้อุลตราโซนิกและอุณหภูมิต่างๆ ทอดส่งผลร่วมกันต่อค่าความชื้นที่ได้ ในการควบคุมการทอด จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาในค่าที่เหมาะสมของทั้งความถี่ของอุลตราโซนิกและอุณหภูมิต่างๆ ทอดร่วมกัน เพื่อให้ได้ค่าความชื้นของผลผลิตแห้งตามที่ต้องการ

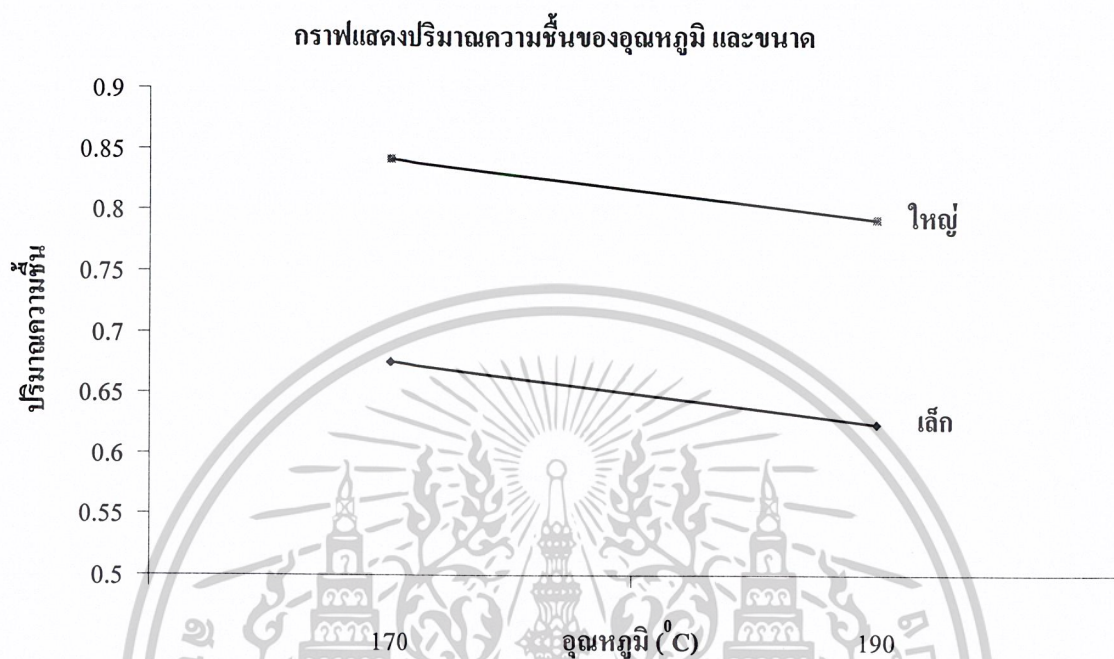
4.2.1.2.2 ผลรวมกันของการใช้อุลตราโซนิกกับขนาดของไส้กรอก (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าปริมาณความชื้นตามขนาดของไส้กรอก

จากกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าทั้งในกรณีการทอดด้วยวิธีธรรมดาและการทอดด้วยอุลตราโซนิก การทอดไส้กรอกขนาดเล็กจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นน้อยกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ ดังนั้นขนาดของไส้กรอกและวิธีการทอดไม่ส่งผลกระทบต่อกัน

4.2.1.2.3 ผลรวมกันของอุณหภูมิกับขนาดของไส้กรอง (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

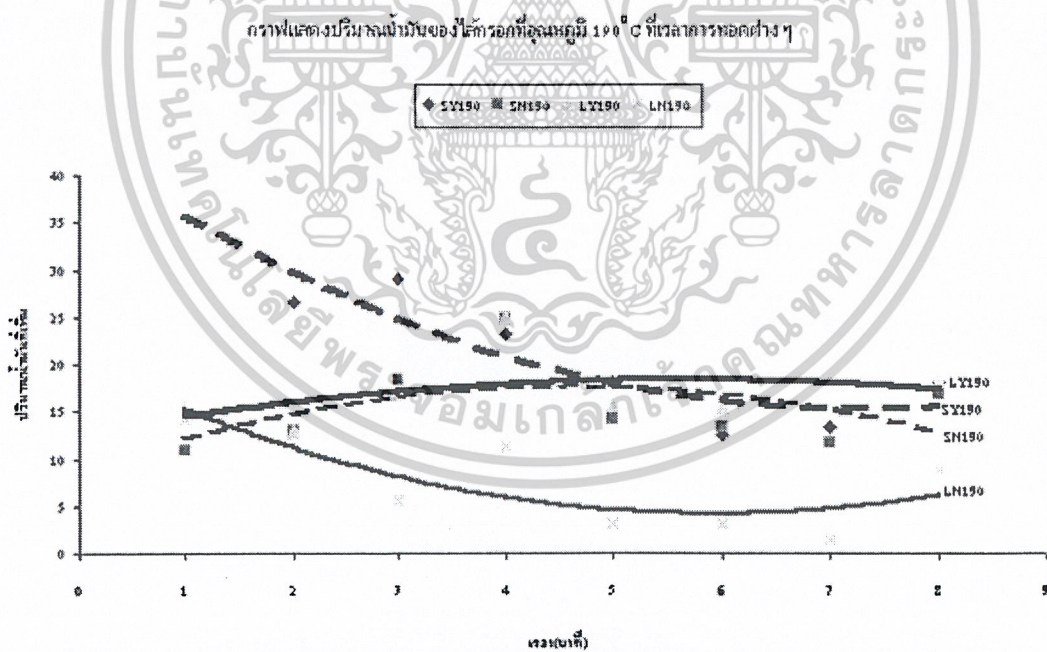
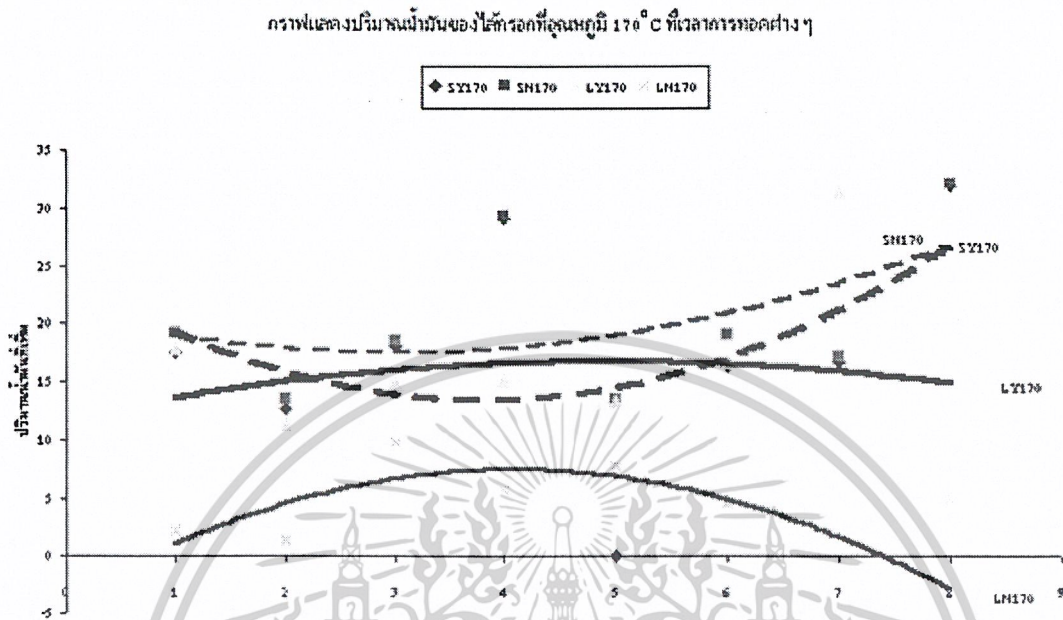


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าปริมาณความชื้น

จากกราฟรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าในการทอดไส้กรองขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิต่ำผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณความชื้นมากกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง การทอดไส้กรองขนาดเล็กก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงขนาดของไส้กรองและอุณหภูมิที่ใช้ทอดจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์

4.2.2 การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ (%Oil Uptake)

ผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.2 สามารถนำมาพลอตกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นที่สภาวะการทอดต่างๆ
(ก) อุณหภูมิ 170°C (ข) อุณหภูมิ 190°C

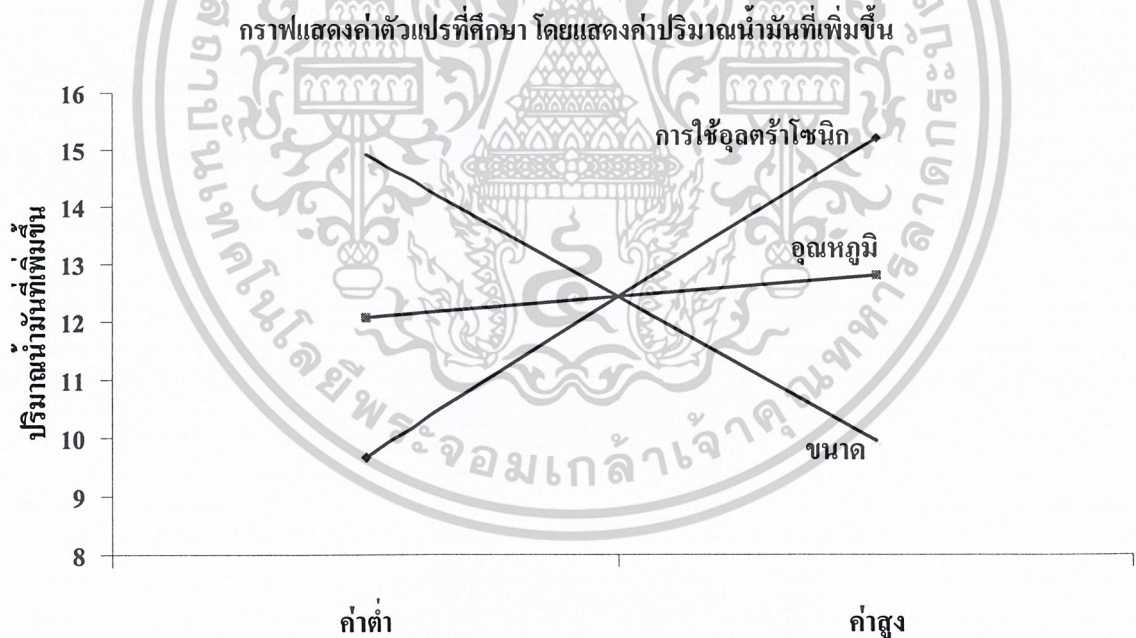
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.6(ก) เป็นการทอดไส้กรอกที่อุณหภูมิ 170°C ผลที่ได้ คือ การทอดไส้กรอกขนาดเล็กโดยใช้อุลตราโซนิกจะมีปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดเล็กแบบวิธีธรรมดา ส่วนการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่โดยใช้อุลตราโซนิกจะมีค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ด้วยวิธีธรรมดา

จากกราฟรูปที่ 4.6(ข) เป็นการทอดไส้กรอกที่อุณหภูมิ 190°C ผลที่ได้ คือ การทอดไส้กรอกขนาดเล็กด้วยวิธีธรรมดามีปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดเล็กด้วยอุลตราโซนิก ส่วนการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่โดยใช้อุลตราโซนิกจะมีค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ด้วยวิธีธรรมดา

เมื่อพิจารณาที่เวลาใด ๆ เพื่อศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการทดลองต่อปริมาณน้ำมันที่เพิ่มของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลง

4.2.2.1 ผลของสภาวะการทอด (Main Effects)



รูปที่ 4.7 ผลของสภาวะการทอดต่อปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

จากกราฟรูปที่ 4.7 จะได้ว่า การทอดโดยไม่ใช้อุลตราโซนิกจะมีปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการทอดโดยใช้อุลตราโซนิก ส่วนการทอดที่อุณหภูมิกของน้ำมัน 170°C จะมีค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า

