



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาผลของการเขย่าน้ำมันในระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วมที่มีต่อคุณภาพของ  
ผลิตภัณฑ์และน้ำมันทอด

Study on the Effect of Oil Shaking to Quality of Fried Product and Frying Oil  
during Deep-Fat Frying

ผศ.ดร.นวกัทยา หนูนาค

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

TP  
6๒๙

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 131100

วัน เดือน ปี 22 พ.ค. 2557

b.1260373๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การศึกษาผลของการเขี่ยน้ำมันในระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วมที่มีต่อคุณภาพของ  
ผลิตภัณฑ์และน้ำมันทอด

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2555

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 72,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 ถึง 30 กันยายน 2555

หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.ดร.นวกัทรာ หนูนาค

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการเขี่ยน้ำมันในระหว่างการทอดนักเก็ตไก่แบบน้ำมันท่วม โดยพิจารณาผลของความถี่ในการเขี่ยที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าสี ค่าเนื้อสัมผัส และคุณภาพของน้ำมัน ได้แก่ ค่าสีและค่าเปอร์ออกไซด์ โดยทำการทดลองที่ความถี่ 0, 2, 4 และ 8 เฮิร์ตซ์ อุณหภูมิน้ำมัน 160 องศาเซลเซียส จากการทอดที่สภาวะดังกล่าว พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทอดเพิ่มขึ้น นักเก็ตไก่มีปริมาณความชื้นลดลง ค่าความสว่างลดลง ค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น ค่าความแข็ง ค่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุและค่าความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น น้ำมันมีค่าความสว่าง ค่าความความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองมีค่าใกล้เคียงกัน (ระยะเวลาการทอด 15 นาที) ความถี่ในการทอดมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ตามความถี่ในการเขี่ยที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กลไกการทอดดีขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณความชื้นลดลง ค่าความสว่างลดลง ค่าความแข็ง ค่าความแน่นเนื้อและค่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาน้ำมันพบว่าค่าความเป็นสีเหลืองลดลง ส่วนค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น และค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การทอดแบบน้ำมันท่วม การเขี่ยน้ำมัน นักเก็ต น้ำมัน

**Research Title:** Study on the Effect of Oil Shaking to Quality of Fried Product and Frying Oil during Deep-Fat Frying

**Researcher:** Navaphattra Nunak

Faculty of Engineering

Department of Food Engineering

### ABSTRACT

According to the study in the effect of shaking oil during deep-frying on nuggets quality of nuggets (moisture content, texture, color) and quality of the oil (color, peroxide value) could be affected from the heat transfer coefficient. Consequently, the experiment of frying at frequency 0, 2, 4 and 8 hertz on the 160 °C temperature can be analyzed, that the usage of times in shaking oil during deep-frying reduces moisture content and lightness. On the other hand redness, yellowness, toughness, stiffness, firmness of the product gradually increases. The measure in lightness, redness, yellowness of the oil is still sustainable (frying time 15 minutes). Due to the frequency of frying increase affect significantly to increase the heat transfer coefficient and frying mechanism increase. The product obtains to decrease moisture content and lightness. And increase toughness, stiffness and firmness. The oil obtains to decrease yellowness. And increase redness and peroxide value.

**Keywords:** Deep-Frying, Oil Shaking, Nugget, Oil

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นางสาวเพลา ตันติสุริย์พร นางสาวภาวิณี เรืองศิษย์ และ นายสิทธิพัฒน์ น้อยเพ็ง นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สำหรับการให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการวิจัย และ “การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2555สำหรับการจัดสรรทุนอุดหนุนการวิจัย”

นวกัทร่า หนูนาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 การทอด.....	3
2.2 กลไกที่เกิดในระหว่างกระบวนการทอด.....	4
2.3 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของน้ำมันและอาหารทอด.....	8
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอาหารในกระบวนการทอด.....	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....</b>	<b>11</b>
3.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	11
3.2 ชุดอุปกรณ์การทอด.....	11
3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	12
3.4 การวิเคราะห์.....	13
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย.....</b>	<b>16</b>
4.1 ผลของการแช่ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและคุณภาพของน้ำมัน.....	16
4.2 ผลของการแช่ที่มีต่อคุณภาพของน้ำมันและผลิตภัณฑ์ที่ทอดแบบน้ำมันทอด.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย .....	39
บรรณานุกรม .....	40
ประวัตินักวิจัย .....	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดของน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทอดในแต่ละประเทศ.....	9
2.2 มาตรฐานค่าเปอร์ออกไซด์ และค่ากรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าว และน้ำมันถั่วเหลือง.....	9
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอลูมิเนียมที่ความถี่ 0 2 4 6 8 และ 10 เฮิร์ตซ์.....	17
4.2 ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ให้ความร้อนที่เวลาและความถี่ต่างๆ.....	22
4.3 ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ใช้ทอดที่เวลาและความถี่ต่างๆ.....	29
4.4 ปริมาณความชื้นของน้กเกิดไ้ที่ทอดที่เวลาและความถี่ต่างๆ.....	31
4.4 ค่าเนื้อสัมผัสของน้กเกิดไ้ที่เวลาและความถี่ต่างๆ.....	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 ชุดอุปกรณ์การทอด.....	11
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	15
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกึ่งกลางของอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ความถี่ 4 เฮิร์ตซ์.....	16
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกึ่งกลางของอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 6 8 และ 10 เฮิร์ตซ์.....	16
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที (ก) ค่าความสว่าง (L*) (ข) ค่าความเป็นสีแดง (a*) (ค) ค่าความเป็นเหลือง (b*) (ง) ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta E^*$ ).....	19
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์ (ก) ค่าความสว่าง (L*) (ข) ค่าความเป็นสีแดง (a*) (ค) ค่าความเป็นเหลือง (b*) (ง) ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta E^*$ ).....	20
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที	21
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์	22
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกึ่งกลางของนักเก็ตไก่กับเวลาที่ความถี่ 4 เฮิร์ตซ์.....	23
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกึ่งกลางของนักเก็ตไก่กับเวลาที่ความถี่ต่างๆ.....	23
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้ำมันที่ใช้ทอดกับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที (ก) L* (ข) a* (ค) b* (ง) $\Delta E^*$ .....	25
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้ำมันที่ใช้ทอดกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์ (ก) L* (ข) a* (ค) b* (ง) $\Delta E^*$ .....	27
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ใช้ทอดกับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที.....	28
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ใช้ทอดกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์.....	28
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของนักเก็ตไก่กับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที	30
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของนักเก็ตไก่กับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์.....	30
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของนักเก็ตไก่กับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที (ก) L* (ข) a* (ค) b* (ง) $\Delta E^*$ .....	33
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของนักเก็ตไก่กับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์ (ก) L* (ข) a* (ค) b* (ง) $\Delta E^*$ .....	34
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่กับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที.....	36
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อสัมผัสกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์.....	37

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทอดเป็นกรรมวิธีการแปรรูปอาหารวิธีหนึ่งซึ่งช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารให้ยาวนานขึ้น โดยการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหารและการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ประโยชน์ด้านการเก็บรักษาอาหารให้นานขึ้นแล้ว การทอดยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ โดยอาหารทอดที่ได้มีรสชาติ กลิ่น สี และเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้นมีลักษณะเฉพาะสำหรับแต่ละชนิดของอาหาร ผลิตภัณฑ์ที่นิยมแปรรูปด้วยวิธีการทอด ได้แก่ เนื้อสัตว์ชนิดต่าง ๆ เช่น ไก่ทอด อาหารทะเลทอด ผักและผลไม้ เช่น มันฝรั่งทอด ก๋วยเตี๋ยวทอด และเฟรนช์ฟรายด์ เป็นต้น กระบวนการทอดอาหารแบ่งเป็นการทอดแบบน้ำมันตื้นและการทอดแบบน้ำมันท่วม ซึ่งการทอดแบบน้ำมันท่วมเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อุณหภูมิที่ใช้ในการทอดคือ  $150^{\circ}\text{C}$  ถึง  $220^{\circ}\text{C}$  ที่ความดันบรรยากาศปกติ (ณรงค์ อาษา, 2008)

การทอดอาศัยหลักการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางให้ความร้อน (น้ำมัน) ไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร (ความชื้น) ระหว่างอาหารกับน้ำมัน โดยเกิดขึ้นทั้งภายในและรอบ ๆ ชิ้นอาหาร กลไกการถ่ายเทความร้อนของการทอดแบบน้ำมันท่วม (Deep-Fat Frying) ประกอบด้วยกลไกการพาความร้อนในน้ำมันและการนำความร้อนภายในชิ้นอาหาร ผิวอาหารทั้งหมดได้รับความร้อนใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดสีและลักษณะภายนอกที่สม่ำเสมอ เมื่ออาหารสัมผัสน้ำมันร้อนในระหว่างการทอด อุณหภูมิของอาหารสูงขึ้นทำให้น้ำและไอน้ำเคลื่อนตัวออกจากช่องว่างในอาหารและน้ำมันร้อนเคลื่อนเข้ามาแทนที่อาหารที่ผ่านการทอดจึงมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบและมีมวลลดลง เนื่องจากการสูญเสียความชื้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดพิจารณาจากค่าปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น กรรมวิธีการทอด สภาพที่ใช้ทอด ชนิดของน้ำมันและชนิดอาหารที่ใช้ในการทอด เป็นต้น (Moreira et al., 1999) การทอดแบบน้ำมันท่วมโดยทั่วไปใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน Sosa-Morales et al. (2006) ทำการศึกษาเรื่องการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวลสาร และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเนื้อหมูที่แปรรูปด้วยวิธีการทอดแบบน้ำมันท่วม พบว่าค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทอดมากขึ้น โดยระยะเวลาในการทอดสามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมันในระหว่างการทอด เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงจะช่วยให้เพิ่มอัตราการพาความร้อนจากน้ำมันไปสู่ชิ้นอาหารให้สูงขึ้นจึงทำให้อาหารสุกเร็วขึ้น ซึ่งการเขย่า การคนหรือการกวนน้ำมันในระหว่างการทอดล้วนเป็นวิธีที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้มีส่วนเพิ่มโอกาสให้น้ำมันได้สัมผัสกับอากาศได้มากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำมันที่ใช้ทอด เช่น การเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงนำเสนอการศึกษาผลของการเขี่ยน้ำมันในระหว่างกระบวนการทอดที่ความเร็วรอบของการเขี่ยระดับต่าง ๆ ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในน้ำมันและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์และน้ำมันทอดเช่น ปริมาณความชื้น ค่าสี เนื้อสัมผัส และค่าเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของการเขี่ยน้ำมันในระหว่างกระบวนการทอดที่ความเร็วรอบของการเขี่ยระดับต่าง ๆ ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในน้ำมันและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์และน้ำมันทอด

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลของการเขี่ยน้ำมันในระหว่างกระบวนการทอดที่ความเร็วรอบของการเขี่ยที่ระดับต่าง ๆ โดยใช้ น้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  ที่มีผลกระทบต่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์และน้ำมันทอด เช่น ปริมาณความชื้น ค่าสี เนื้อสัมผัส และค่าเปอร์ออกไซด์

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1) เก็บคืนและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและสมบัติความร้อนของน้ำมันและอาหารทอดในระหว่างการทอด

2) ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับการทดสอบกลไกการทอดชนิดน้ำมันท่วม โดยชุดทดลองออกแบบให้ตะแกรงบรรจุอาหารสามารถเขี่ยได้ที่ความถี่การเขี่ยหรือความเร็วรอบต่าง ๆ อย่างน้อย 4 ระดับ วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ชี้น้ำมันที่เดือดได้

3) ทำการทดลองที่ระดับความถี่ในการเขี่ยต่าง ๆ กัน บันทึกค่าอุณหภูมิน้ำมันและผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการทอด

4) วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ผลของการเขี่ยที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์และน้ำมันทอด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การทอด

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยความความร้อนที่มีการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางให้ความร้อนไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว ตัวกลางที่ใช้ คือ น้ำมัน การทอดเป็นการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนเพื่อทำลายจุลินทรีย์และเอนไซม์ในอาหาร ทำให้ค่า Water activity ที่ผิวหน้าของอาหารหรือทั้งชิ้นลดลง อายุการเก็บของอาหารทอดขึ้นกับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมัน (วิลโลว์ รังสาตทอง, 2546) ในระหว่างการทอดมีการระเหยของน้ำออกจากชิ้นอาหารและมีการพอร์มตัวของแป้งที่เกิดการเจลาติไนซ์ (gelatinization) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเฉพาะทางด้านเนื้อสัมผัสและรสชาติ เวลาที่ใช้ในการทอดจนได้ผลิตภัณฑ์จะใช้เวลานานมาก พบว่า อาหารจะสุกในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ (transient state) โดยที่อุณหภูมิของอาหารมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำมันอยู่มาก (Fellow, 1990) การทอดแตกต่างจากกรรมวิธีแปรรูปอื่นๆ ดังนี้ การทอดใช้เวลาสั้นมาก ส่วนใหญ่จะเสร็จภายใน 5 นาที ทั้งนี้เนื่องจากการทอดมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางให้ความร้อน คือ น้ำมัน และอุณหภูมิของอาหารมาก และขนาดของชิ้นอาหารที่ใช้ในการทอดส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและมีน้ำน้อย ผลิตภัณฑ์อาหารทอดโดยทั่วไปมีน้ำมันอยู่ในผลิตภัณฑ์ประมาณ 10-40 % โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์อาหารทอดจะมีคุณลักษณะความกรอบมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปชนิดอื่น ตัวกลางส่งผ่านความร้อนที่ใช้ คือ น้ำมัน ซึ่งมีผลทำให้องค์ประกอบและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเฉพาะแตกต่างกับวิธีแปรรูปอาหารอื่น ๆ (Joslyn et al., 1964)

วิธีการทอดที่นิยมใช้กันทั่วไป มีอยู่ 2 วิธี คือ การทอดแบบสัมผัส (Contact frying) และการทอดแบบจุ่มในน้ำมัน (Deep-fat frying)

##### 2.1.1 การทอดแบบสัมผัส (Contact frying)

วิธีนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอนสไลด์ ไช้ เบอร์เกอร์ การส่งผ่านความร้อนจากผิวหน้าของกระทะที่ร้อนไปยังน้ำมัน ความหนาของชั้นน้ำมันที่สัมผัสกับอาหารจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าของอาหารเป็นสีน้ำตาล ขณะเดียวกันจะเกิดฟองจากไอน้ำที่ผิวหน้าอาหาร การทอดแบบสัมผัสนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสูงอยู่ในช่วง  $200-450 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

##### 2.1.2 การทอดแบบจุ่มในน้ำมัน (Deep-fat frying)

การส่งผ่านความร้อนโดยการทอดวิธีนี้ เกิดขึ้นทั้งการพาความร้อน (heat convection) ภายในน้ำมันร้อนและการนำความร้อน (heat conduction) ภายในชิ้นอาหาร ผิวหน้าของอาหารจะได้รับความร้อน

ในทุกๆ ด้าน จึงทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและลักษณะปรากฏอย่างสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 2.1 (ข) ในช่วงแรกของการทอดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าประมาณ  $200-300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  แต่เมื่อทอดไปนานขึ้นมีการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า เกิด vapor bubble รอบ ๆ ซึ่งอาหารเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น  $800-1000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  (วิลโลว์ รังสาตทองม, 2546)

## 2.2 กลไกที่เกิดในระหว่างกระบวนการทอด

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) พิวสัมผัสระหว่างน้ำมันกับอาหาร (Oil-Food interactions) และการเสื่อมสภาพของน้ำมัน (Oil degradation) (Sharma, 2000)

### การวัด

#### 2.2.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ การพาความร้อนและการนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนแบบการนำภายใต้สภาวะที่ไม่คงที่ (Unsteady State) เกิดขึ้นภายในอาหารแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับคุณสมบัติเชิงความร้อนของอาหาร ได้แก่ ค่าการแพร่ความร้อน การนำความร้อน ความจุความร้อน และความหนาแน่นของอาหาร ส่วนการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเกิดขึ้นระหว่างอาหารแข็งกับน้ำมัน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอาหารแข็งกับน้ำมันมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก เนื่องจากมีความเคลื่อนไหวอย่างรุนแรงของไอน้ำ (Vapor bubble) ที่ออกจากชั้นอาหาร ปริมาณของกลุ่มไอน้ำรอบ ๆ ซึ่งอาหารลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากความชื้นในอาหารลดลง ไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้ทำให้การศึกษาเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีความยุ่งยาก ในทางปฏิบัติจึงใช้วัสดุที่เป็นโลหะในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพื่อใช้ในกระบวนการต่างๆ ของการผลิตอาหารแต่ค่าที่ได้มีความแตกต่างจากการทอดอาหารในน้ำมันจริง (Singh, 1995)

การถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางสู่ผิวหน้าอาหาร (การพาความร้อน) เป็นการพาความร้อนจากน้ำมันไปยังผิวหน้าอาหาร ในการทอดแบบจุ่มในน้ำมันมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงก่อนการระเหยน้ำเท่ากับ  $250-300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  แต่ในขณะที่มีการระเหย bubble ที่เกิดขึ้นทำให้มีความปั่นป่วนในน้ำมันเป็นผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปมีฟิล์มของไอน้ำอยู่รอบ ๆ ซึ่งอาหารมากขึ้น จึงทำให้

การถ่ายเทความร้อนลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ Lumped-Heat-Capacity

$$\frac{T_s - T_e}{T_o - T_e} = \exp\left(\frac{-hA}{\rho VC_p} t\right) \quad (2.1)$$

สำหรับการถ่ายเทความร้อนภายในโดยหลักแล้วเป็นการนำความร้อน แต่ก็อาจมีการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำด้วย ความหนาของ crust มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นอาหาร หลังจากอุณหภูมิที่ผิวสูงถึง 100 องศาเซลเซียส ประมาณได้ว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ในช่วงนี้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มีค่าสูงมีนัยสำคัญน้อยกว่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

## 2.2.2 การถ่ายเทมวล

### 2.2.2.1 การถ่ายเทความชื้น

ในอาหารโดยทั่วไปสูญเสียน้ำออกจากอาหารจาก 2 แหล่ง คือ การระเหยน้ำออกจาก crust และการสูญเสียน้ำเนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity, WHC) ที่ลดลง โดยการระเหยน้ำเกิดขึ้นภายใน crust ขณะที่ทอดอาหารในน้ำมันร้อน จะมีการส่งผ่านความร้อนไปยังผิวหน้าอาหารที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนประกอบด้วยคาปิลลารีที่มีขนาดแตกต่างกันไป เมื่อมีการระเหย น้ำจะระเหยออกจากคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่ก่อน และภายในอาหารมีการเคลื่อนที่ของน้ำมายังผิวหน้าของอาหาร อาจมีกลไกหลายรูปแบบ Singh (1995) ได้สรุปกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพรุน โดยค่านึงเฉพาะการเคลื่อนที่ของน้ำภายในช่องว่างของโครงสร้างของสารดังนี้

- ก) การเคลื่อนที่น้ำในรูปของเหลวผ่านรูพรุนเนื่องจากแรงคาปิลลารี (capillary force) เมื่อปริมาณน้ำในอาหารลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านคาปิลลารีและรูเปิดเล็กๆ อาจเกิดขึ้นภายใต้สภาพไอเป็นส่วนใหญ่
- ข) การแพร่ของของเหลวเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นภายในชิ้นอาหาร
- ค) การแพร่ของไอน้ำภายในช่องว่างของอาหารเกิดจากความแตกต่างของความดันไอ (vapor diffusion) และน้ำจะระเหยกลายเป็นไอ

ในช่วงแรกของการถ่ายเทน้ำจะอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งเกิดจากการแพร่ออกสู่ภายนอกเนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เกิดเป็นช่องว่างอากาศภายในรูพรุนแทนที่ความชื้นที่สูญเสียไป ระหว่างนี้การถ่ายเทของน้ำจะถูกดึงเข้าไปด้วยแรงดึงผิวเกาะไปตามผนังของรูพรุน จากนั้นน้ำในรูพรุนจะมีทั้งในสถานะของเหลวไอ ไอน้ำบางส่วนจะถูกควบแน่นเป็นของเหลวที่บริเวณคอขวดของรูพรุน น้ำบางส่วนจะระเหยกลายเป็นไอและบางส่วนเคลื่อนที่เกาะไปตามผนังจนกระทั่งเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายที่น้ำระเหยและ

เคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำ จากลักษณะการถ่ายเทของน้ำในวัสดุพูนเห็นได้ว่าไม่มีทฤษฎีหนึ่งที่อธิบายได้ครอบคลุมกระบวนการทั้งหมด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Van Arsdell, 1973)

การสูญเสียน้ำอีกส่วนหนึ่งเนื่องมาจากความสามารถในการอุ้มน้ำที่ลดลง เช่นในกรณีให้ความร้อนแก่ชิ้นเนื้อด้วยอุณหภูมิและเวลาระดับหนึ่ง พบว่ามีการเสื่อมสภาพของโปรตีน (protein denaturation) โปรตีนจับตัวกันทำให้น้ำ (drip) ถูกบีบตัวออกมาภายนอก แต่ถ้ามีส่วนผสมที่เป็นแป้งประกอบอยู่ด้วย น้ำจะถูกดูดซับด้วยส่วนผสมเหล่านี้

#### 2.2.2.1 การถ่ายเทของน้ำมัน

กลไกการถ่ายเทของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยังมีความเข้าใจน้อยมาก แต่ก็มียานวิจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษาและให้ข้อสังเกตไว้มากมาย Pinthus and Saguy (1994) สังเกตว่าน้ำมันเข้าไปในอาหาร โดยไปแทนที่ในช่องว่างระหว่างเซลล์และตามผนังเซลล์ แต่ไม่ได้อธิบายว่าเกิดขึ้นได้อย่างไรและเมื่อไหร่ Brown (1960) อธิบายว่าความพูนของ potato chips เป็นเหตุให้อิอน้ำมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนจากน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง ไอน้ำบางส่วนที่อยู่กักอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อไอน้ำเคลื่อนที่ออกไป น้ำมันจึงเข้าไปแทนที่ Gamble et al. (1987) แสดงให้เห็นว่าเมื่อทอดอาหาร ความชื้นภายในอาหารจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำ เมื่อผิวหน้าแห้งและมีเกรเดียนต์ความดัน จึงทำให้น้ำมันที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าเข้าสู่ภายในได้ตามผิวหน้าที่ถูกทำลายเมื่อนำอาหารออกจากเครื่องทอด McDonough et al. (1993) ใช้ ESEM (environment scanning electron microscope) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ tortilla chips ระหว่างการทอด พบว่ามีน้ำมันเกาะตัวที่ผิวหน้าอาหาร โดยพื้นที่ที่อาหารสัมผัสกับน้ำมัน และแพร่เข้าไปในอาหาร Matz (1993) เสนอแนะว่าถ้าหากนำ chips ออกจากเครื่องทอดขณะที่อุณหภูมิของอาหารยังเพิ่มขึ้นอยู่น้ำมันถูกดูดซับเข้าไปเพียง 15% เท่านั้น ส่วนที่เหลืออยู่จับตัวที่ผิวหน้าและเข้าสู่ภายในเมื่ออาหารเย็นตัวลง จากงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาถึงการดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์นั้น Pinthus and Saguy (1994) ได้สรุปกลไกที่เกิดขึ้นดังนี้

1) การเข้าไปแทนที่น้ำที่ระเหยไป (replacement of moisture) มียานวิจัยหลายงานที่สนับสนุนว่าน้ำมันแทนที่ความชื้นที่สูญเสียไประหว่างการทอด เมื่อเริ่มกระบวนการทอดที่ผิวหน้าด้านนอกของอาหารประกอบด้วยน้ำอิสระและ 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 เมื่อเริ่มจุ่มชิ้นอาหารในน้ำมันที่เกาะอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของอาหาร มี interfacial tension ระหว่างผิวหน้าอาหารกับน้ำมันมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำมันด้วยกันเอง เมื่อเวลาผ่านไป interfacial tension ระหว่างอาหารกับน้ำมันจะลดลงจนต่ำกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำมันกับน้ำมัน น้ำมันที่ผิวหน้าอาหารจึงเคลื่อนที่เข้าไปภายใน

5) ความเป็นรูพรุน (porosity) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับของน้ำมันของผลิตภัณฑ์ ความเป็นรูพรุนเริ่มต้นของอาหารมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ และในระหว่างการทอดทั้งค่าความเป็นรูพรุนและการดูดซับน้ำมันจะเพิ่มขึ้นและมีผลต่อกันและกัน

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

Hallstrom (1984) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการทอด ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ผิวหน้าและใจกลางอาหาร แบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ

1) ช่วงแรกเป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับค่าความดันไอ ซึ่งในการทอดแบบจุ่มในน้ำมันมีค่าประมาณ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในช่วงนี้ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำมันและผิวหน้าของอาหาร ในการทอดแบบจุ่มในน้ำมันและการทอดแบบสัมผัส ผลคูณระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงจึงมีช่วงนี้สั้น

2) ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่อุณหภูมิที่ผิวสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส การสูญเสียความชื้นเนื่องจากการระเหยของน้ำและมีการเกิด crust formation ในช่วงนี้ไม่ขึ้นกับวิธีการให้ความร้อนเนื่องจากเป็นช่วงที่มีการระเหยกลายเป็นไอ การเกิด crust formation ทำให้ภายในใจกลางอาหารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

3) ช่วงที่ 3 ภายหลังจากให้ความร้อน พบว่าอุณหภูมิที่ผิวลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการพาความร้อนระหว่างอากาศกับผิวหน้าอาหาร แต่ภายในชิ้นอาหารมีการถ่ายเทแบบนำความร้อน (Heat conduction) อย่างช้าๆ จากภายในสู่ผิว จึงทำให้อุณหภูมิใจกลางชิ้นอาหารยังคงสูงกว่าผิวหน้าอาหาร ช่วงนี้สิ้นสุดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใจกลางมีค่าสูงสุดและช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่อุณหภูมิใจกลางอาหารเริ่มเย็นลง ช่วงที่ 2

และ 3 เวลาในการทอดขึ้นกับขนาดและมิติของชิ้นอาหาร (dimension) ถ้าเป็นอาหารที่มีขนาดใหญ่และหนา จะมีช่วงที่ 2 และ 3 ยาวนานกว่าชิ้นบาง

Farkas et al. (1973) ทำการศึกษาเบื้องต้นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารเมื่อทอดแบบจุ่ม ในน้ำมัน อาหารโดยส่วนมากมักมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักและมีตัวถูกละลายปะปนอยู่เล็กน้อย ดังนั้นจุดเดือดของของเหลวในตัวอย่างอาหารจึงมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ เมื่อน้ำระเหยออกจากอาหารมากขึ้น อุณหภูมิของอาหารจึงสูงกว่าจุดเดือด

### 2.3 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของน้ำมันและอาหารทอด

การทอดมีการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปที่น้ำมัน และความร้อนจากน้ำมันถ่ายเทไปยังอาหาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารและน้ำมัน ดังนี้ ผลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหาร คือ ทำให้เกิดการพัฒนาลี กลิ่น รสของอาหาร โดยที่คุณภาพของอาหารจะถูกพัฒนา โดยพิจารณาจากการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) และการดูดซับของ volatile compound ของน้ำมัน

สำหรับการให้ความร้อนกับน้ำมันเป็นเวลานานที่อุณหภูมิสูงๆ เวลาทอดจะทำให้ความชื้นและออกซิเจนออกจากอาหาร ซึ่งสาเหตุของการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบบางอย่าง เช่น volatile carbonyls, hydroxyl acids, keto acids และ epoxy acids ซึ่งสิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติ น้ำมันมีสีเข้มและความหนืดเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันจะมีสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (anti-oxidant) อยู่ในน้ำมันตามธรรมชาติ เช่น โทโคฟีรอล (tocopherols) (Fellow, 1990)

ข้อกำหนดของน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทอดของประเทศต่างๆ มีการกำหนดค่า PV, AV, หรือ FFA แสดงดังตารางที่ 2.1 สำหรับประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดสมบัติของน้ำมันที่ใช้ทอด ทั้งนี้ น้ำมันพืชที่นิยมใช้บริโภค ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าว และน้ำมันถั่วเหลือง จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้ กำหนด ค่าเปอร์ออกไซด์ และค่ากรดของน้ำมันดังกล่าวไว้ดังตารางที่ 2.2 โดยในน้ำมันผ่านกรรมวิธีทั่วไป นอกจากจะมีการกำหนดค่า Peroxide value และ Acid value แล้ว ยังมีการกำหนดค่าต่างๆ อีกได้แก่ น้ำและสิ่งที่ระเหยได้ (water and volatile matter) ไม่เกิน 0.2% ปริมาณสบู่ (soap) ไม่เกิน 0.005% และสิ่งอื่นที่ไม่ละลาย (insoluble impurities) ไม่เกิน 0.05% (มอก.47-2533)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทอดในแต่ละประเทศ

วิธีวัดค่า	ปริมาณไม่เกิน	ชนิดของน้ำมัน	ประเทศ	ที่มา
	<1.0 meq			
PV	peroxide/kg oil	Fresh oil	-	Perkins and Erickson, 1996
	<10.0 meq			
PV	peroxide/kg oil	Used oil	-	Perkins and Erickson, 1997
AV	<2.5 mg KOH/1g oil	Used oil	Austria	Rossell, 2001
AV	<2.0 mg KOH/1g oil	Used oil	Germany	Rossell, 2002
AV	<2.5 mg KOH/1g oil	Used oil	Japan	Rossell, 2003
AV	<4.5 mg KOH/1g oil	Used oil	Netherland	Rossell, 2004
FFA	<0.05%	Used oil	-	Perkins and Erickson, 1997
FFA	<0.2%	Fresh oil	USA	Rossell, 2003
FFA	<0.4%	Fresh oil	Austria	Rossell, 2004
FFA	<2.5%	Used oil	Belgium	Rossell, 2005
FFA	≤0.1%	Used oil	Chile	Rossell, 2006
FFA	≤2.0%	Used oil	USA	USDA, 1997

ที่มา : นุช(2545)

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานค่าเปอร์ออกไซด์ และค่ากรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าว และน้ำมันถั่วเหลือง

ชนิดของน้ำมัน	ค่าเปอร์ออกไซด์ (meq. Peroxide/1 kg oil)	ค่ากรดไขมันอิสระ (mg KOH/1 g oil)	ที่มา
น้ำมันปาล์ม	10	0.6	มอก. 288-2535
น้ำมันรำข้าว	10	0.6	มอก. 44-2516
น้ำมันถั่วเหลือง	10	0.6	มอก. 176-2519

ที่มา : นุช(2545)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอาหารในกระบวนการทอด

การทอดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมาก มีตัวแปรมากมายที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพของอาหารทอด โดยพิจารณาเป็น 3 ส่วนดังนี้

- 1) สภาพการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันและเวลาที่ใช้ทอด และวิธีการทอดเป็นแบบจุ่มในน้ำมันหรือการทอดแบบสัมผัส โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการทอดมีค่าประมาณ 163-193°C ขึ้นกับชนิดของอาหารที่ทอด การเลือกอุณหภูมิที่ใช้สำหรับทอดอาจพิจารณาจากข้อกำหนดลักษณะและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของผู้บริโภค การทอดที่ใช้อุณหภูมิสูงจะลดเวลาการทอดให้สั้นลงและทำให้อัตราการทอดเร็วขึ้น
- 2) ชนิดของน้ำมันที่ใช้ทอดและอายุการเก็บ ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมัน สารปนเปื้อนและองค์ประกอบในน้ำมัน การทอดที่อุณหภูมิน้ำมันสูงจะเป็นตัวเร่งให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพเร็วเนื่องจากกรดไขมันอิสระมากขึ้น และยังทำให้สี กลิ่น และความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนไป
- 3) ตัวอาหาร ได้แก่ การเตรียมอาหารก่อนการทอด สัดส่วนของน้ำหนักรวมต่อปริมาณน้ำมัน และสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหาร ซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหาร
- 4) วิธีปฏิบัติภายหลังการทอด

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่อทอง วานานุวัธ และ คณะ (2547) ทดลองทอดปลาทองโก้ พบว่า เมื่อใช้เวลาทอดนานขึ้น ค่าเปอร์ออกไซด์ กรดไขมันอิสระ ความหนืดมีค่ามากขึ้น และค่าสีของน้ำมันที่ใช้ในการทอดปลาทองโก้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทอดไป 36 ชั่วโมง

Hallstrom (1984) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณความชื้นในกระบวนการให้ความร้อนจากการจุ่มในน้ำมัน โดยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการทอด พบว่า อุณหภูมิที่ผิวลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการพาความร้อนระหว่างอากาศกับผิวหน้าอาหาร แต่ภายในชิ้นอาหารมีการถ่ายเทแบบการนำความร้อนอย่างช้า ๆ จากภายในสู่ผิว จึงทำให้อุณหภูมิใจกลางชิ้นอาหารยังคงสูงกว่าผิวหน้าอาหาร

Shahina et al. (2007) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันพืชแต่ละชนิด โดยพิจารณาจากค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ใช้ในการทอดเฟรนช์ฟรายด์อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น น้ำมันมีค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

