



การศึกษาปัจจัยและสถานะการผลิตเพื่อพัฒนาระบบการทอดแบบฟ้นฝอย

โดย

นางสาวจันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาปัจจัยและสถานะการผลิตเพื่อพัฒนาระบบการทอดแบบฟ้นฝอย

โดย

นางสาวจันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**THE STUDY OF PROCESSING FACTORS AND CONDITIONS FOR THE
DEVELOPMENT OF SPRAY FRYING SYSTEM**

By

Janjira Tangsantaskul

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

MASTER OF SCIENCE

Department of Food Technology

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2011

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาปัจจัยและ
สภาวะการผลิตเพื่อพัฒนาระบบการทอดแบบฟ้นฝอย ” เสนอโดย นางสาวจันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินดวงศ์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณศรี ลีจิระจำเนียร)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข กระจุกสุขสถิตย์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินดวงศ์)

...../...../.....

53403202 : สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

คำสำคัญ : ข้าวตัง/การทอดแบบพ่นฝอย/การดูดซับน้ำมัน/การสลัดเหวี่ยง

จันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล : การศึกษาปัจจัยและสภาวะการผลิตเพื่อพัฒนาระบบการทอดแบบพ่นฝอย. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.บัณฑิต อินดวงศ์. 136 หน้า.

กระบวนการทอดแบบพ่นฝอย เป็นนวัตกรรมที่ทันสมัยในการฉีดพ่นละอองน้ำมันร้อนที่มีแรงดันสูงผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทอด โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำมันทอดอย่างสม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ผ่านละอองน้ำมันร้อน ซึ่งเปรียบเสมือนทำการทอดอยู่ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ใช้แผ่นข้าวตังเป็นวัตถุดิบ ทำการทดลองทอดที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 17 วินาที โดยกำหนดสภาวะอัตราการพ่นฝอยน้ำมันที่ 3 ระดับคือ 0.3, 0.5 และ 0.7 ลิตร/วินาที ความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอดที่ 60, 80 และ 100 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเลือกสภาวะการทอดที่ดีที่สุดไปศึกษาสภาวะการสลัดเหวี่ยงน้ำมันหลังกระบวนการทอดที่ความเร็ว 600, 800 และ 1000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 6 นาทีตามลำดับ พบว่าแผ่นข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยจะมีการดูดซับน้ำมันในปริมาณที่น้อยกว่ากระบวนการทอดแบบจุ่ม ซึ่งสภาวะที่ใช้อัตราการพ่นน้ำมัน 0.3 ลิตรต่อวินาที และความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นสภาวะการทอดที่ดีที่สุด สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ และให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สุด และเมื่อพิจารณาผลการสลัดเหวี่ยงน้ำมันหลังกระบวนการทอด พบว่าที่การสลัดเหวี่ยงที่สภาวะความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เวลา 4 นาที เป็นสภาวะที่ดีที่สุด สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันลงได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการสลัดเหวี่ยง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า กระบวนการทอดแบบพ่นฝอยสามารถลดปริมาณการดูดซับในน้ำมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดได้

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

53403202 : MAJOR : FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : RICE CRACKER/SPRAY FRY/OIL UPTAKE/CENTRIFUGE

JANJIRA TANGSANTASKUL : THE STUDY OF PROCESSING FACTORS AND
CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SPRAY FRYING SYSTEM. THESIS ADVISOR :
ASST.PROF. BHUNDIT INNAWONG, Ph.D. 136 pp.

Spray frying is one of the cooking methods that sprays hot oil on the food. Hot oil is controlled proper temperature and speed continuously. This work reports the study of effect of spray frying conditions on the moisture retention and oil uptake of fried rice crackers.

The spraying oil rate and speed of frying pot was varied to find the optimized condition for spray frying. Both deep frying and spray frying used 190 °C oil temperature for 17 s. Rice crackers were fried at different spraying oil rate (0.3, 0.5 and 0.7 l/s) for 3 levels of speed of frying pot (60, 80 and 100 rpm). Furthermore, the rice crackers were used to evaluate the influence of 3 different centrifuge speeds (600, 800 and 1000 rpm) for 3 levels of times (2, 4 and 6 min) after both frying processes on the fried rice crackers qualities. The quality parameters (color, density, expansion ratio), texture, moisture retention and oil uptake of the fried products were determined.

The result shown that spraying oil rate and frying pot speed were effective to moisture content and oil absorption ($p < 0.05$). The optimized condition for this experiment was used 0.3 l/s spraying oil rate and 60 rpm of frying pot speed. In this condition, rice crackers have less oil absorption ($p < 0.05$) than another one that used deep frying up to 40%. In addition, the fried rice crackers that used the specific centrifuge at the speed of 800 rpm for 4 minutes can reduce oil absorption up to 60% in both frying process and have the best quality.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินดวงศ์ เป็นอย่างสูง สำหรับการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี และคอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแนวคิดในการจัดทำงานวิจัยในครั้งนี้ ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่าน สำหรับความรู้ และให้คำปรึกษาแนะนำมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนการทำงานของข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกๆ คน ที่คอยให้คำแนะนำ ปรึกษา ช่วยเหลือ และให้กำลังใจเพื่อปรับปรุงให้การทำงานในครั้งนี้มีความสมบูรณ์ จนสำเร็จเป็นชิ้นงานออกมา

และท้ายที่สุด ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้ทุนวิจัยมหาบัณฑิตเป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ผลิตภัณฑ์อาหารทอด	4
กระบวนการทอด.....	4
การเปลี่ยนแปลงของอาหารที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด	7
การถ่ายเทมวลและความร้อนในระหว่างกระบวนการทอด	10
ผลกระทบของกระบวนการทอดต่ออาหาร	14
กลไกการพองตัว	17
กลไกการดูดซับน้ำมัน	18
ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมันของอาหารทอด	24
การลดปริมาณการดูดซับน้ำมันก่อนการทอด.....	29
การลดปริมาณการดูดซับน้ำมันหลังการทอด	31
3 วัตถุประสงค์ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	35
วัตถุประสงค์	35
อุปกรณ์.....	35
วิธีการทดลอง	36

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง	43
การศึกษาหาการกระจายความร้อนในระบบการทอดแบบพ่นฝอย.....	43
การศึกษาหาอัตราการพ่นน้ำมันของเครื่องทอดแบบพ่นฝอย	51
การศึกษาหาสภาวะการสลัดเหียงน้ำมันออกหลังกระบวนการทอด.....	66
การศึกษาหาสภาวะการทอดแบบพ่นฝอยที่เหมาะสมด้วยวิธี Response Surface Method (RSM).....	71
5 บทสรุป.....	77
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ทางกายภาพ	84
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์ทางเคมี.....	87
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	88
ประวัติผู้วิจัย	136

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สภาวะในการทอดแบบพ่นฝอย	38
2	สภาวะในการสลัดเหวี่ยงน้ำมันออกจากผลิตภัณฑ์	39
3	ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD)	41
4	กำหนดสภาวะในการทอดแบบพ่นฝอย	51
5	คุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่าน กระบวนการทอดแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่างๆ	53
6	สรุปการเปรียบเทียบคุณสมบัติที่ได้จากแผ่นข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี	56
7	ลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดกรอบ	61
8	ขนาดของรูพรุนในผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดที่สภาวะต่างๆ	65
9	สภาวะในการสลัดเหวี่ยงน้ำมันหลังกระบวนการทอด	67
10	อิทธิพลของสภาวะในการสลัดเหวี่ยงน้ำมันต่อคุณสมบัติต่างๆ ของ แผ่นข้าวตังทอด (ทอดแบบจุ่มน้ำมัน)	68
11	อิทธิพลของสภาวะในการสลัดเหวี่ยงน้ำมันต่อคุณสมบัติต่างๆ ของ แผ่นข้าวตังทอด (ทอดแบบพ่นฝอย)	69
12	ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD)	72
13	คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย (ไม่สลัดเหวี่ยง)	73

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด	9
2	การถ่ายเทความร้อนของชิ้นอาหารระหว่างกระบวนการทอด	13
3	การดูดซับน้ำมันระหว่างกระบวนการทอดแบบจุ่ม ณ อุณหภูมิต่างๆ	15
4	ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายและการทดลอง โดยการทอดมันฝรั่ง ที่อุณหภูมิ 155 (ก) 170 (ข) 185 (ค) องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 วินาที..	25
5	เครื่องสไลด์เหวี่ยงน้ำมันในขณะที่บรรจุอาหาร (ก) ขณะหมุนเหวี่ยง (ข).....	32
6	ระบบการทอดแบบสูญญากาศที่ใช้ในการทดลอง	32
7	แบบจำลองการทำงานของเครื่องทอดแบบพ่นฝอยดันแบบ	36
8	ระนาบภายในหม้อทอดแบบพ่นฝอย	43
9	การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 1 ของหม้อทอด	44
10	การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 2 ของหม้อทอด	45
11	การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 3 ของหม้อทอด	46
12	การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 4 ของหม้อทอด	47
13	การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 5 ของหม้อทอด	48
14	การกระจายความร้อน (heat profile) ในระบบการทอดแบบพ่นฝอย.....	50
15	เครื่องทอดแบบพ่นฝอยดันแบบที่ใช้ในการทดลอง.....	51
16	แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอด ทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที	56
17	ปริมาณความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที	57
18	ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที	57
19	อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที	58
20	ความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที	58

ภาพที่		หน้า
21	ค่าสีของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที	59
22	ลักษณะผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน	59
23	ลักษณะผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบแบบพ่นฝอย.....	60
24	เปรียบเทียบปริมาณไขมันของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี หลังการสลัดเหวี่ยงที่สภาวะ 800 รอบ/นาที เป็นเวลา 4 นาที	70
25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพ่นน้ำมัน และความเร็วรอบในการหมุน ต่อปริมาณน้ำมันในข้าวตังทอด.....	74
26	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพ่นน้ำมัน และความเร็วรอบในการหมุน ต่อปริมาณน้ำมันในข้าวตังทอด.....	74
27	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและระยะเวลาในการสลัดเหวี่ยง ต่อปริมาณน้ำมันในข้าวตังทอด.....	75
28	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและระยะเวลาในการสลัดเหวี่ยง ต่อปริมาณน้ำมันในข้าวตังทอด.....	75
29	การจัดอุปกรณ์เพื่อถ่ายภาพ.....	84
30	อุปกรณ์ถ่ายภาพที่ใช้ในการทดลอง.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์อาหารที่แปรรูปด้วยวิธีการทอด ปรากฏให้เห็นอยู่ทั่วไปในท้องตลาด ไม่ว่าจะเป็นสินค้าที่ผลิตในระดับครัวเรือน ตลอดจนถึงระดับอุตสาหกรรมการค้าข้ามชาติ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์อาหารทอดนั้นสามารถผลิตได้ง่ายจากวัตถุดิบที่มีในท้องถิ่น ด้วยวิธีการไม่ยุ่งยาก และใช้เวลาในการแปรรูปไม่นาน (Mellema, 2003) อาหารที่ผ่านกระบวนการทอดมีกลิ่นรสลักษณะปรากฏ และเนื้อสัมผัสที่เฉพาะตัวและต่างจากการแปรรูปด้วยวิธีอื่น (Banks และ Lusas, 2001) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผู้บริโภคยังคงชื่นชอบและนิยมบริโภคอาหารทอด แต่จากงานวิจัยต่างๆ พบว่าผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการทอดแล้วพบว่ามีปริมาณน้ำมันในอาหารอยู่ถึงร้อยละ 12-37 โดยน้ำหนัก (Dana และ Saguy, 2006)

ผลิตภัณฑ์อาหารทอดจัดเป็นอาหารอีกกลุ่มหนึ่งที่ผู้บริโภคทั่วไปให้ความสนใจเนื่องจากมีลักษณะของกลิ่นรสที่โดดเด่นเฉพาะตัว รวมถึงลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบ แต่หากมองในแง่ของผู้ผลิตแล้วพบว่าอาหารทอดนั้นจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากน้ำมันทอดที่ใช้เป็นสำคัญ เนื่องจากน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในตัวอาหารเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารทอดโดยตรง ดังนั้นการทำความเข้าใจกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงมีความสำคัญ โดยเฉพาะกับผู้ที่ทำหน้าที่ผลิต

นอกจากนี้ ยังพบว่าในปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารทอดจัดเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่สามารถสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศ รวมถึงเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกลุ่มสำคัญที่สามารถกระตุ้นความตื่นตัวทางเศรษฐกิจภายในประเทศไทยได้อย่างมาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารทอดนั้นมีคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏที่เฉพาะตัว ทำให้สร้างความหลากหลายทางด้านผลิตภัณฑ์ได้มาก อย่างไรก็ตามการควบคุมคุณภาพ และให้ความสำคัญทั้งแง่ของปัจจัยต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของสี ความกรอบ การอมน้ำมัน ประสิทธิภาพการใช้น้ำมันทอด เป็นต้น นับเป็นสิ่งที่ผู้ประกอบการให้ความสำคัญ ทั้งนี้จะพบว่าระบบการทอดที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะการทอดแบบจุ่ม (deep fat frying) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ประสิทธิภาพของน้ำมันทอดได้อย่างไม่เต็มที่

เนื่องจากน้ำมันส่วนหนึ่งต้องถูกใช้ไปเพื่อสร้างปริมาตรให้มากเพียงพอต่อการลงทอดของผลิตภัณฑ์ชนิดนั้น ตลอดจนความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันในระหว่างทอดก็ทำได้ยาก เนื่องจากช่วงการขึ้นลงของอุณหภูมิน้ำมันในขณะที่มีอาหารทอดมีการแกว่งตัวในช่วงกว้าง จากประเด็นต่างๆ เหล่านี้ส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ มากมายดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยพบว่า เป็นกระบวนการที่น่าสนใจสำหรับอุตสาหกรรมอาหารทอดของประเทศไทย เนื่องจากการทอดภายใต้ละอองน้ำมันที่มีแรงดันสูงซึ่งลักษณะการทอดดังกล่าวจะทำให้ไม่ก่อให้เกิดการทิ้งน้ำมันทอดในปริมาณมาก อีกทั้งช่วยลดระยะเวลาในการทอดให้สั้นลง ตลอดจนช่วยลดการดูดซับน้ำมัน และลดการสูญเสียความชื้น (moisture loss) ในระหว่างกระบวนการทอดได้ดีกว่าการทอดแบบจุ่ม (deep fat frying) มากไปกว่านั้นการทอดแบบพ่นฝอยสามารถควบคุมลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์อาหารได้สม่ำเสมอได้ดีกว่า ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถตอบโจทย์ภาคอุตสาหกรรมในด้านเศรษฐศาสตร์ได้เป็นอย่างดี รวมถึงเพิ่มขีดความสามารถในการควบคุมผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค อย่างไรก็ตามระบบการทอดดังกล่าวยังไม่ได้มีการศึกษาอย่างเป็นรูปธรรมในประเทศไทย เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องทอด เพราะยังไม่พบว่ามีผู้ประกอบการรายใดผลิตจำหน่าย ดังนั้นการศึกษาปัจจัยและสถานะต่างๆ ของระบบการทอดแบบพ่นฝอยจึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญในการศึกษา เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาระบบการทอดแบบพ่นฝอยให้เหมาะสมมากที่สุดในระบบการผลิตเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบการทอดแบบพ่นฝอยต้นแบบในระดับปฏิบัติการสำหรับใช้ต่อ ยอดเชิงพาณิชย์

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องของกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอด เปรียบเทียบกับกระบวนการทอดแบบจุ่ม

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ของกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย เปรียบเทียบกับกระบวนการทอดแบบจุ่ม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลเพื่อสนับสนุนข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบการทอดแบบพ่นฝอยในเบื้องต้น ที่สามารถปรับแก้องค์ประกอบต่างๆ ของระบบได้โดยง่าย โดยระบุถึงความสูงของหัวพ่นฝอยน้ำมัน, อุณหภูมิน้ำมันที่ต้องการ, แรงดันน้ำมันที่ต้องการ, ลักษณะการพ่นฝอย เป็นต้น

1.3.2 ศึกษาการทอดผลิตภัณฑ์อาหาร ในกลุ่มที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก (carbohydrate-based) ได้แก่ แผ่นข้าวตัง ซึ่งจะวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ ความชื้น การดูดซับไขมัน สี การพองตัว ความกรอบ ทั้งนี้จะดำเนินการศึกษาถึงอุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการทอดในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยอาศัยการเปรียบเทียบกับวิธีการทอดแบบจุ่ม (deep fat frying) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบการทอดในแง่ของผลิตภัณฑ์

1.3.3 ศึกษาการทอดผลิตภัณฑ์อาหาร โดยพิจารณาที่ประสิทธิภาพการทำงานในด้านต่างๆ ของระบบการทอดแบบพ่นฝอย โดยเปรียบเทียบกับระบบการทอดแบบจุ่ม (deep fat frying)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เกิดแนวทางในการพัฒนาระบบการทอดแบบพ่นฝอยเพื่อนำไปผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

1.4.2 สร้างทางเลือกใหม่ของกระบวนการทอดให้กับอุตสาหกรรมอาหารทอดของประเทศไทย

1.4.3 สร้างโอกาสในการทำธุรกิจส่งออกเครื่องทอดสู่อุตสาหกรรมอาหารในระดับนานาชาติ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลกระทบต่ออาหารทอด