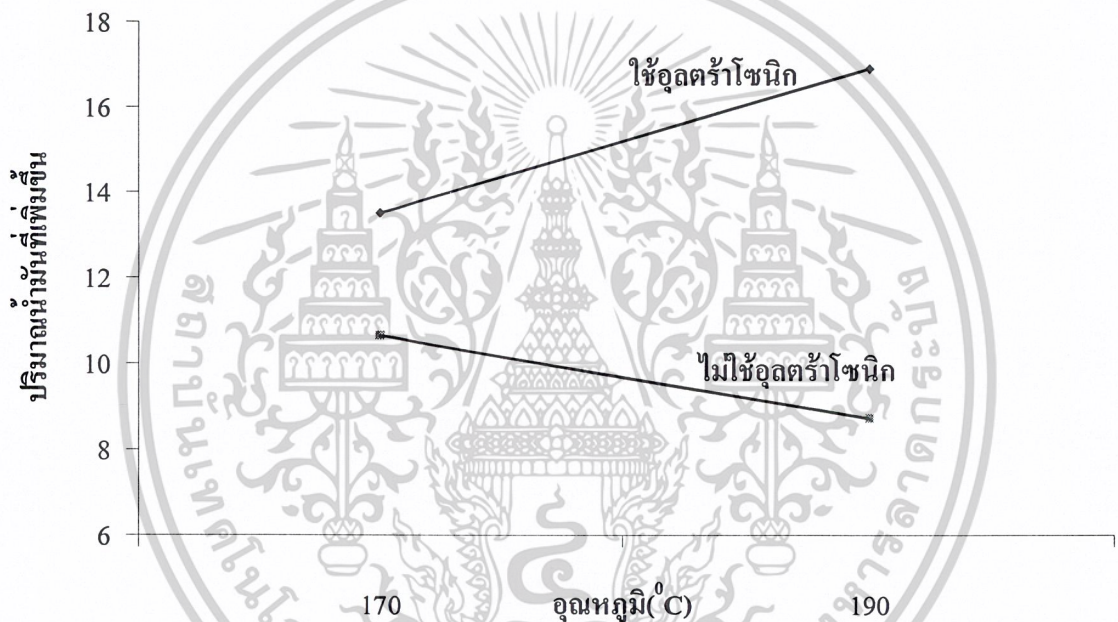
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทอดที่อุณหภูมิสูง และสำหรับผลของขนาดของไส้กรอกนั้น พบว่าการทอดไส้กรอกขนาดเล็กจะมีค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่

4.2.2.2 ผลร่วมกันของสถานะการทอด (Interaction Effects)

4.2.2.2.1 ผลร่วมกันของการใช้อุตราโซนิกกับอุณหภูมิ (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

กราฟแสดงปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของไส้กรอกที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของไส้กรอกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากกราฟที่ 4.8 จะได้ว่าผลของอุณหภูมิของน้ำมันและการใช้อุตราโซนิกส่งผลร่วมกันต่อค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่ม (%Oil Uptake) เนื่องจากพบว่าการทอดแบบวิธีธรรมดาที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่การทอดด้วยอุตราโซนิกที่อุณหภูมิต่ำกลับให้ปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าการทอดด้วยอุตราโซนิกที่อุณหภูมิสูง

ส่วนค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดด้วยอุตราโซนิกมีค่าสูงกว่าการทอดด้วยวิธีธรรมดา น่าจะเป็นผลมาจากแรงสั่นสะเทือนของความถี่ของคลื่นที่ใช้ ทำให้โมเลกุลของน้ำมันสามารถซึมผ่านเข้าไปยังชิ้นอาหารได้เร็วขึ้น ทำให้ปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น

4.2.2.2.2 ผลร่วมกันของการใช้อุลตราโซนิคกับขนาดของไส้กรอก (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)



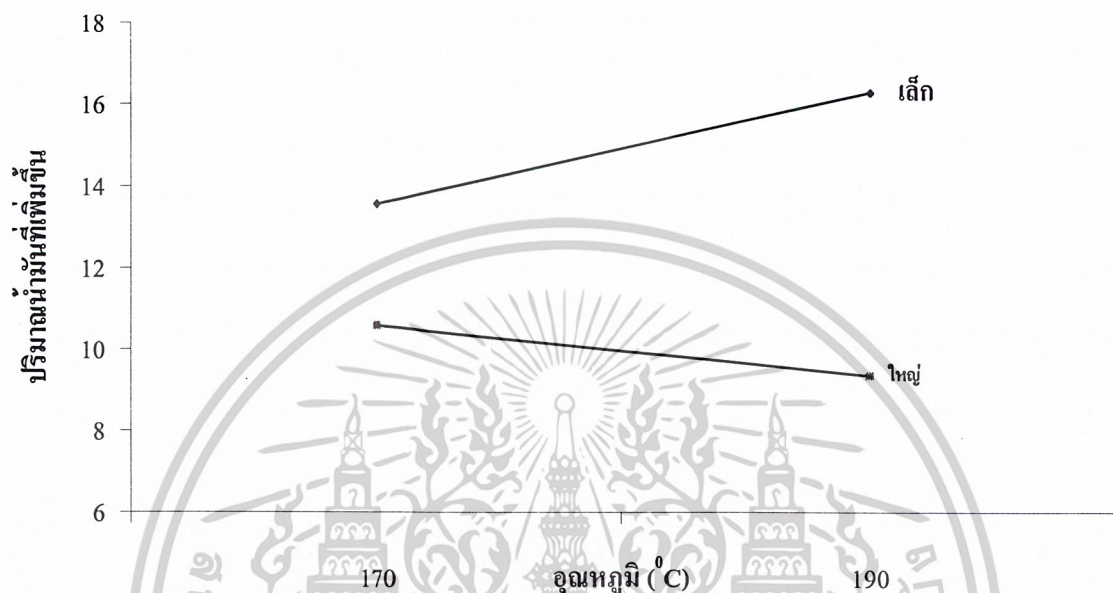
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของไส้กรอก

จากกราฟที่ 4.9 จะได้ว่าผลของขนาดของไส้กรอกและการใช้อุลตราโซนิคส่งผลร่วมกันต่อค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่ม (%Oil Uptake) เนื่องจากพบว่า การทอดไส้กรอกขนาดเล็กด้วยวิธีการทอดแบบธรรมดา ส่งผลให้ปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ ในทำนองเดียวกัน การทอดไส้กรอกขนาดเล็กด้วยอุลตราโซนิคยังคงให้ปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่เช่นกัน แต่ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกันมากนัก

ส่วนค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดด้วยอุลตราโซนิคมีค่าสูงกว่าการทอดด้วยวิธีธรรมดา น่าจะเป็นผลมาจากแรงสั่นสะเทือนของคลื่นที่ใช้ ทำให้โมเลกุลของน้ำมันสามารถซึมผ่านเข้าไปยังชิ้นอาหารได้เร็วขึ้น ทำให้ปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น

4.2.2.2.3 ผลร่วมกันของอุณหภูมิกับขนาดของไส้กรอง (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

กราฟแสดงปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และขนาด



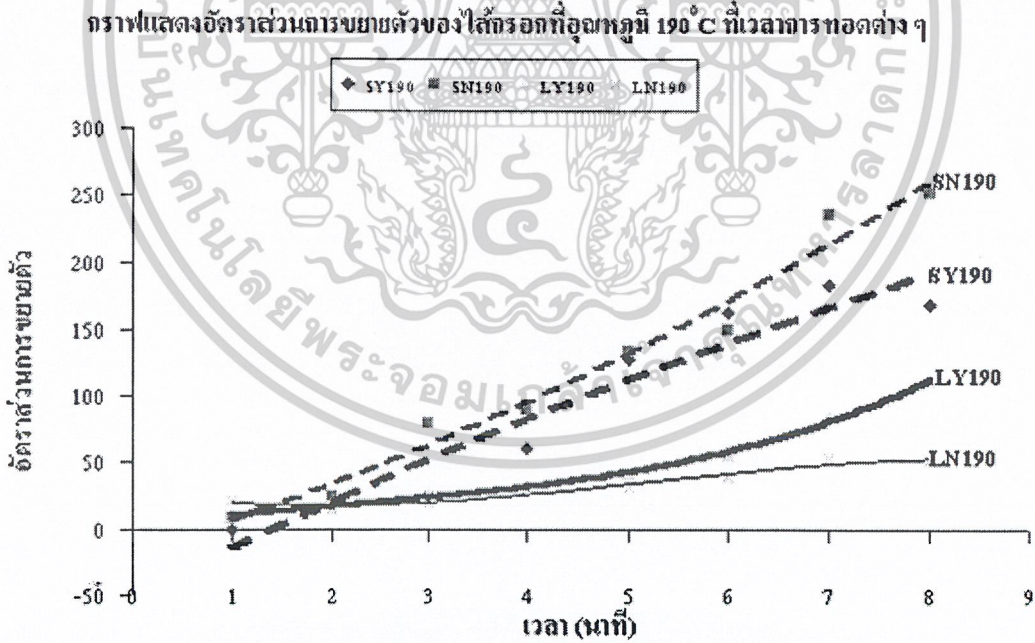
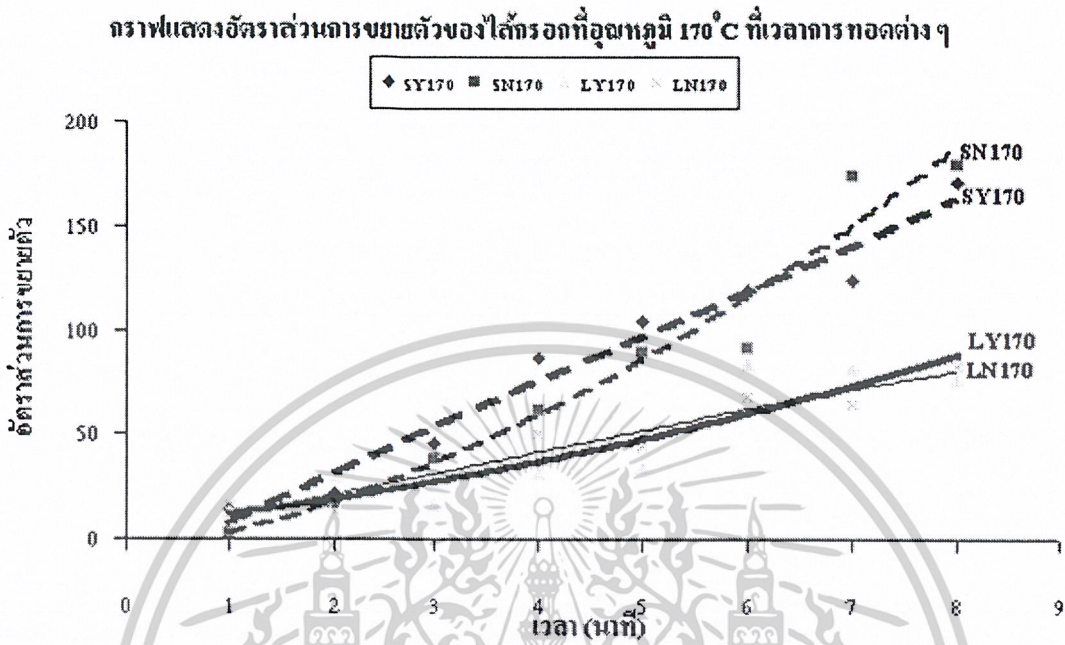
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

จากกราฟที่ 4.10 จะได้ว่าผลของอุณหภูมิของน้ำมันและขนาดของไส้กรองส่งผลร่วมกันต่อค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่ม (%Oil Uptake) เนื่องจากพบว่าการทอดไส้กรองขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่การทอดไส้กรองขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิต่ำกลับให้ปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าการทอดด้วยอุณหภูมิสูง

ส่วนค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดไส้กรองขนาดเล็กมีค่าสูงกว่าการทอดไส้กรองขนาดใหญ่ น่าจะเป็นผลมาจากความร้อนที่ใช้ ทำให้โมเลกุลของน้ำมันสามารถซึมผ่านเข้าไปยังชิ้นอาหารได้เร็วขึ้น ระยะทางจากผิวของไส้กรองขนาดเล็กถึงใจกลางมีระยะทางสั้นกว่าและพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวลของไส้กรองขนาดเล็กมีมากกว่าไส้กรองขนาดใหญ่จึงทำให้ปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น

4.2.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (%Expansion Ratio)

ผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.3 สามารถนำมาพลอตกราฟได้ดังนี้