### บทที่ 3

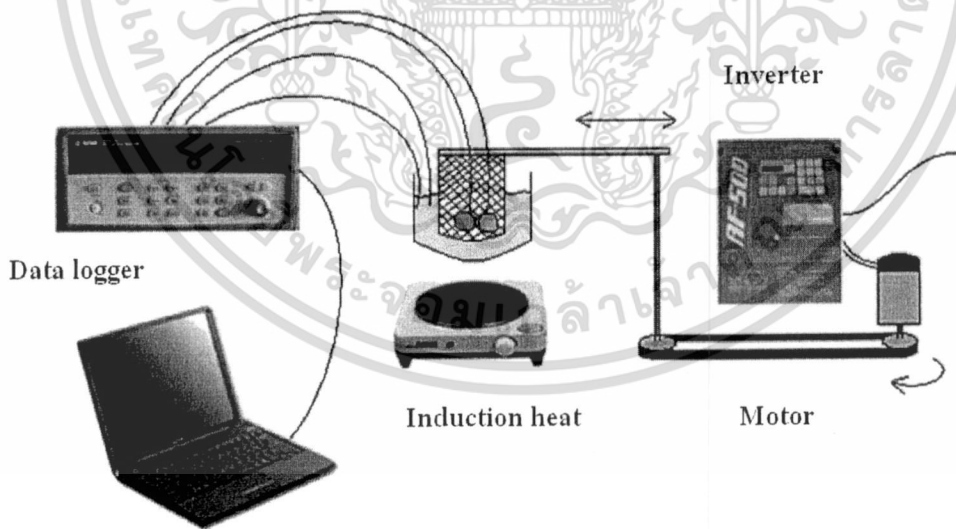
#### วิธีการทดลอง

#### 3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ซึ่งนักเกิดไก่อตราซีพีและน้ำมันปาล์มตราหยกจากซูเปอร์มาร์เก็ต โดยนักเกิดไก่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $4.7 \pm 0.2$  เซนติเมตร หนา  $1.3 \pm 0.2$  เซนติเมตร น้ำหนักโดยเฉลี่ย  $20 \pm 2$  กรัมต่อชิ้น นำมาเก็บไว้ในช่องแช่แข็งอุณหภูมิ  $-18$  องศาเซลเซียส และนำออกมาไว้ที่อุณหภูมิ  $4$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดลอง

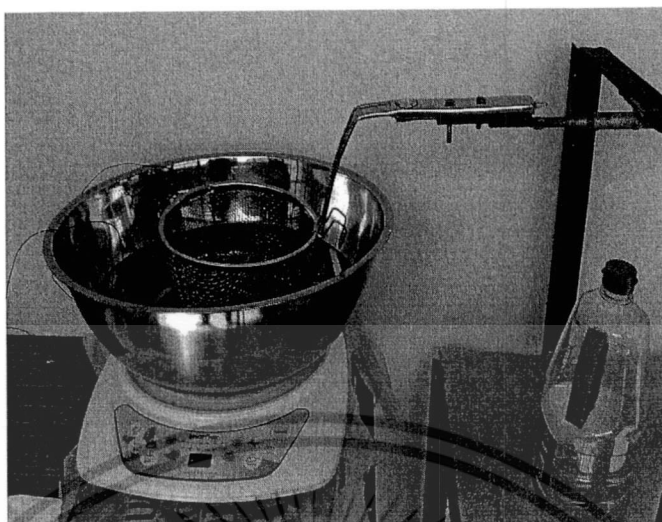
#### 3.2 ชุดอุปกรณ์การทอด

ชุดอุปกรณ์การทอด (ภาพที่ 3.1) ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่แสดงผลการวัดอุณหภูมิที่ได้จากเครื่อง Data logger (Agilent 34970A) เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล type K จำนวน 4 เส้น อินเวอร์เตอร์รุ่น AF-500 บริษัท Sumitomo Heavy Industries, Ltd. ใช้สำหรับปรับความเร็วรอบมอเตอร์ตะแกรงสำหรับใส่ชิ้นตัวอย่างและเตาให้ความร้อน Induction heat ขนาด 746 Watt สำหรับให้ความร้อนกับน้ำมัน



ภาพที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การทอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 (ต่อ) ชุดอุปกรณ์การทอด

### 3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

#### 3.3.1 การใช้ความร้อนกับน้ำมันและการเขย่า

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ศึกษาผลของความถี่ในการเขย่าที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยเขย่าน้ำมันด้วยความถี่ 0, 2, 4 6 และ 8 เฮิร์ตซ์ ซึ่งมีค่าความเร็วรอบเท่ากับ 0 24 48 และ 96 รอบ/นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำมัน 160 องศาเซลเซียส ภายในภาชนะบรรจุน้ำมันและแท่งอะลูมิเนียมทรงกระบอกแบนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร หนา 1.3 เซนติเมตร ( $k = 202 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $\rho = 2703 \text{ kg/m}^3$  และ  $V = 2.22 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ) โดยมีเทอร์โมคัปเปิลเสียบที่จุดกึ่งกลางอะลูมิเนียมเพื่อวัดอุณหภูมิ และ กลุ่มที่ 2 ศึกษาผลของความถี่ในการเขย่าที่มีต่อค่าคุณภาพของน้ำมัน โดยให้ความร้อนกับน้ำมันที่มีการเขย่าด้วยความถี่ 0, 2, 4 6 และ 8 เฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 240 นาที ทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 10 มล. ทุกๆ 60 นาที ทิ้งไว้ 4 ชั่วโมงแล้วนำไปวิเคราะห์ค่าสีและค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมัน

#### 3.3.2 การทอดนักเก็ตไก่แบบน้ำมันท่วม

นำนักเก็ตไก่จำนวน 11 ชิ้นทอดในน้ำมันปาล์ม 3 ลิตร อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสภายในภาชนะบรรจุแท่งอะลูมิเนียม เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ทอดที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์ นำสายเทอร์โมคัปเปิล type K ต่อกับ Data logger เสียบที่กึ่งกลางของนักเก็ตเพื่อวัดอุณหภูมิของนักเก็ต อีก 2 สายจุ่มลงในน้ำมันเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำมัน เก็บตัวอย่างนักเก็ตไก่และน้ำมันทุกๆ 1 นาที จำนวน 2 ชิ้น จนครบตามเวลาที่กำหนด (5 นาที) หลังจากนั้นสะเด็ดน้ำมันเป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ค่าสี เนื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัส และความชื้น สำหรับน้ำมันทิ้งไว้ 4 ชั่วโมงก่อนวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ และสี ขั้นตอนการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3.2

### 3.4 การวิเคราะห์

#### 3.4.1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในน้ำมันสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{T_s - T_e}{T_o - T_e} = \exp\left(\frac{-hA}{\rho V C_p} t\right)$$

เมื่อ  $T_o$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของแท่งอะลูมิเนียม  $T_e$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมัน และ  $T_s$  คืออุณหภูมิที่ผิวสัมผัส ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธี Lumped-capacity เป็นการศึกษานำความร้อนของตัวกลางที่มีค่า Bi น้อยกว่า 0.1 มาก ๆ ในสภาวะไม่คงที่ (อุณหภูมิตัวกลางขึ้นกับเวลาเท่านั้น) โดยค่า Bi ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.3

#### 3.4.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้น

ใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ตัวอย่างบดให้ละเอียดจำนวน 5 กรัม แล้วอบในตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ชั่งน้ำหนักและจดบันทึกผล คำนวณหาปริมาณความชื้น (% MC) จาก

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

#### 3.4.3 การวิเคราะห์ค่าสี

วิเคราะห์ค่าสีโดยเครื่อง Colorimeter รุ่น JC 801 บันทึกค่า  $L^* a^* b^*$  ตัวอย่างละ 10 ซ้ำ จนครบทุกตัวอย่าง

#### 3.4.4 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

วัดเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส Texture Analyzer ของบริษัท Stable Micro System รุ่น TA.XT plus โดยกำหนดให้เป็นการทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัดทรงกระบอก P/2 ซึ่งมี pre-test speed 1 mm/s , test-speed 1 mm/s , post-test 1 mm/s , Trigger force 5.0 g , Strain 80% ทำการเจาะขึ้นตัวอย่าง 3 ตำแหน่งคือ บน กลาง และล่าง โดยบันทึกค่า Area Gradient Force Distance

### 3.4.5 การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์

ใช้ตัวอย่างน้ำมัน 5 กรัม เติมนสารละลายกรดอะซิติก – คลอโรฟอร์ม 30 มล. เขย่าให้เข้ากัน เติมนสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์อิ่มตัว 0.5 มล. เขย่าแล้วเติมน้ำกลั่น 30 มล. หยดสารละลายน้ำแป้ง 0.5 มล. ไทเทรตกับสายละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งสีน้ำเงินหายไป จะสามารถคำนวณหาค่าเปอร์ออกไซด์ได้จากสมการ

$$\text{ค่าเปอร์ออกไซด์ (Meq)} = \frac{(S-B) \times N \times 1000}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

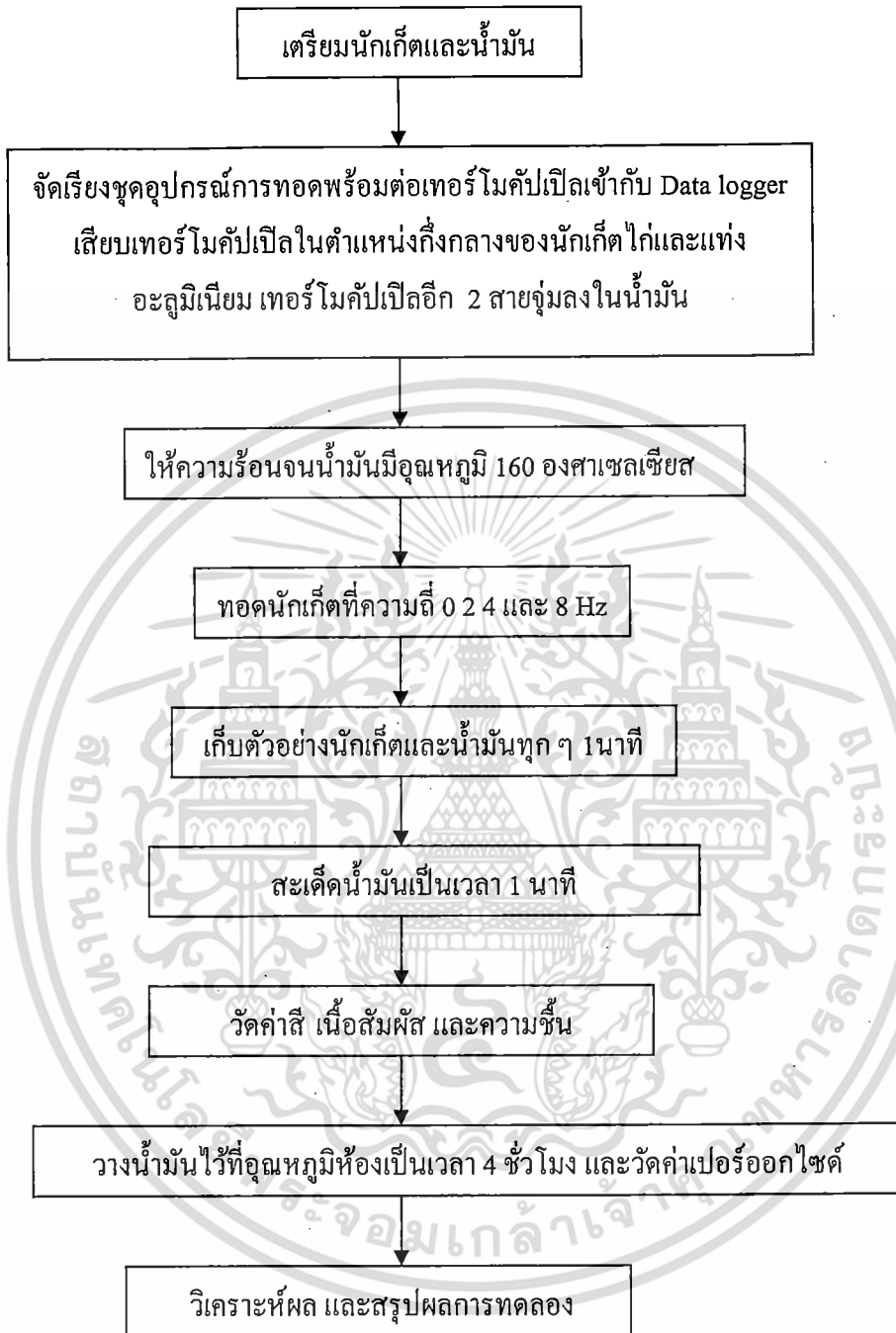
โดย N = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต

S = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)

B = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต blank (มล.)

### 3.4.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส ความชื้นของนักเก็ตและค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วย Duncan's Multiple rang test ( $P \leq 0.05$ )



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

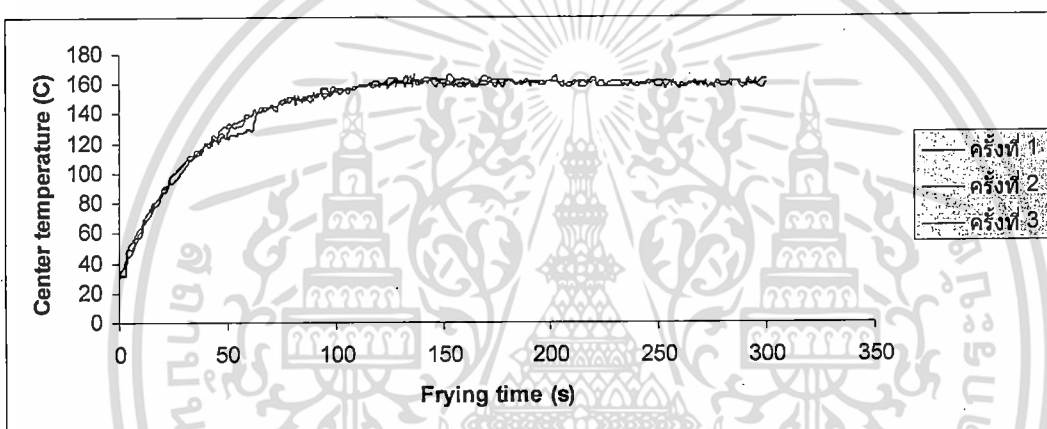
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

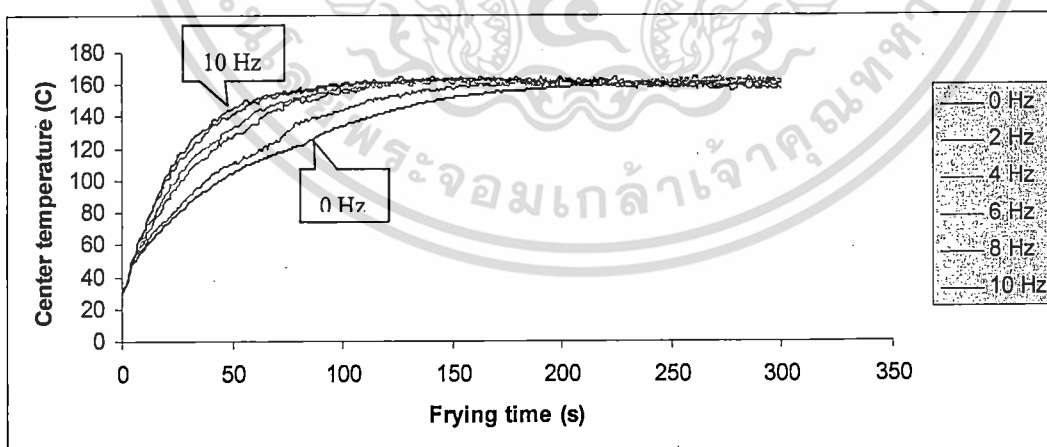
#### 4.1 ผลของการแช่ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและคุณภาพของน้ำมัน

##### 4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)

พิจารณาผลของความถี่และเวลาที่ใช้ในการแช่น้ำมัน ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จากการวัดอุณหภูมิกึ่งกลางของอลูมิเนียมตั้งแต่เวลา 0 – 300 วินาที ที่ความถี่ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 เฮิรตซ์ พบว่า อุณหภูมิกึ่งกลางของอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่เริ่มให้ความร้อน (ภาพที่ 4.1-4.2)



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกึ่งกลางของอลูมิเนียมกับเวลาที่ความถี่ 4 เฮิรตซ์



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกึ่งกลางของอลูมิเนียมกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 6 8 และ 10 เฮิรตซ์

หลังจากนั้นอุณหภูมิที่กึ่งกลางของอุณหภูมิเนียมจะเพิ่มขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่เราต้องการจะศึกษา ในที่นี้คือ 160 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงสภาวะคงตัว เมื่อถึงสภาวะคงตัวอุณหภูมิที่กึ่งกลางของอุณหภูมิเนียมจะคงเดิมไปจนกระทั่งสิ้นสุดการให้ความร้อน จากภาพที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่กึ่งกลางของอุณหภูมิเนียมที่ความถี่ต่างๆ พบว่าที่ความถี่ 0 เฮิร์ตซ์ อุณหภูมิที่กึ่งกลางของอุณหภูมิเนียมค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ใช้เวลานานประมาณ 190 วินาที ส่วนที่ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ ใช้เวลานานประมาณ 90 วินาที แสดงว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นอุณหภูมิที่กึ่งกลางของอุณหภูมิเนียมจะเพิ่มถึงอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เร็วกว่าที่ความถี่ต่ำ