2.1.1 ลักษณะของอาหารทอด

โดยทั่วไปแล้ว ในระหว่างการทอดนั้นเมื่ออาหารสัมผัสกับน้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูง จะทำให้อุณหภูมิที่บริเวณผิวหน้าของอาหารนั้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นน้ำที่บริเวณผิวหน้าก็จะเริ่มเดือดอย่างทันทีทันใด ทำให้น้ำมันบริเวณรอบๆนั้นถูกทำให้เย็นลงเนื่องจากไอน้ำที่ระเหยออกมา แต่อุณหภูมิที่ลดลงของน้ำมันนี้จะได้รับทดแทนจากการการพาความร้อน ของแหล่งความร้อนที่ใ้มาซึ่งน้ำมันทำให้น้ำที่บริเวณผิวหน้าของอาหารนั้นเกิดการเดือดและระเหยกลายเป็นไอน้ำออกมาได้อีก เป็นผลให้ที่บริเวณผิวหน้าของอาหารนั้นเกิดลักษณะที่แห้ง และการระเหยของน้ำนี้เอง ทำให้ที่บริเวณผิวนั้นเกิดลักษณะที่เป็นรูพรุน และขรุขระ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าน้ำมันเกิดการระเหยออกมาอย่างรุนแรงจะก่อให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะก่อให้เกิดโอกาสการดูดซับน้ำมันได้ค่อนข้างมาก

นอกจากนี้ยังได้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพมากมายหลายการเปลี่ยนแปลง เช่น การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของแป้ง ปฏิริยามเมลลาร์ด (Miallard reaction) กลาสทรานสิชัน (glass transition) เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะก่อให้เกิดผลต่อคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส และสีของเปลือก (crust)

2.2 กระบวนการทอด

กระบวนการทอดจัดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่สำคัญและแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม (Hein และคณะ, 1998) เพราะการทอดเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งช่วยเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภคของอาหาร ทำให้เกิดลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ คุณลักษณะทางด้าน สี กลิ่น รส และลักษณะเนื้อสัมผัสที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนและ

มวล์ (Fellow, 2000) การทอดเป็นกรรมวิธีที่รวดเร็วและไม่ทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหารมากนักจึงทำให้เป็นกรรมวิธีที่ได้รับความนิยมทั้งในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม

การทอดเป็นกระบวนการทำแห้งแบบหนึ่งซึ่งอาหารจะสัมผัสโดยตรงกับน้ำมันร้อนทำให้เกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนในเวลาเดียวกัน (Alvis และคณะ, 2009) คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอด ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยไม่เพียงแต่เงื่อนไขในการทอดเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับชนิดน้ำมันและอาหารที่ใช้ระหว่างการทอดอีกด้วย น้ำมันในการทอดอาหารจึงเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนระหว่างอาหารกับเครื่องทอด ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัส และกลิ่นรสของอาหาร อุณหภูมิที่ใช้ในการทอด ชนิดของน้ำมันทอด เวลาในการทอด และชนิดของเครื่องทอด ล้วนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทอดทั้งสิ้น (Moreira และคณะ, 1999)

กระบวนการทอดจัดเป็นการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารให้สามารถบริโภคได้ โดยอาศัยน้ำมันเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อน โดยใช้อุณหภูมิระหว่าง 150 – 200 องศาเซลเซียส (Mir-Bel และคณะ, 2009) ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบในน้ำมัน แป้ง และโปรตีน (Singh, 1995) ในระหว่างกระบวนการทอดความร้อนจะซึมผ่านจากด้านนอกเข้าสู่ด้านในของอาหาร และในเวลาเดียวกันความชื้นจากภายในจะถูกสกัดและระเหยออกมาสู่ตัวพาความร้อน ซึ่งก็คือน้ำมัน (Schneider, 1993) โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารทอดจะมีปริมาณน้ำมัน 35-40 เปอร์เซ็นต์ (Debnath, 2009) ปริมาณการดูดซับน้ำมันในอาหารทอดจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้งสภาวะการทอด และปัจจัยของวัตถุดิบ

การทอดเป็นหนึ่งในกระบวนการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง (Totte และคณะ, 1996; Predreschi และ Moyano, 2005b) และเป็นวิธีการที่ช่วยพัฒนากลิ่นรสและเนื้อสัมผัสของอาหาร (Moyano และ Predreschi, 2006) ข้อดีของกระบวนการทอดคือ เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาไม่นาน และช่วยให้อาหารมีกลิ่นรสและเนื้อสัมผัสที่เฉพาะตัวต่างจากการแปรรูปด้วยวิธีอื่น (Banks และ Lusas, 2001) วัตถุประสงค์หลักของการทอดเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภคของอาหาร ส่วนวัตถุประสงค์รองคือ การถนอมรักษาอาหารโดยการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ เอนไซม์ และช่วยลดค่าออกซิเดชันที่บริเวณผิวหรือตลอดชิ้นอาหาร (Fellows, 2000) การทอดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ การทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow (pan) frying) และการทอดแบบน้ำมันท่วม (deep fat frying) (Podmore, 2002)

2.2.1 การทอดแบบน้ำมันดัน

วิธีนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอน ไช้ เบอร์เกอร์ เป็นต้น ความร้อนจากผิวของกระทะร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำมันบางๆ ไปยังอาหาร ความหนาของชั้นน้ำมันมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของผิวหน้าอาหาร ถ้าชั้นน้ำมันบาง ฟองไอน้ำเดือดจะทำให้อาหารเคลื่อนที่ขึ้นลงบนผิวร้อนของกระทะ การกระจายความร้อนจึงไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผิวหน้าของอาหารที่ทอดแบบน้ำมันดันมีสีน้ำตาลไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามวิธีทอดแบบนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสูง (200-450 วัตต์/เมตร²เคลวิน) (Fellows, 2000)

2.2.2 การทอดแบบน้ำมันท่วม

การทอดแบบน้ำมันท่วมได้รับความนิยมอย่างสูงในการแปรรูปอาหาร เพราะมีความรวดเร็ว กรรมวิธีการผลิตง่าย ทำให้เกิดลักษณะกลิ่นรสที่ดี อาหารเป็นสีเหลืองทอง และเนื้อสัมผัสกรอบ (Podmore, 2002) การถ่ายเทความร้อนในการทอดแบบนี้ มีทั้งการพาความร้อนในน้ำมันร้อน และการนำความร้อนสู่ภายในอาหาร ผิวอาหารทั้งหมดจะได้รับความร้อนใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดสีและลักษณะภายนอกที่สม่ำเสมอ การทอดแบบน้ำมันท่วมนี้เหมาะสำหรับอาหารทุกรูปทรง แต่อาหารที่มีรูปร่างไม่แน่นอนจะอมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีรูปร่างแน่นอน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก่อนเกิดการระเหยเท่ากับ 250-300 วัตต์/เมตร²เคลวิน และเพิ่มขึ้นเป็น 800-1000 วัตต์/เมตร²เคลวิน เนื่องจากเกิดการไหลปั่นป่วนของไอน้ำที่ออกจากอาหาร อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราการระเหยสูงเกินไปจะเกิดฟิล์มบางๆ ของไอน้ำอยู่บนผิวอาหารทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง (Fellows, 2000) เปลือกนอกที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วม เป็นหนึ่งในลักษณะที่สำคัญของอาหารทอด ซึ่งมีอิทธิพลของการถ่ายเทมวลและความร้อน การดูดซับน้ำมัน และคุณสมบัติทางกายภาพของอาหารทอด (Krokida และคณะ, 2000b)

เมื่อวางอาหารลงในน้ำมันร้อน อุณหภูมิที่ผิวหน้าของอาหารจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำเกิดการระเหย โดยในระหว่างการทอดผลิตภัณฑ์จะสูญเสียน้ำถึงร้อยละ 90 ของปริมาณความชื้นเริ่มต้นภายในเวลาไม่กี่นาทีของกระบวนการทอด (Totte และคณะ, 1996) นอกจากนี้ยังเกิด เจลาติไนซ์เซชันของสตาร์ช (starch gelatinization) โปรตีนเกิดการเสียสภาพ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซลล์อาหารถูกทำลาย เกิดการขยายตัว เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ผิวหน้าเริ่มแห้งและเกิดเปลือกนอกขึ้น อุณหภูมิที่ผิวอาหารจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิน้ำมันร้อน และอุณหภูมิภายในจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึง 100 องศาเซลเซียส (Fellows, 2000) และสุดท้ายเกิดการดูดซับน้ำมัน (Predreschi และ Moyano, 2005b) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของน้ำมันทอดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอด ได้แก่ การมี

ปริมาณกรดไขมันอิสระ สารประกอบ คาร์บอนิล (carbonyl compound) และสารที่มีมวลโมเลกุลสูง เพิ่มขึ้น แต่ความไม่อิ่มตัว กลิ่นรส และคุณค่าทางโภชนาการลดลง ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดได้แก่ การมีความหนืด สี และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และจุดเกิดควันลดลง (Podmore, 2002)

BeMiller – Whistler และคณะ (2003) พบว่า เมื่อวางอาหารลงในน้ำมันร้อน อุณหภูมิที่ผิวหน้าของอาหารจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและน้ำที่อยู่ในอาหารจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้น้ำมันบริเวณรอบๆ นั้นลดอุณหภูมิลง เนื่องจากไอน้ำที่ระเหยออกมา ผิวหน้าอาหารจึงเริ่มแห้งและเกิดลักษณะรูพรุน (porosity) ถ้ามีการระเหยของน้ำออกมาอย่างรุนแรงจะก่อให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ได้ น้ำที่อยู่ภายในอาหารจะเริ่มมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จนสามารถทำให้อาหารนั้นสุกได้ ยิ่งใช้เวลาในการทอดนานขึ้นก็จะทำให้ปริมาณความชื้นที่บริเวณผิวหน้าอาหารที่เป็นเปลือกแห้งมีปริมาณลดน้อยลง

2.3 การเปลี่ยนแปลงของอาหารที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด

วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการทอดคือ การปรับปรุงสี กลิ่น และรสชาติในเปลือกนอกของอาหาร โดยอาศัยปฏิกิริยาเมลลาร์ด และการดูดซับสารระเหยจากน้ำมัน (Fellows, 2000) ในขณะทอดอาหารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี (Krokida และคณะ, 2000b; Predreschi และ Moyano, 2005b) เช่น เกิดเจลาตินไนซ์เซชันของสตาร์ช โปรตีนเสียสภาพ การระเหยของน้ำ การดูดซับของน้ำมันและการเกิดขึ้นเปลือกนอก (Rimac-Brncic และคณะ, 2004; Hickey และคณะ, 2006) นำไปสู่การเกิดรูปร่างและเนื้อสัมผัส เช่น ความหนาลดลง เกิดความเป็นรูพรุนมากขึ้น ปริมาตรจำเพาะลดลง ปัจจัยหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสี กลิ่น และลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารทอด ได้แก่ ชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการทอด อายุการใช้งานของน้ำมัน อุณหภูมิและเวลาในการทอด ขนาดและลักษณะผิวหน้าของอาหาร หรือการจัดการหลังการทอด เป็นต้น

ผลกระทบของการทอดต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหารขึ้นอยู่กับชนิดของกรรมวิธีที่ใช้ เช่น การใช้น้ำมันที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดเปลือกนอกเร็วและปิดกั้นผิวหน้าของอาหารไว้ ทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยลงและยังคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการส่วนใหญ่ไว้ได้ แต่การทอดให้อาหารแห้งเพื่อถนอมรักษาอาหารจะทำให้เกิดการสูญเสียสารอาหารมากขึ้น โดยเฉพาะวิตามินที่ละลายได้ในไขมัน เช่น วิตามินอี ซึ่งถูกดูดซับโดยน้ำมันระหว่างทอด (Fellows, 2000) โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างของอาหารทอดจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนบริเวณพื้นที่ผิว จะเป็นส่วนที่มีความกรอบ มีสีเหลืองทอง เนื่องจากการสูญเสียไอน้ำระหว่างการทอด ส่วนบริเวณ

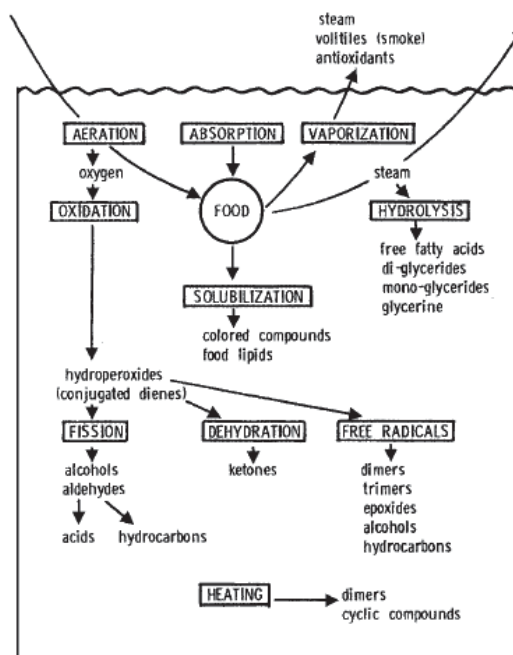
เปลือก ในระหว่างกระบวนการทอดจะมีการระเหยของน้ำกลายเป็นไอน้ำ ทำให้เกิดการฟอรั่มตัวของเปลือกเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดสูงกว่า 155 องศาเซลเซียสและส่วนสุดท้าย คือ บริเวณแกนใน หรือ Core เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลาง มีความชื้นสูงและอาหารสุกเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันเข้าไปภายในอาหาร (Alvis และคณะ, 2009) ในการทอดแบบจุ่มจะมีส่วนแกนปรากฏอยู่ตลอดเวลาการทอด ยกเว้น ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นบางๆ จะมีเฉพาะส่วนเปลือก (Guillaumin, 1988) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอาหารในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการทอดมีดังนี้ (Banks และ Lusas, 2001)

2.3.1 การนำวัตถุดิบลงสู่น้ำมันทอด (Fryer entry)

เมื่อนำวัตถุดิบลงสู่น้ำมันร้อน สตาร์ชบริเวณผิวเกิดจะเจลาติไนซ์เซชันอย่างรวดเร็ว และผลิตภัณฑ์จะถูกปกคลุมด้วยฟองอากาศเล็กๆ เนื่องจากความชื้นบริเวณผิวเกิดการระเหยเป็นไอน้ำและฟองอากาศจะเริ่มค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณผิว และช่วยให้ชั้นผลิตภัณฑ์ไม่เกาะตัวกัน การเกิดไอน้ำอย่างรวดเร็วจะจำกัดอุณหภูมิของอาหารให้ถึงเพียงแค่อุณหภูมิที่เดือด และจำกัดปริมาณน้ำมันที่แทรกซึมเข้าสู่อาหาร

2.3.2 เริ่มเกิดชั้นเปลือกนอก (Case hardening)

ชั้นผิวด้านนอกของอาหารจะมีการสูญเสียไอน้ำ และมีลักษณะ โครงสร้างเป็นแผ่นบางๆ การระเหยของไอน้ำถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยแสดงว่ากำลังมีการเกิดชั้นเปลือกแข็งด้านนอก เพราะบริเวณพื้นผิวบางแห่งจะเกิดฟองอากาศเร็วกว่าบริเวณอื่น บริเวณพื้นผิวที่มีความชื้นลดลง ความชื้นที่อยู่ภายในจะถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นไอน้ำและแยกออกไปตามช่องว่างในโครงสร้างของอาหาร ที่จุดนี้ของการทอดการสูญเสียไอน้ำไม่ได้ก่อให้เกิดผิวนอกที่มีลักษณะแห้งแข็ง แต่จะก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างอาหารที่สมบูรณ์ เช่น ในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ ระยะนี้ของการทอดจะก่อให้เกิดการบดงอ หลังจากนั้นจึงกลับสู่โครงร่างเดิม



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด
ที่มา: Banks และ Lusas (2001)

2.3.3 ชั้นเปลือกนอกหนามากขึ้น (Surface firming)

หลังจากที่ชั้นเปลือกนอกเริ่มเกิดการสูญเสียน้ำ และ เริ่มเกิดชั้นเปลือกนอกแล้ว อาหารจะมีลักษณะชั้นเปลือกนอกบางๆ เมื่อทอดที่อุณหภูมิต่ำหรือใช้เวลานานจะทำให้ชั้นเปลือกนอกยังมีความกรอบและหนามากขึ้น โครงสร้างที่อยู่ต่ำกว่าชั้นเปลือกนอกจะถูกทำให้แตกออกทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุน ในระยะนี้การเกิดชั้นเปลือกนอก และ โครงสร้างภายในยังไม่สมบูรณ์

2.3.4 การซึมผ่านความร้อนและการลดลงของความชื้น (Cooking/moisture reduction)

การเปลี่ยนแปลงสำคัญที่เกิดขึ้นช่วงนี้คือ การซึมผ่านของความร้อน และการลดลงของปริมาณความชื้น

2.3.5 ช่วงสุดท้ายของการทอด (Finish frying)

ในระหว่างช่วงสุดท้ายของการทอด อุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงอุณหภูมิน้ำมันทอด การที่มีปริมาณความชื้นต่ำและอุณหภูมิสูง จะช่วยส่งเสริมการเกิดกลิ่นรสจากกรดอะมิโน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต (Podmore, 2002) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ลด

ปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดชั้นเปลือกนอกที่มีความกรอบ และสีเข้มขึ้น ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นในระหว่างเสร็จสิ้นกระบวนการทอด แต่น้ำมันส่วนใหญ่จะยังคงอยู่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์

2.3.6 เกิดการดูดซับน้ำมัน (Oil adsorption)

ปริมาณน้ำมันในอาหารทอดจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันแคปิลารีและภาวะสุญญากาศ บริเวณผิวนอกที่เปียกชุ่มน้ำมัน โดยในระหว่างช่วงเริ่มต้นของการทอดการเกิดไอน้ำจะมีผลจำกัด การดูดซับน้ำมัน แต่ช่วงต่อมาของการทอด น้ำมันจะถูกดูดซับโดยแรงแคปิลารีจากช่องว่างที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ แต่น้ำมันส่วนใหญ่ยังคงเกาะอยู่บริเวณผิวหน้าส่งผลให้ ในระหว่างการเย็นตัวของอาหาร ไอน้ำภายในอาหารจะเกิดการควบแน่น ทำให้เกิดเป็นลักษณะสุญญากาศขึ้น ทำให้น้ำมันบริเวณผิวถูกดูดซับอย่างรวดเร็ว (Gamble และ Rice, 1987, Mellema, 2003, Vliet และคณะ, 2007)

ส่วนการแห้งของอาหารในระหว่างกระบวนการทอดจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (Garayo และ Moreira, 2002) ช่วงเริ่มต้นของกระบวนการทอด องค์ประกอบของอาหารที่เป็นของแข็งจะดูดซับความร้อนจากตัวกลางส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิที่น้ำเริ่มระเหยออกจากอาหาร ในการทอดแบบสุญญากาศเวลาที่อุณหภูมิช่วงแรกเพิ่มสูงขึ้นจะสั้นมาก และยากต่อการหาจำนวน ช่วงต่อมาเป็นช่วงที่มีความคงที่ เนื่องจากอัตราการทำแห้งถูกจำกัดด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางไปสู่ผลิตภัณฑ์อาหาร อัตราการทำแห้งจะคงที่ไปจนกว่าผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้งและ เมื่อปริมาณน้ำในอาหารต่ำลงมาก จนผิวหน้าแห้ง อัตราการทำแห้งจะลดลง (falling rate period) ช่วงนี้อัตราการทำแห้งจะถูกควบคุมโดยกลไกการแพร่ของน้ำ ซึ่งน้ำในช่วงนี้จะจับเกาะกับด้วยการดูดซับของโมเลกุล (multi-molecular adsorption) และเกิดการควบแน่นในรูพรุนของอาหาร

2.4 การถ่ายเทมวลและความร้อนในระหว่างกระบวนการทอด

ในระหว่างการทอด แบบน้ำมันท่วมจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลไปพร้อมๆ กัน (Rimac-Brcic และคณะ, 2004; Moyano และ Predreschi, 2006) น้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการให้ความร้อนแก่อาหาร (Bouchon และ Pyle, 2005a) โดยทั่วไปอุณหภูมิของน้ำมันจะอยู่ระหว่าง 150-200 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยส่วนมากอาหารมักมี

ปริมาณความชื้นสูง น้ำในอาหารเมื่อได้รับความร้อนจะระเหยจากผิวหนังของอาหาร ออกสู่น้ำมัน ภายนอกในรูปของไอน้ำ (Math และคณะ, 2004) ทำให้ผนังเซลล์มีการเกาะกันแบบหลวมๆ และความดันภายในรูพรุนลดลง (Saguy และ Pinthus, 1995) เปิดช่องให้น้ำมันแพร่เข้าสู่ภายใน (Hickey และคณะ, 2006) น้ำมันจึงถูกซึบเข้าไปในอาหารด้วยแรงแคปิลลารี (capillary force) ในที่สุด (Moreira และคณะ, 1997; Krokida และคณะ, 2000a; Albert และ Mittal, 2002; Math และคณะ, 2004; Rimac-Brcic และคณะ, 2004; Hickey และคณะ, 2006) ปัจจัยที่มีผลต่อทั้งการถ่ายเทมวล และความร้อน คือ คุณสมบัติทางความร้อน และเคมีกายภาพ ของทั้งอาหารและน้ำมัน รูปทรงของอาหาร และอุณหภูมิของน้ำมันทอด โดยที่อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่ม อุณหภูมิ และลดขนาดอนุภาคของอาหาร (โดยเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกัน) (Krokida และคณะ, 2000a)

2.4.1 การถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลในระหว่างการทอดเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนจะถูกถ่ายเทจากน้ำมัน ไปสู่อาหาร ทำให้น้ำระเหยออกจากอาหาร ไอน้ำในอาหารเคลื่อนที่ออกจากอาหารเข้าสู่ น้ำมัน และการเคลื่อนที่ของน้ำมันเข้าสู่อาหาร (Moreira และคณะ, 1997; Krokida และคณะ, 2000a; Sharma และคณะ, 2000; Albert และ Mittal, 2002; Rimac-Brcic และคณะ, 2004; Hickey และคณะ, 2006) เมื่อไม่นานมานี้มีงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่สวนทางกันของไอน้ำและน้ำมันมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน แต่ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน และน้ำมันส่วนมากจะถูกดูดซับในระหว่าง ช่วงการเย็นตัวของอาหาร (Bouchon และ Pyle, 2005a)

2.4.2 การถ่ายเทความร้อน

การทอดมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ น้ำมันทอดกับผลิตภัณฑ์อาหารสูง (Predreschi และ Moyano, 2005a) โดยที่มีการถ่ายเทความร้อน เกิดขึ้น 2 รูปแบบในระหว่างกระบวนการทอด คือ การนำความร้อน และการพาความร้อน (Sahin และคณะ, 1999) โดยการนำความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างไม่คงที่ภายในตัวอาหาร ซึ่งเป็นผลมาจาก คุณสมบัติเชิงความร้อน (thermal properties) ของอาหาร ซึ่งประกอบด้วย ค่าการถ่ายเทความร้อน (thermal diffusivity) ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) และความหนาแน่นของอาหาร ส่วนการพาความร้อนนั้นเกิดขึ้นระหว่างอาหารและน้ำมัน (Podmore, 2002) พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันทอดและอาหารอาจถูกรบกวนการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากอาหาร ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำมันทอด จึงส่งผลให้

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ไม่คงที่ ปริมาณฟองอากาศจะลดลงเมื่อเวลาในการทอดนานขึ้น เนื่องจากมีปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ลดลง เมื่อกระบวนการทอดดำเนินต่อไป ไขมันจะระเหยออกสู่ภายนอกมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นเกินกว่าจุดเดือดของน้ำ

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น กระบวนการทอดสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน (Sharma และคณะ, 2000) ดังนี้

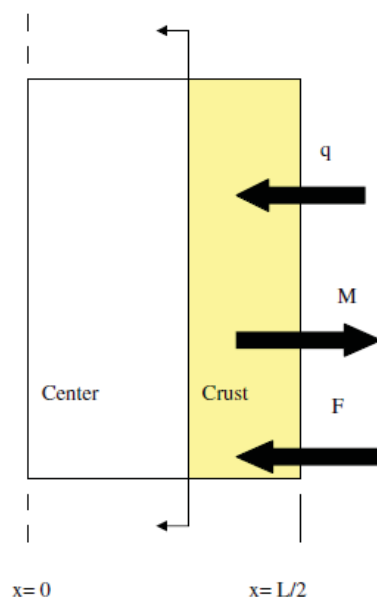
1) ช่วงแรกของการให้ความร้อน (Initial heating) เกิดขึ้นในระหว่างช่วงแรกของการให้ความร้อน เมื่อผิวหน้าของอาหารสัมผัสกับน้ำมันร้อนจนอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดของน้ำ การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำมันทอดและอาหารเกิดขึ้นเนื่องจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และไม่เกิดการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าของอาหาร

2) เกิดการระเหยของไอน้ำ (Surface Boiling) ในช่วงนี้ไอน้ำจะเริ่มระเหยออกจากอาหาร การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ไปจนถึงการพาความร้อนเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำมันทอดรอบๆอาหาร

3) การระเหยของไอน้ำลดลง (Falling rate) ในช่วงนี้ของการทอดมีไอน้ำออกจากอาหารปริมาณมากและอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางอาหารสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ จนเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและทางกายภาพบริเวณด้านในชิ้นอาหาร เช่น การเกิดเจลาคีโนสในชั้นของสตาร์ช และการเสียสภาพของโปรตีน ส่วนบริเวณผิวด้านนอกจะเกิดขึ้นเปลือกนอกขึ้นและมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเหตุนี้อัตราการระเหยของไอน้ำบริเวณผิวหน้าจึงลดต่ำลง

4) ไม่เกิดฟองอากาศออกจากผิวหน้าอาหาร (Bubble end point) ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อทอดอาหารเป็นระยะเวลานาน อัตราการสูญเสียความชื้นของอาหารจะลดลง และไม่เกิดฟองอากาศออกจากผิวหน้าอาหาร เมื่อการทอดดำเนินต่อไป ชั้นเปลือกนอกจะเพิ่มความหนาขึ้นเรื่อยๆ

กระบวนการทอดทั้ง 4 ขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 เฟส คือ non-boiling phases (ขั้นตอนที่ 1 และ 4) และ boiling phases (ขั้นตอนที่ 2 และ 3) (Alvis และคณะ, 2009)



ภาพที่ 2 การถ่ายเทความร้อนของชิ้นอาหารระหว่างกระบวนการทอด

ที่มา: Alvis และคณะ (2009)

จากภาพที่ 2 สามารถอธิบายการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการทอดได้ โดยเริ่มต้นจากการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (convection) จากน้ำมันร้อนไปสู่ผิวหน้าของชิ้นอาหาร (q) และการนำความร้อน (conduction) จากผิวหน้าของชิ้นอาหารไปสู่ใจกลางของชิ้นอาหาร ในขณะเดียวกันจะเกิดการระเหยของน้ำ (ความชื้น) (M) ภายในชิ้นอาหารออกสู่ภายนอก พร้อมทั้งมีการดูดซึมของน้ำมันบางส่วนเข้าสู่ชิ้นอาหาร ทำให้ความชื้นภายในชิ้นอาหารลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำมันในชิ้นอาหารเพิ่มสูงขึ้น

ระหว่างกระบวนการทอดอาหาร จะเกิดลักษณะเป็นเปลือกแข็ง (crust) เกิดขึ้นบริเวณผิวนอกของชิ้นอาหาร ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ทอด ความหนาของเปลือกแข็ง (crust) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการทอด ซึ่งจะผลต่อการดูดซับน้ำมันของชิ้นอาหารด้วย

เมื่อพิจารณาถึงชิ้นอาหารที่ผ่านกระบวนการทอดแล้ว พบว่าจะมีส่วนของน้ำมันที่สนใจอยู่ 2 บริเวณ คือ น้ำมันบริเวณพื้นผิวของชิ้นอาหาร (surface oil) และน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในชิ้นอาหาร (structural oil) ส่วนปริมาณน้ำมันทั้งหมดในชิ้นอาหารทอด จะคิดได้จากผลรวมของ surface oil และ structural oil (Bouchon และคณะ, 2003)

2.5 ผลกระทบของกระบวนการทอดต่ออาหาร

2.5.1 ผลกระทบของความร้อนต่อน้ำมัน

1) การให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะทำให้ไขมันเกิดออกซิเดชันได้เนื่องจากมีความชื้นและออกซิเจนเคลื่อนที่ออกมาจากอาหารขณะทำการทอด นอกจากนั้นยังเกิดสารระเหยประเภทคาร์บอนิล กรดไฮดรอกซี กรดคีโต และกรดอีพอกซี ทำให้น้ำมันมีสีคล้ำและมีกลิ่นเหม็น จึงให้น้ำมันมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งส่งผลไปลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวระหว่างการทอดและทำให้อาหารดูดซับน้ำมันมากขึ้น

2) การออกซิไดส์วิตามินที่ละลายได้ในไขมันทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ (Kilgore and Bailey, 1970)

2.5.2 ผลกระทบของความร้อนต่ออาหาร

1) การปรับปรุงสี กลิ่น รส ในเปลือกนอกของอาหารโดยอาศัยปฏิกิริยาเมลลาร์ด และการดูดซับสารระเหยจากน้ำมัน

Krokida – Oreopoulou และคณะ (2000) สรุปว่า การเปลี่ยนแปลงสีของมันฝรั่งทอดมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้ำมันและชนิดของน้ำมัน แต่ถ้าใช้น้ำมันที่ถูก hydrogenated จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีได้น้อยกว่าการใช้น้ำมันปกติในการทอด แม้ว่าจะใช้อุณหภูมิของน้ำมันในการทอดเท่ากัน และจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้น้ำมันชนิดเดียวกัน อุณหภูมิในการทอดที่ต่ำกว่าจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่าง (lightness) สูงกว่า

ปัจจัยหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสีและกลิ่นของอาหาร

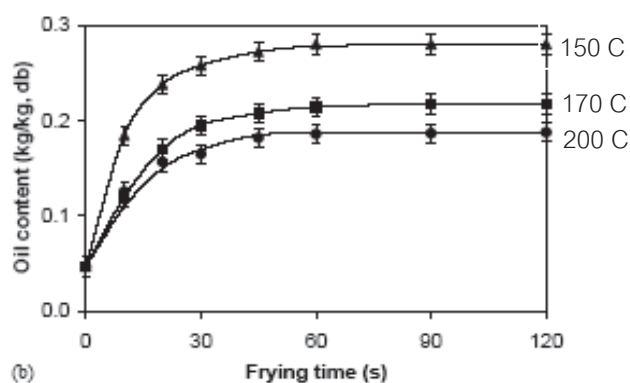
- ชนิดของน้ำมันที่ใช้ทอด
- อายุของน้ำมัน
- อุณหภูมิและเวลาในการทอด
- ขนาดและลักษณะผิวหน้าของอาหาร
- การจัดการหลังการทอด

2) การใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดเปลือกนอกเร็วและปิดกั้นผิวหน้าอาหารไว้ ทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยลงและยังรักษาคูณค่าทางโภชนาการส่วนใหญ่ไว้ได้

3) ถ้าทอดอาหารยิ่งนานยิ่งนาน การดูดซับน้ำมันจะยิ่งมากขึ้น แต่มีข้อยกเว้น คือ การใช้อุณหภูมิสูงในการทอดอาหารจะทำให้ผิวนอกของอาหารแข็ง ซึ่งสามารถไปป้องกันการดูดซับน้ำมันแม้จะใช้ระยะเวลาในการทอดนาน

Debnath – Bhat และคณะ (2003) สรุปว่าถ้าใช้เวลาการทอดอาหารนานขึ้น ผลผลิตกันท์จะมีค่า oil content เพิ่มขึ้น จึงทำให้การดูดซับน้ำมันมากขึ้นด้วย จากการทดลอง ค่าปริมาณน้ำมัน (oil content) ระหว่างการทอดแบบจุ่ม โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจะทำให้ค่า oil content สูงขึ้น (ภาพที่ 3) เพราะต้องใช้ระยะเวลาในการทอดนานขึ้น ทำให้สัมผัสกับชั้นอาหารนานขึ้น ถ้าใช้อุณหภูมิในการทอดต่ำก็จำเป็นจะต้องใช้ระยะเวลาในการทอดนานขึ้นเพื่อที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลตามต้องการได้ ดังนั้นการดูดซับน้ำมันจึงมากขึ้น (ศิริลักษณ์, 2534)

แต่ทั้งนี้ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการทอดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ขนาดของชิ้นอาหารรูปร่างของชิ้นอาหาร และปริมาณอาหารที่ใช้ทอดในแต่ละครั้ง เนื่องจากในระหว่างที่ทำการทอดใช้น้ำมันที่มีอุณหภูมิประมาณ 160-190 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิในการทอดต่ำจะทำให้อาหารสุกช้า และมีการดูดซับน้ำมันเข้าไปในอาหารมาก (ทิพาพร, 2546)



ภาพที่ 3 การดูดซับน้ำมันระหว่างกระบวนการทอดแบบจุ่ม ณ อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Debnath (2003)

4) การใช้อุณหภูมิสูงในการทอดอาหารจะทำให้เกิดเปลือกแข็ง (crust) บริเวณผิวนอกของชิ้นอาหาร ซึ่งจะช่วยป้องกันการดูดซึมของน้ำมันแม้จะใช้เวลาในการทอดนาน อีกทั้งยังเป็นการป้องกันการสูญเสียความชื้น พร้อมกับการป้องกันการเสื่อมสลายของสารอาหารและองค์ประกอบด้านกลิ่นรส ความดันไภายในอาหารจะสูงกว่าความดันไภายนอกมาก ทำให้โอกาสที่น้ำมันจะซึมผ่านเข้าไปในชิ้นอาหารเกิดได้น้อยลง

5) ถ้าใช้อุณหภูมิในการทอดต่ำแต่ใช้เวลาในการทอดนานมากก็จะทำให้ความชื้นระเหยออกมาจากผิวหนังของอาหารได้มากก่อนที่จะถูกปิดกั้นโดยเปลือกแข็ง (crust) ทำให้บริเวณด้านในของชิ้นอาหารมีลักษณะแห้ง จึงสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นาน