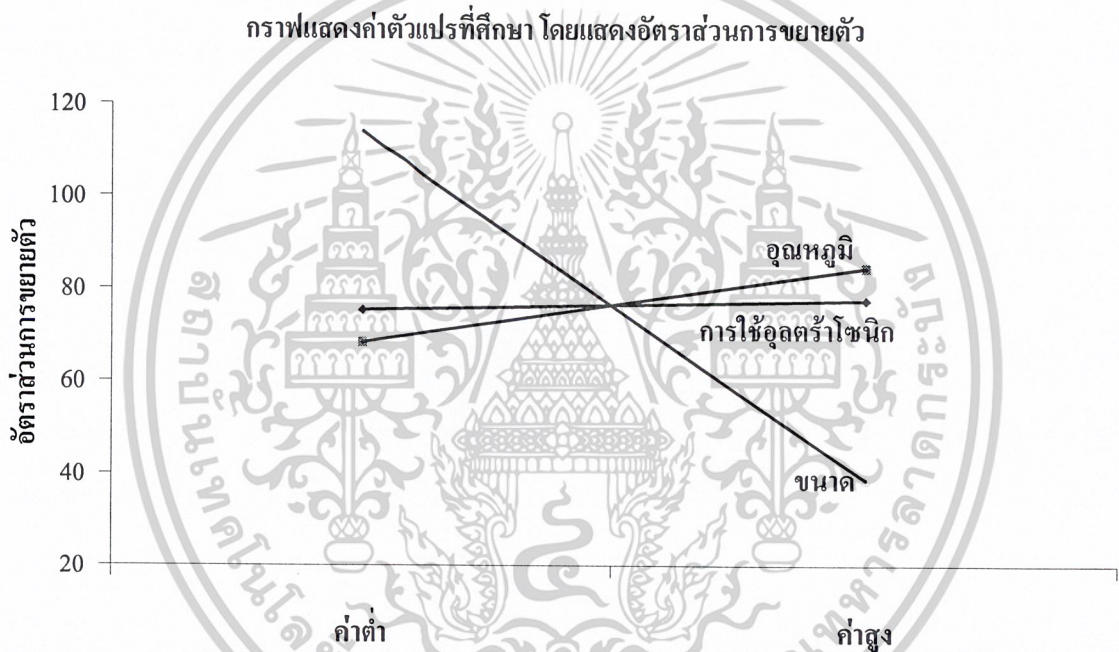
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการขยายตัวที่สภาวะการทอดต่าง ๆ
(ก) อุณหภูมิ 170°C (ข) อุณหภูมิ 190°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าการทอดไส้กรอกขนาดเล็กให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวสูงกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ ในช่วง 4 นาทีแรก อัตราส่วนการขยายตัวน้อยกว่าและเริ่มสูงขึ้นมากหลังจากนาทีที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จากนั้นการขยายตัวยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ด้วยอัตราการเพิ่มที่ลดลง

เมื่อพิจารณาที่เวลาใด ๆ เพื่อศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการทดลองต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลง

4.2.3.1 ผลของสภาวะการทอด (Main Effects)



รูปที่ 4.12 ผลของสภาวะการทอดต่ออัตราส่วนการขยายตัว

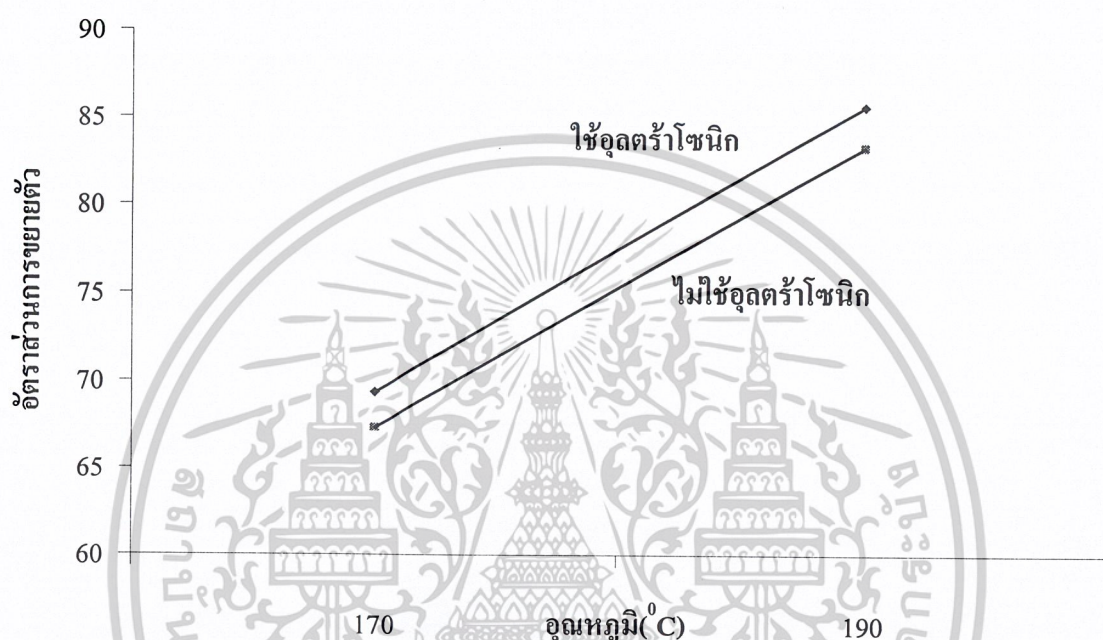
จากกราฟรูปที่ 4.12 จะได้ว่าอัตราส่วนการขยายตัวที่ได้จากการทอดแบบธรรมดาและการทอดด้วยอุลตราโซนิกไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่การทอดที่อุณหภูมิต่ำมีอัตราส่วนการขยายตัวน้อยกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง การทอดไส้กรอกขนาดเล็กจะให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวมากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่กว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากไส้กรอกขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันร้อนมากกว่า มีผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 ผลร่วมกันของสภาวะการทอด (Interaction Effects)

4.2.3.2.1 ผลร่วมกันของการใช้อุตร้าโซนิคกับอุณหภูมิ (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

กราฟแสดงอัตราส่วนการขยายตัวของไส้กรอกที่อุณหภูมิต่างๆ

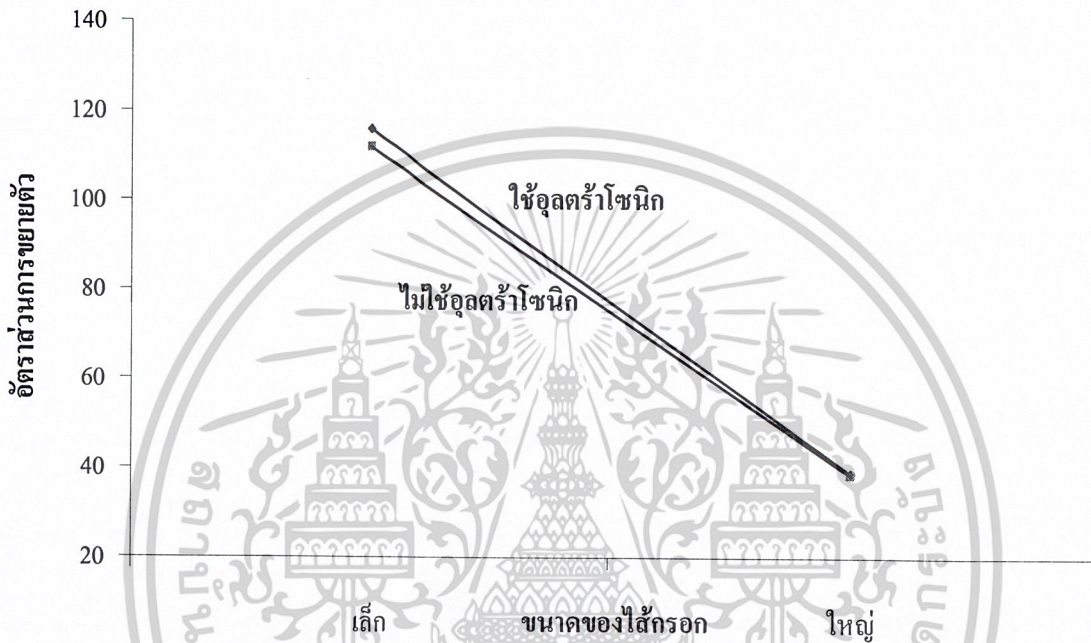


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลกระทบร่วมกันของตัวแปรหลักต่ออัตราส่วนการขยายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าทั้งในกรณีการทอดด้วยวิธีธรรมดาและการทอดด้วยอุตร้าโซนิค การทอดที่อุณหภูมิต่ำทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะการพองตัวน้อยกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง การเพิ่มอุณหภูมิการทอดหรือการเพิ่มความถี่ของคลื่นอุตร้าโซนิคที่ใช้ทอด จะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์

4.2.3.2.2 ผลร่วมกันของการใช้อุลตราโซนิคกับขนาดของไส้กรอก (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

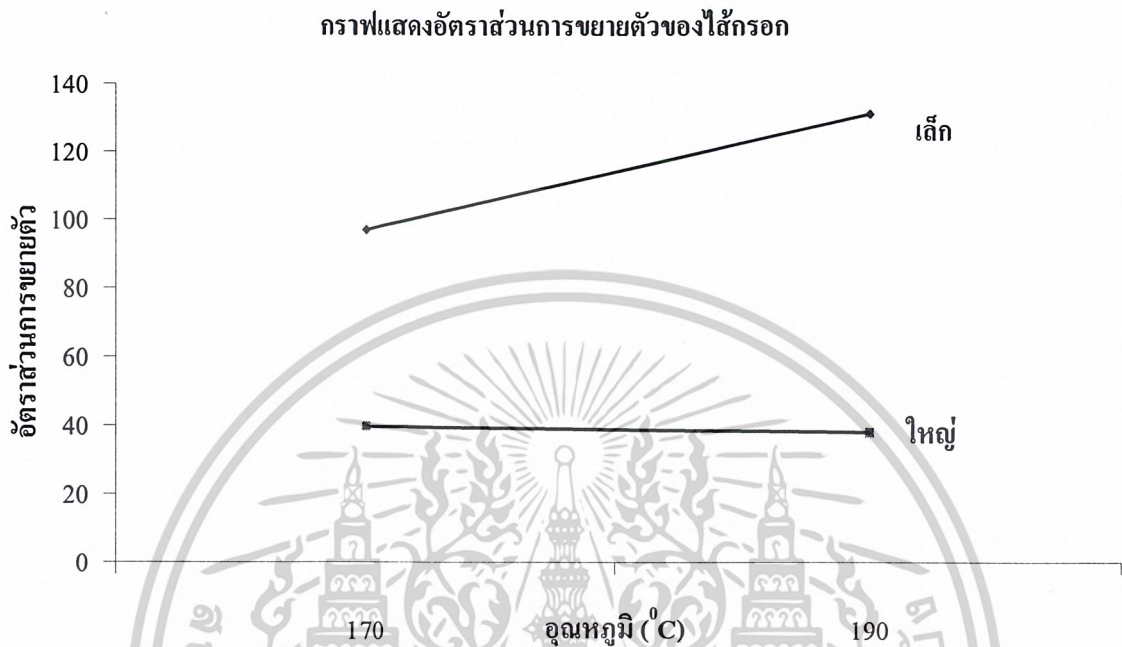
กราฟแสดงอัตราส่วนการขยายตัวตามขนาดของไส้กรอก



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลกระทบร่วมกันของตัวแปรหลักต่ออัตราส่วนการขยายตัวตามขนาดของไส้กรอก

จากกราฟที่ 4.14 จะเห็นว่าทั้งในกรณีการทอดแบบธรรมดาและการทอดด้วยอุลตราโซนิค นั้น ไส้กรอกขนาดเล็กจะมีอัตราส่วนการขยายตัวมากกว่าไส้กรอกขนาดใหญ่ การส่งผลกระทบต่อกันระหว่างวิธีการทอดกับขนาดของตัวอย่างมีเพียงเล็กน้อยต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัว

4.2.3.2.3 ผลร่วมกันของอุณหภูมิกับขนาดของไส้กรอก (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลกระทบร่วมกันของตัวแปรหลักต่ออัตราส่วนการขยายตัว

จากกราฟรูปที่ 4.15 เมื่อทอดไส้กรอกเล็กที่อุณหภูมิ 170°C จะให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 190°C ในทางกลับกันเมื่อทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 170°C จะให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวมากกว่าที่อุณหภูมิ 190°C เล็กน้อย การขยายตัวของไส้กรอกเกิดจากในขณะทำการทอด น้ำในไส้กรอกจะเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนเนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่างกันของน้ำที่อยู่ในรูปของเหลว เกิดการแพร่ออกสู่ภายนอก เกิดเป็นช่องว่างอากาศภายในรูพรุน และคุณสมบัติของอากาศสามารถขยายตัวได้ จึงทำให้ไส้กรอกที่ผ่านการทอดเกิดการขยายตัว

4.2.4 การวิเคราะห์ค่าความสว่าง (L)

ระบบ Hunter (L, a, b) [24]

ได้พัฒนาเครื่องวัดสีระบบ Tristimulus ขึ้นในปี ค.ศ. 1952 ซึ่งแสดงค่าสีด้วยค่า L, a และ b ซึ่งระบบนี้ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร และค่าที่ได้จากระบบ Hunter สามารถเปลี่ยนเป็นค่าในระบบ C.I.E (x,y,z) ได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของค่า Hunter (L, a, b)