จากสมการ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ค่าดังตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อความถี่ในการเขย่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการปั่นป่วนในน้ำมัน ทำให้การพาความร้อนจากน้ำมันดีขึ้น (วิลโลว์ รังสาดทอง, 2546) โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) สามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่มได้อย่างชัดเจน โดยแบ่งเป็นกลุ่ม 0 เฮิร์ตซ์ กลุ่ม 2 เฮิร์ตซ์ กลุ่ม 4 และ 6 เฮิร์ตซ์ และกลุ่ม 8 และ 10 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นความถี่ที่นำมาใช้ในการทดลองในหัวข้อต่อไป คือ 0, 2, 4 และ 8 เฮิร์ตซ์

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอุณหภูมิเนียมที่ความถี่ 0 2 4 6 8 และ 10 เฮิร์ตซ์

ความถี่ (Hz)	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2K$ )
0	530.244±13.504a
2	764.466±19.912b
4	1036.891±50.543c
6	1089.230±14.436c
8	1326.612±53.808d
10	1406.761±51.947d

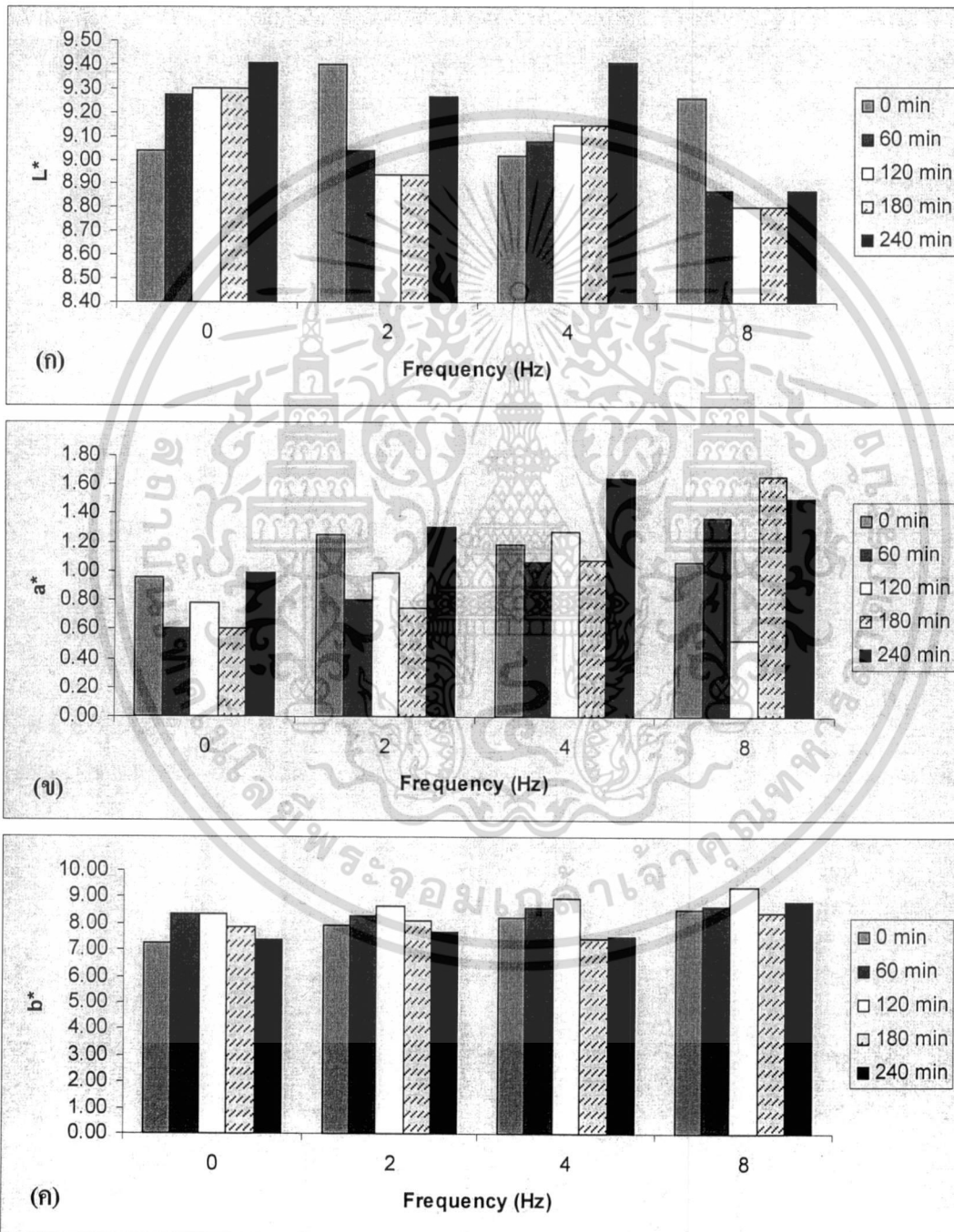
หมายเหตุ : 1. ข้อมูลที่มีตัวเลขอยู่ด้านหลัง หมายถึง จำนวนซ้ำการทดลอง 2. ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a b c และ d) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.5$ )

## 4.1.2 คุณภาพของน้ำมัน

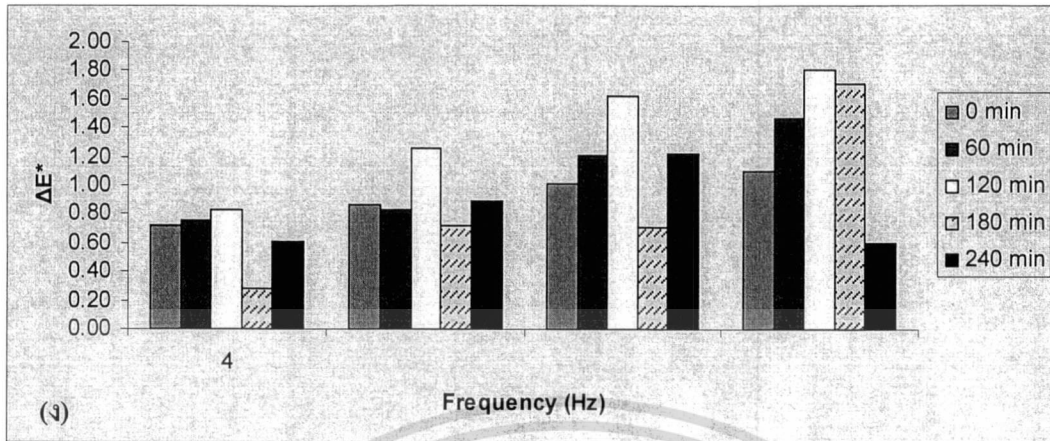
### 4.1.2.1 การวิเคราะห์ค่าสี

พิจารณาผลของเวลาและความถี่ที่ใช้ในการเขย่าน้ำมันที่มีผลต่อค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมัน พบว่าเมื่อให้ความร้อนกับน้ำมันที่ความถี่

เดียวกัน เวลาเพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมัน มีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะเวลาในการทอด 4 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.3 จากงานวิจัยพบว่าค่าสีของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้ระยะเวลาในการทอด 36 ชั่วโมง (เนื้อทอง วนานูวัวร์ และคณะ) ที่เวลา 0 นาที (เวลา 0 นาที เริ่มนับตั้งแต่อุณหภูมิน้ำมันถูกให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึง 160 องศาเซลเซียส)

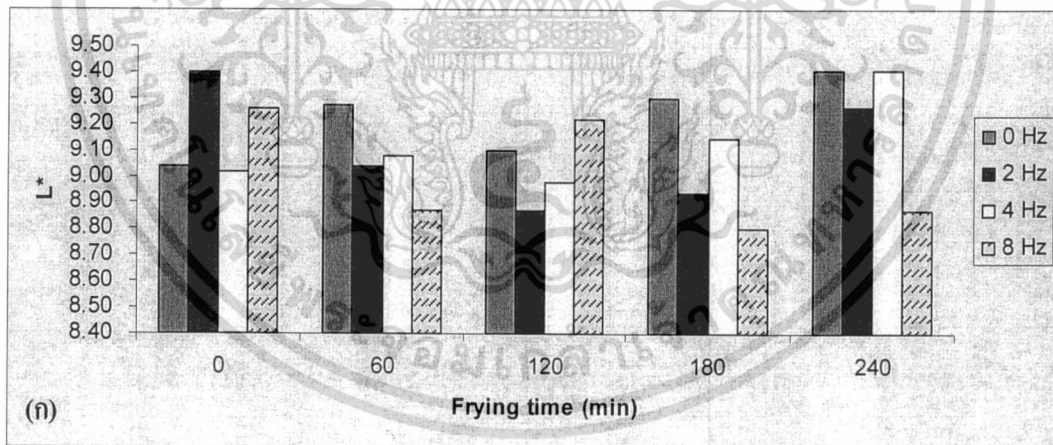


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

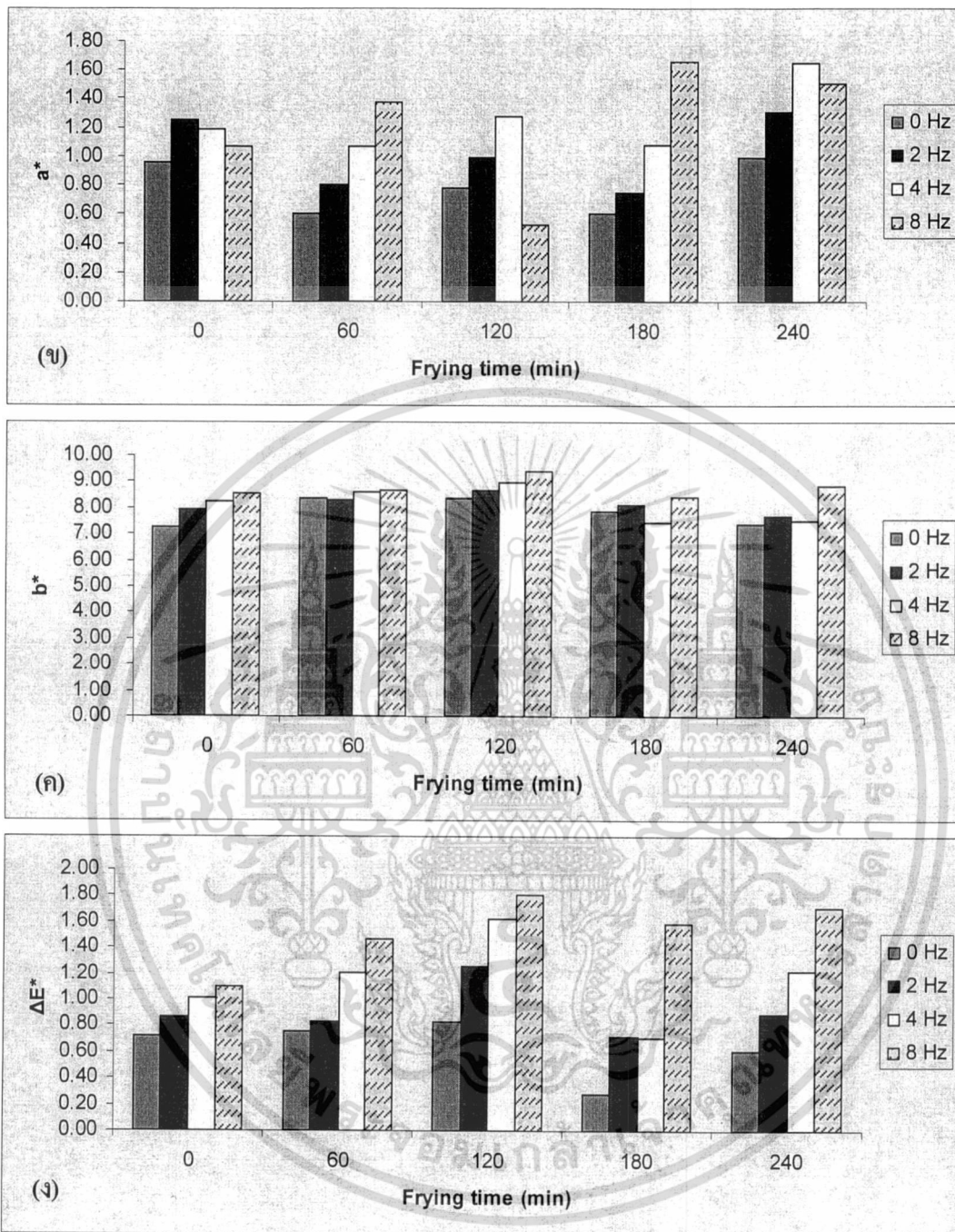


ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที (ก) ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) (ข) ค่าความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) (ค) ค่าความเป็นเหลือง ( $b^*$ ) (ง) ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta E^*$ )

อย่างไรก็ตามเมื่อให้ความร้อนกับน้ำมันที่เวลาเดียวกัน ความถี่เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีแดง(ข) และค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมัน(ค) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 4.4 สรุปได้ว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนกับน้ำมัน ไม่มีผลต่อค่าสีของน้ำมัน แต่ความถี่ในการเขี่ยน้ำมันมีผลต่อค่าความเป็นสีแดงและค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

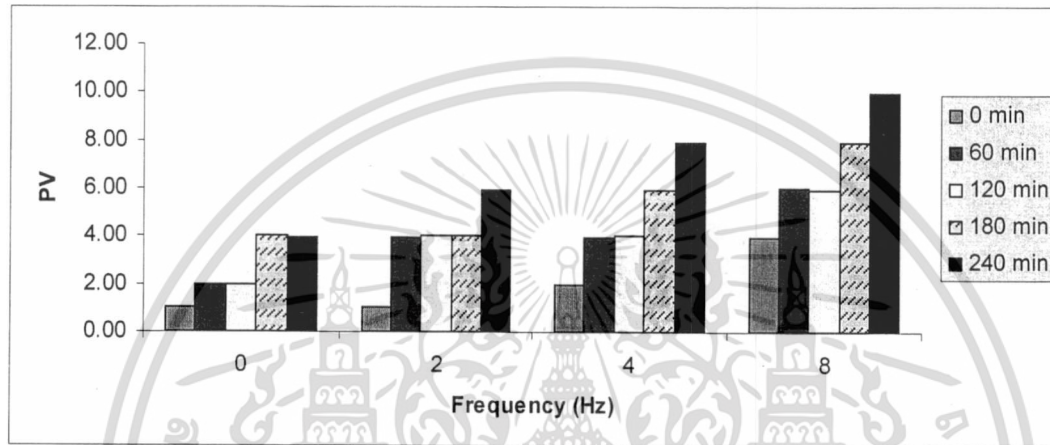


ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์ (ก) ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) (ข) ค่าความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) (ค) ค่าความเป็นเหลือง ( $b^*$ ) (ง) ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta E^*$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

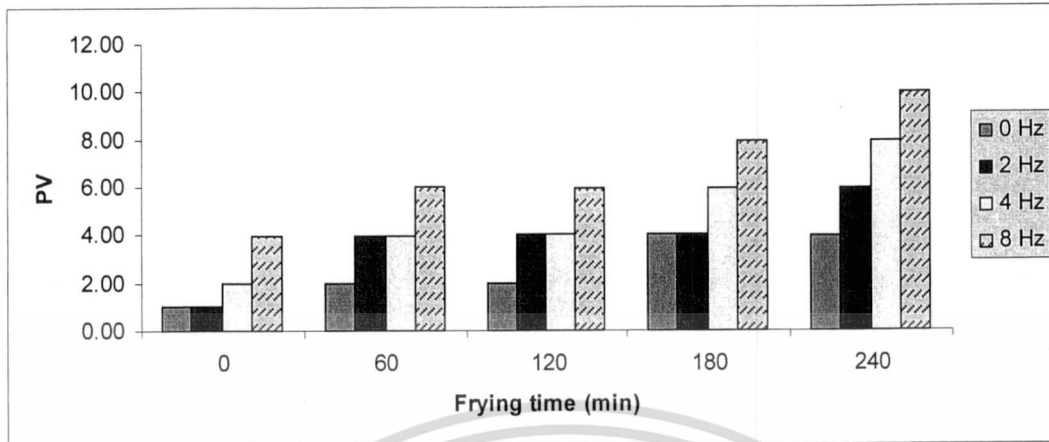
#### 4.1.2.2 การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ (PV)

พิจารณาผลของเวลาและความถี่ที่ใช้ในการเขย่าน้ำมันที่มีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมัน เมื่อให้ความร้อนกับน้ำมัน ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 0.998 มิลลิกรัมสมมูลย์ ที่ความถี่เดียวกัน เวลาเพิ่มขึ้น พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.5 เนื่องจากการให้ความร้อนกับน้ำมันที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานๆ ทำให้น้ำมันเกิดการออกซิเดชัน (วิไล รัตนาทอง, 2546)



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที

อย่างไรก็ตามเมื่อให้ความร้อนกับน้ำมันที่เวลาเดียวกัน ความถี่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.6 เนื่องจากการเขย่าทำให้เกิดการปั่นป่วนในน้ำมัน น้ำมันจึงสัมผัสกับออกซิเจนมากขึ้น สรุปได้ว่าระยะเวลาในการให้ความร้อน และความถี่ในการเขย่าน้ำมัน มีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมัน



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิรตซ์

ตารางที่ 4.2 ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ให้ความร้อนที่เวลาและความถี่ต่างๆ