ปริมาณการดูดซับน้ำมันของอาหารจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการทอดที่นานขึ้น ดังนั้นในกระบวนการทอดจะต้องควบคุมอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทอดให้เหมาะสม เพื่อควบคุมปริมาณการดูดซับน้ำมันของอาหาร (Rossell, 2001) ซึ่งในการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ในการทอดเพิ่มขึ้นทุกๆ 1 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์ลดลง 0.04 กรัม/100 กรัม (Mackay, 2000) เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิในการทอดสูงขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการทอดสั้นลง ระยะเวลาที่อาหารสัมผัสกับน้ำมันจึงลดลง ดังนั้นการดูดซับน้ำมันเข้าสู่ชิ้นอาหารจึงลดลงด้วย

Maneerote และคณะ (2009) ได้ศึกษาการทอดข้าวแฉ้น (rice crackers) ด้วยกระบวนการทอดแบบจุ่ม (deep-fat frying) ที่อุณหภูมิ 200, 220 และ 240 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20-140 วินาที โดยทำการทอดข้าวแฉ้นครั้งละ 50 กรัม ในน้ำมันปาล์ม 6 ลิตร แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (moisture content) และปริมาณการดูดซับน้ำมัน (oil content) พบว่าปริมาณความชื้นของข้าวแฉ้นทอดจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิของน้ำมันทอดที่เพิ่มสูงขึ้น โดยปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวแฉ้นทอดจะมีค่าต่ำกว่า 3 กรัม/100 กรัม หลังทอดเป็นระยะเวลา 60 วินาที ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 220 และ 240 องศาเซลเซียส พบว่าข้าวแฉ้นทอดจะมีปริมาณความชื้นลดลงต่ำกว่า 3 กรัม/100 กรัม อย่างรวดเร็วในระยะเวลาเพียง 40 วินาที ในขณะที่ปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวแฉ้นทอดจะเริ่มลดลงอย่างช้าๆ หลังการทอดเป็นระยะเวลา 60 วินาทีเป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจาก ข้าวแฉ้นที่ผ่านกระบวนการทอดเป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดเปลือกแข็ง (crust) บริเวณผิวหนังของชิ้นอาหาร ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการแพร่ผ่านของน้ำจากชิ้นอาหารไปสู่ภายนอก (Rossell, 2001) ทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในชิ้นอาหารลดน้อยลง

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณน้ำมัน (oil content) พบว่า ปริมาณน้ำมันในข้าวแต๋นทอดจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการทอดที่นานขึ้น และปริมาณน้ำมันในข้าวแต๋นทอดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทอดสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดเปลือกแข็ง (crust) บริเวณผิวหน้าของชิ้นอาหารอย่างรวดเร็ว เมื่อทอดด้วยอุณหภูมิสูง โดยเปลือกแข็งที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวขัดขวางการดูดซับน้ำมันของชิ้นอาหาร (Rossell, 2001)

2.6 กลไกการพองตัว

กระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอนสามารถที่จะส่งผลต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์อาหารได้เช่นเดียวกัน ซึ่งกลไกการพองตัวในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถแบ่งกลุ่มได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 การอัดด้วยความดันสูง (extrusion) ซึ่งวิธีดังกล่าวนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม การพองตัวของแป้งเกิดจากการที่แป้งรับความร้อนผ่านขดลวดและความดันสูงจากการขับเคลื่อนของแท่นเกลียว ทำให้แป้งและองค์ประกอบของแป้งเกิดการหลอมตัวและแป้งที่ได้จะมีความเหลว จากนั้นจะเคลื่อนตัวออกสู่บรรยากาศ ความดันจะลดลงกะทันหัน ไอน้ำที่อยู่ในก้อนแป้งเหลว จะระเหยออกทันทีและทำให้แป้งเกิดรูพรุน กระจายและทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความกรอบ (ศิริธร, 2547)

2.6.2 การอัดแป้งไ่วระหว่างแผ่นโลหะร้อน (puffing machine) หลักการทำงานจะเช่นเดียวกับการอัดด้วยความดันสูง แต่ความดันที่ได้รับเกิดจากแรงกดและการเคลื่อนกลับของแผ่นให้ความร้อน 2 แผ่นประกบกัน ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ได้แก่ rice cake (ศิริธร, 2547)

2.6.3 การใช้ความร้อน การใช้ลมร้อนทำให้ข้าวพองตัวได้ 1.5 – 3.0 เท่า โดยที่ก้อนแป้ง จะต้องมีความชื้นระหว่างร้อยละ 22-27 ส่วนประกอบของแป้งอาจประกอบด้วยข้าวโพดปนแป้งสาลี แป้งมันสำปะหลัง พร้อมด้วยเครื่องปรุงและเครื่องเทศ โดยนำส่วนผสมที่เตรียมไว้มาปั้นเป็นก้อนใส่ลงในหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 6 - 30 นาที นำแป้งมาทอดและหั่นเป็นแผ่นบางๆ ทำให้ผิวแห้งแข็งโดยใช้ลมเป่าจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 16 -21 นำมารีดเป็นแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 177 ถึง 400 องศาเซลเซียส นาน 8 – 35 วินาที ข้าวที่พองตัวแล้วจะมีความชื้นเหลือร้อยละ 3 ถึง 7 อาจทำให้ลดลงอีกโดยนำไปอบหรือคั่วที่อุณหภูมิ 107 ถึง 290 องศาเซลเซียส นาน 2 – 10 วินาที (ปกรณ์พรณ, 2545)

2.6.4 การใช้สุญญากาศ การทำข้าวพองโดยวิธีการนี้จะต้องเริ่มด้วยการทำให้ข้าวอยู่ในสภาพที่เหนียวแข็งก่อน แล้วจึงใส่ในตู้สุญญากาศ เพื่อให้ข้าวพองตัว การเตรียมข้าวพองด้วยวิธีการนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเตรียมสารละลายเข้มข้นจากน้ำตาล และขั้นที่สองเตรียมส่วนผสมที่เป็นส่วนของแป้ง แล้วนำมาผสมกันให้หมด นวดเป็นก้อนเหนียว นำแป้งไปอัดเป็นแผ่นแล้วทำให้เย็นตัวลง ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในตู้สุญญากาศ โดยทำการวางไว้บนโลหะที่รักษาอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเดินเครื่องทำสุญญากาศ แป้งจะพองตัวจนกระทั่งเป็นก้อนกลมและแห้งสนิท (ศิริธร, 2547)

2.6.5 การย่างบนความร้อน (baking) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากข้าวเหนียว และเซมเบ้ ที่ทำจากแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ เทคโนโลยีการผลิตทั้งสองผลิตภัณฑ์นี้ นำมาจากชาวญี่ปุ่นโดยนำแป้งมาผสมกับน้ำให้ความชื้นไม่เกินร้อยละ 25 นำมาตัดเป็นแท่งหรือกลมด้วยเครื่องอัดแรงอัดสูง นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส นาน 3 – 5 นาที (ศิริธร, 2547)

2.6.6 การใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ การพองตัวโดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ น้ำที่ใส่ลงไปนั้นจะต้องกระจายตัวสม่ำเสมอ ปริมาณความชื้นควรควบคุมอยู่ในช่วงร้อยละ 12 ถึง 26 โดยน้ำหนัก เมื่อนำไปเข้าเครื่องไมโครเวฟ น้ำที่อยู่ในส่วนผสมจะระเหยออกไปทันที และทำให้แป้งพองตัว ถ้าอาหารนั้นอยู่ในสุญญากาศการพองตัวจะดีขึ้น (ปกรณ์พรณ, 2545)

2.6.7 การอบหรือการทอดด้วยน้ำมัน (oven หรือ deep fry puffing) เช่น ข้าวตอกซึ่งทำมาจากข้าวเหนียว จากการศึกษาการพองตัวของข้าวที่ทอดในน้ำมัน พบว่า ข้าวที่เหมาะสมควรเป็นข้าวสุกอบแห้ง ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ และข้าวเหนียว จะมีการพองตัวได้สูงกว่าข้าวชนิดอื่นๆ (ศิริธร, 2547)

2.7 กลไกการดูดซับน้ำมัน

การดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์อาหารทอด สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของแรงดันแคปิลลารี และความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกชิ้นอาหาร (Mellema, 2003; Saguy และ Dana, 2003) ในระหว่างกระบวนการทอด ความชื้นภายในชิ้นอาหารจะระเหยออกสู่ภายนอกเนื่องจากความร้อนจากน้ำมันร้อน เกิดแรงดันขับเคลื่อนให้น้ำระเหยออกสู่ภายนอกชิ้นอาหาร ทำให้น้ำมันไม่สามารถซึมผ่านไปสู่ภายในของชิ้นอาหารได้ (Aguilera และคณะ, 2001) แต่เมื่อหลังกระบวนการทอด ชิ้นอาหารถูกนำขึ้นจากน้ำมันร้อน ทำให้อุณหภูมิภายในชิ้นอาหารลดต่ำลง ความดันภายในชิ้นอาหารต่ำกว่าความดันภายนอก จึงทำให้เกิดการขับเคลื่อนให้น้ำมันที่อยู่บริเวณผิวหน้าขึ้น

อาหารถูกดูดซับเข้าสู่ภายในชิ้นอาหาร ดังนั้น การดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์อาหารทอดโดยส่วนใหญ่ จะเกิดขึ้นหลังกระบวนการทอด ในขั้นตอนการทำให้เย็น (cooling) (Dana และ Saguy, 2006)

นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Mellema (2003) พบว่า หลังจากที่น่าผลิตภัณฑ์ขึ้นจากน้ำมันร้อนหลังจากนำผลิตภัณฑ์ผ่านกระบวนการทอดแบบจุ่ม ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลง ใช้น้ำควบแน่นทำให้ปริมาณอากาศภายในผลิตภัณฑ์ลดลง แต่โพรงที่อยู่ภายในยังมีขนาดเท่าเดิม ทำให้เกิดภาวะสุญญากาศภายในโพรงนั้น โพรงจะดูดน้ำมันเข้ามาภายใน ซึ่งพบว่าน้ำมันที่บริเวณผิวหน้าอาหารจะถูกดูดกลับเข้าไปภายในชิ้นผลิตภัณฑ์ได้ถึง 64 เปอร์เซ็นต์ หลังกระบวนการทอด ดังผลการศึกษาของ Ufheil และ Escher (1996) พบว่า มันฝรั่งแผ่นทอดกรอบจะมีการดูดซับน้ำมันหลังกระบวนการทอดถึง 80 กรัม/100 กรัม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีปริมาณน้ำมันเพียงจำนวนน้อยที่จะแทรกผ่านเข้าไปอยู่ในชิ้นอาหารขณะทอด เพราะปริมาณน้ำมันส่วนมากจะถูกดูดซับเข้าไปในชิ้นอาหารเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทอด (Ufheil และ Escher, 1996; Moreira และคณะ, 1997; Banks และ Lusas, 2001; Garayo และ Moreira, 2002) นอกจากนี้ Moyano และ Predreschi (2006) ได้ทำการทดลองทอดแผ่นมันฝรั่ง สรุปได้ว่าในระหว่างการทอดนั้น ปริมาณน้ำมันจะแพร่เข้าไปในแผ่นมันฝรั่งเพียงจำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณน้ำมันส่วนใหญ่จะแพร่เข้าสู่ชิ้นอาหารเมื่อนำอาหารออกจากหม้อทอดแล้ว เนื่องจากหลังกระบวนการทอด ในขณะที่ชิ้นอาหารเกิดการเย็นตัวลงจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำในรูพรุนทำให้เกิดภาวะสุญญากาศเกิดขึ้น (Gamble และ Rice, 1987, Vliet และคณะ, 2007)

Bouchon และคณะ (2003) ได้วิเคราะห์การดูดซึมของน้ำมันในระหว่างการทอดมันฝรั่ง ซึ่งทำให้รู้ความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของน้ำมันที่ถูกดูดซับในระหว่างการทอด ได้แก่

- น้ำมันที่อยู่ในโครงสร้างอาหาร ซึ่งน้ำมันส่วนนี้จะถูกดูดซับในระหว่างกระบวนการทอด
- น้ำมันที่แพร่เข้าสู่ผิวหน้า เป็นน้ำมันที่ถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวหน้าในระหว่างการเย็นตัว (cooling) ของอาหาร และ
- น้ำมันที่อยู่บริเวณผิว เป็นส่วนของน้ำมันที่ยังคงค้างอยู่ที่บริเวณผิวของอาหาร

จากการศึกษาดังกล่าว พบว่าปริมาณน้ำมันที่อยู่ในโครงสร้างอาหารมีเพียงปริมาณน้อยเท่านั้น เพราะในระหว่างกระบวนการทอด ไอน้ำที่ระเหยออกจากอาหารจะสามารถป้องกันการแพร่ของน้ำมันเข้าสู่โครงสร้างภายในได้ โดยที่น้ำมันส่วนมากจะถูกดูดซับเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทอด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับน้ำมันและการระเหยของไอน้ำไม่ได้เกิดขึ้นพร้อม

กัน ในช่วงการเย็นตัวของอาหาร น้ำมันที่อยู่บริเวณผิวหน้าจะถูกดูดเข้าสู่รูพรุนที่เปลือกนอก นอกจากนี้จากการศึกษาของ Moreira และคณะ (1997) ยังพบว่ามีปริมาณน้ำมันเพียงร้อยละ 20 ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดเท่านั้นที่อาหารดูดซับเข้าไปในระหว่างการทอด และร้อยละ 64 ถูกดูดซับในระหว่างการเย็นตัวของอาหาร ส่วนที่เหลือร้อยละ 36 จะเกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของอาหาร

Duran และคณะ (2007) ทำการทดลองเพื่อหาการแทรกซึมของน้ำมันในระหว่างกระบวนการทอดและหลังการทอดแผ่นมันฝรั่ง พบว่า ในระหว่างการทอดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซับน้ำมันประมาณร้อยละ 38 ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในแผ่นมันฝรั่งทอดกรอบ ส่วนที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 62 ยังคงค้างอยู่ที่บริเวณผิวหน้า ซึ่งมีความแตกต่างกับในช่วงการเย็นตัว (cooling) หลังกระบวนการทอดที่พบว่า ปริมาณน้ำมันประมาณร้อยละ 65 ถูกดูดซึมเข้าสู่รูพรุนบริเวณผิวหน้าของมันฝรั่ง ส่วนที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 35 ยังคงค้างอยู่ที่บริเวณผิวหน้าชั้นมันฝรั่ง ซึ่งความแตกต่างของการดูดซับน้ำมันในระหว่างกระบวนการทอดและการเย็นตัวภายหลังการทอด เกิดขึ้นเนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิของชั้นมันฝรั่งเมื่อนำออกจากหม้อทอด ทำให้ลดแรงตึงระหว่างผิว (interfacial tension) ของน้ำมันและอากาศ และเกิดการลดลงของความดันภายในรูพรุนอาหาร มีผลทำให้น้ำมันเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำมันส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงการเย็นตัว (cooling) หลังกระบวนการทอด

Moreira และคณะ (1997) ได้ศึกษาผลของระยะเวลาในการอบ อุณหภูมิน้ำมันทอด ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในแผ่นอาหาร และคุณภาพของน้ำมันทอด ที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันในแผ่นทอดที่เวลา ผลการทดลองพบว่า ในช่วงเวลา 10-15 วินาทีแรกของการทอด สตาร์ชจะเกิดเจลาติไนซ์เซชัน (gelatinization) และความชื้นจะระเหยอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้เกิดการขยายขนาดของรูแคปิลารีในช่วงเวลานี้ ทำให้ปริมาณน้ำมันที่เกาะอยู่ที่บริเวณผิวนอกของชิ้นอาหารเกิดการไหลเข้าไปในผลิตภัณฑ์ หลังจากทีน้ำเกือบทั้งหมดระเหยออกจากชิ้นอาหาร อุณหภูมิในชิ้นอาหารจะเริ่มสูงขึ้น และอัตราการดูดซับน้ำมันจะลดลง เนื่องจากเกิดการลดลงของแรงตึงผิว และเกิดแรงดันแคปิลารี (capillary pressure)

Halder และคณะ (2006) ได้ทดลองศึกษาการดูดซับน้ำมันของมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ พบว่า ในระหว่างการเย็นตัวภายหลังการทอด อุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผ่นมันฝรั่งจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก 167 จนถึง 65 องศาเซลเซียส ภายในเวลาเพียงแค่นึงนาที ซึ่งทำให้ความดันภายในลดลง เนื่องจากไอน้ำเกิดการควบแน่น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันผลักดันน้ำมันจากภายนอกเข้าสู่แคปิลารี

Dana และ Saguy (2006) กล่าวว่า กลไกการดูดซับน้ำมันของอาหารทอดอาจเกิดจาก 3 กลไกหลัก ซึ่งประกอบด้วย กลไกการแทนที่น้ำ (water replacement), กลไกการเย็นตัวของอาหาร (cooling-phase effect) และกลไกการเกิดสารลดแรงตึงผิว (surface-active agents) ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

1) กลไกการแทนที่น้ำ (water replacement)