ค่า Hunter L (lightness) เป็นค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0-100 ค่า L เท่ากับ 0 เป็นสีที่มืดที่สุด ค่า L เท่ากับ 100 เป็นสีสว่างมากที่สุด ซึ่งเปรียบได้กับค่า Y ในระบบ C.I.E (x,y,z)

ค่า Hunter a เป็นค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือความเป็นสีเขียว โดย

ค่า Hunter a เป็นบวก แสดง ความเป็นสีแดง

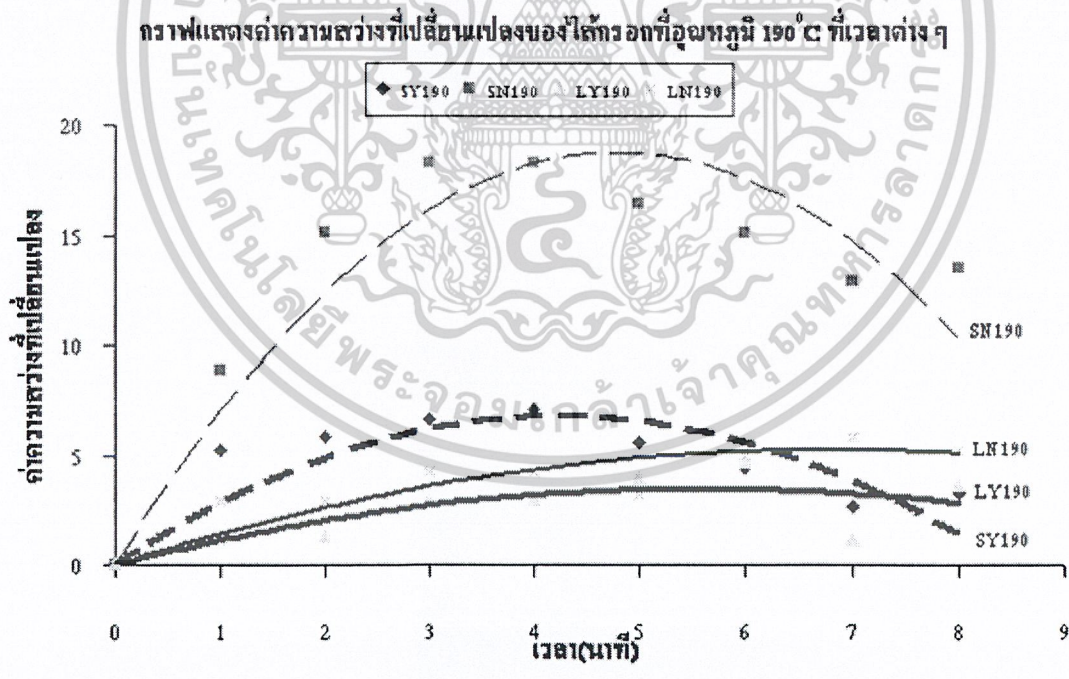
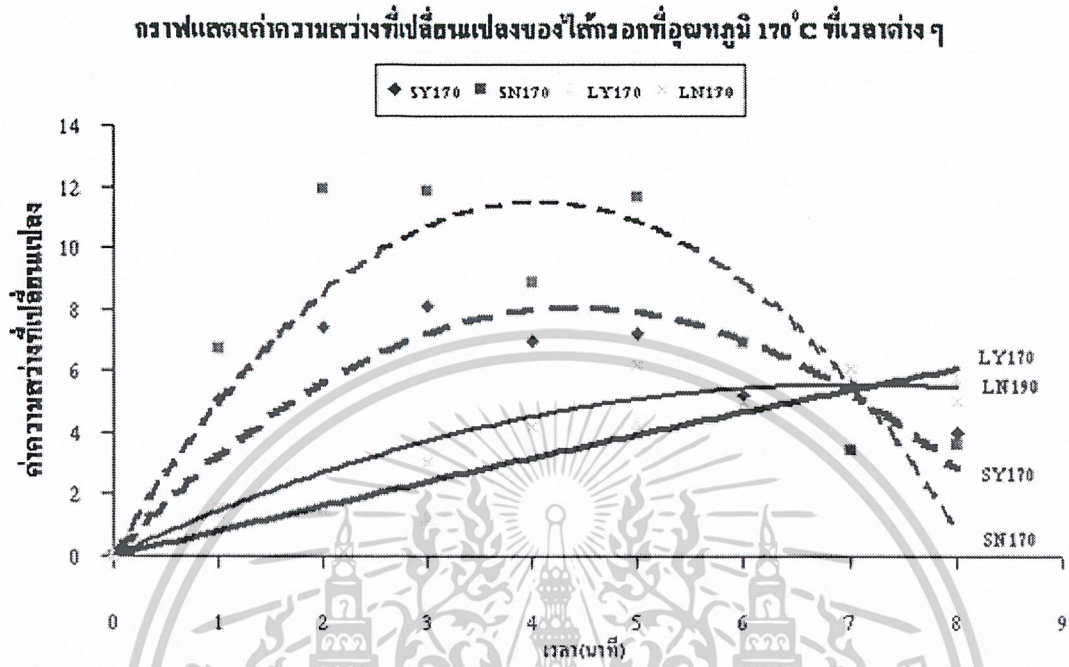
ค่า Hunter a เป็นบวกแสดงความเป็นสีเขียว

ค่า Hunter b แสดงค่าความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน โดยที่

ค่า Hunter a เป็นบวก แสดง ความเป็นสีเหลือง

ค่า Hunter b เป็นบวก แสดง ความเป็นน้ำเงิน

ในการศึกษานี้ ต้องการบันทึกลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ศึกษา คือ ใส้กรอกไก่ ที่มีสีขาว จากการสังเกตพบวาสีของผลิตภัณฑ์จากการทอดใส้กรอกไก่ จะมีความเข้มหรือสีจะ เกรียมเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อวัดค่าสี L, a, b ค่า a, b ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ค่า L จะลดลงจากเดิมมากขึ้น ตามระยะเวลาที่ทอด ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้เฉพาะค่า L เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสีที่ เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ระหว่างการทอด

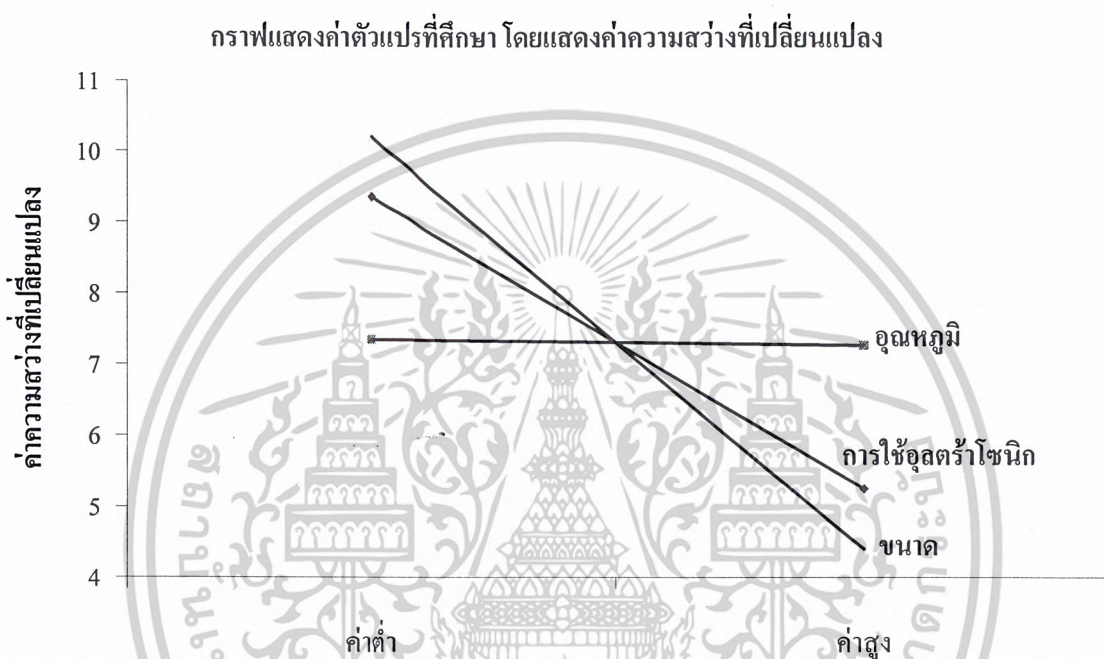


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงที่สภาวะการทอดต่าง ๆ (ก) อุณหภูมิ 170°C (ข) อุณหภูมิ 190°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาที่เวลาใด ๆ เพื่อศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการทดลองต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลง

4.2.4.1 ผลของสภาวะการทอด (Main Effects)



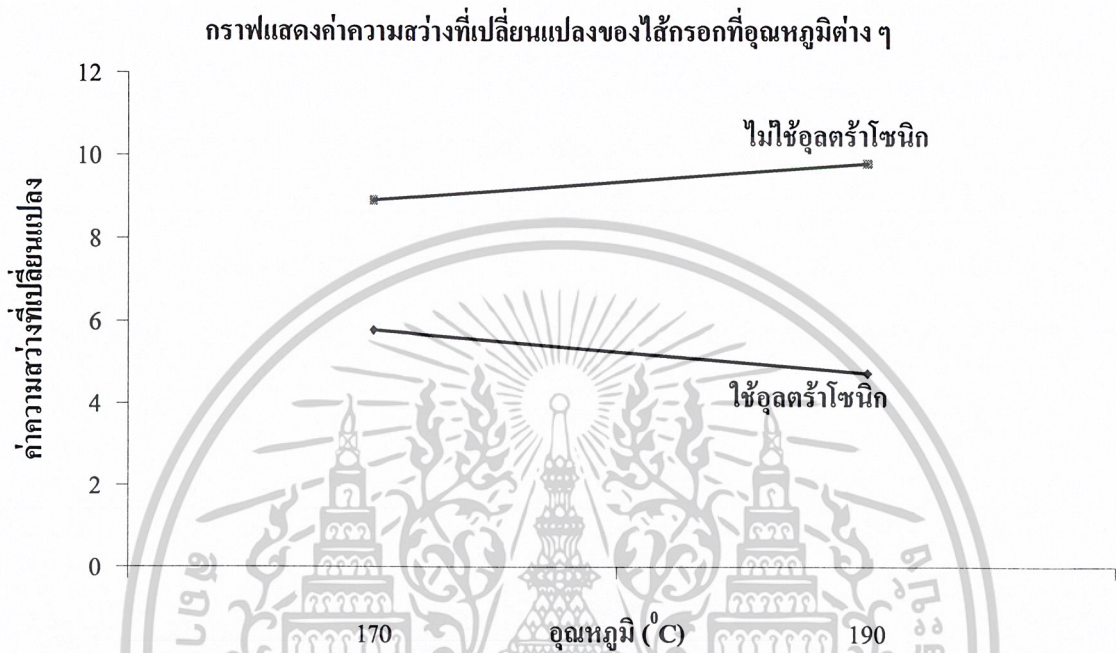
รูปที่ 4.17 ผลของสภาวะการทอดต่อค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง

จากกราฟรูปที่ 4.17 จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของไส้กรอกและวิธีการทอดมีผลต่อค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง พบว่าการทอดแบบธรรมดาและการทอดไส้กรอกขนาดเล็กจะมีค่าความสว่าง (L) ของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงลดลงมากกว่าการทอดโดยใช้สูตร้าโซนิคและการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ นั่นคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดจะมีสีที่เกรียมกว่า ส่วนค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดที่อุณหภูมิต่างกันจะมีค่าไม่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.2 ผลร่วมกันของสภาวะการทอด (Interaction Effects)