เวลา (นาที)	ค่าเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมสมมูลย์)			
	0 Hz	2 Hz	4 Hz	8 Hz
0	0.9920	0.9940	1.9920	3.9761
60	1.9762	3.9682	3.9682	5.9880
120	2.0000	4.0000	3.9920	5.9405
180	4.0323	4.0161	5.9523	7.9364
240	3.9840	5.9523	7.9364	9.9800

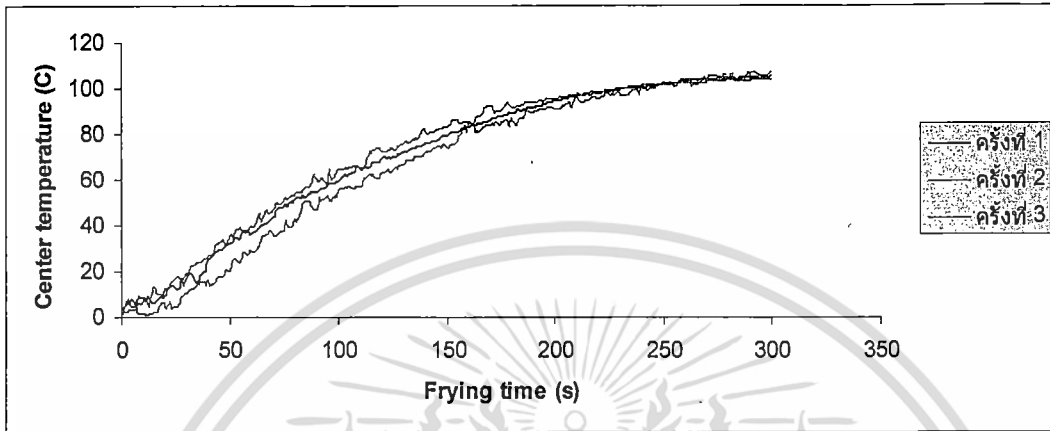
เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ให้ความร้อนกับน้ำมันธรรมดา พบว่าเมื่อให้ความร้อนกับน้ำมันเป็นเวลานานขึ้น ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันเพิ่มขึ้นจากเดิม แต่มีค่าไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบน้ำมันที่ให้ความร้อนกับน้ำมันที่ใช้ทอดนั้กเกิดแบบน้ำมันท่วมแล้ว พบว่าระยะเวลาที่ใช้ทอดนั้กเกิด 15 นาที ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูงขึ้นเร็วกว่าน้ำมันที่ให้ความร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

#### 4.2 ผลของการเขย่าที่มีต่อคุณภาพของน้ำมันและผลิตภัณฑ์ที่ทอดแบบน้ำมันท่วม

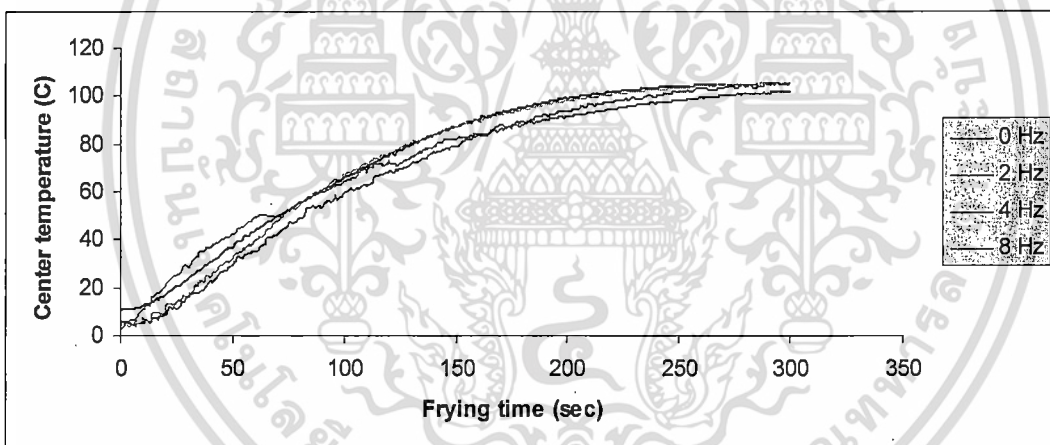
พิจารณาผลของความถี่และเวลาที่ใช้ในการเขย่าน้ำมัน ที่มีต่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางของนั้กเกิดไก่ โดยทดลองจากการวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางของนั้กเกิดไก่ตั้งแต่เวลา 0 - 300 วินาที ที่ความถี่ 0, 2, 4 และ 8 เฮิรตซ์ พบว่า อุณหภูมิที่กึ่งกลางของนั้กเกิดไก่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่เริ่มให้ความร้อน ดังภาพที่ 4.7-4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นอุณหภูมิกึ่งกลางของน้กเกิดไก่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสภาวะคงตัว เมื่อถึงสภาวะคงตัวอุณหภูมิกึ่งกลางของน้กเกิดไก่จะคงเดิมไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทอด



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกึ่งกลางของน้กเกิดไก่กับเวลาที่ความถี่ 4 เฮิรตซ์



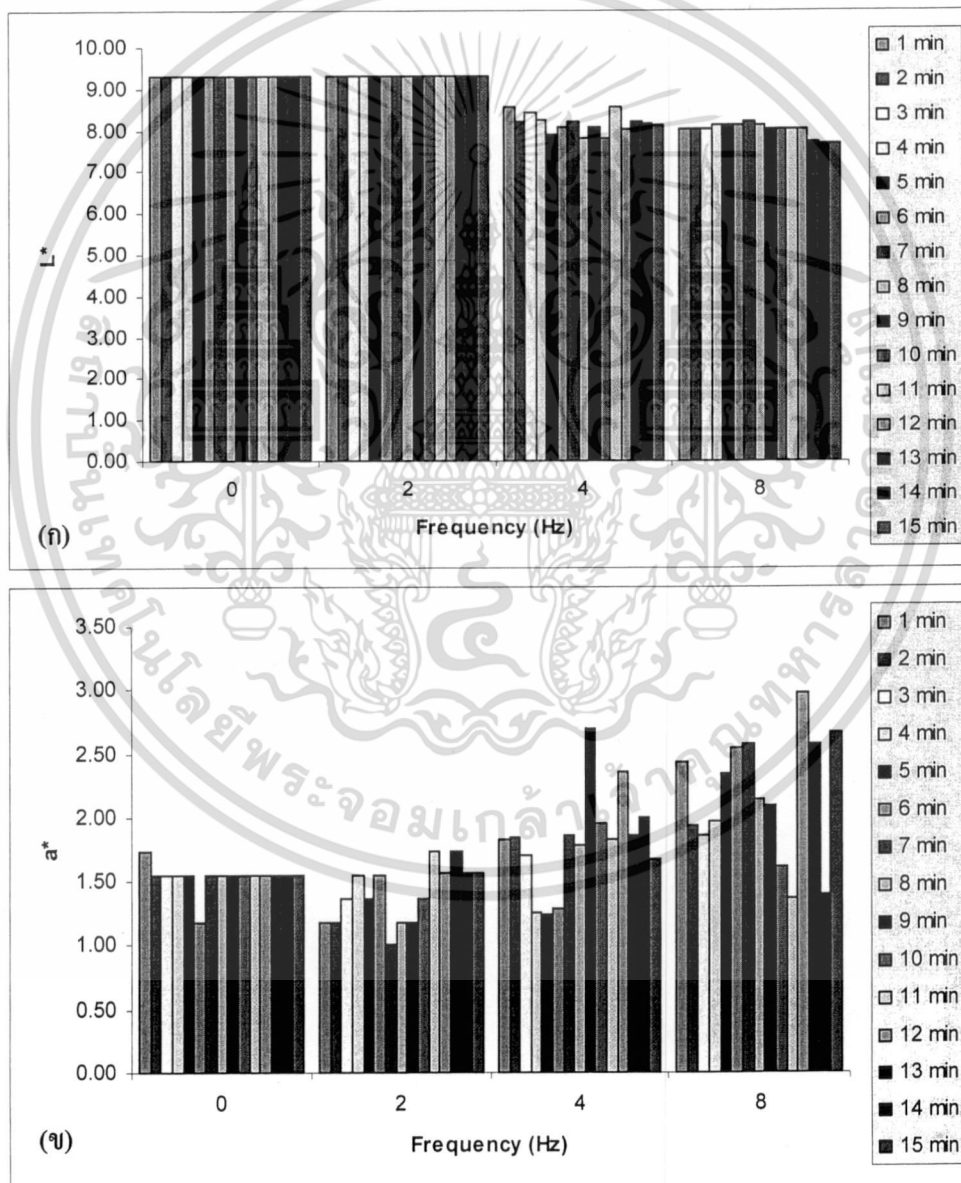
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกึ่งกลางของน้กเกิดไก่กับเวลาที่ความถี่ต่างๆ

อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิน้กเกิดไก่สุก) เมื่อเพิ่มความถี่ในการเขย่าน้ำมันพบว่าเวลาที่ใช้ในการทอดน้กเกิดไก่ให้สุกไม่ต่างกันมากนัก

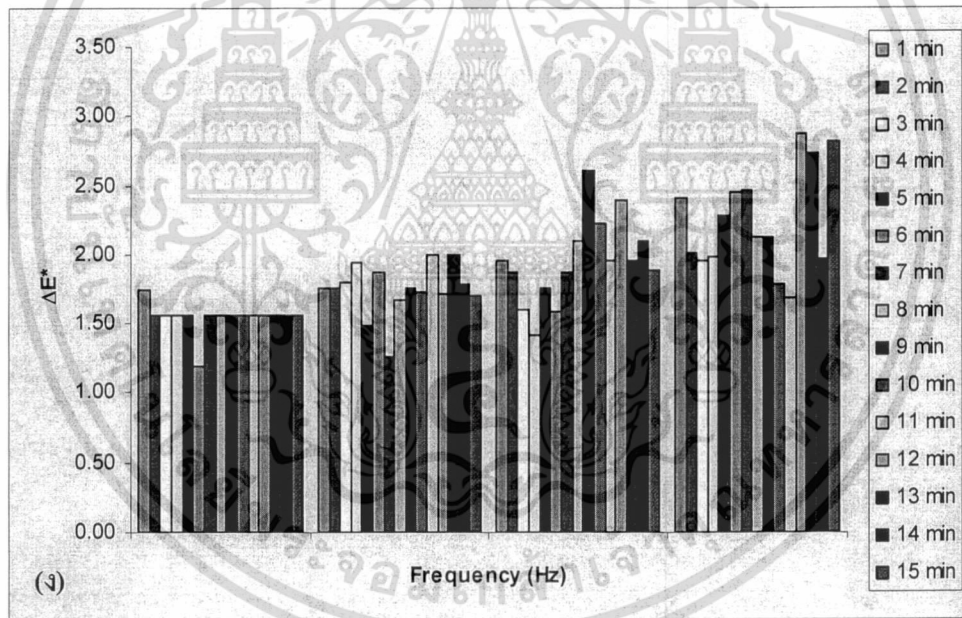
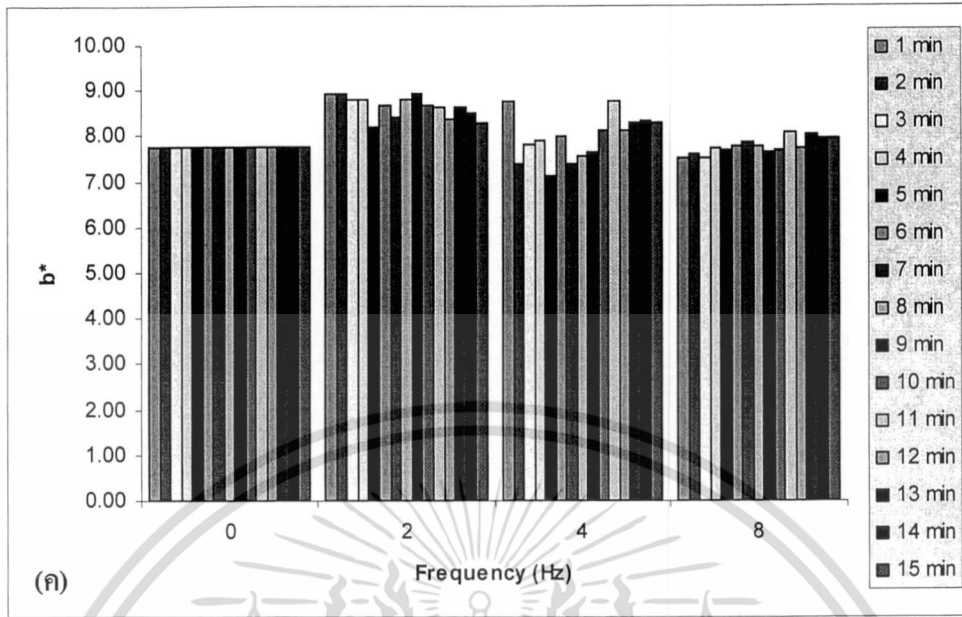
#### 4.2.1 คุณภาพน้ำมัน

##### 4.2.1.1 การวิเคราะห์ค่าสี

พิจารณาผลของเวลาและความถี่ที่ใช้ในการเขย่าน้ำมันที่มีผลต่อค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมัน พบว่าเมื่อทอดนักเกิดไก่อแบบน้ำมันท่วมที่ความถี่เดียวกัน เวลาเพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำมัน มีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะเวลาในการทอด 15 นาที ดังภาพที่ 4.9 จากงานวิจัยพบว่าค่าสีของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้ระยะเวลาในการทอด 36 ชั่วโมง (เนื้อทอง วนานูวัธ และคณะ)



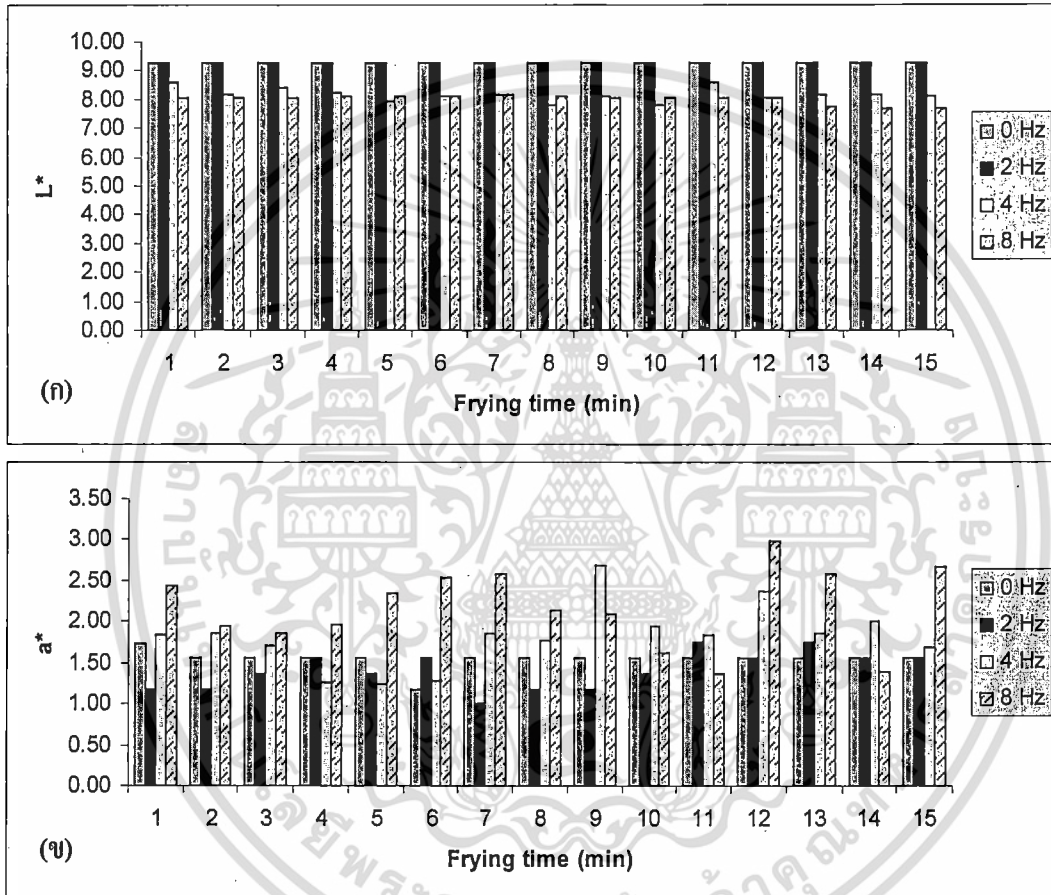
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