ในระหว่างกระบวนการทอด (โดยพื้นฐานคือกระบวนการทำแห้ง) น้ำมันเข้าไปแทนที่น้ำซึ่งเกิดการระเหยออกจากอาหาร เมื่ออาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอด น้ำจะเกิดการระเหยออกจากอาหารอย่างรวดเร็ว พื้นผิวภายนอกของอาหารทอดเริ่มแห้งและเกิดชั้นเปลือกนอก (crust) เกิดขึ้น ความชื้นที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ถูกเปลี่ยนรูปให้กลายเป็นไอน้ำ ซึ่งเป็นการเพิ่มความแตกต่างของความดัน ส่งผลให้ไอน้ำภายในอาหารมีการเคลื่อนที่ออกจากอาหารทางรอยแตกหรือรูเปิดที่อยู่ในโครงสร้างเซลล์หรือเนื้อเยื่อของอาหาร ในขณะที่ขั้นตอนนี้ดำเนินต่อไป น้ำมันที่อยู่บริเวณด้านนอกของชิ้นอาหารเกิดการเคลื่อนที่เข้าสู่อาหารผ่านทางรูเปิดหรือช่องว่างขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์อาหารทอดจะเกิดรอยแตกขึ้นโดยเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื่องจากกระบวนการทอด และการระเหยของน้ำออกจากอาหาร เมื่อช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้นจะไม่มีแรงต้านจากภายในที่เกิดจากความดันไอน้ำ

เมื่อน้ำมันเข้าสู่ชิ้นอาหารทางช่องว่าง หรือรูพรุนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ น้ำมันส่วนนี้จะมียุทธศาสตร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรกสามารถช่วยคงรูปร่างของอาหารได้โดยการป้องกันการหดตัวหรือยุบตัว ส่วนประการที่สองจะมีผลให้เกิดการสูญเสียความชื้นในระหว่างกระบวนการทอด ซึ่งมีผู้วิจัยเพียงบางท่านเท่านั้นที่อธิบายกลไกการแทนที่น้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด เนื่องจากนักวิจัยส่วนมากจะศึกษาการดูดซับน้ำมันที่เกิดขึ้นในช่วงการเย็นตัวของอาหารเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามกลไกการแทนที่น้ำมีความสัมพันธ์อย่างมากกับรูพรุนขนาดใหญ่ หรือรอยแตกของชิ้นอาหารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทอด โดยส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปหรือหุบแป้งเป็นหลัก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ แต่ถ้าเป็นอาหารประเภทที่ไม่เกิดจากการขึ้นรูป รูพรุนของชิ้นอาหารส่วนใหญ่จะเต็มไปด้วยน้ำในช่วงแรกของการทอด และจะไม่เกิดการดูดซับน้ำมันไปจนกว่าน้ำจะเริ่มเกิดการระเหย ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ จะถูกอธิบายโดยอาศัยหลักการระเบิด (explosion) ซึ่งเกิดจากแรงดันไอน้ำมีค่าสูงขึ้นและหาทางที่จะออกจากชิ้นอาหาร ถ้ารูพรุนของอาหารถูกปิดอยู่หนึ่งข้าง น้ำมันจะไม่สามารถเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนได้เนื่องจากมีความดันไอน้ำที่อยู่ภายในรูพรุนเป็นเครื่องป้องกันการดูดซับน้ำมัน

2) กลไกการเย็นตัวของอาหาร (cooling-phase effect)

เมื่อกระบวนการทอดสิ้นสุดลง ในขณะที่นำอาหารออกจากหม้อทอด อาหารจะเริ่มเกิดการเย็นตัวลง ส่งผลให้อุณหภูมิเกิดการควบแน่น และต่อมาคือเกิดลดความดันภายในอาหาร น้ำมันที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของอาหารจึงถูกดูดซับเนื่องจากเกิด “vacuum effect” ดังนั้นการดูดซับน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของอาหาร เนื่องจากการทำให้เกิดการสมดุลระหว่างน้ำมันที่ยึดเกาะและน้ำมันที่ระเหยออกจากผิวหน้าในขณะที่อาหารถูกนำขึ้นจากน้ำมันทอด ลักษณะผิวหน้าของอาหารที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอดมีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับน้ำมันและการกระจายตัวของน้ำมัน

ความหนืดของน้ำมันทอดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการดูดซับน้ำมันได้มากขึ้น เพราะความหนืดที่เกิดขึ้นจะทำให้ไขมันระเหยออกจากอาหารได้น้อยลงในขณะที่นำอาหารขึ้นจากน้ำมัน ซึ่งหลักการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการลดการดูดซับน้ำมันภายหลังการทอดได้โดยการใช้น้ำมันร้อนหรือไอน้ำร้อนยังยวดเป่าลงไปใต้ผิวหน้าของชิ้นอาหารทอด ซึ่งนอกจากจะเป็นการช่วยไล่ไขมันออกจากผิวหน้าแล้วยังช่วยรักษาระดับอุณหภูมิของอาหารเพื่อป้องกันการเย็นตัวและป้องกันการเกิด “vacuum effect” ได้ นอกจากนี้ยังมีการซับผิวหน้าอาหารด้วยกระดาษ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับครัวเรือนไปจนถึงอุตสาหกรรมอาหาร

3) กลไกการเกิดสารลดแรงตึงผิว (surface-active agents)

ในระหว่างกระบวนการทอด น้ำมันจะมีการเสื่อมเสียและเปลี่ยนรูปจากไตรกลีเซอไรด์บริสุทธิ์ไปเป็นสารประกอบอื่นๆ อีกหลายชนิด น้ำที่ระเหยออกจากชิ้นอาหารในระหว่างกระบวนการทอดเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกของพันธะระหว่างกลีเซอรอลและกรดไขมัน นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการทอดเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก ซึ่งเป็นการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาอื่นๆ ตามมา ทำให้เกิดสารไดกลีเซอไรด์ (diglyceride) โมโนกลีเซอไรด์ (monoglyceride) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) และกลีเซอรอล (glycerol)

โมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวและสารประกอบที่มีขั้ว ซึ่งมีผลทำให้เพิ่มการเกิดคุณสมบัติการเกิดฟอง (foaming) ของน้ำมันทอด ซึ่งฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะช่วยดักจับไอน้ำที่ระเหยออกจากอาหารในระหว่างกระบวนการทอด เมื่อเวลานานขึ้นไอน้ำเหล่านี้จะมีผลเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติก ซึ่งสารประกอบบางชนิดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้มีคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและอาหาร ซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็น “wetting agents” ซึ่งทำหน้าที่คล้ายสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและลดแรงตึงผิวบริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและอาหาร ถ้าเวลาที่อาหารสัมผัสกับน้ำมันทอดนานขึ้นจะยิ่งเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันทอดไปสู่อาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุให้อาหารเกิดการสูญเสียความชื้นบริเวณผิวหน้าอาหารมากขึ้น และเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากชั้นเนื้อในขึ้นอาหารออกสู่ชั้นนอกมากขึ้น (Totte และคณะ, 1996) ดังนั้นถ้ามีสารลดแรงตึงผิวปริมาณมากจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ชุ่มไปด้วยน้ำมันและภายนอกเกิดการสุกมากเกินไป จนอาจเกิดเปลือกแข็ง (crust) ส่วนภายในชั้นอาหารได้รับความร้อนไม่ทั่วถึง

ดังนั้นในการศึกษาการลดปริมาณการดูดซับน้ำมันในอาหารทอดนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำมันในโครงสร้างของอาหาร ปัจจัยและสภาวะที่ส่งผลของการดูดซับน้ำมัน การสร้างแบบจำลองทำให้เราไปถึงผลของสภาวะการผลิตและคุณสมบัติของอาหารที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมัน โดยที่แบบจำลองนั้นต้องมีความสอดคล้องกับการทดลองที่สนใจศึกษากลไกการดูดซับน้ำมันด้วย (Bouchon และ Pyle, 2005a)

2.7.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช่วงการเย็นตัวของอาหาร

หลังจากที่นำอาหารขึ้นจากน้ำมัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเกิดขึ้น 2 ช่วง ทั้งบริเวณชั้นใน และเปลือกนอกของชั้นอาหาร โดยที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิล็กน้อยระหว่างภายในกึ่งกลางและบริเวณผิวหน้าชั้นเนื้อในของชั้นอาหาร แต่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างมากระหว่างบริเวณผิวหน้าชั้นในและชั้นเปลือกนอก

เมื่ออาหารเริ่มเกิดการเย็นตัว อุณหภูมิภายในจะเริ่มลดลง แต่การระเหยของน้ำไม่ได้หยุดลงอย่างทันทีทันใด ในช่วงเวลาไม่กี่วินาทีแรกยังมีการถ่ายเทความร้อนจากชั้นเปลือกนอกเข้าสู่บริเวณด้านในชั้นอาหาร อุณหภูมิบริเวณชั้นเปลือกนอกจึงลดต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัสระหว่างบริเวณเนื้อในและเปลือกนอกของอาหารยังคงสูงถึงจุดเดือดของน้ำตราบเท่าที่การถ่ายเทความร้อนยังคงเกิดขึ้น ซึ่งรายละเอียดเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับแบบจำลองการดูดซับน้ำมันในระหว่างการเย็นตัวของอาหาร

2.7.2 การดูดซับน้ำมันบริเวณรูพรุนในระหว่างการเย็นตัวของอาหาร

เมื่อพิจารณาสภาวะช่วงแรกของการดูดซับน้ำมันในรูแคปิลารีภายในส่วนเปลือกนอก โดยมีสมมติฐานว่า แคปิลารีเต็มไปด้วยไอน้ำมีความดัน P_v (หาจากอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างส่วนชั้นในและชั้นเปลือกนอก) ลดลงเนื่องจากอาหารเริ่มเย็นตัว น้ำมันจะเริ่มแพร่เข้าไปเมื่อความดันน้ำมันสูงกว่า P_v เมื่ออัตราการไหลของความดันที่ลดลงภายในท่อเส้นผ่าน

ศูนย์กลางวงกลม โดยมีสมมติฐานว่าเป็นการไหลแบบลามินา เมื่อนำแผ่นอาหารขึ้นจากหม้อทอด อุณหภูมิจะลดลง และความดันภายในที่ว่างในรูพรุนจะลดลงด้วย นอกจากนี้ แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับอากาศเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิลดลง และน้ำมันบริเวณผิวหน้าเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของชิ้นอาหารอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณน้ำมันในชิ้นอาหารเพิ่มสูงขึ้น

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมันของอาหารทอด

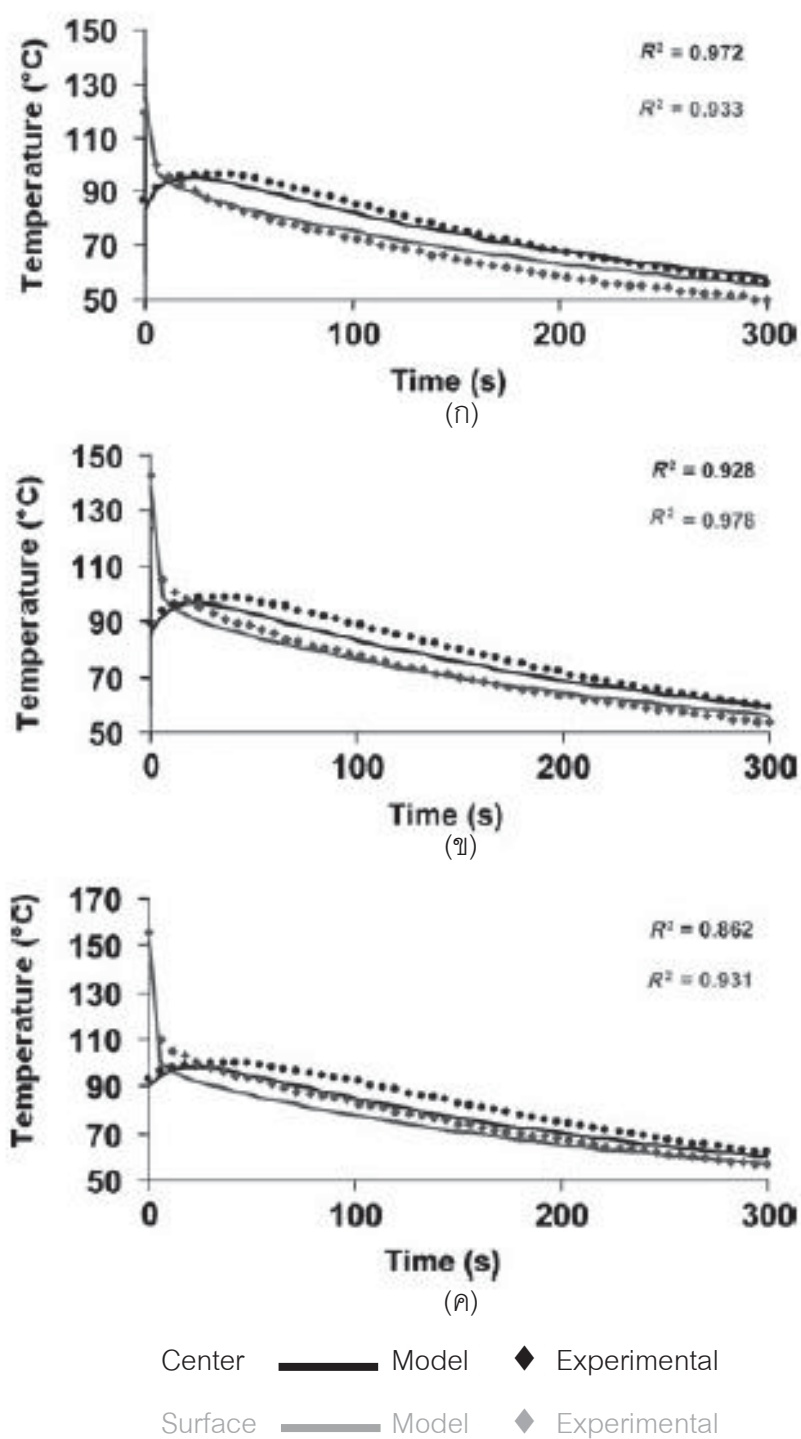
ในการศึกษากลไกการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอด พบว่า มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับน้ำมันในอาหารทอด (Sharma และคณะ, 2000) ได้แก่

2.8.1 คุณภาพและองค์ประกอบของน้ำมัน

คุณภาพน้ำมันส่งผลต่อปริมาณน้ำมันที่เกาะอยู่ที่ผิวอาหาร โดยที่แผ่นทอร์ติลลา ที่ผ่านการทอดด้วยน้ำมันที่ใช้แล้วจะมีปริมาณน้ำมันสะสมที่ผิวมากกว่าที่ทอดด้วยน้ำมันใหม่ เนื่องจากน้ำมันเก่ามีความหนืดสูงและมีแรงตึงผิวต่ำ ทำให้น้ำมันเกิดการเกาะที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่า (Moreira และคณะ, 1997; Rimac-Brcic และคณะ, 2004) ซึ่งการเสื่อมเสียของน้ำมันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทอดไปเป็นเวลานาน นอกจากนี้ สารลดแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลทำให้ลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับอาหาร จากการศึกษาพบว่า สารลดแรงตึงผิวเหล่านี้จะถูกผลิตขึ้นในน้ำมันที่มีคุณภาพต่ำมากกว่าน้ำมันใหม่ (Gamble และ Rice, 1987)

2.8.2 เวลาและอุณหภูมิในการทอด

โดยส่วนมากถ้าใช้อุณหภูมิในการทอดสูง จะส่งผลให้มีปริมาณการดูดซับน้ำมันมากกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากน้ำจะมีการระเหยมากกว่า ณ เวลาเดียวกัน (Lujan-Acosta และ Moreira, 1997; Krokida และคณะ, 2000a; Garayo และ Moreira, 2002; Math และคณะ, 2004) แต่อย่างไรก็ตามในบางกรณี การที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็ไม่ส่งผลต่อการดูดซับน้ำมัน เพราะเมื่อทอดที่อุณหภูมิต่ำ หรือใช้เวลาในการทอดนานขึ้น จะทำให้มีปริมาณการดูดซับน้ำมันมากขึ้น (Fellows, 2000; Predreschi และ Moyano, 2005a) ส่วนการทอดที่ใช้เวลาน้อยจะมีการดูดซับน้ำมันน้อยกว่าการทอดที่ใช้เวลานาน (Gamble และ Rice, 1987; Ufheil และ Escher, 1996; Moreira และคณะ, 1997; Banks และ Lusas, 2001; Rimac-Brcic และคณะ, 2004; Predreschi และ Moyano, 2005a)



ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายและจากการทดลอง โดยการทอดมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 155 (ก) 170 (ข) และ 185 (ค) องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 วินาที และทิ้งให้เย็นจนอุณหภูมิลดลงเป็น 40 องศาเซลเซียส

ที่มา: Bouchon และ Pyle (2005b)

2.8.3 ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของอาหาร

โดยทั่วไปการดูดซับน้ำมันจะเกิดขึ้นเมื่อความชื้นออกจากชิ้นอาหารในระหว่างการทอด ดังนั้น เมื่ออาหารมีความชื้นเริ่มต้นสูง ย่อมส่งผลให้มีการดูดซับน้ำมันมากขึ้น (Gamble และ Rice, 1987; Ufheil และ Escher, 1996; Moreira และคณะ, 1997) นอกจากนี้ในอาหารที่มีปริมาณความชื้นสูงอัตราการระเหยของน้ำในระหว่างการทอดจะเร็วกว่าอาหารที่มีปริมาณความชื้นต่ำ ทำให้เกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งจะเก็บกักอากาศได้มากกว่า เป็นผลให้เกิดแรงดันแคปปิลารีในระหว่างการเย็นตัวของอาหาร (Moreira และคณะ, 1997)