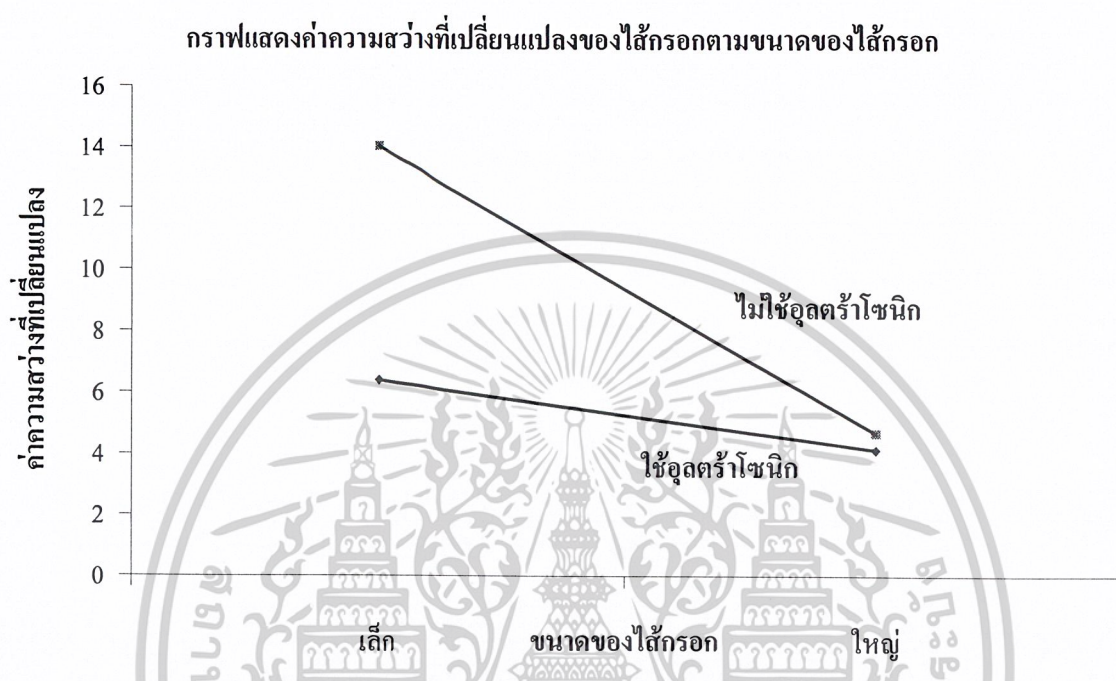
4.2.4.2.1 ผลร่วมกันของการใช้อุตร้าโซนิกกับอุณหภูมิ (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงของไส้กรอกที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า การทอดด้วยวิธีธรรมดาที่อุณหภูมิ 170°C จะมีค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง (L) ของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 190°C แต่ในขณะที่การทอดด้วยอุตร้าโซนิก การทอดที่อุณหภูมิต่ำทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง (L) มากกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง

4.2.4.2.2 ผลรวมกันของการใช้อุลตราโซนิกกับขนาดของไส้กรอก (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

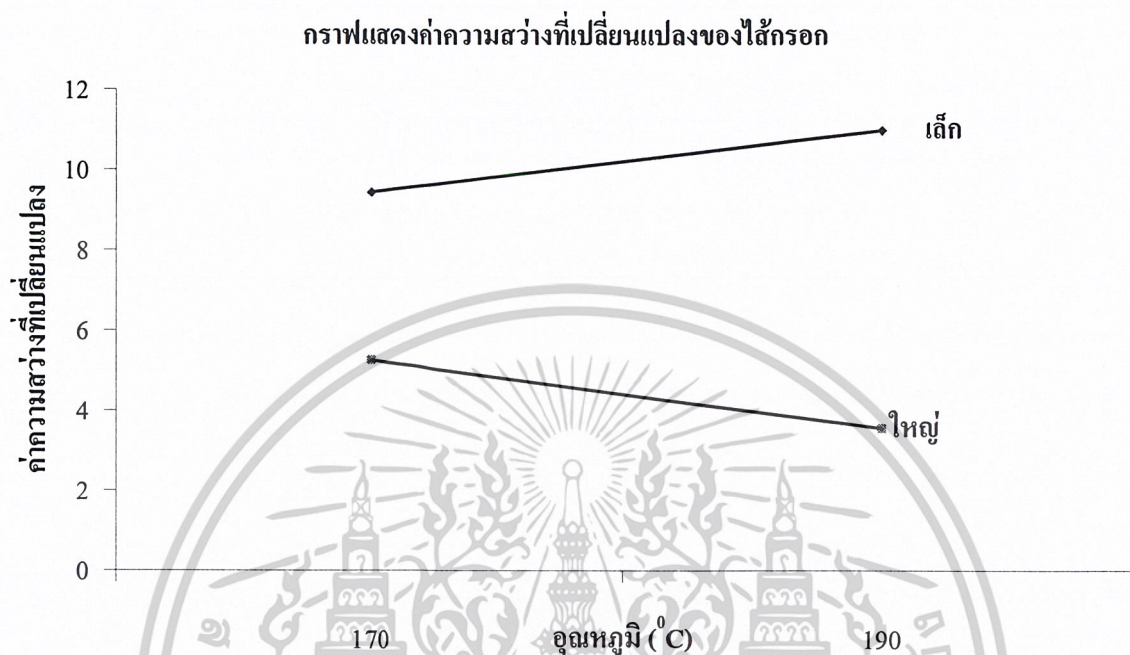


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงของไส้กรอกตามขนาดของไส้กรอก

จากกราฟรูปที่ 4.19 จะพบว่าทั้งการทอดแบบธรรมดาและการทอดด้วยอุลตราโซนิก การทอดไส้กรอกขนาดเล็กทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง (L) มากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ การส่งผลกระทบต่อกันระหว่างวิธีการทอดกับขนาดของตัวอย่างมีเพียงเล็กน้อยต่อค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.2.3 ผลรวมกันของอุณหภูมิกับขนาดของไส้กรอง (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

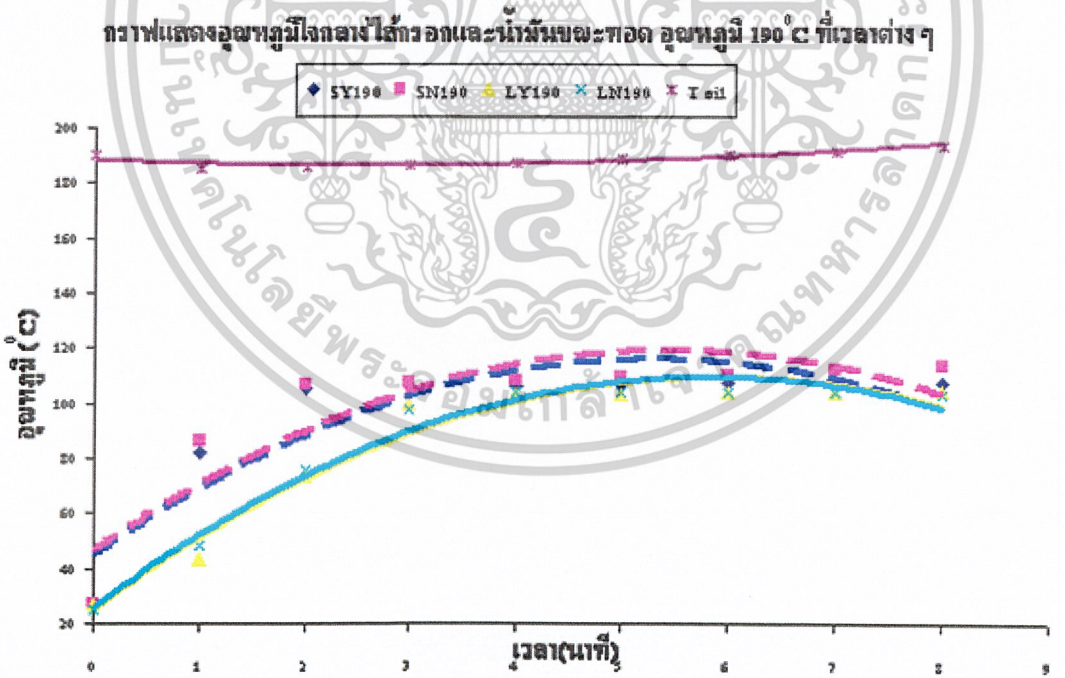
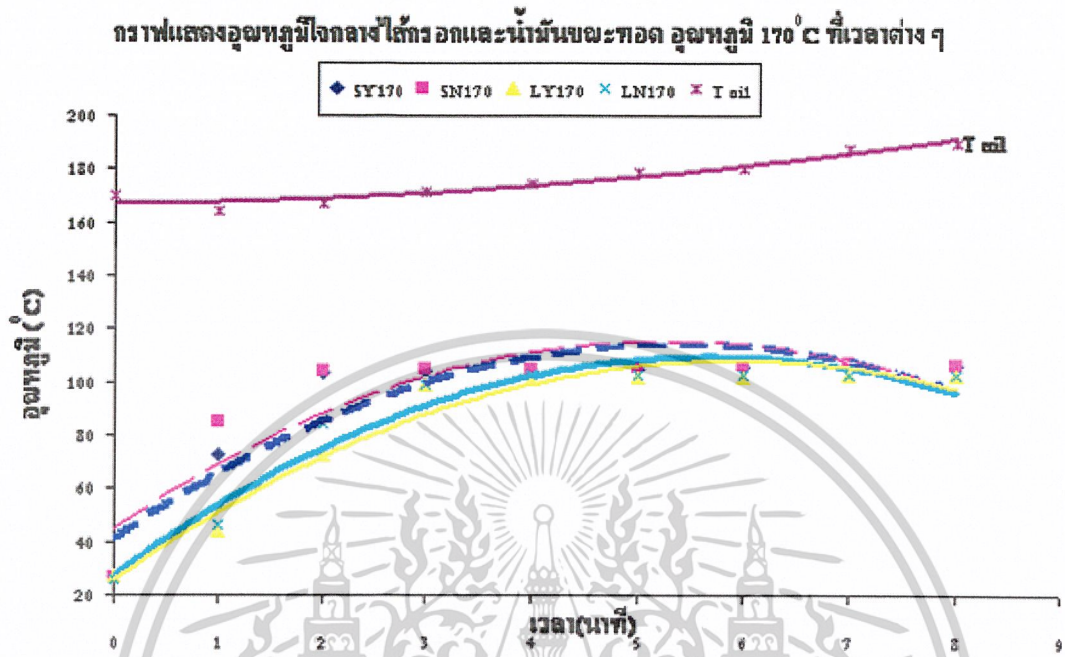


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง

จากกราฟรูปที่ 4.20 จะพบว่าการทอดไส้กรองขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 170°C ส่งผลให้ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง (L) ของผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยกว่าการทอดที่อุณหภูมิ 190°C ในขณะที่การทอดไส้กรองขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 170°C ให้ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง (L) ของผลิตภัณฑ์มีค่ามากกว่าการทอดที่อุณหภูมิ 190°C

4.3 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิใจกลางของไส้กรองและอุณหภูมิของน้ำมัน (ข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางไส้กรองและน้ำมันที่สภาวะการทอดต่างๆ (ก) อุณหภูมิ 170°C (ข) อุณหภูมิ 190°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.21 จะพบว่าอุณหภูมิใจกลางของไส้กรอกจะเพิ่มขึ้นในช่วง 5 นาทีแรก และจะเริ่มคงที่ อุณหภูมิของไส้กรอกที่ทอดแบบธรรมดาและที่ทอดด้วยอุตราโซนิกมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการทอดไส้กรอกขนาดเล็กจะมีอุณหภูมิใจกลางของไส้กรอกมากกว่าการทอดไส้กรอกขนาดใหญ่ เนื่องจากไส้กรอกขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันร้อนมากกว่า มีผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว

จากการสังเกตอุณหภูมิของน้ำมันจะพบว่าในช่วงแรกอุณหภูมิของน้ำมันจะลดลง และเมื่อใช้เวลานานในการทอดมากขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิของน้ำมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลานานในการทอดมากขึ้น น้ำมันอาจเกิดการสะสมความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ทำการศึกษาผลของการใช้คลื่นอุลตราโซนิค, อุณหภูมิและขนาดของวัตถุดิบในการทอดต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ประกอบด้วยปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลง, ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น, อัตราส่วนการขยายตัวและค่าความสว่าง (L) ของผลิตภัณฑ์

1) การทอดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคกระทำโดยใช้เปียโซอิเล็กทริก ที่ความถี่ 40 Hz โดยรักษาอุณหภูมิของเปียโซอิเล็กทริกไว้ไม่เกิน 50°C

2) ผลของการใช้คลื่นอุลตราโซนิคและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอด อธิบายได้ดังนี้

- ค่าปริมาณความชื้น (Moisture Ratio) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิคโดยรวมมีค่าน้อยกว่าการทอดด้วยวิธีธรรมดา
- ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น (%Oil Uptake) ของผลิตภัณฑ์ที่ทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิคมีค่ามากกว่าการทอดแบบวิธีธรรมดา
- อัตราส่วนการขยายตัว (%Expansion Ratio) ที่ทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิคโดยรวมมีอัตราส่วนการขยายตัวมากกว่าการทอดด้วยวิธีธรรมดาเล็กน้อย
- การเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (L) ที่ทอดโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิคมีค่าน้อยกว่าการทอดแบบวิธีธรรมดา

ความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิค, อุณหภูมิการทอดและขนาดของวัตถุดิบมีผลกระทบต่อกัน ดังนั้นในการเลือกสภาวะการทอดที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลที่เกี่ยวข้องจากแต่ละสภาวะและเงื่อนไข

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทำให้น้ำมันเกิดการหมุนเวียนตลอดเวลาที่ทอดอาหาร เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมันร้อนเท่ากันทั่วทั้งเครื่องทอด

2) ควรมีการติดตั้งปั๊ม recirculation เพื่อนำน้ำที่ผ่านการ Cooling แล้วมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ขาดความสามารถควบคุมและรักษาค่าอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ โดยทำการติดตั้งตัวตั้งค่าอุณหภูมิแบบดิจิทัล

4) ในระหว่างทำการทอด ควรใช้ตระแกรงครอบตระกร้าทอดแทนที่ใช้ค้ายร้อยใส่กรอก เนื่องจากอาจมีน้ำมันบางส่วนซึมผ่านเข้าไปในผลิตภัณฑ์ในบริเวณที่ใช้ค้ายร้อยใส่กรอก ซึ่งทำให้ส่งผลถึงค่าปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น อัตราการพองตัวและค่าความสว่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Singh, R.P., 1995, Heat and Mass Transfer in Food during Deep Fat Frying, Food Technology, Vol.49, No.4, pp.134-137
2. Fellow, P.J, 1990, Food Processing Technology Principles and Practices, Ellis Horwood, London, pp.329-340
3. Malcolm, J.W. and Timothy, J., 1998, Ultrasound in Food Processing, Blackie Academic&Professional, London, pp.105-123
4. Ultrasonic Frying Machine URL http://www.sonicstech.com/engindex/mn04_production_ct.htm
5. Joslyn, M.A. and Heid, J.I., 1964, Food Processing Operations, The AVI Publ., Westport, pp.124-205
6. Mellema, M. , 2003, Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods, Trends in Food Science & Technology.
7. Sharma, S.K., Mulvancy, S.j. and Rizvi, S.S.H., 2000, Food Process Engineering Theory and Laboratory Experiment, John Wiley&Sons, Canada, pp.259-265
8. Hallstrom, B., 1984, Heat and Mass Transfer Development, In Engineering and Food Vol.1:Engineering Science and Food Industry, Edited by Brian, M., Elsevier Applied Science Publisher, Mckenna, pp.457-465
9. Farkas, B.E., Singh, R.P. and Rumsen, T.R.1996, Modelling Heat and Mass Transfer in Immersion FryingI: Model Development, Journal of Food Engineering, Vol.29, No.1, pp.211-226
10. Van Arsdel, W.B., 1973, Drying Phenomena, In Food Dehydration, Vol.1: Drying Method and Phenomena, 2nd ed., Edited by Van Arsdel, W.B., Copley, M.J.and Morgan, A.I., AVI Publ, Westport, pp.37-53
11. Pinthus, E.J. and Saguy, I.S., 1994, Initial Interface Tension and Oil Uptake by Deep-Fat Fried Foods, Journal of Food Science, Vol.59, No.2, pp.804-807,823
12. Brown,H.P.,1960, Problem of the Potato Chip Industry Processing and Technology, Advance in Food Reseach, Vol.56, No.1, pp.586-590

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Gamble, M.H., Rice, P. and Selman, J.D.1987, Relationship between Oil Uptake and Moisture Loss During Frying of Potato Slices from C.V.Record U.K. Tugers, International Journal of Food Science and Technology, Vol.22, No.1, pp.233-241
14. McDonough, L., Gamez, M.H. and Lee, J.K., 1993, Environmental Scanning Electron Microscopy Evaluation of Tortilla Chips Microstructure during Deep Fat Frying, "Journal of Food Science, Vol.58, No.1, pp.199-203
15. Matz, S.A., 1993, Snack Food Technology, 3rd ed., New York, AVI Publ., pp.211-224
16. Palua,J., 1993, Deep-Fat Frying of Tortilla.Chips:An Intergrated Approach, Master of Engineering Thesis, Agricultural Engineering Program, Texas A&M University, pp.1-87
17. Guillaumin, R., 1988, Kinetics of Fat Penetration in Food, In Frying of Food: Principle,Changes, New Approach, Edited by Varela, G.Bemder, A.E.and Morton, I.D., Chichester, Ellis Horwood, pp.83-89
18. Varela, G., 1988, Current Facts about The Frying of Frying of Food, In Frying of Food :Principle, Changes, New Approach, Edited by Varela, G.Bender, A.E. and Morton, I.D., Chichester, Ellis Horwood, pp.9-23
19. ศศิเกษม ทองยงค์และพรณี เดชกำแพง, 2530, เคมีเบื้องต้น,สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, หน้า 59-143
20. พันธ์ พุกฤษ์สุนันท์ URL http://www.anamai.moph.go.th/hpc4/Page3/artricle_2.htm
21. รักธรรม อุตตโรทัยและสุชัย วัชรวารการ, 2542, การใช้อัลตราโซนิคเซนเซอร์วัดระดับของเหลวในถัง, ปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, หน้า 1-22
22. Saguy, I.S. and Dina Dana, 2001, Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects, Journal of Food Engineering, pp.143-152.
23. ปารเมศ ชูติมา, 2545, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 269.
24. ปานมนัส สิริสมบุรณ์, 2538, สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของชีวะวัสดุ, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า193-194.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ก.1 ผลการทดลอง

ก.1.1 ผลการทดลองค่าปริมาณน้ำที่หายไป

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองค่าปริมาณน้ำที่หายไป

time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
1	35.056	39.489	-	32.297	25.510	11.185	27.275	24.654
2	37.238	42.361	47.274	45.332	23.612	15.427	39.950	26.007
3	53.369	58.855	64.654	62.464	32.045	29.505	52.325	28.581
4	75.369	81.083	76.071	74.588	39.229	36.102	62.746	44.506
5	76.694	72.780	85.280	73.913	43.359	42.850	59.378	40.371
6	78.161	82.571	87.204	77.043	56.070	46.870	72.828	45.665
7	85.022	90.770	96.513	82.912	78.492	50.041	79.362	53.008
8	102.978	108.873	107.876	94.563	51.402	42.785	80.084	62.529

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.2 ผลการทดลองค่า % Moisture Content

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองค่า % Moisture Content

Time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
0	59.13	60.10	62.00	57.971	60.70	57.47	63.94	62.56
1	48.26	58.54	51.49	48.756	52.24	54.81	56.52	55.50
2	48.82	44.95	47.8	45.05	54.03	54.15	54.85	55.61
3	43.63	46.50	43.28	38.942	51.60	49.038	51.69	56.73
4	34.98	45.50	41.38	33.658	50.00	48.36	47.80	52.40
5	40.69	42.65	39.71	35.897	49.50	46.12	50.50	55.14
6	36.36	42.16	40.29	34.95	45.73	45.77	47.50	54.10
7	33.82	38.83	37.00	33.01	36.63	46.60	45.27	52.94
8	24.02	38.53	31.86	27.053	49.50	50.49	45.05	49.00

ก.1.3 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนการขยายตัวตามเส้นผ่านศูนย์กลาง

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนการขยายตัวตามเส้นผ่านศูนย์กลาง

time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
1	9.728	2.829	-	7.819	7.168	9.541	6.619	11.714
2	11.874	8.540	15.388	16.360	12.421	4.161	5.459	7.882
3	20.560	17.066	14.154	31.708	3.094	8.370	9.822	6.985
4	24.430	24.514	22.031	33.450	7.295	13.457	11.902	9.659
5	29.442	28.219	35.380	35.287	10.866	13.952	14.888	12.786
6	26.692	25.944	37.228	36.885	21.395	15.583	24.167	18.010
7	32.689	36.377	37.384	43.611	22.708	29.401	24.033	18.759
8	32.003	36.563	35.733	41.848	24.193	28.596	32.918	21.156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.4 น้ำหนักของไส้กรอกก่อนทอดที่เวลาต่าง ๆ

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าน้ำหนักของไส้กรอกก่อนทอดที่เวลาต่าง ๆ

Time(min)	SU17	SN17	SU19	SN19	BU17	BN17	BU19	BN19
0	3.823	-	3.695	3.362	9.765	9.352	10.252	10.603
1	4.020	3.943	3.662	3.523	9.400	8.677	10.553	10.357
2	4.147	4.023	3.662	3.527	10.042	9.362	10.328	10.475
3	4.092	3.795	3.638	3.495	9.600	9.097	10.325	10.715
4	4.057	4.047	3.82	3.652	9.770	9.787	10.575	10.483
5	4.130	3.902	3.677	3.593	9.648	9.127	10.630	10.462
6	3.983	3.923	3.543	3.467	9.320	9.830	10.712	10.097
7	4.067	4.022	3.777	3.562	9.773	9.255	10.180	10.033
8	3.873	4.025	3.802	3.53	9.487	9.462	10.058	10.013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.5 น้ำหนักของไส้กรอกหลังทอดที่เวลาต่าง ๆ

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าน้ำหนักของไส้กรอกหลังทอดที่เวลาต่าง ๆ

Time(min)	SU17	SN17	SU19	SN19	BU17	BN17	BU19	BN19
0	3.823	-	3.695	3.362	9.765	9.352	10.252	10.603
1	3.732	3.623	-	3.208	9.118	8.345	10.102	9.952
2	3.73	3.56	3.373	3.047	9.557	8.802	9.327	9.95
3	3.5	3.185	3.147	2.847	8.95	8.333	9.003	9.795
4	3.292	3.21	3.055	2.888	8.848	8.523	9.14	9.182
5	3.235	2.978	2.74	2.693	8.51	7.767	8.952	9.002
6	2.978	2.93	2.538	2.538	7.88	8.062	8.497	8.485
7	2.932	2.84	2.585	2.495	7.965	7.187	7.943	8.095
8	2.748	2.792	2.507	2.378	7.762	7.36	7.828	8.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.6 ผลการทดลองค่าอุณหภูมิใจกลางของไส้กรอก

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองค่าอุณหภูมิใจกลางของไส้กรอก

Time(min)	SU170	SN170	SU190	SN190	LU170	LN170	LU190	LN190
0	27.308	26.257	27.758	27.383	27.313	25.983	27.226	25.067
1	72.819	84.798	82.183	86.452	43.979	46.683	43.184	48.344
2	103.619	104.478	105.723	106.723	72.814	84.2	73.669	75.711
3	104.149	104.618	106.111	107.644	98.8	99.34	99.556	97.569
4	104.503	104.967	106.432	108.273	101.545	102.508	103.233	103.692
5	105.094	105.806	106.633	109.442	101.619	102.844	103.278	103.739
6	105.722	106.344	107.344	110.022	101.811	102.844	103.667	103.878
7	106.133	106.917	107.683	112.767	102.9	102.4	104.217	103.95
8	106.633	106	107.8	113.667	102.9	102.767	104.367	103.467

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.7 ผลการทดลองค่าอุณหภูมิของน้ำมัน

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองค่าอุณหภูมิของน้ำมัน

Time(min)	SU170	SN170	SU190	SN190	LU170	LN170	LU190	LN190
0	170	170	190	190	170	170	190	190
1	171.7	143.188	185.175	187.25	170.113	170.363	182.067	185.55
2	174.443	148.2	186.229	188.057	173.767	172.54	182.16	186.314
3	177.417	156.2	187.433	189.067	175.32	175.56	183.467	187.017
4	180.44	161.66	188.16	189.12	176.2	179.8	183.8	187.24
5	183.5	170.725	189.15	192.6	179.25	181.075	185.167	188.65
6	185.7	172.733	189.433	194.7	181.65	181.633	187.733	189.4
7	188.6	191	190.85	197.1	185.2	185.25	189.35	189.85
8	190.8	191.4	193.6	203.2	187.9	188.8	190.6	188.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.8 ผลการทดลองค่าสีของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ (L)

time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
0	41.374	41.374	40.012	35.432	32.41	40.2	37.816	37.456
1	39.272	38.59	37.922	32.292	31.946	39.553	37.342	36.354
2	38.298	36.445	37.684	30.07	31.894	39.114	37.316	36.374
3	38.018	36.478	37.356	28.94	32.008	38.982	36.698	35.868
4	38.492	37.7	37.168	28.944	31.302	38.526	36.694	35.85
5	38.384	36.563	37.798	29.612	31.006	37.714	36.326	36.268
6	39.226	38.524	38.224	30.072	30.842	38.18	36.042	35.588
7	39.078	39.97	38.944	30.848	30.58	37.75	37.388	35.266
8	39.71	39.893	38.698	30.644	30.562	38.194	36.448	35.494