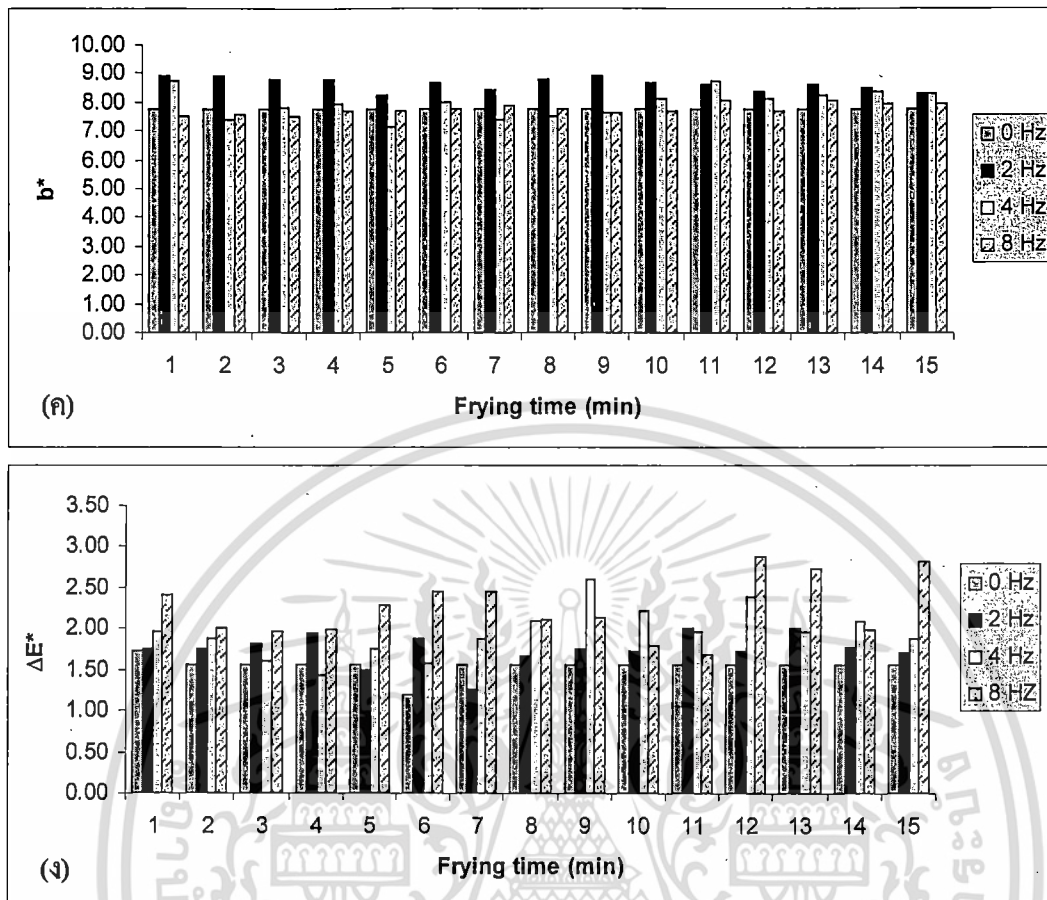
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้ำมันที่ใช้ทอดกับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที  
 (ก) ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) (ข) ค่าความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) (ค) ค่าความเป็นเหลือง ( $b^*$ ) (ง) ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta E^*$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามเมื่อทอดคนกึ่งไก่แบบน้ำมันท่วมที่เวลาเดียวกัน ความถี่เพิ่มขึ้น ค่าความสว่างจะลดลง และค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น โดยค่าความสว่าง(L)และค่าความเป็นสีแดง(a\*)สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้อย่างชัดเจน คือ กลุ่ม 0, 2 เฮิรตซ์ และกลุ่ม 4, 8 เฮิรตซ์ ดังภาพที่ 4.10 สรุปได้ว่าระยะเวลาในการทอดคนกึ่งไก่แบบน้ำมันท่วม ไม่มีผลต่อค่าสีของน้ำมัน แต่ความถี่ในการเขย่าน้ำมันมีผลต่อค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงของน้ำมัน



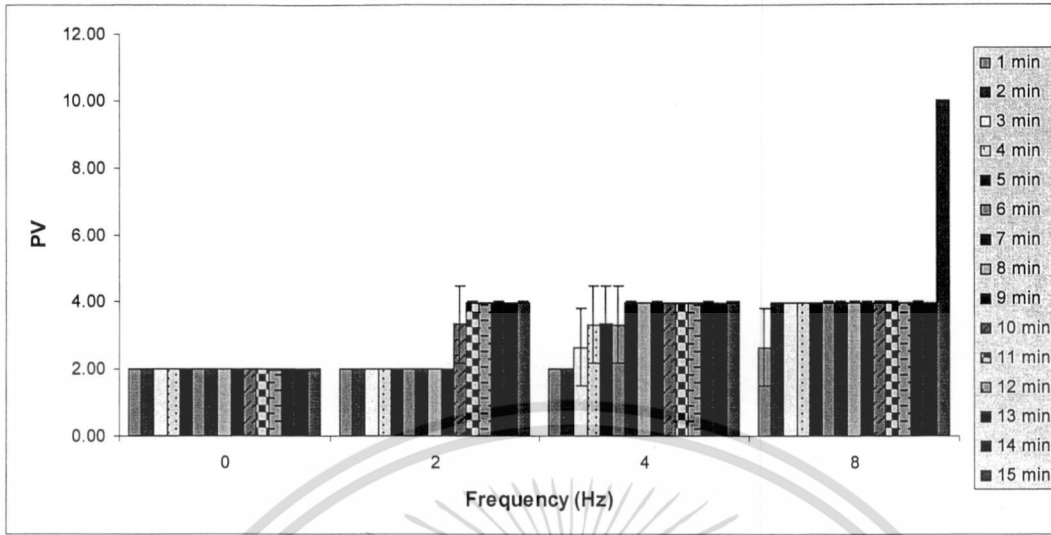
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้ำมันที่ใช้ทอดกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิร์ตซ์  
(ก) ค่าความสว่าง (L\*) (ข) ค่าความเป็นสีแดง (a\*) (ค) ค่าความเป็นเหลือง (b\*) (ง) ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta E^*$ )

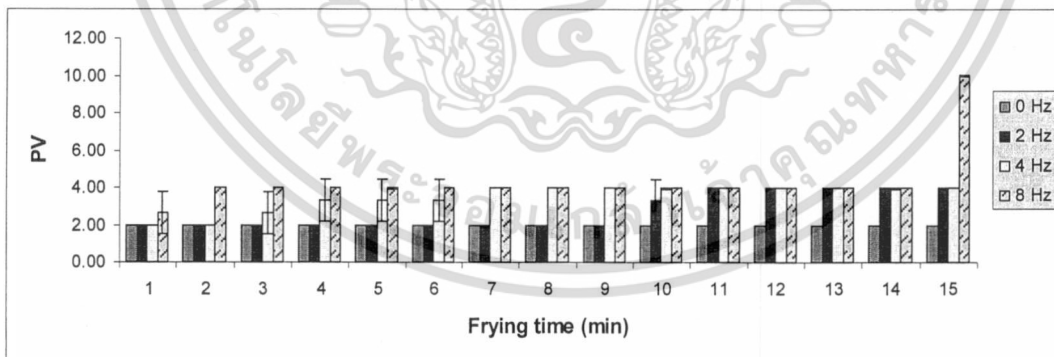
#### 4.2.1.2 การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์

พิจารณาผลของเวลาและความถี่ที่ใช้ในการเขย่าน้ำมันที่มีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันเมื่อทอดนักเก็ตไก่แบบน้ำมันท่วมที่ความถี่เดียวกัน เวลาเพิ่มขึ้น พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ความถี่ 0 เฮิร์ตซ์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) ดังตารางที่ 4.3 แต่ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันตั้งแต่ที่ความถี่ 2 เฮิร์ตซ์ขึ้นไป ดังภาพที่ 4.11 มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) ทั้งนี้เนื่องจากการให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้น้ำมันเกิดการออกซิเดชันเนื่องจากมีปริมาณน้ำออกมาจากอาหารระหว่างการทอด (วิลโลว์ รังสาทอง, 2546)



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ใช้ทอดกับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที

อย่างไรก็ตามเมื่อทอดน้กเกิดไก่อแบบน้ำมันท่วมที่เวลาเดียวกัน ความถี่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่เวลา 1 นาที ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) แต่ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันตั้งแต่ที่เวลา 2 นาทีขึ้นไป ดังภาพที่ 4.12 มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) ทั้งนี้เนื่องจากการเขย่าทำให้เกิดการปั่นป่วนในน้ำมัน น้ำมันจึงสัมผัสกับออกซิเจนมากขึ้น สรุปได้ว่าระยะเวลาในการทอดแบบน้ำมันท่วม และความถี่ในการเขย่าน้ำมัน มีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมัน ยกเว้นที่ความถี่ 0 เฮิรตซ์ เวลาเพิ่มขึ้น และที่เวลา 1 นาที ความถี่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ใช้ทอดกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ใช้ทอดที่เวลาและความถี่ต่างๆ

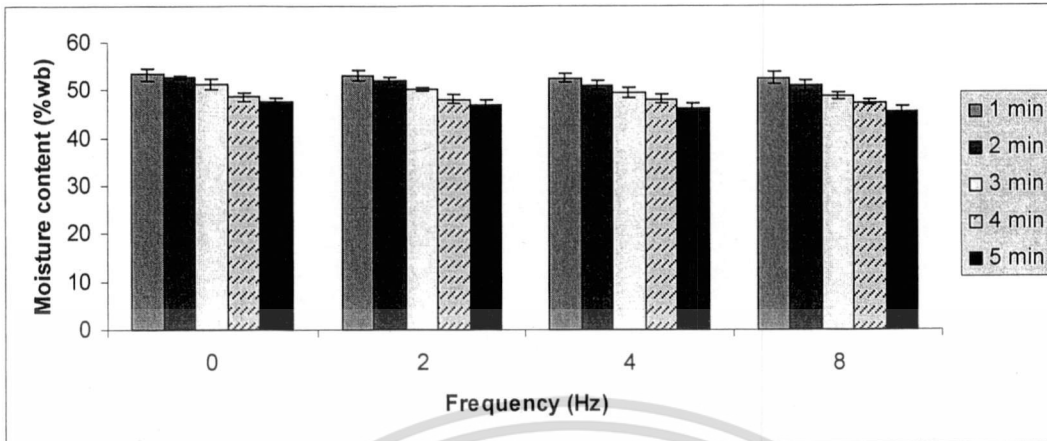
ค่า PV	0 Hz	2 Hz	4 Hz	8 Hz
1 min	1.9930±0.0046b,A	1.9960±0.0000b,A	1.9933±0.0046ab,A	2.6533±1.1455b,A
2 min	1.9893±0.0061b,A	1.9920±0.0040b,A	1.9960±0.0000ab,A	3.9787±0.0122c,B
3 min	1.9960±0.0000b,A	1.9933±0.0046b,A	2.6547±1.1443bc,A	3.9707±0.0046c,B
4 min	1.9907±0.0023b,A	1.9920±0.0040b,A	3.3213±1.1547cd,B	3.9760±0.0080c,B
5 min	1.9933±0.0046b,A	1.9867±0.0115b,A	3.3253±1.1547cd,B	3.9680±0.0080c,B
6 min	1.9920±0.0040b,A	1.9960±0.0000b,A	3.3160±1.1432cd,B	3.9813±0.0122c,B
7 min	1.9920±0.0040b,A	1.9920±0.0040b,A	3.9920±0.0160d,B	3.9867±0.0185c,B
8 min	1.9933±0.0046b,A	1.9920±0.0040b,A	3.9920±0.0000d,B	3.9867±0.0167c,B
9 min	1.9907±0.0061b,A	1.9920±0.0069b,A	3.9813±0.0122d,B	3.9920±0.0240c,B
10 min	1.9920±0.0057b,A	3.3307±1.1455c,B	3.9760±0.0160d,B	3.9920±0.0212c,B
11 min	1.9947±0.0023b,A	3.9893±0.0046d,B	3.9840±0.0080d,BC	3.9973±0.0092c,C
12 min	1.9907±0.0061b,A	3.9813±0.0046d,B	3.9920±0.0000d,C	3.9760±0.0080c,B
13 min	1.9907±0.0046b,A	3.9813±0.0122d,B	3.9920±0.0240d,B	3.9867±0.0201c,B
14 min	1.9947±0.0023b,A	3.9813±0.0092d,B	3.9707±0.0185d,C	3.9920±0.0000c,BC
15 min	1.9907±0.0092b,A	3.9840±0.0288d,B	4.0027±0.0185d,B	9.9893±0.0201d,B

หมายเหตุ : 1. ข้อมูลที่มีตัวเลขอยู่ด้านหลัง หมายถึง จำนวนซ้ำการทดลอง 2. ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a b c และ d) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.5$ ) 3. ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละคอลัมน์ (A B C และ D) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.5$ )

#### 4.2.2 คุณภาพของผลิตภัณฑ์

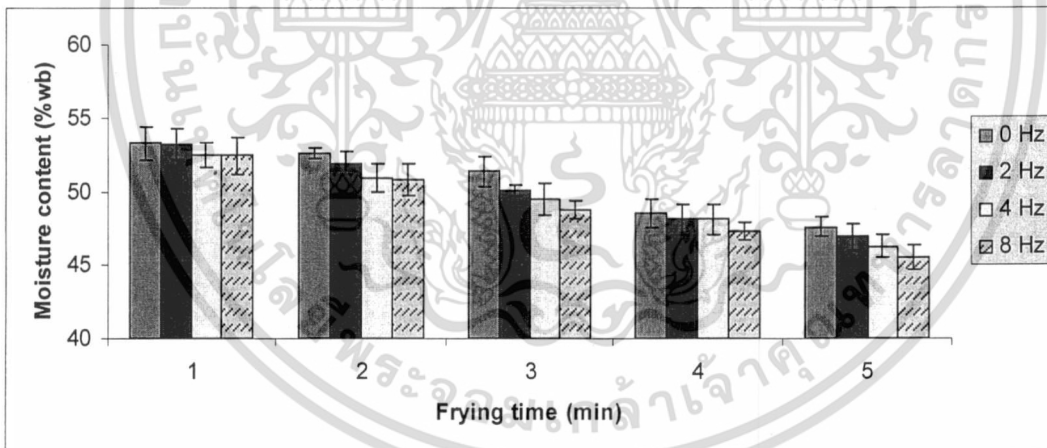
##### 4.2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

พิจารณาผลของเวลาและความถี่ที่ใช้ในการเขย่าน้ำมันที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของนักเก็ตไก่ เมื่อทอดแบบน้ำมันท่วมที่เวลาเดียวกัน ความถี่เพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณความชื้นของนักเก็ตไก่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4.13 เนื่องจากการเพิ่มความถี่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้อาหารได้รับความร้อนเร็วขึ้น การระเหยน้ำในอาหารจึงเร็วขึ้น (วิไล รังสาตทอง, 2546)



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของนั้กเกิดไ้กับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที

อย่างไรก็ตามเมื่อทอดนั้กเกิดไ้แบบน้ำมันท่วมที่เวลาเดียวกัน ความถี่เพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณความชื้นของนั้กเกิดไ้ลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4.14 เนื่องจากบริเวณผิวหน้าอาหารเกิดการระเหยน้ำมากขึ้น (วิไล รังสาทอง, 2546) สรุปได้ว่าระยะเวลาในการทอดแบบน้ำมันท่วม และความถี่ในการเขย่าน้ำมัน มีผลต่อปริมาณความชื้นของนั้กเกิดไ้ โดยมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของนั้กเกิดไ้กับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณความชื้นของน้กเก็ตไก่ที่ทอดที่เวลาและความถี่ต่างๆ