ดังนั้น ปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่มีอยู่ในชิ้นอาหารก็จะส่งผลต่อการดูดซับน้ำมันเข้าไปในอาหารในระหว่างกระบวนการทอดเช่นกัน โดย T.T. Mai Tran-Xiao Dong Chen และคณะ (2007) พบว่า ความชื้นของมันฝรั่งเริ่มต้นมีผลต่อการดูดซับน้ำมันเข้าไปในมันฝรั่ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างภายในชิ้นอาหารที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง มักจะมีโครงสร้างที่มีการเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ อีกทั้งต้องใช้ระยะเวลาในการทอดนาน เพื่อให้ให้น้ำภายในชิ้นอาหารระเหยออกไปจนถึงระดับที่ต้องการ ส่งผลทำให้มีการดูดซับน้ำมันเข้าไปในปริมาณที่มากกว่า

2.8.4 องค์ประกอบของอาหาร

ชนิดของอาหารมีผลต่อปริมาณการดูดซับน้ำมันเข้าไปในอาหาร โดยจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อาหารที่มีไขมันเริ่มต้นต่ำจะมีโอกาสดูดซับน้ำมันเข้าไปในอาหารได้มาก เช่น มันฝรั่งทอด ถั่วทอด มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 30-40 ในขณะที่ไก่ ปลา มีไขมันเป็นองค์ประกอบที่เริ่มต้นสูงกว่า แต่มีปริมาณการดูดซับน้ำมันที่ต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากกระบวนการถ่ายเทมวลระหว่างน้ำในชิ้นอาหาร และน้ำมันร้อนที่อยู่รอบๆ ชิ้นอาหาร

2.8.5 กระบวนการก่อนการทอด

จากการศึกษาพบว่า กระบวนการก่อนการทอด เช่น การจุ่มลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หรือ แคลเซียมคลอไรด์ สามารถลดการดูดซับน้ำมันได้เช่นกัน (Gamble และ Rice, 1987; Moreira และคณะ, 1997; Rimac-Brncic และคณะ, 2004) นอกจากนี้ การทำแห้ง การลวก การแช่แข็ง หรือการลดระดับความชื้นเริ่มต้นของอาหารก่อนการทอดจะช่วยลดการดูดซับน้ำมันได้ (Krokida และคณะ, 2000a; Rimac-Brncic และคณะ, 2004; Predreschi และ Moyano, 2005a)

2.8.6 Surface treatment และแรงดึงผิว

การเคลือบผิวอาหารด้วยสารในกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ เช่น gellan gum, corn zein, อนุพันธ์เซลลูโลส, เพคติน, โซเดียมอัลจีเนต ฯลฯ สามารถป้องกันการดูดซับน้ำมันในระหว่างการทอดได้ (Krokida และคณะ, 2000a; Predreschi และ Moyano, 2005b) เนื่องจากสารประกอบในกลุ่มนี้มีพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) จะช่วยลดการดูดซับน้ำมันได้ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารเคลือบบริเวณชิ้นอาหาร ทำให้สามารถช่วยลดปริมาณการดูดซับน้ำมันในระหว่างกระบวนการทอดได้ (Rimac-Brcic และคณะ, 2004)

2.8.7 ความแข็งแรงของเจล (Gel strength) และ การเกิดชั้นเปลือกนอก

ในโครงสร้างของอาหาร ความแข็งแรงของเจลจะมีความสัมพันธ์ต่อการควบคุมปริมาณการดูดซับน้ำมัน โดยที่ปริมาณการดูดซับน้ำมันจะลดลงเมื่อเพิ่มความแข็งแรงของเจล ส่วนชั้นเปลือกนอกของชิ้นอาหาร จะเกิดขึ้นในระหว่างการบวนการทอดแบบน้ำมันท่วม และมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนและการดูดซับน้ำมัน เพราะการดูดซับน้ำมันจะถูกจำกัดอยู่ในส่วนของชั้นเปลือกนอกของชิ้นอาหาร ซึ่งความหนาของชั้นเปลือกนอก จะมากขึ้นเมื่อความแข็งแรงของเจลต่ำ ต่อมาเมื่อชั้นเปลือกนอกพัฒนาเต็มที่ และมีลักษณะแข็ง และแห้ง ทำให้มีปัจจัยอื่นๆ เช่น ความเป็นรูพรุน (porosity) และความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) เข้ามามีบทบาทต่อการดูดซับน้ำมันแทน (Gamble และ Rice, 1987; Moreira และคณะ, 1997)

2.8.8 ความเป็นรูพรุนของอาหาร

ความเป็นรูพรุน (porosity) เริ่มต้นของผลิตภัณฑ์อาหาร จะสัมพันธ์กับปริมาณการดูดซับน้ำมันในกระบวนการทอดแบบน้ำมันท่วม ความเป็นรูพรุนของอาหารสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนสูตรอาหาร เช่น การเติมสารสร้างชั้นฟิล์มรอบๆ ผิวหน้าของอาหาร เป็นต้น (Gamble และ Rice, 1987; Moreira และคณะ, 1997; Rimac-Brcic และคณะ, 2004)

2.8.9 ความหนาแน่นของอาหาร

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น หรือความหนาของชิ้นอาหาร จะทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์ลดลง (Ufheil และ Escher, 1996)

2.8.10 พื้นที่ผิวของอาหารและรูปทรงของอาหาร

เมื่อชิ้นอาหารมีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าก็จะมากขึ้นด้วย (Utheil และ Escher, 1996; Krokida และคณะ, 2000a; Rimac-Brcic และคณะ, 2004)

2.8.11 สภาวะในการทอด

อุตสาหกรรมอาหารทอดโดยทั่วไป มักจะใช้กระบวนการทอดแบบจุ่ม ซึ่งเป็นกระบวนการที่ส่งผลให้เกิดการดูดซับน้ำมันในปริมาณมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบการทอดเพื่อลดปริมาณการดูดซับน้ำมัน ซึ่งพบว่า การทอดในสภาวะสุญญากาศ (vacuum frying) สามารถลดปริมาณการดูดซับลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับทอดในสภาวะปกติ ทั้งนี้เนื่องจากในระบบที่เป็นสภาวะสุญญากาศ ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการทอดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีการดูดซับน้ำมันน้อยลง และการทอดในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสภาวะปกติ ทำให้ช่วยปรับปรุงคุณภาพในด้านสี และความกรอบของผลิตภัณฑ์อาหารทอดด้วย (Math และคณะ, 2004; Rimac-Brcic และคณะ, 2004) ในปัจจุบันพบว่า การทอดในสภาวะสุญญากาศ นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารในกลุ่มผัก และผลไม้ เช่น ทูเรียน ขนุน สตรอเบอร์รี่ กล้วย บร็อคโคลี่ เป็นต้น

2.8.12 สภาวะที่นำอาหารขึ้นจากหม้อทอด

สภาวะในการนำอาหารขึ้นจากหม้อทอดมีความสำคัญต่อปริมาณการดูดซับน้ำมัน เนื่องจากการดูดซับน้ำมันส่วนมากจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่อุณหภูมิของอาหารทอดเย็นตัวลง หลังจากนำขึ้นจากหม้อทอด (Lujan-Acosta และ Moreira, 1997; Predreschi และ Moyano, 2005b) ซึ่งเป็นช่วงที่ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับน้ำมันมากที่สุด

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการดูดซับน้ำมันของอาหารทอด ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งปัจจัยของอาหาร (ชนิด องค์ประกอบ ขนาดและรูปร่าง ความชื้นเริ่มต้น ความเป็นรูพรุนของชิ้นอาหาร เป็นต้น) รวมถึงการเตรียมวัตถุดิบก่อนการทอด และปัจจัยของสภาวะการทอด (อุณหภูมิของน้ำมันทอด ระยะเวลาในการทอด และความดันในขณะทอด) (Bouchon และ Aguilera, 2001; Saguy และ Pinthus, 1995) ดังนั้น ในการศึกษากระบวนการทอด จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถควบคุม และเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ส่งผลให้กระบวนการทอดมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.9 การลดปริมาณการดูดซับน้ำมันก่อนการทอด

อาหารที่ผ่านกระบวนการทอดนั้นมีปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อยู่สูง เช่น ในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบมีปริมาณไขมันอยู่สูงถึงร้อยละ 35-40 (Predreschi และ Moyano, 2005b; Moyano และ Predreschi, 2006) ซึ่งปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์อาหารมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Banks และ Lusas, 2001) เนื่องจากในปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจกับอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาหารที่มีไขมันต่ำ หรืออาหารที่ปราศจากไขมัน (Lujan-Acosta และ Moreira, 1997; Predreschi และ Moyano, 2005b) โดยมีงานวิจัยพิสูจน์ว่าการรับประทานไขมันมากเกินไปอาจก่อให้เกิดโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตันและอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งเต้านม มะเร็งลำไส้ และมะเร็งต่อมลูกหมากได้ (Bouchon และ Pyle, 2005a) ด้วยเหตุนี้อาหารที่มีปริมาณไขมันต่ำจึงเป็นที่ต้องการของตลาดอย่างมาก ซึ่งส่วนแบ่งทางการตลาดของอาหารไขมันต่ำหรือปราศจากไขมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (Banks และ Lusas, 2001) ด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นแรงผลักดันให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอาหารหันมาสนใจค้นคว้าวิธีช่วยลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารลง (Albert และ Mittal, 2002; Predreschi และ Moyano, 2005b) แต่อย่างไรก็ตามการลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารควรคำนึงถึงลักษณะเนื้อสัมผัส และกลิ่นรสดั้งเดิมของอาหารด้วย (Lujan-Acosta และ Moreira, 1997)

Lujan-Acosta และ Moreira (1997) ศึกษาผลของการทำแห้งที่มีต่อการลดปริมาณการดูดซับน้ำมันของแผ่นทอร์ทิลลา พบว่า การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ก่อนการทอด เนื้อสัมผัสของอาหารจะมีความกรอบมากขึ้นที่อุณหภูมิในการทำแห้งสูงๆ และยังช่วยลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้ เมื่อนำชิ้นอาหารส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (scanning electron microscopy) จะพบว่ามีรูพรุนและฟองอากาศลดลง

Albert และ Mittal (2002) ทดลองใช้ไฮโดรคอลลอยด์ ในการเป็นแผ่นฟิล์มรับประทานได้ จากวัสดุ 9 ชนิด เพื่อดูความสามารถในการเกิดฟิล์ม ความเหมาะสมต่ออาหารทอด และคุณสมบัติในการถ่ายเทน้ำและน้ำมัน ผลจากการทดลองพบว่า soy protein isolate, whey protein isolate, และ methyl cellulose ให้ผลดีที่สุด โดยการลดการดูดซับน้ำมันในระหว่างการทอดได้ดี และเมื่อใช้ soy protein isolate ผสมร่วมกับ whey protein isolate สามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ถึงร้อยละ 99.8 และ soy protein isolate ผสมร่วมกับ methyl cellulose สามารถลดได้ถึงร้อยละ 83.5 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เคลือบผิว

Predreschi และ Moyano (2005b) ศึกษาการดูดซับน้ำมันและการพัฒนาของเนื้อสัมผัส ในระหว่างทอดมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ ผลการทดลองพบว่า การลวกสามารถพัฒนาสีและเนื้อสัมผัส และสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ในบางกรณี เพราะเกิดเจลาติไนซ์เซชัน (gelatinization) ของสตาร์ชบริเวณผิวของชิ้นอาหาร ถ้าลวกที่อุณหภูมิต่ำก่อนการทอดจะช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์เพคตินเอส-เทอร์เรส (pectinesterase) ส่งผลทำให้ลดความเป็นรูพรุนของชิ้นอาหารและช่วยลดการดูดซับน้ำมันได้

Moyano และ Predreschi (2006) ศึกษาผลของกระบวนการก่อนการทอด ที่มีต่อปริมาณการดูดซับน้ำมันในระหว่างทอดมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ พบว่า การทำแห้งก่อนการทอดสามารถช่วยลดปริมาณน้ำมันลงได้ เนื่องจากการทำแห้งจะช่วยลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นของชิ้นอาหาร นอกจากนี้ยังพบว่า การทอดในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้เพิ่มขึ้น เพราะการทอดในอุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการทอดน้อยกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ

การใช้สารเคลือบผิวอาหาร เช่น hydrophilic cellulose derivative, โปรตีน และ กัม เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการเกิดโครงสร้างกีดขวางการดูดซับน้ำมันในระหว่างทอด (Albert และ Mittal, 2002; Rimac-Brcic และคณะ, 2004) ส่วนประกอบของแผ่นฟิล์มอาจเป็นสารประกอบในกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ ไขมัน หรือทั้งสองอย่าง แต่ไฮโดรคอลลอยด์มักได้รับความนิยมเพราะมีคุณสมบัติในการกีดขวางออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไขมัน มีการประยุกต์ใช้ไฮโดรคอลลอยด์จากแหล่งต่างๆ เช่น โปรตีน, อนุพันธ์ของเซลลูโลส (cellulose derivative), อัลจิเนต, เพคติน, สตาร์ช และ โพลีแซคคาไรด์ อื่นๆ ซึ่งหลักเกณฑ์ในการเลือกใช้จะดูได้จากความสามารถในการแพร่เข้า-ออกของน้ำมัน ซึ่งคุณสมบัตินี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของน้ำมันในฟิล์ม และความหนาของฟิล์ม (Albert และ Mittal, 2002)

Rimac-Brcic และคณะ (2004) ศึกษาอิทธิพลของชนิดน้ำมัน (น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน น้ำมันพืช และน้ำมันปาล์ม) และกระบวนการก่อนการทอด (ลวกในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์, สารละลายกรดซิตริก, จุ่มลงในสารละลาย carboxymethyl cellulose derivatives) ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมันในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ ผลการทดลองพบว่า ชนิดของน้ำมันไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับน้ำมัน แต่กระบวนการก่อนการทอดมีส่วนช่วยลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้ โดยมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบที่ผ่านการลวกในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จะมีการดูดซับน้ำมันน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น

2.10 การลดปริมาณการดูดซับน้ำมันภายหลังการทอด

จากการศึกษาพบว่า การดูดซับน้ำมันส่วนมากเกิดขึ้นในช่วงการเย็นตัว (cooling) หลังกระบวนการทอด ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งในการหากระบวนการลดการดูดซับน้ำมันภายหลังกระบวนการทอด

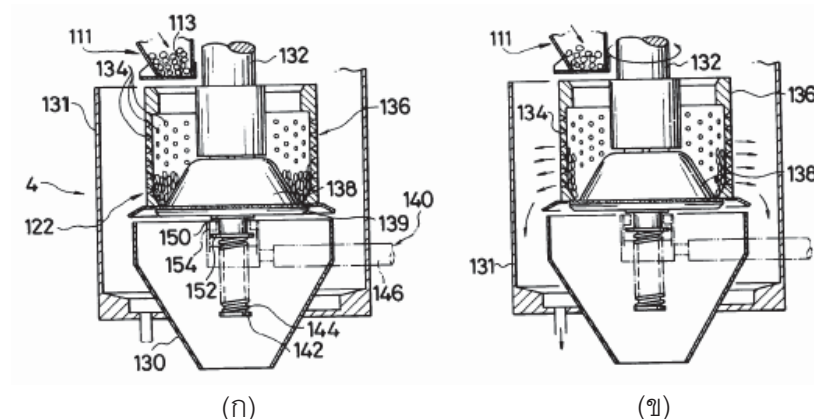
2.10.1 การใช้เครื่องสลัดเหวี่ยงน้ำมัน

การใช้เครื่องสลัดเหวี่ยงน้ำมันเป็นหนึ่งในกระบวนการลดปริมาณน้ำมันบริเวณผิวหน้าอาหารภายหลังการทอดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารขนาดกลางไปจนถึงขนาดใหญ่ (Banks และ Lusas, 2001) โดยมีหลักการทำงานคือ การอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อแยกน้ำมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าให้หลุดออกจากชิ้นอาหาร โดยประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสลัดเหวี่ยงจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและระยะเวลาที่ใช้ในการสลัดเหวี่ยง โดยที่ใช้ความเร็วรอบสูง หรือระยะเวลานานจะส่งผลให้สามารถลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์อาหารได้มาก แต่ทั้งนี้ควรขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของอาหาร เพราะผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิดมีลักษณะเปราะ แตกหักได้ง่าย จึงไม่ควรใช้ความเร็วรอบสูง แต่อาจใช้วิธีการเพิ่มเวลาในการสลัดเหวี่ยงแทน

Yang (1989) ได้ประดิษฐ์เครื่องทอดสุญญากาศที่สามารถสลัดน้ำมันได้ในตัว โดยใช้ทอดอาหารในสภาวะสุญญากาศและเหวี่ยงแยกน้ำมันออกภายใต้สภาวะสุญญากาศเช่นกัน การทอดที่สภาวะความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำจะช่วยให้ น้ำเกิดการระเหยออกไปได้มากขึ้น และยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันทอดด้วย อาหารที่ได้จากการทอดในสภาวะแบบนี้จะคงสีและรสชาติดั้งเดิมของผลิตภัณฑ์เอาไว้ได้ และการสลัดเหวี่ยงยังช่วยให้มีปริมาณน้ำมันเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์น้อย โดยความเร็วรอบที่ใช้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 300-500 รอบต่อนาที