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองค่า a

time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
0	0.488	0	1.032	2.086	0.773	0	0.224	-1.336
1	0.148	2.656	0.72	1.538	0.902	3.98	0.032	-1.638
2	0.274	2.584	0.51	1.576	0.76	2.326	0.128	-1.568
3	0.088	2.248	0.52	1.226	1.198	2.53	0.408	-1.822
4	0.192	2.312	0.392	1.194	1.08	2.47	0.36	-1.878
5	0.144	2.356	0.512	1.484	0.966	2.342	0.258	-1.702
6	0.29	2.944	0.578	1.708	0.83	2.522	0.132	-2.026
7	0.656	2.674	0.644	2.02	0.67	2.475	0.206	-2.164
8	0.66	2.868	0.808	2.21	0.85	2.39	0.234	-2.178

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองค่า b

time(min)	SY170	SN170	SY190	SN190	LY170	LN170	LY190	LN190
0	1.758	0	2.668	3.03	1.905	0	2.16	2.498
1	1.316	0.37	2.234	2.224	2.266	-2.736	2.296	2.646
2	0.984	1.246	2.268	2.29	2.434	0.178	2.654	2.898
3	0.97	-0.08	2.036	1.782	2.73	0.444	1.942	2.606
4	1.246	-0.634	1.906	1.758	2.164	0.092	1.91	2.558
5	1.01	-0.014	2.408	2.268	1.95	-0.798	1.53	2.94
6	1.792	-0.546	2.772	2.658	1.756	-0.35	1.246	2.41
7	1.522	-1.322	3.386	3.234	1.55	-0.82	2.228	2.146
8	2.21	-1.858	3.55	3.19	1.542	-0.484	1.48	2.234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข.1 การคำนวณหาความชื้น

วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ตัวอย่าง
- 2) ตู้อบ Oven
- 3) Desicator
- 4) ถ้วย
- 5) มีด เขียง
- 6) เครื่องชั่งน้ำหนัก

วิธีการทดลอง

1. เปิดตู้อบ Oven ที่ 105°C ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำถ้วยเปล่าเข้าตู้อบ Oven เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำถ้วยเปล่าใส่ใน Desicator จนกว่าอุณหภูมิคงที่
4. นำถ้วยเปล่ามาชั่งน้ำหนัก พร้อมติดหมายเลข บันทึกน้ำหนัก
5. นำตัวอย่างมาสับให้ละเอียด โดยใช้ตัวอย่าง 2 กรัมใส่ในถ้วย
6. นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
7. นำเข้าตู้อบ Oven เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
8. นำถ้วยตัวอย่างใส่ใน Desicator จนกว่าอุณหภูมิคงที่
9. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
10. การคำนวณ

$$\%mc = \frac{\text{น้ำหนักก่อนเข้าตู้อบ} - \text{น้ำหนักหลังเข้า Desicator}}{\text{น้ำหนักก่อนเข้าตู้อบ}} \times 100$$

%mc คือ ร้อยละความชื้นของผลิตภัณฑ์ (มาตรฐานเปียก)

ตัวอย่างการคำนวณ ไม้ใส่กรอกขนาดเล็กใช้อุตสาหกรรมโชนิก อุณหภูมิของน้ำมัน 170°C ที่น้ำหนักที่ 1
 น้ำหนักก่อนเข้าตู้อบ 2.08 กรัม
 น้ำหนักหลังเข้า Desicator 0.85 กรัม

$$\%mc = \frac{2.08 - 0.85}{2.08} \times 100 = 59.13\%$$

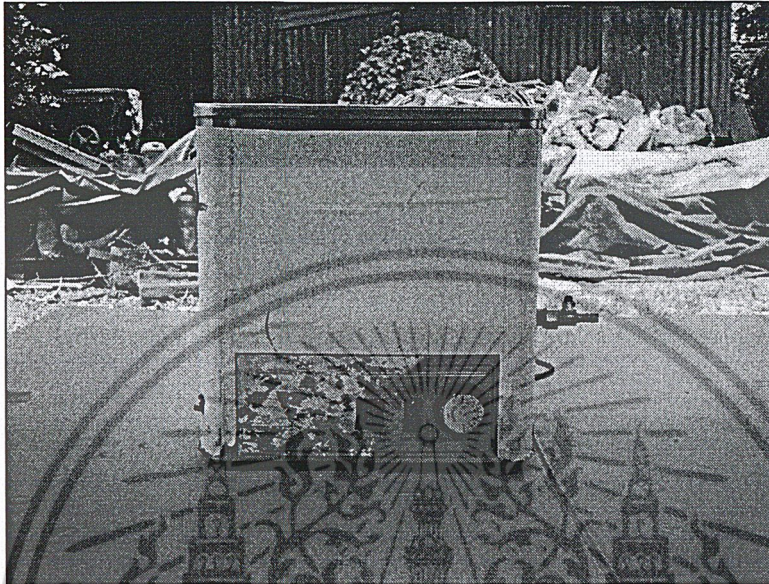
แสดงว่า ไม้ใส่กรอกมีร้อยละความชื้น 59.13



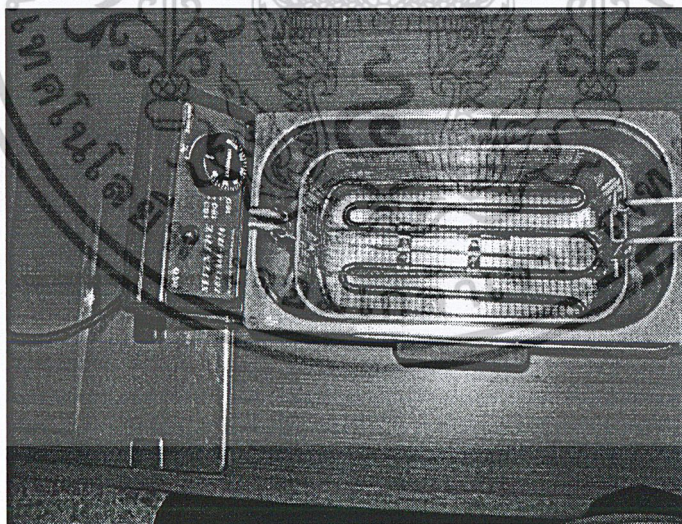
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค.1 แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้

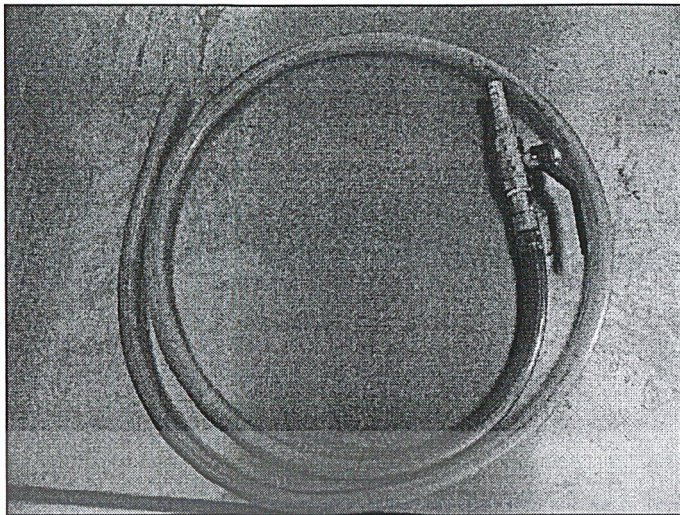


รูปที่ ค.1 เครื่องอัลตราโซนิคความถี่ 40 Hz

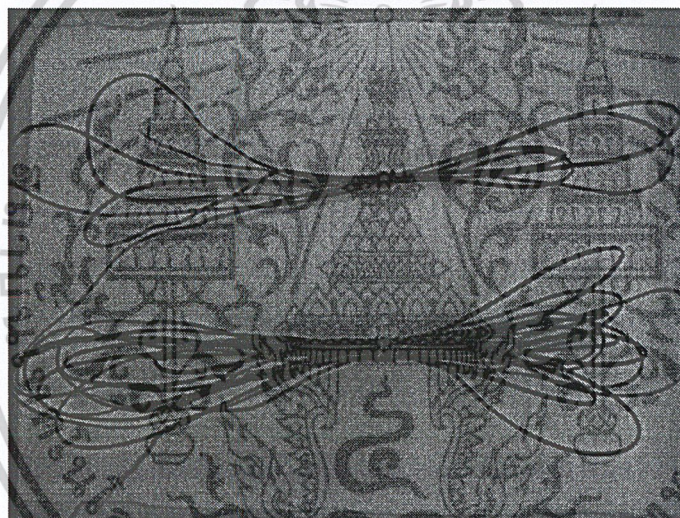


รูปที่ ค.2 เครื่องทอดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

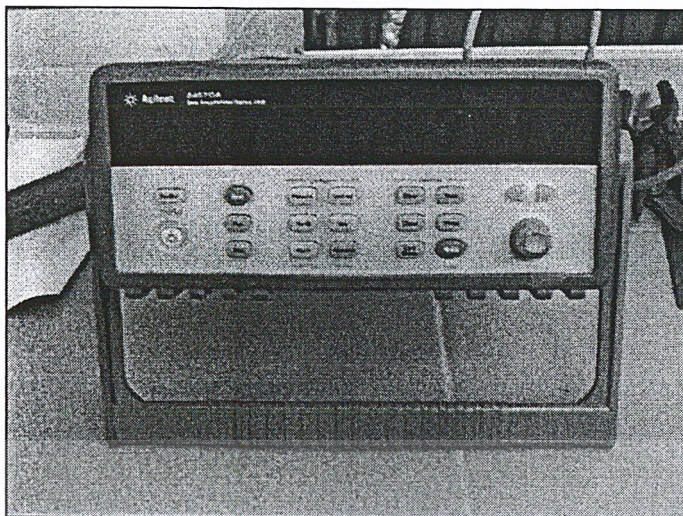


รูปที่ ค.3 สายยาง

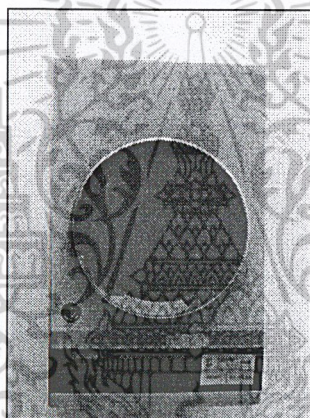


รูปที่ ค.4 Thermocouple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

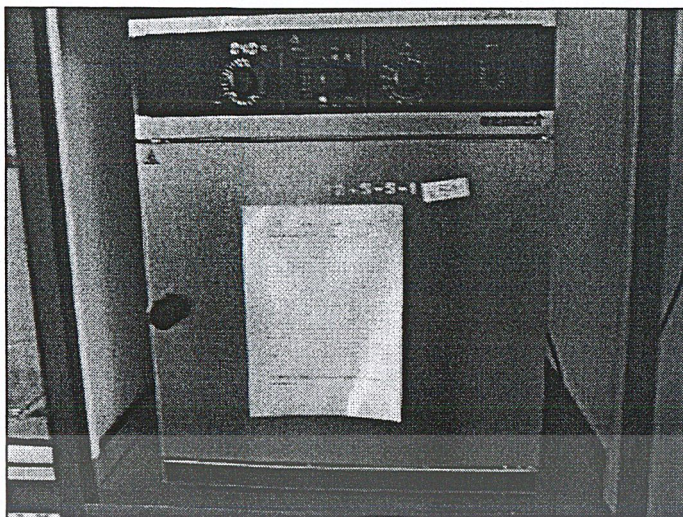


รูปที่ ก.5 Data Logger

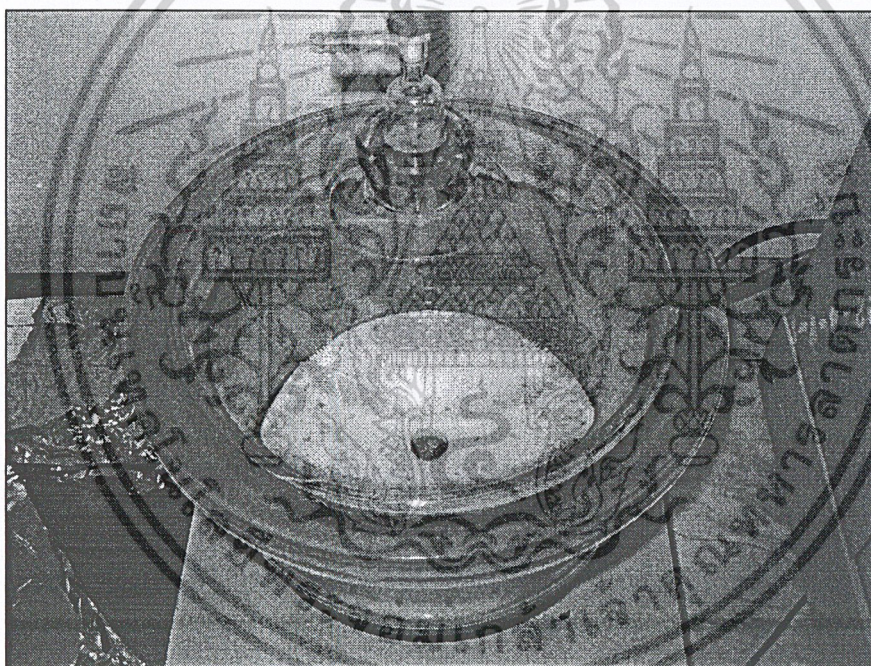


รูปที่ ก.6 เครื่องชั่งน้ำหนักหน่วยกรัม ทศนิยม 3 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