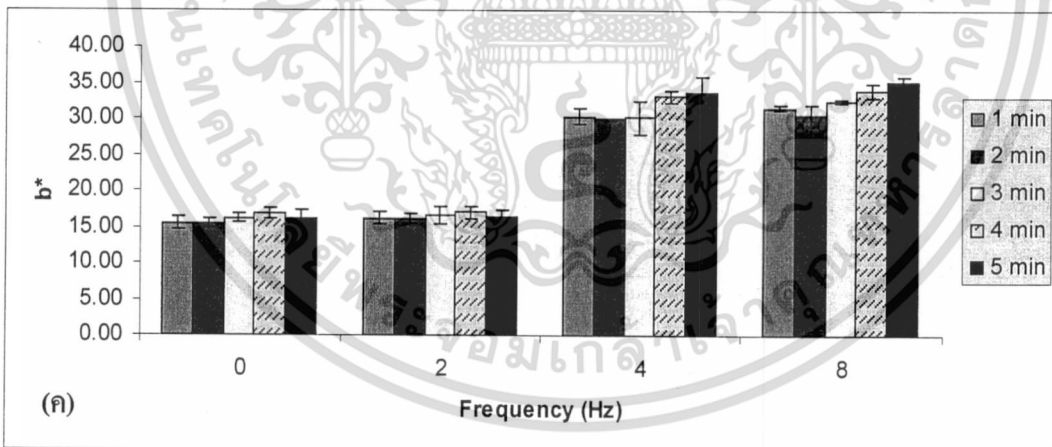
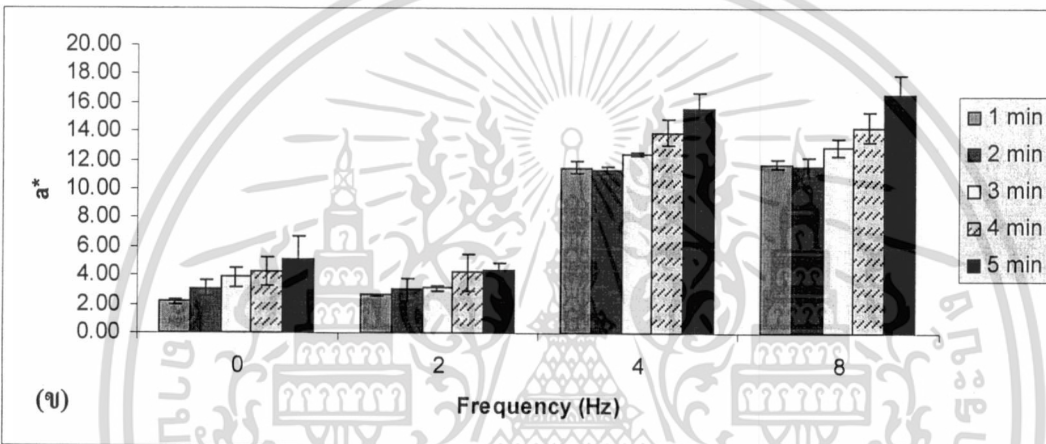
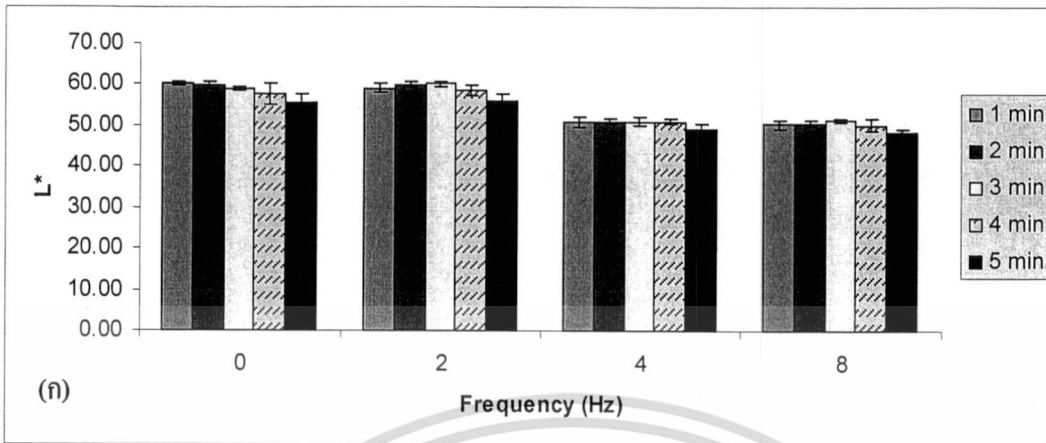
เวลา (นาที)	Moisture content (%wb)			
	0 Hz	2 Hz	4 Hz	8 Hz
1	53.2338±1.1759a,A	53.1470±1.1098a,A	52.4677±0.8098a,A	52.4111±1.2228a,A
2	52.5695±1.0405b,B	51.9073±0.8192b,AB	50.9422±0.9683a,AB	50.7747±1.1240a,A
3	51.3383±1.0429c,B	50.0330±0.3911b,AB	49.4423±1.0515ab,A	48.6888±0.5941a,A
4	48.4962±0.9716b,A	48.0920±0.9677ab,A	48.0903±1.0240ab,A	47.3568±0.6066a,A
5	47.5797±0.6893c,B	46.9009±0.8991bc,B	46.2723±0.7427ab,AB	45.5250±0.8487a,A

หมายเหตุ : 1. ข้อมูลที่มีตัวเลขอยู่ด้านหลัง หมายถึง จำนวนซ้ำการทดลอง 2. ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a b c และ d) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.5$ ) 3. ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละคอลัมน์ (A B C และ D) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.5$ )

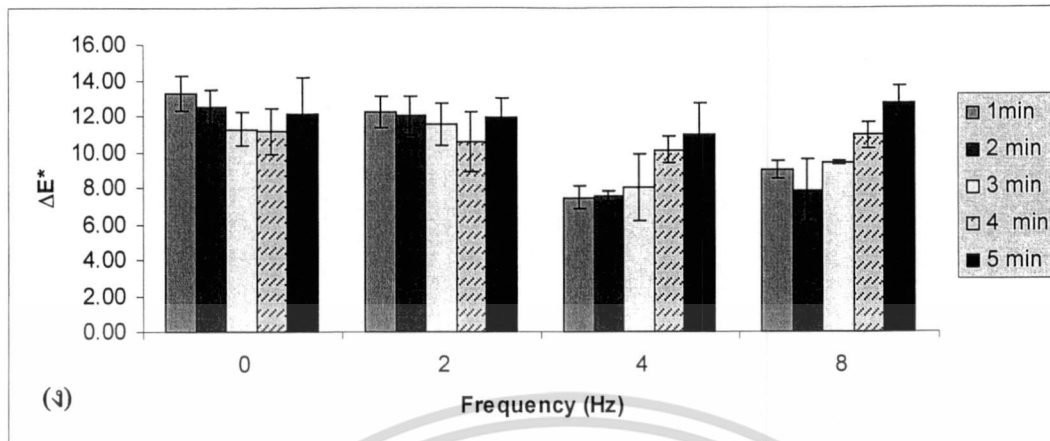
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นของน้กเก็ตไก่ที่ทอดแบบน้ำมันท่วมกับน้กเก็ตไก่ธรรมดาพบว่าเมื่อทอดน้กเก็ตไก่เมื่อให้ความร้อนกับน้ำมันเป็นเวลานานขึ้น ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันเพิ่มขึ้นจากเดิม แต่มีค่าไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบน้ำมันที่ให้ความร้อนกับน้ำมันที่ใช้ทอดน้กเก็ตแบบน้ำมันท่วมแล้ว พบว่าระยะเวลาที่ใช้ทอดน้กเก็ต 15 นาที ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูงขึ้นเร็วกว่าน้ำมันที่ให้ความร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

#### 4.2.2.2 การวิเคราะห์ค่าสี

พิจารณาผลของเวลาและความถี่ที่ใช้ในการเขี่ยน้ำมันที่มีผลต่อค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของน้กเก็ตไก่ เมื่อทอดแบบน้ำมันท่วมที่ความถี่เดียวกัน เวลาเพิ่มขึ้นพบว่าค่าความสว่างลดลง(ก) ค่าความเป็นสีแดง(ข)และค่าความเป็นสีเหลือง(ค)เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.15

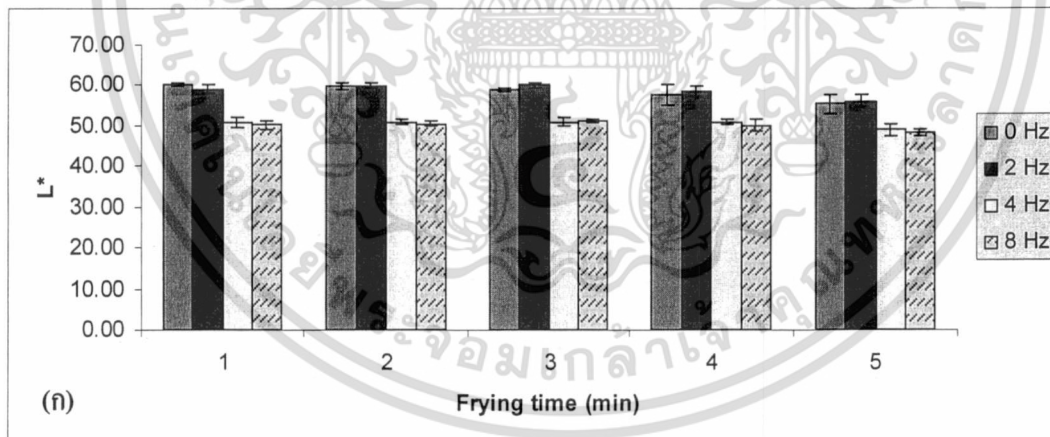


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

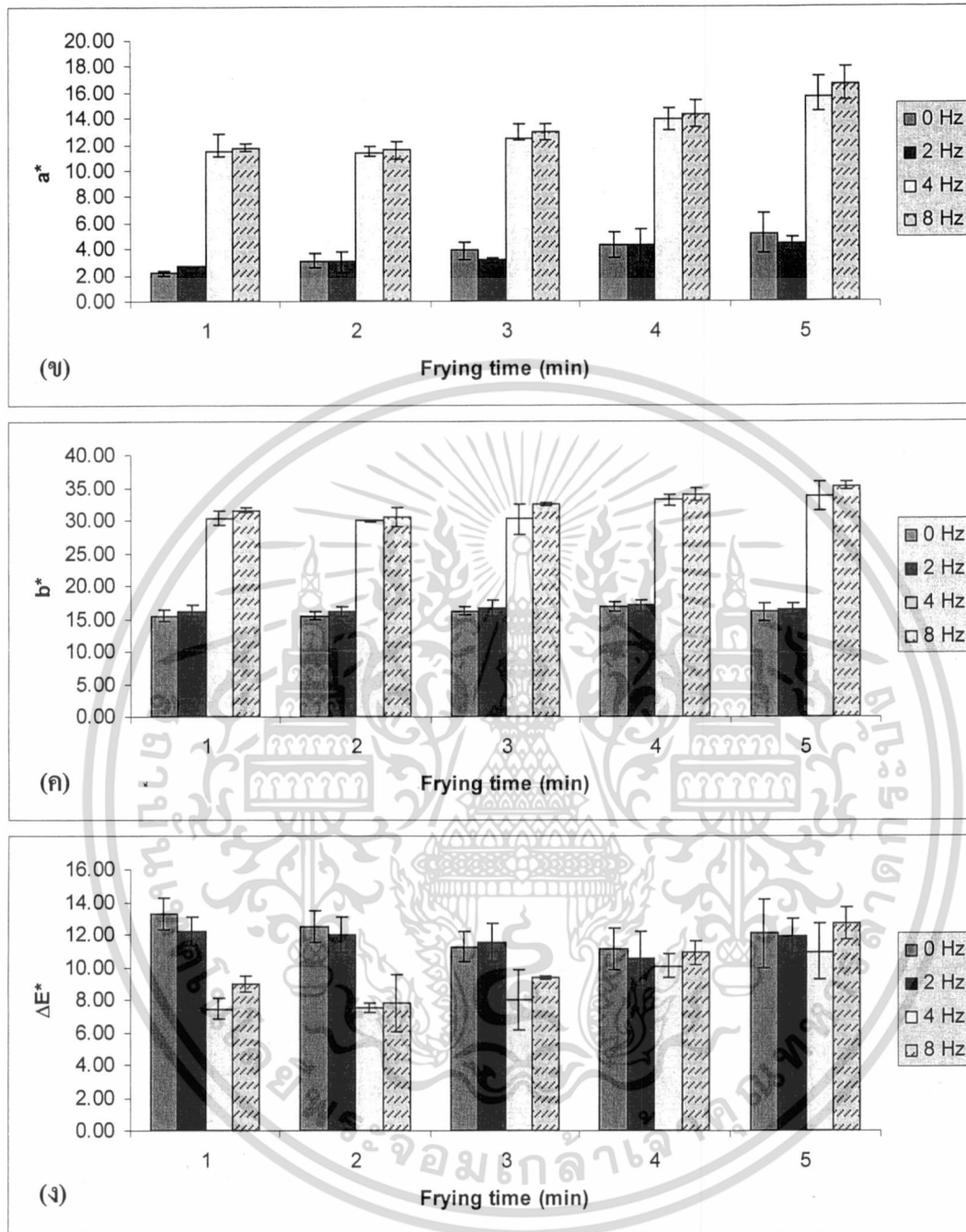


ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้อกเก็ตไก่กับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที (ก) ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) (ข) ค่าความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) (ค) ค่าความเป็นเหลือง ( $b^*$ ) (ง) ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta E^*$ )

อย่างไรก็ตามเมื่อทอดน้อกเก็ตไก่แบบน้ำมันท่วมที่เวลาเดียวกัน ความถี่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าความสว่างลดลง(ก) ค่าความเป็นสีแดง(ข)และค่าความเป็นสีเหลือง(ค)เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.16 สรุปได้ว่าระยะเวลาในการทอดน้อกเก็ตไก่แบบน้ำมันท่วมและความถี่ในการเขย่าน้ำมันมีผลต่อค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลืองของน้ำมัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



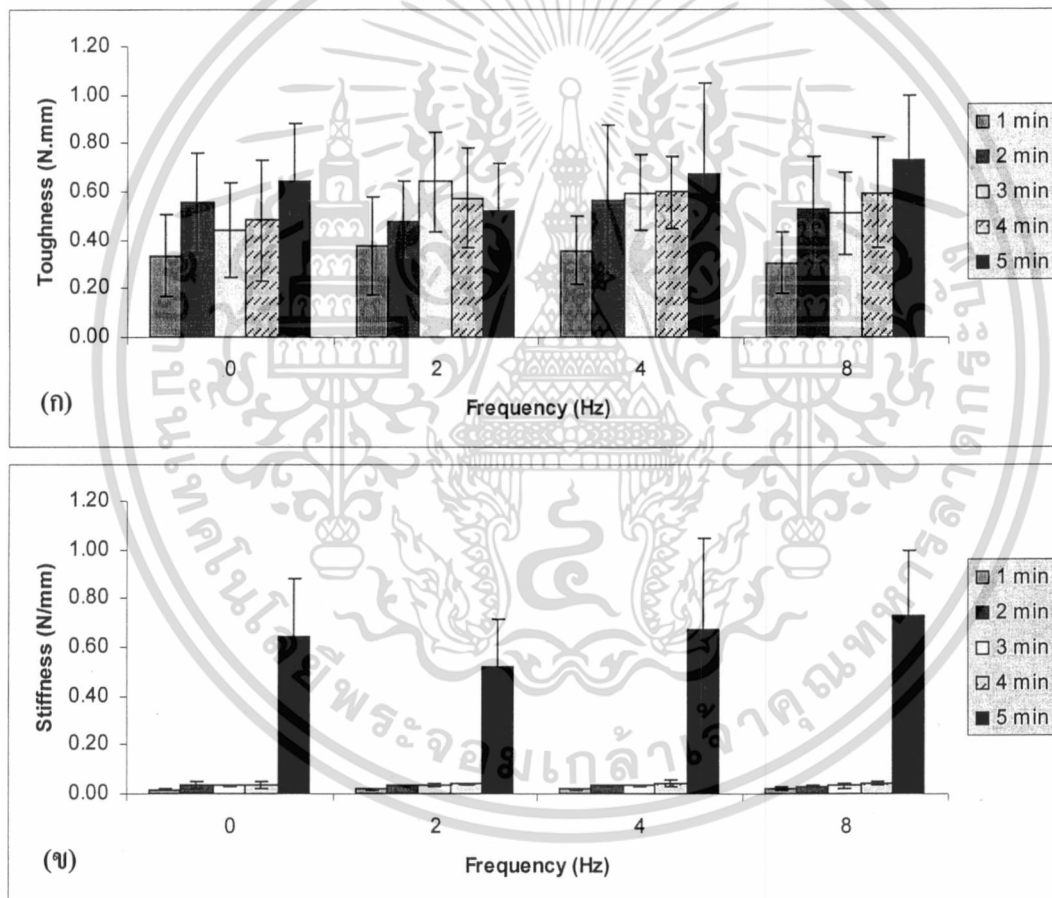
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของน้กเก็ตไค้กับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิรตซ์

(ก) ค่าความสว่าง (L\*) (ข) ค่าความเป็นสีแดง (a\*) (ค) ค่าความเป็นเหลือง (b\*) (ง) ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง (ΔE\*)

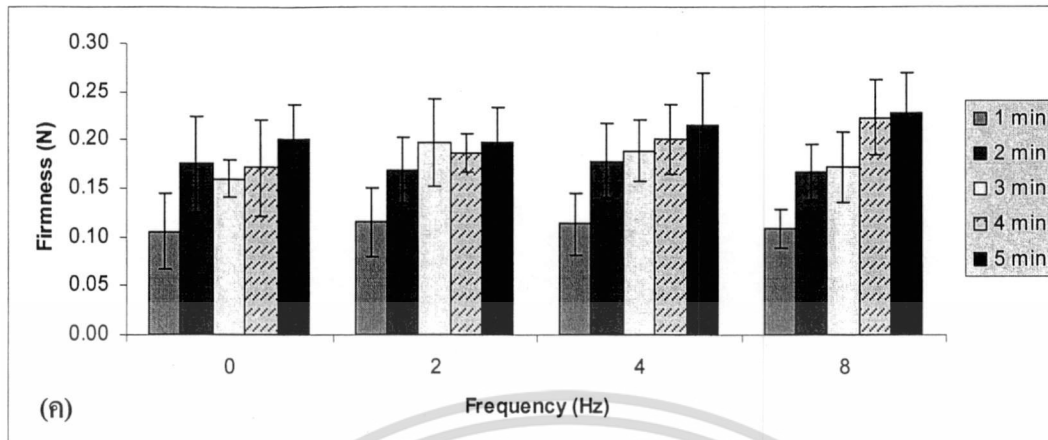
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3.3 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

พิจารณาผลของเวลาและความถี่ที่ใช้ในการเขย่าน้ำมันที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ เมื่อทอดแบบน้ำมันท่วม ค่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุ ค่าความแน่นเนื้อ และค่าความแข็ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ไม่พบความแตกต่าง จึงไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน เวลาเพิ่มขึ้น พบว่าความแข็ง (ก) ความแน่นเนื้อ(ข) และพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุ(ค) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.17 เนื่องจากในระหว่างการทอดความร้อนจะทำให้โปรตีนเปลี่ยนแปลง อาหารจึงมีเนื้อสัมผัสที่แข็งและแน่นขึ้น (วิไล รังสาทอง, 2546) ดังนั้นแรงที่ต้านเมื่อต้องการเจาะทะลุจึงมีค่ามาก จึงต้องใช้พลังงานในการเจาะทะลุมากขึ้น



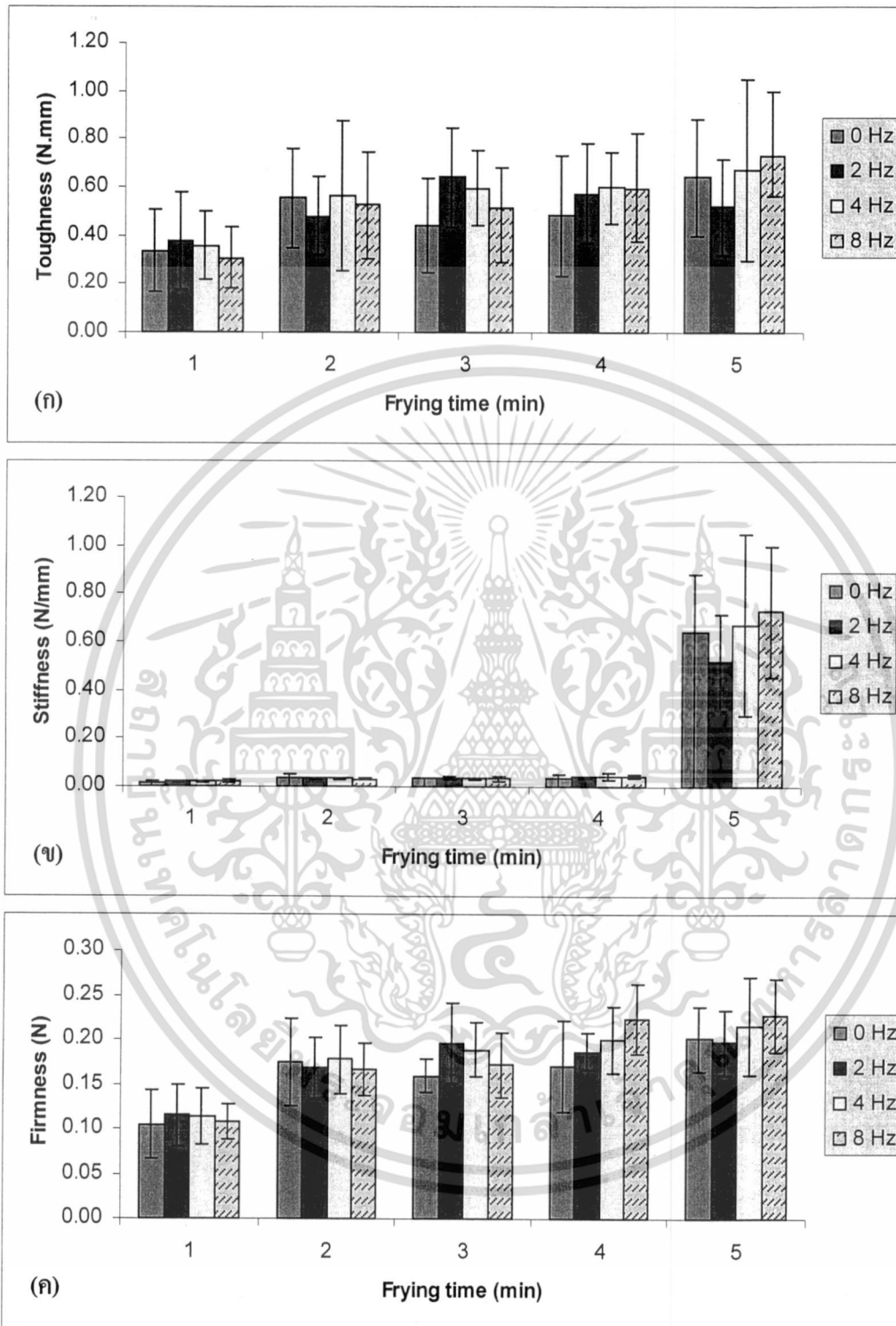
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่กับความถี่ที่เวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที

(ก) Toughness (ข) Stiffness (ค) Firmness

อย่างไรก็ตามเมื่อทอดนักเก็ตไก่แบบน้ำมันท่วมที่เวลาเดียวกัน ความถี่เพิ่มขึ้น พบว่าความแข็ง(ก) และพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุ(ค) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนความแน่นเนื้อ(ข)เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่นาที่ที่ 5 ของทุกๆ ความถี่ ดังภาพที่ 4.18 สรุปได้ว่าระยะเวลาในการทอดนักเก็ตไก่แบบน้ำมันท่วมมีผลต่อความแข็ง พลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุ และความแน่นเนื้อ แต่ความถี่ในการเขย่าน้ำมัน มีผลต่อความแน่นเนื้ออย่างเดียว ส่วนความแข็ง และพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุ มีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อสัมผัสกับเวลาที่ความถี่ 0 2 4 และ 8 เฮิรตซ์

(ก) Toughness (ข) Stiffness (ค) Firmness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ที่เวลาและความถี่ต่างๆ

ความถี่	เวลา	Area (Toughness)	Slope YP(Stiffness)	Force YP (Firmness)
0 Hz	1 min	0.3345±0.1688	0.0173±0.0044	0.1049±0.0388
	2 min	0.5538±0.2035	0.0346±0.0157	0.1744±0.0494
	3 min	0.4396±0.1959	0.0344±0.0053	0.1598±0.0194
	4 min	0.4822±0.2483	0.0372±0.0125	0.1708±0.0505
	5 min	0.6423±0.2422	0.6423±0.2422	0.2014±0.0359
2 Hz	1 min	0.3782±0.2029	0.0189±0.0045	0.1149±0.0350
	2 min	0.4781±0.1624	0.0327±0.0047	0.1677±0.0341
	3 min	0.6403±0.2037	0.0359±0.0090	0.1962±0.0452
	4 min	0.5738±0.2043	0.0398±0.0066	0.1863±0.0206
	5 min	0.5173±0.1969	0.5173±0.1969	0.1971±0.0359
4 Hz	1 min	0.3558±0.1406	0.0201±0.0047	0.1134±0.0313
	2 min	0.5644±0.3084	0.0335±0.0056	0.1777±0.0383
	3 min	0.5957±0.1563	0.0338±0.0051	0.1888±0.0309
	4 min	0.5995±0.1481	0.0416±0.0133	0.2006±0.0370
	5 min	0.6721±0.3761	0.6721±0.3761	0.2157±0.0541
8 Hz	1 min	0.3068±0.1269	0.0213±0.0047	0.1083±0.0199
	2 min	0.5247±0.2217	0.0301±0.0047	0.1659±0.0293
	3 min	0.5097±0.1690	0.0329±0.0078	0.1716±0.0364
	4 min	0.5952±0.2283	0.0437±0.0087	0.2231±0.0396
	5 min	0.7294±0.2714	0.7294±0.2714	0.2279±0.0407

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

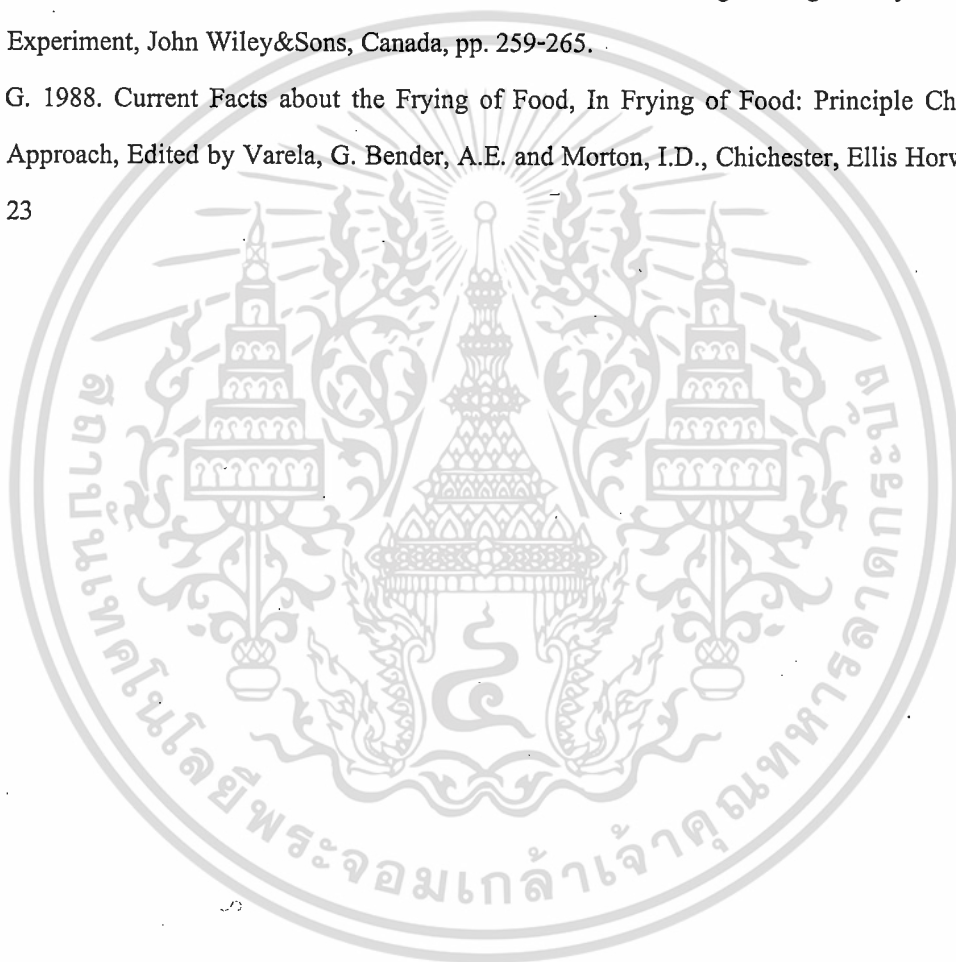
### สรุปผลการวิจัย

1. การทอดแบบน้ำมันท่วมโดยการเขย่าที่ความถี่เพิ่มขึ้นมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยความถี่ 0, 2, 4 และ 8 เฮิรตซ์ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่า  $530.24 \pm 13.50$ ,  $764.47 \pm 19.91$ ,  $1036.89 \pm 50.54$ ,  $1326.61 \pm 53.81$  ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) ตามลำดับ
2. การเขย่าน้ำมันสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนให้สูงขึ้นได้ โดยทำให้กลไกการทอดดีขึ้น
3. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการเขย่า ทำให้น้ำมันมีค่าความสว่างลดลง และมีค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ที่มีค่าความสว่างลดลง ปริมาณความชื้นลดลง มีความแข็ง และความแน่นเนื้อมากขึ้น ทำให้ต้องใช้พลังงานในการเจาะทะลุมากขึ้น
4. การเขย่าในระหว่างการทอดทำให้น้ำมันมีโอกาสสัมผัสกับอากาศมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้น้ำมันมีคุณภาพลดลง โดยค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตามความถี่ในการเขย่าที่เพิ่มมากขึ้น

### บรรณานุกรม

- เนื้อทอง วนานุวัชร และคณะ. 2547. การทอดปลาทอดโกโก้. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะ  
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วิไล รังสาดทอง. การทอด. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่3. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าพระนครเหนือ; 2546. หน้า 312-319.
- Brown, H.P. 1960. Problem of the Potato Chip Industry Processing and Technology, *Advance in Food  
Research*, Vol. 56, No.1, pp. 586-590.
- Farkas, B.E., Singh, R.P. and Rumsen, T.R. 1996. Modelling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying  
I: Model Development, *Journal of Food Engineering*, Vol.29, No.1, pp. 221-226.
- Fellow, P.J. 1990. *Food Processing Technology Principles and Practices*, Ellis Horwood, London, pp. 329-  
340.
- Gamble, M.H., Rice, P. and Selman, J.E. 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.
- Guillaumin, R. 1988. Kinetics of Fat Penetration in Food, In *Frying of Food: Principle, Changes, New  
Approach*, Edited by Varela, G. Bember, A.E. and Morton, I.D., Chichester, Ellis Horwood, pp.  
83-89.
- 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.
- 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.
- Melluma, M. 2003. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods, *Trends in Food Science  
and Technology*.
- Ngadi, M., Li, Y. and Oluka, S. 2007. Quality changes in chicken nuggets fried in oils with different  
degrees of hydrogenatation, *LWT*. 40, pp. 1784-1791.

- Palua, J. 1993. Deep-Fat Frying of Tortilla Chips: An Integrated Approach, Master of Engineering Thesis, Agricultural Engineering Program, Texas A&M University, pp. 1-87.
- 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.
- Singh, R.P. 1995. Heat and Mass Transfer in Food during Deep Fat Frying, Food Technology, Vol. 49, No. 4, pp. 134-137.
- Sharma, S.K. Mulvance, S.J. and Rizvi, S.S.H. 2000. Food Process Engineering Theory and Laboratory Experiment, John Wiley&Sons, Canada, pp. 259-265.
- Varela, G. 1988. Current Facts about the 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

## ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนาค

เพศ  ชาย  หญิง วันเดือนปีเกิด 07 กันยายน 2519 อายุ 36 ปีสถานภาพ  โสด  สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

## ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมเกษตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า- เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2542
M.Eng.	Post-Harvest and Food Process Engineering	Asian Institute of Technology	2545
Dr.Nat.tech	Food Technology	University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria	2549

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ Food Properties (Mechanical, Optical, Thermal and Textural Properties),  
Measurement and Instruments in Food Processing, Hygienic Design of Food Processing Equipment

## ตำรา

- นวกัทธา หนูนาค และ ทวีพล ชื่อสัตย์. 2555. การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 316 หน้า

## ผลงานวิชาการ

## International Journals

- Nunak N. and Schleining G. (2011). Instrumental Textural Changes in Raw White Shrimp during Iced Storage. Journal of Aquatic Food Product Technology, 20, 4, 350-360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Pimpen Pornchaloempong Panmanas Sirisomboon and **Navapattra Nunak**. 2011. Mass-Volume-Area properties of frozen Skipjack tuna. *International Journal of Food Properties* Available online: 12 Feb 2011
- **N.Nunak** and T.Suesut. (2010). Measuring geometric mean diameter of fruits and vegetables using light sectioning method. *Songklanakarin Journal Science Technology*
- **Nunak N.** and Schleining G. (2006). A rapid blade cutting method for the evaluation of osmotic dehydration of apples and potatoes. *Journal of Texture Studies*, 37, 1, 80-92
- Jarimopas B., Nunak T., and **Nunak N.** (2005). Electronic device for measuring volume of selected fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 35, 25-31

#### National Journals

- นวภัทรา หนูนาค และ อมรรัตน์ มุขประเสริฐ, “จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติกไซโป้วหวาน”, *วิศวกรรมสาร มช.*, ปีที่ 38, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2554
- นวภัทรา หนูนาค, “ปัจจัยและกระบวนการเบื้องต้นที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลของชิ้นอาหารในระหว่างกระบวนการออสโมติก”, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2552

#### Selected Proceedings

- **Navapattra Nunak** and Kiattisak Roonprasang, “Use of Electrical Conductivity to Monitor Gel Forming of Soft-Tofu, Hanoi, Vietnam, 3<sup>rd</sup>-4<sup>th</sup> March, 2011
- **Navapattra Nunak** and Taweepol Suesut, “Design of an Instrument for Concentration Control of Sugar Solution during Osmotic Process”, *International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010*
- **Navapattra Nunak**, Teerawat Nunak and Taweepol Suesut, “Identification of Thermal Distribution in Liquid during Ohmic Heating Process by Infrared Thermography”, *International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010*

- **Navaphattra Nunak** and Taweepol Suesut, “Fish Species Sorting and Size Estimation using Laser Light Sectioning”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010
- **Navaphattra Nunak** and Taweepol Suesut, “Electrical Conductivity of Bonito Tuna during Ohmic Thawing”, International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1<sup>st</sup> – 3<sup>rd</sup> April, 2009
- **Navaphattra Nunak**, Taweepol Suesut, and Sarayut Inthuset, “Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning”, International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1<sup>st</sup> – 3<sup>rd</sup> April, 2009
- **N.NUNAK** and **G.SCHLEINING**, “Evaluation of the water transfer in osmotically dehydrated fruit and vegetables using TA-XT2”, International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/ Production Technology, 21 – 24 January 2007, pp.
- **Schleining, G. and Nunak, N.** A rapid texture measurement method to determine the mass transfer in osmotically dehydrated plant products. In: Pedro Fito and Fidel Toldra: Intrafood 2005: Innovations in Traditional foods, 25-28 October, Valencia; Conference Proceedings, Vol 1, 261-264; Elsevier, London; ISBN 84-9705-880-1.