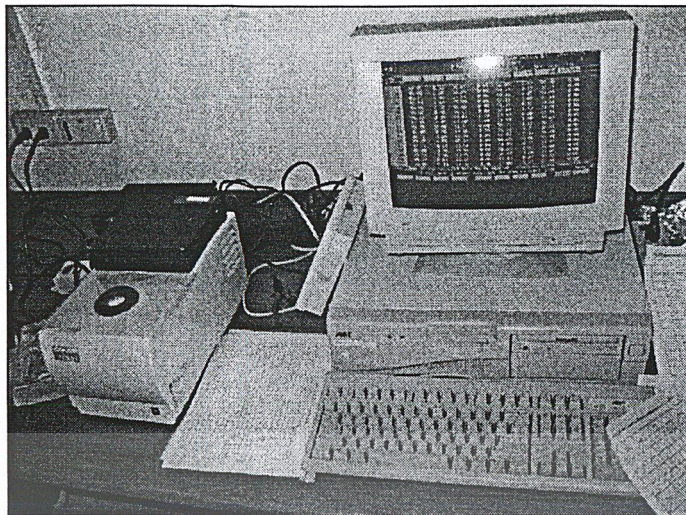


รูปที่ ค.7 ตู้อบ Oven

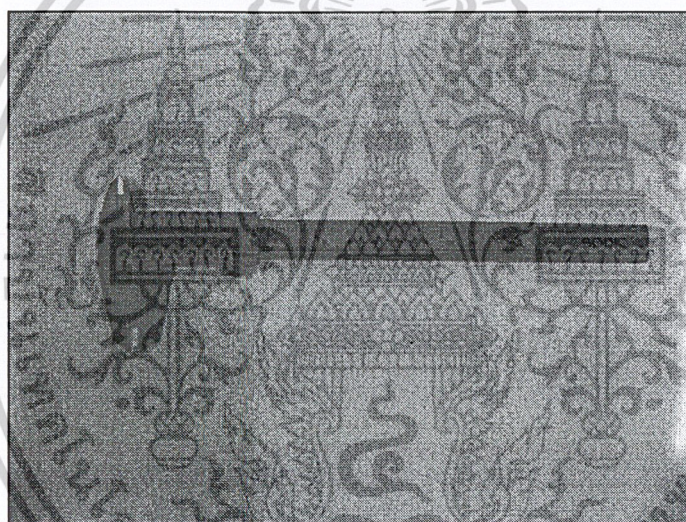


รูปที่ ค.8 Desicator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

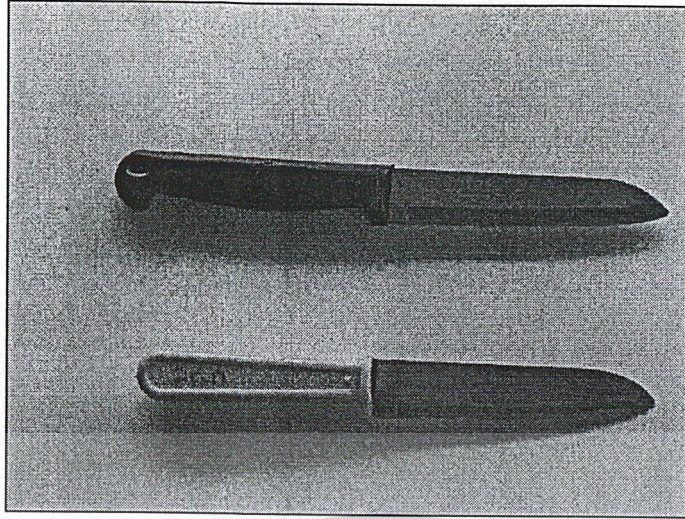


รูปที่ ค.9 เครื่องวัดสี (Colorimeter)



รูปที่ ค.10 เวอร์เนียร์พลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.11 มีด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ง.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สภาวะต่าง ๆ ตามตารางการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³

จากการดำเนินการทดลอง โดยการทดสอบตามสภาวะต่าง ๆ ที่กำหนด ให้ผลของคุณลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

ง.1.1 การวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้น (Moisture Ratio)

ตารางที่ ง.1 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้น โดยอ่านค่าตามอุณหภูมิ

Ultrasonic	อุณหภูมิ (°C)	ขนาดของไส้กรอก	ปริมาณความชื้น	Average
+	+	+	0.747	0.707
+	+	-	0.667	
+	-	+	0.824	0.708
+	-	-	0.592	
-	+	+	0.837	0.709
-	+	-	0.581	
-	-	+	0.841	0.799
-	-	-	0.757	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้นโดยอ่านค่าขนาดของไส้กรอง

Ultrasonic	ขนาดของไส้กรอง	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณความชื้น	Average
+	+	+	0.747	0.786
+	+	-	0.824	
+	-	+	0.667	0.63
+	-	-	0.592	
-	+	+	0.837	0.839
-	+	-	0.841	
-	-	+	0.581	0.669
-	-	-	0.757	

ตารางที่ ง.3 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้น

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดของไส้กรอง	Ultrasonic	ปริมาณความชื้น	Average
+	+	+	0.747	0.792
+	+	-	0.837	
+	-	+	0.667	0.624
+	-	-	0.581	
-	+	+	0.824	0.833
-	+	-	0.841	
-	-	+	0.592	0.675
-	-	-	0.757	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1.2 การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น (%Oil Uptake)

ตารางที่ ง.4 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยอ่านค่าตามอุณหภูมิ

Ultrasonic	อุณหภูมิ(°C)	ขนาดของไส้กรอง	ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น	Average
+	+	+	15.602	16.92
+	+	-	18.238	
+	-	+	13.338	13.504
+	-	-	13.67	
-	+	+	3.097	8.709
-	+	-	14.32	
-	-	+	7.805	10.637
-	-	-	13.469	

ตารางที่ ง.5 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยอ่านค่าตามขนาดของไส้กรอง

Ultrasonic	ขนาดของไส้กรอง	อุณหภูมิ(°C)	ปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น	Average
+	+	+	15.602	14.47
+	+	-	13.338	
+	-	+	18.238	15.954
+	-	-	13.67	
-	+	+	3.097	5.451
-	+	-	7.805	
-	-	+	14.32	13.895
-	-	-	13.469	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.6 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดของไส้กรอง	Ultrasonic	ปริมาณน้ำมันที่เพิ่ม	Average
+	+	+	15.602	9.35
+	+	-	3.097	
+	-	+	18.238	16.279
+	-	-	14.32	
-	+	+	13.338	10.572
-	+	-	7.805	
-	-	+	13.67	13.57
-	-	-	13.469	

ง.1.3 การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการขยายตัว (%Expansion Ratio)

ตารางที่ ง.7 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการขยายตัวโดยอ่านค่าตามอุณหภูมิ

Ultrasonic	อุณหภูมิ(°C)	ขนาดของไส้กรอง	อัตราส่วนการขยายตัว	Average
+	+	+	43.597	85.641
+	+	-	127.684	
+	-	+	34.296	69.308
+	-	-	104.319	
-	+	+	32.215	83.30
-	+	-	134.385	
-	-	+	44.974	67.281
-	-	-	89.588	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.8 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการขยายตัวโดยอ่านค่าตามขนาดของไส้กรอก

Ultrasonic	ขนาดของไส้กรอก	อุณหภูมิ(°C)	อัตราส่วนการขยายตัว	Average
+	+	+	43.597	38.947
+	+	-	34.296	
+	-	+	127.684	116.002
+	-	-	104.319	
-	+	+	32.215	38.595
-	+	-	44.974	
-	-	+	134.385	111.987
-	-	-	89.588	

ตารางที่ ง.9 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการขยายตัว

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดของไส้กรอก	Ultrasonic	อัตราส่วนการขยายตัว	Average
+	+	+	43.597	37.906
+	+	-	32.215	
+	-	+	127.684	131.035
+	-	-	134.385	
-	+	+	34.296	39.635
-	+	-	44.974	
-	-	+	104.319	96.954
-	-	-	89.588	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1.4 การวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ ง.10 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงโดยอ่านค่าตามอุณหภูมิ

Ultrasonic	อุณหภูมิ(°C)	ขนาดของไส้กรอง	ค่าความสว่าง	Average
+	+	+	3.940	4.737
+	+	-	5.533	
+	-	+	4.332	5.78
+	-	-	7.227	
-	+	+	3.172	9.80
-	+	-	16.426	
-	-	+	6.184	8.906
-	-	-	11.628	

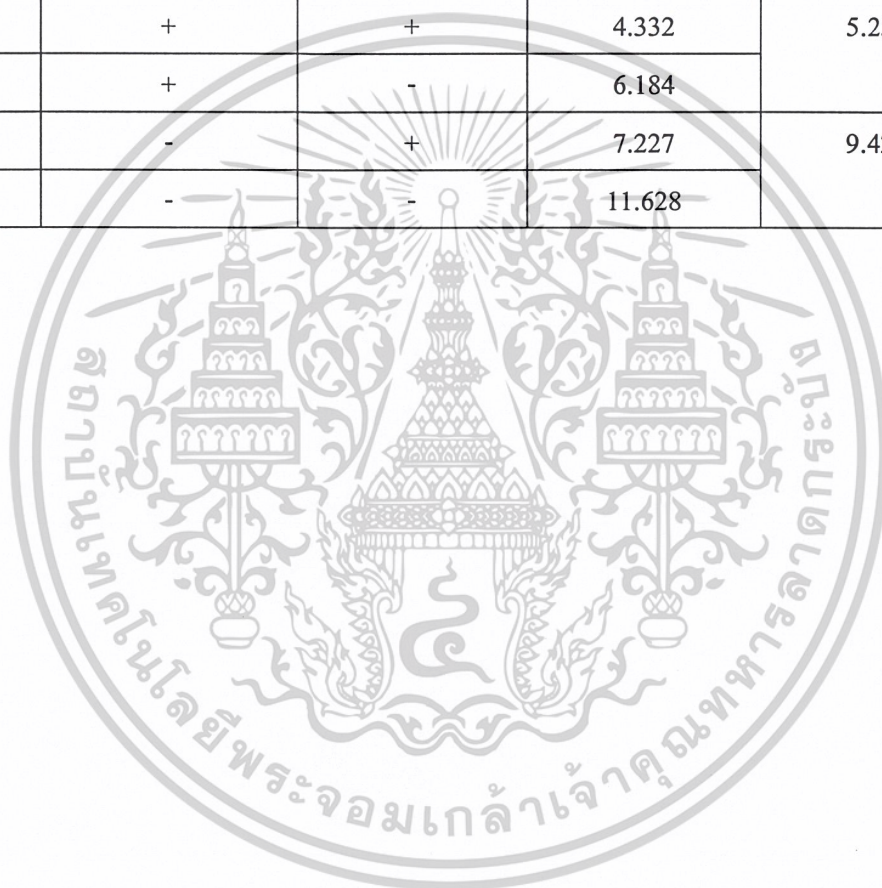
ตารางที่ ง.11 ตารางผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงโดยอ่านค่าตามขนาดของไส้กรอง

Ultrasonic	ขนาดของไส้กรอง	อุณหภูมิ(°C)	ค่าความสว่าง	Average
+	+	+	3.940	4.136
+	+	-	4.332	
+	-	+	5.533	6.38
+	-	-	7.227	
-	+	+	3.172	4.678
-	+	-	6.184	
-	-	+	16.426	14.027
-	-	-	11.628	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.12 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดของไส้กรอง	Ultrasonic	ค่าความสว่าง	Average
+	+	+	3.940	3.556
+	+	-	3.172	
+	-	+	5.533	10.98
+	-	-	16.426	
-	+	+	4.332	5.258
-	+	-	6.184	
-	-	+	7.227	9.428
-	-	-	11.628	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้