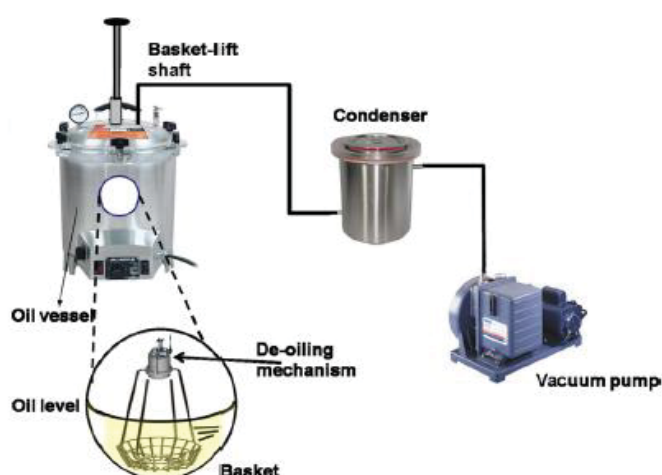
Ryuichi และ Nobuhide (1990) ได้ประดิษฐ์เครื่องสลัดเหวี่ยงน้ำมันออกจากอาหารทอด โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และสามารถดัดแปลงใช้กับเครื่องทอดสุญญากาศได้ ส่วนความเร็วที่ใช้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 300-1500 รอบต่อนาที (ภาพที่ 5)

Hendrick (2001) ได้ประดิษฐ์เครื่องทอดสุญญากาศพร้อมทั้งที่สามารถสลัดเหวี่ยงได้ในตัวหลังกระบวนการทอด โดยเครื่องสลัดเหวี่ยงจะทำมุม 30 องศา กับแนวตั้งเพื่อให้ง่ายต่อการบรรจุอาหารและนำอาหารออกจากเครื่องสลัดเหวี่ยง ความเร็วรอบที่ใช้จะอยู่ที่ประมาณ 400 รอบต่อนาที



ภาพที่ 5 เครื่องสลัดเหวี่ยงน้ำมันในขณะที่ยังบรรจุอาหาร (ก) ขณะหมุนเหวี่ยง (ข)
ที่มา: Ryuichi และ Nobuhide (1990)

นอกจากนี้ ยังได้มีการพัฒนาระบบการทอดแบบสุญญากาศ โดยให้มีกลไกการสลัดเหวี่ยงน้ำมันออก (de-oiling) ในขั้นตอนหลังการทอด เพื่อลดปริมาณการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดลงไปอีก ซึ่ง Moreira และคณะ (2009) ได้ศึกษาผลของการสลัดเหวี่ยงน้ำมัน (de-oiling) ในระบบการทอดแบบสุญญากาศ (ภาพที่ 5) เพื่อลดปริมาณการดูดซับน้ำมันในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร ทำการทอดที่อุณหภูมิ 120, 130 และ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 วินาที และสลัดเหวี่ยงน้ำมันหลังการทอดโดยใช้ความเร็วรอบในการหมุน 750 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 วินาที



ภาพที่ 6 ระบบการทอดแบบสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง
ที่มา: Moreira และคณะ (2009)

จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า แผ่นมันฝรั่งที่ผ่านการทอดในระบบสุญญากาศ เป็นเวลา 360 วินาที แล้วนำมาเหวี่ยงน้ำมันออกด้วยความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 วินาที มีปริมาณการดูดซับน้ำมันลดลงตามอุณหภูมิของน้ำมันทอดที่สูงขึ้น ซึ่งอัตราการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทอดสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการทอดที่อุณหภูมิสูง ทำให้น้ำภายในชิ้นอาหารระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจะสังเกตเห็นว่า อัตราการดูดซับน้ำมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทอด คือ 120 วินาทีแรกของการทอด (Granda, 2005; Garayo และ Moreira, 2002)

ข้อดีของการใช้เครื่องสลัดเหวี่ยงน้ำมันคือ สามารถทำได้ง่ายและมีความสะดวก รวดเร็ว จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ถ้าใช้ความเร็วรอบสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกหักเสียหายได้ และสามารถลดปริมาณน้ำมันได้เพียงที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของอาหารเท่านั้น ดังนั้นสภาวะในการสลัดเหวี่ยงควรกำหนดให้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิด เพื่อให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันลงได้มากที่สุด โดยยังคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้

2.10.2 การใช้กระบวนการลดความดันในผลิตภัณฑ์หลังการทอด

Gvili (2005) ได้คิดค้นระบบการทอด ที่มีกระบวนการลดปริมาณน้ำมันภายหลังการทอด โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดบรรจุลงใน ลูกกลิ้งที่สามารถหมุนได้ และทำการลดความดันให้ต่ำกว่ากระบวนการทอด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าทอดผลิตภัณฑ์ในสภาวะปกติ จะลดความดันให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ เพื่อทำให้น้ำมันที่อยู่ภายในอาหารออกสู่ภายนอก จากนั้นหมุนเหวี่ยงลูกกลิ้งเป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งจากการศึกษาพบว่า วิธีการนี้สามารถลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ลงได้ประมาณร้อยละ 30-40

2.10.3 การใช้กระบวนการเพิ่มอุณหภูมิผลิตภัณฑ์หลังการทอด

Barber และคณะ (2006) ได้พัฒนากระบวนการลดปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ โดยการพ่นไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 300-340 องศาฟาเรนไฮต์ ผ่านเหนือชิ้นผลิตภัณฑ์ โดยใช้เวลาประมาณ 30-120 วินาที ซึ่งสามารถลดปริมาณน้ำมันลงได้ประมาณร้อยละ 33-40

นอกจากนี้ Meijer และ Heijmans (2006) ได้คิดค้นกระบวนการหลังการทอด โดยการนำผลิตภัณฑ์อาหารทอดผ่านไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam) ที่มีอัตราการไหล 1-20 เมตรต่อวินาที โดยมีอุณหภูมิระหว่าง 150-250 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1-5 นาที ซึ่งวิธีนี้จะทำให้พื้นผิวของผลิตภัณฑ์สัมผัสกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด มากกว่าร้อยละ 70 ของพื้นที่ทั้งหมด และยังพบว่าวิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับสายพานสั้นหรือตระแกรงสั้นได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารทอดที่ผ่านกระบวนการนี้จะมีปริมาณไขมันไม่เกินร้อยละ 15

Debnath และคณะ (2003) ได้ใช้เทคนิคในการลดปริมาณน้ำมันหลังกระบวนการทอดกับผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ทำจากแป้งถั่ว โดยใช้ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (superheated vapor) ซึ่งพบว่าสามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันลงได้ประมาณร้อยละ 30

บทที่ 3

วัตถุดิบ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบในการทดลองคือ แผ่นข้าวตังดิบ โดยรับมาจากโรงงาน (บริษัท สุคันธา ไทยสแน็ค จำกัด) ทำจากปลายข้าวหอมมะลิ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ± 0.11 เซนติเมตร ปริมาณความชื้นของแผ่นข้าวตังดิบเริ่มต้น ประมาณร้อยละ 12 ± 0.08

3.2 อุปกรณ์

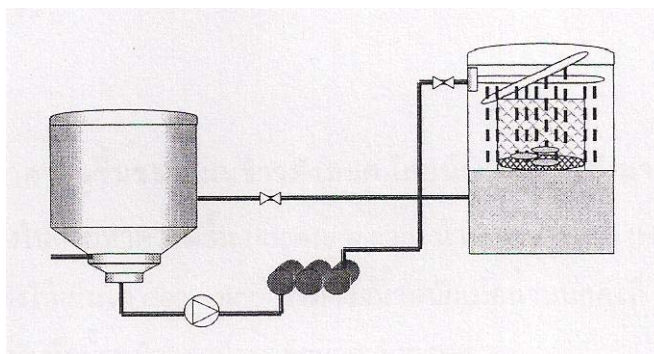
3.2.1 สารเคมี

- 1) ปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether)
- 2) น้ำมันปาล์มโอเลอิน (Palm oil)
- 3) น้ำกลั่น

3.2.2 อุปกรณ์

- 1) ชุดเครื่องแก้ว
- 2) โถดูดความชื้น (Desicator)
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนัก (ผลิตภัณฑ์ Satorius)
- 4) เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)
- 5) อุปกรณ์วัดสีด้วยวิธี image analysis
- 6) เครื่องอบลมร้อน (Hot air oven)
- 7) ถ้วยหาความชื้น (Moisture can)
- 8) เครื่องสกัดไขมัน (Soxhtec system) รุ่น HT6
- 9) ถุงซิปล็อก และกระดาษฟอยล์อะลูมิเนียม

- 10) กล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope:SEM)
- 11) เครื่องทอดแบบพ่นฝอยดันแบบ ที่สามารถสลัดเหวี่ยงน้ำมันได้ในตัว (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 แบบจำลองการทำงานของเครื่องทอดแบบพ่นฝอยดันแบบที่ใช้ในการทดลอง

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำวัตถุดิบ (แผ่นข้าวตังดิบ) มาวัดคุณลักษณะทางเคมีกายภาพ และบันทึกข้อมูลเริ่มต้น

3.3.2 การศึกษาลักษณะและการกระจายความร้อน (heat profile) ภายในระบบการทอดแบบพ่นฝอย

ศึกษาการกระจายความร้อนภายในหม้อทอดแบบพ่นฝอย เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบการทอดแบบพ่นฝอย ศึกษาโดยการวัดค่าอุณหภูมิแต่ละจุดภายในหม้อทอด หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (EasyFEM : FEM) และ MATLAB ตามลำดับ

ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้งานได้ง่ายบนเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป เพื่อแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อน การเสียรูปและความเค้นของแผ่นโลหะ รวมทั้งการไหลทั้งแบบรวมความหนืดที่ความเร็วต่ำ และการไหลแบบอัดตัวได้ที่ความเร็วสูงกว่าเสียง เป็นต้น

Finite Element Method (FEM) เป็นวิธีในการหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการประมาณ นิยมใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนทั้งทางด้านรูปร่าง (geometry) และปัญหาขอบเขต (boundary conditions) โดยเริ่มต้นด้วยการแบ่งปัญหาออกเป็นส่วนเล็กๆ โดยชิ้นส่วนเล็กๆ ที่ถูกแบ่งออกจะเรียกว่า เอลิเมนต์ (element) โดยมีจุดเชื่อมต่อกันแต่ละเอลิเมนต์ (element) เรียกว่า โหนด (node) เมื่อเอลิเมนต์ (element) ต่อรวมกันมากจนได้เป็นรูปร่าง จะเรียกรูปร่างนั้นว่า Finite Element Model

MATLAB เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในแวดวงของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรในปัจจุบัน ชื่อโปรแกรม MATLAB นั้นย่อมาจาก MATrix LABoratory โดย MATLAB นั้นได้เริ่มต้นขึ้นเพื่อต้องการให้สามารถแก้ปัญหาตัวแปรที่มีลักษณะเป็นเมตริกซ์ (matrix) ได้ง่ายขึ้น

MATLAB เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงเพื่อใช้ในการคำนวณทางเทคนิค MATLAB ได้รวมการคำนวณ การเขียนโปรแกรมและการแสดงผลรวมกันอยู่ในตัวโปรแกรมเดียว ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอยู่ในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้ลักษณะของการเขียนสมการในโปรแกรมก็จะเหมือนการเขียนสมการคณิตศาสตร์ทั่วไป งานที่นิยมใช้โปรแกรม MATLAB ได้แก่ การคำนวณ หรือการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) การสร้างแบบจำลอง และการทดสอบแบบจำลอง การวิเคราะห์ข้อมูล เป็นต้น ซึ่งการแสดงผลใน MATLAB สามารถแสดงออกมาได้ในลักษณะทั้ง กราฟ 2 มิติ และ 3 มิติ สีต่าง ๆ และรูปภาพ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการสื่อความหมายให้กับผู้ใช้ข้อมูล ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติเด่นของโปรแกรม เนื่องจากการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาต่าง ๆ มักจะขาดเครื่องมือแสดงผลที่เห็นได้ชัดเจน

3.3.3 กระบวนการทอด

กระบวนการทอดแบ่งออกเป็น 2 สถานะคือ

- 1) การทอดที่สภาวะปกติ (แบบจุ่ม) จะใช้อุณหภูมิประมาณ 190 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที
- 2) การทอดแบบพ่นฝอย จะใช้อุณหภูมิประมาณ 190 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที

ชนิดของน้ำมันที่ใช้ คือ น้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยใช้น้ำมันประมาณ 5 ลิตร ต่อครั้ง มีการเปลี่ยนน้ำมันใหม่หลังจากใช้ทอดประมาณ 10 ชั่วโมง และขณะทอดมีการหมุนเหวี่ยงหม้อทอดตลอดเวลาที่ความเร็วรอบในระดับต่างๆ

3.3.4 การศึกษากลไกการทอดแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่างๆ ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับทอดแบบจุ่ม

ศึกษาหาอัตราการไหลของน้ำมัน และความเร็วรอบของหม้อทอดที่เหมาะสมในการทอดแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับทอดแบบจุ่ม โดยทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะในการทอดแบบพ่นฝอย

อัตราการพ่นน้ำมัน (ลิตร/วินาที)	ความเร็วหม้อทอด (รอบ/นาที)
0.3	60, 80, 100
0.5	60, 80, 100
0.7	60, 80, 100

นำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี คือ แบบจุ่มน้ำมัน และแบบพ่นฝอย ในสภาวะต่างๆ มาตรวจสอบลักษณะคุณภาพทั้งทางกายภาพ และทางเคมี ได้แก่ ปริมาณน้ำมัน ปริมาณความชื้น ค่าความหนาแน่น การพองตัว ค่าสี และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เพื่อหาสภาวะการทอดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวตัง

3.3.5 การศึกษากลไกการลดปริมาณน้ำมันดูดซับของผลิตภัณฑ์อาหารหลังการทอด

ศึกษาผลของการสลัดเหวี่ยง (centrifuges) ที่สภาวะต่างๆ (ตารางที่ 2) ภายหลังจากกระบวนการทอดเพื่อลดปริมาณน้ำมันที่มีในชิ้นผลิตภัณฑ์หลังการทอด โดยศึกษาหาระยะเวลาและความเร็วรอบในการสลัดเหวี่ยงที่เหมาะสม

ตารางที่ 2 สภาวะในการสกัดเหวี่ยงน้ำมันออกจากผลิตภัณฑ์

วิธีการทอด	แรงเหวี่ยง (รอบ/นาที)	เวลาเหวี่ยง (นาที)
การทอดแบบจุ่ม	600	2, 4, 6
	800	2, 4, 6
	1000	2, 4, 6
การทอดแบบปั่นฝอย	600	2, 4, 6
	800	2, 4, 6
	1000	2, 4, 6

นำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดทั้งแบบจุ่มน้ำมัน และแบบปั่นฝอย ในสภาวะการทอดที่ดีที่สุด ในข้อ 3.3.3 มาทำการศึกษาผลของการสกัดเหวี่ยงน้ำมันทันทีหลังการทอดเพื่อช่วยลดปริมาณการดูดซับน้ำมัน โดยตรวจสอบลักษณะคุณภาพทั้งทางกายภาพ และทางเคมี ได้แก่ ปริมาณน้ำมัน ปริมาณความชื้น ค่าความหนาแน่น การพองตัว ค่าสี และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

3.3.6 การศึกษาหาสภาวะการทอดแบบปั่นฝอยที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methods : RSM)

ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอดผลิตภัณฑ์ข้าวตัง เพื่อลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทอด และพัฒนาคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้ ในการศึกษาครั้งนี้มีการใช้เทคนิคการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology (RSM)) โดยวางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ดังแสดงในตารางที่ 3 ทำการทอดที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 17 วินาที ตัวแปรสำคัญในการศึกษาระหว่างการทอด ได้แก่ อัตราการปั่นฝอยน้ำมัน 0.3-0.7 ลิตร/วินาที และความเร็วในการหมุนของหม้อทอด 60-100 รอบต่อนาที ส่วนตัวแปรสำคัญในการศึกษาสภาวะการเหวี่ยงน้ำมันหลังการทอด ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุน 600-1000 รอบต่อนาที และเวลา 2-6 นาที ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert 6.0.5

เนื่องจากการศึกษากระบวนการผลิตในบางครั้งทำการศึกษาทดลองทีละปัจจัย (One Factor Method) ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่เรียกว่า Trial & Error Method ได้ ดังนั้นในกรณีที่กระบวนการผลิตนั้นๆ มีปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องหลายปัจจัย และมีปัจจัยร่วมด้วย จึงจำเป็นต้องหาสถานะที่เหมาะสมดังกล่าว

Response Surface Methodology (RSM) เป็นเทคนิคทางสถิติในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สนใจที่สามารถหาจุดที่เหมาะสม (optimization) จากความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นได้

ตัวแปรต้น (Input Variable) เป็นตัวแปรต้น หรือปัจจัยเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น ปริมาณสาร เป็นต้น

ค่าผลตอบสนอง (Response Variable) เป็นค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ผลผลิต (yield) ความหนืด ความแข็ง คະแนนความชอบ ระดับความเข้ม (ทางประสาทสัมผัส) เป็นต้น

เทคนิคการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (RSM) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น กับค่าการตอบสนองได้ สามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง การหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (optimum value) ที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด หรือสามารถเลือกจุดที่เหมาะสมได้จากผลตอบสนองหลายๆ ค่าได้

ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เนื่องจากการออกแบบส่วนประสมกลางเป็นการออกแบบการทดลองที่เป็นส่วนหนึ่งของ Response Surface Methodology ที่ใช้ในการ ออกแบบการทดลองสำหรับพิตแบบจำลองกำลังสอง (Second-Order Model) และนำไปสู่การแปรผลพื้นผิวผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา หลักการพื้นฐานของการออกแบบ ส่วนประสมกลางนั้นเป็นการขยายการออกแบบ 2^k Factorial Design โดยทั่วไปแล้ว CCD จะประกอบด้วย 2^k Factorial ที่มี n_f Runs และ $2k$ Runs ในแนวแกน (Axial Point) ที่เรียกว่า Star Runs และ Center Runs (n_c) ที่จุดศูนย์กลาง และค่า α นี้จะเป็นตัวบอกให้ทราบ ถึงระยะปลายสุดของระดับของปัจจัยที่สนใจศึกษาทั้งทางด้านต่ำ (Low) และด้านสูง (High) ทั้งนี้เพื่อให้สามารถพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณตามระยะทางจากจุดกึ่งกลางของการออกแบบ ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า Rotatable Design นั่นคือค่าความแปรปรวนของผลตอบ ที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม ซึ่งเป็น คุณสมบัติอย่างหนึ่งที่ใช้ในแบบจำลองกำลังสองเพื่อหาพื้นผิวตอบ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดปัจจัยในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทอดแบบ ฟนฝอย คือ ตัวแปรอิสระ (independent variable) ได้แก่ อัตราการพ่นน้ำมัน (x_1) ความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด (x_2) สำหรับกระบวนการทอด และความเร็วรอบในการสลัดเหวี่ยง (x_1) และ ระยะเวลาในการสลัดเหวี่ยง (x_2) สำหรับกระบวนการสลัดเหวี่ยง และตัวแปรตาม (dependent variation) โดยแปรรูปของตัวแปรอิสระ 5 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD)

สภาวะ	ตัวแปรอิสระ	สัญลักษณ์	ระดับของตัวแปรอิสระ				
			-1.414	-1.000	0.000	+1.000	+1.414
การทอด	อัตราการพ่น น้ำมัน (l/s)	X_1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
	ความเร็วรอบ (rpm)	X_2	60	70	80	90	100
การสลัด เหวี่ยง	ความเร็วรอบ (rpm)	X_1	600	700	800	900	1000
	เวลา (min)	X_2	2	3	4	5	6

3.3.7 การตรวจวิเคราะห์ทางกายภาพ

1) ค่าสี (ในระบบ CIE) ใช้วิธี image analysis (ดัดแปลงจากวิธีของ Leon และ คณะ, 2006) และรายงานค่าการวิเคราะห์เป็นค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) (ภาคผนวก ก)

2) ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ พิจารณาจากค่าความแข็ง (hardness) วัดโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer และวิเคราะห์ผลข้อมูลด้วยโปรแกรม Texture Expert Version 1.22

3.3.8 การตรวจวิเคราะห์ทางเคมี

1) ปริมาณความชื้น (moisture content) ใช้หลักการ AOAC วิธี 960.08 (AOAC, 1995) (ภาคผนวก ข)

2) ปริมาณน้ำมัน (oil content) ใช้หลักการ AOCS วิธี Aa 4-38 (AOCS, 1993) (ภาคผนวก ข)

3.3.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ

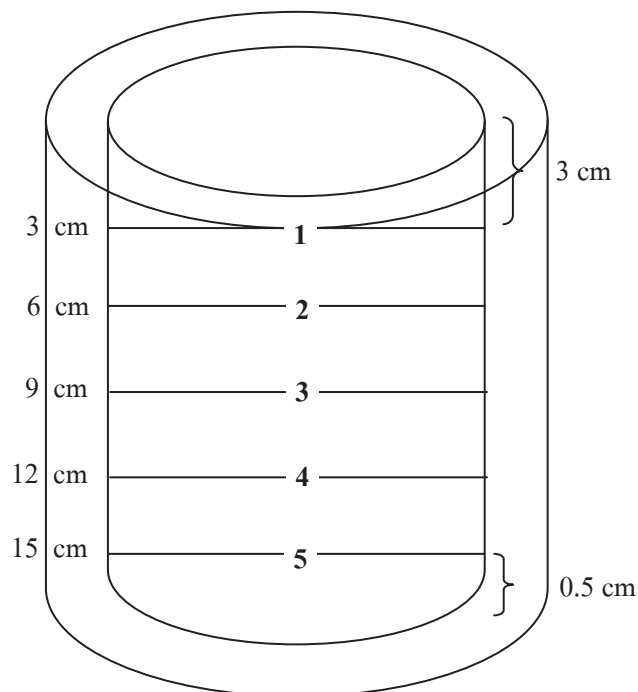
นำผลข้อมูลจากการตรวจสอบลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอด ทั้งทางด้านกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี (การทอดแบบจุ่มน้ำมัน และการทอดแบบฟุ้ง) มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) โดยวางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) การวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS System for Windows Version 8.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) ในการคำนวณทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การศึกษาหาการกระจายความร้อน (heat profile) ในระบบการทอดแบบพ่นฝอย

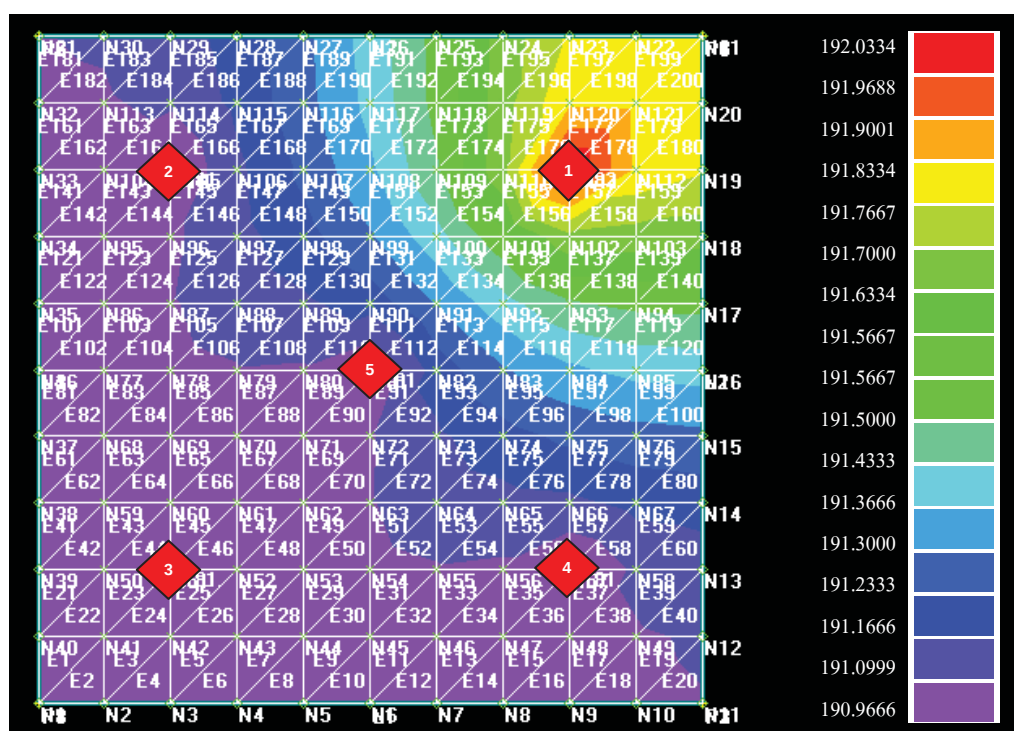
การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาการกระจายความร้อน (heat profile) ภายในหม้อทอดแบบพ่นฝอย เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบการทอดแบบพ่นฝอย ศึกษาโดยการวัดค่าอุณหภูมิแต่ละจุดภายในหม้อทอด โดยแบ่งระนาบสำหรับการศึกษาออกเป็น 5 ระนาบ (ภาพที่ 8) วัดค่าอุณหภูมิระนาบละ 5 จุด หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Methods : FEM) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์เป็นแผนภาพสองมิติ แสดงการกระจายความร้อนในแต่ละระนาบภายในหม้อทอด



ภาพที่ 8 ระนาบภายในหม้อทอดแบบพ่นฝอย

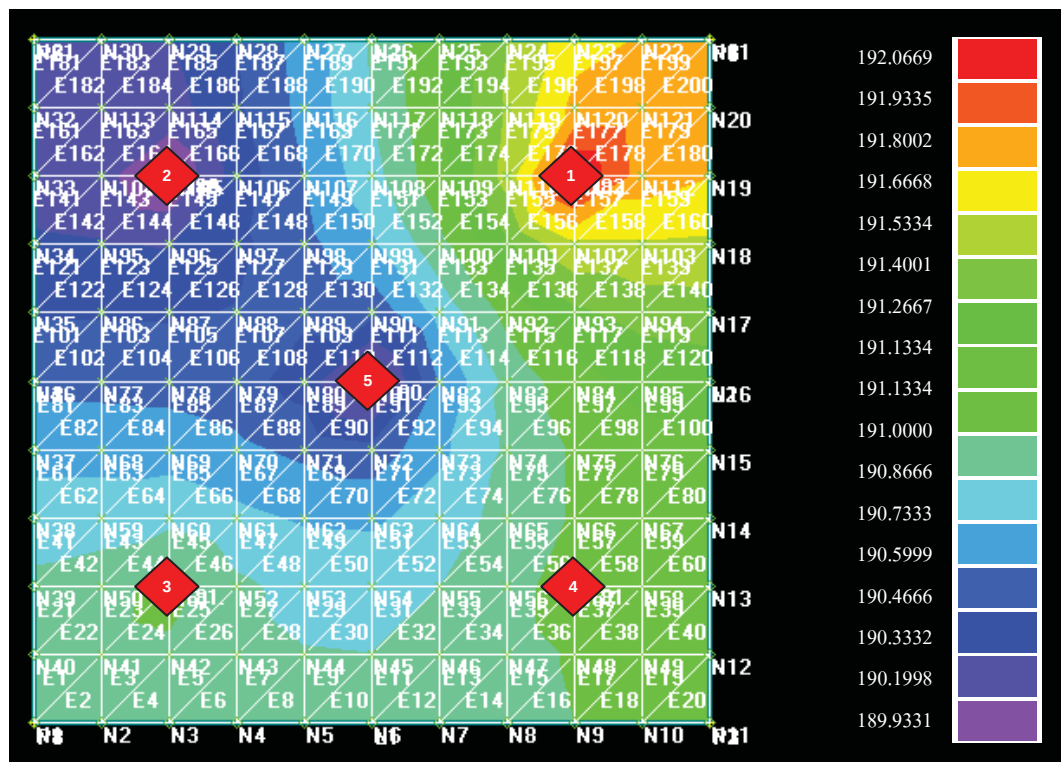
จากการวิเคราะห์ผลข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element : FEM) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์เป็นแผนภาพสองมิติ แสดงการกระจายความร้อนแต่ละระนาบภายในหม้อทอด ดังนี้

1) ในระนาบที่ 1 แสดงการกระจายความร้อนในระดับที่ห่างจากด้านบนของหม้อทอด 3 เซนติเมตร พบว่า อุณหภูมิโดยเฉลี่ยบนระนาบมีค่าประมาณ 192.4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำมันในหม้อเตรียมทอด ดังแสดงในภาพที่ 9



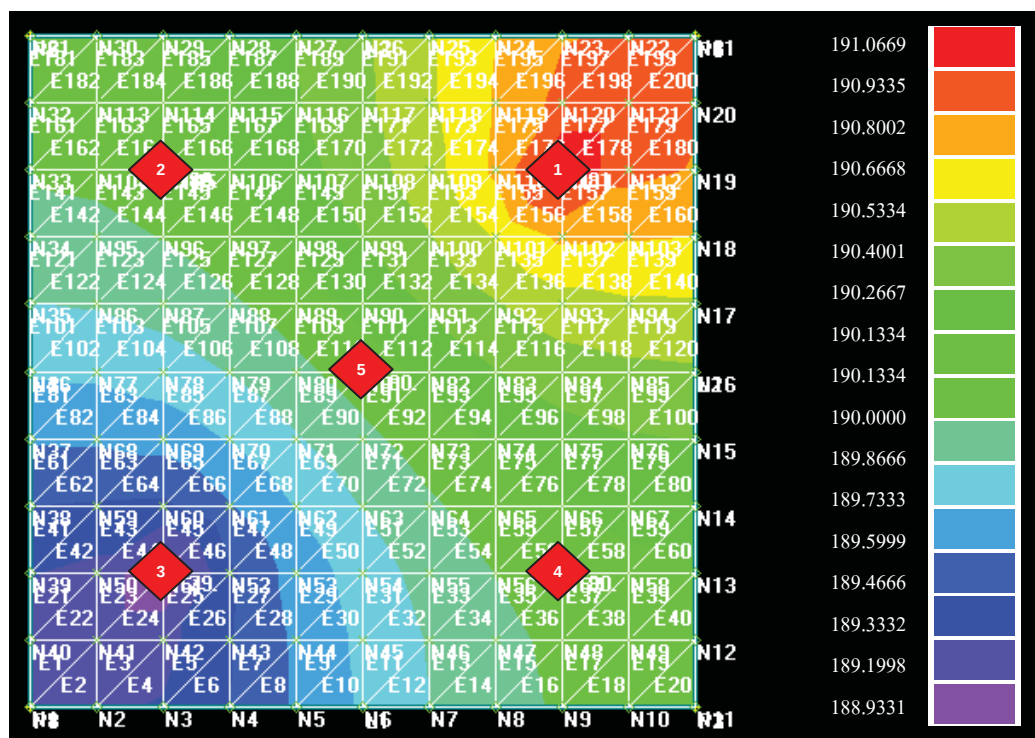
ภาพที่ 9 การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 1 ของหม้อทอดแบบฟ้นฝอย

2) ในระนาบที่ 2 แสดงการกระจายความร้อนในระดับที่ห่างจากด้านบนของหม้อทอด 6 เซนติเมตร พบว่า อุณหภูมิโดยเฉลี่ยบนระนาบมีค่าประมาณ 191.6 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิมีค่าลดลงจากระนาบที่ 1 ประมาณ 1 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 10



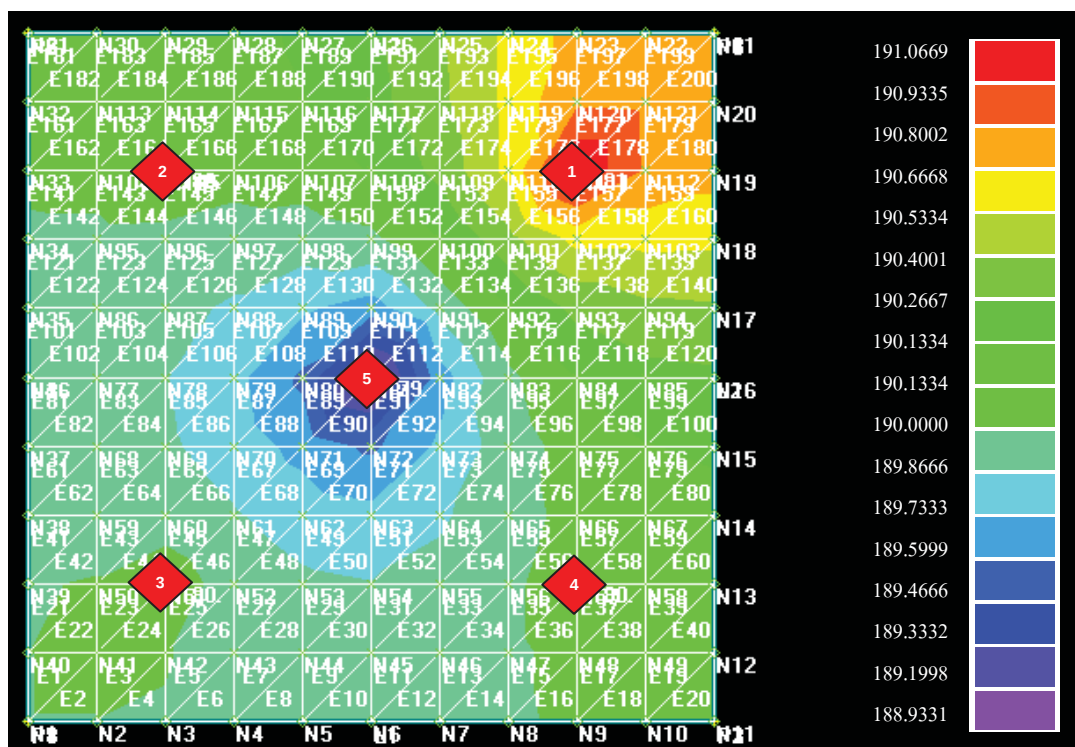
ภาพที่ 10 การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 2 ของหม้อทอดแบบฟ้นฝอย

3) ในระนาบที่ 3 แสดงการกระจายความร้อนในระดับที่ห่างจากด้านบนของหม้อทอด 9 เซนติเมตร พบว่า อุณหภูมิโดยเฉลี่ยบนระนาบมีค่าประมาณ 190.6 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิมีค่าลดลงจากระนาบที่ 1 ประมาณ 2 องศาเซลเซียส และลดลงจากระนาบที่ 2 ประมาณ 1 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 11



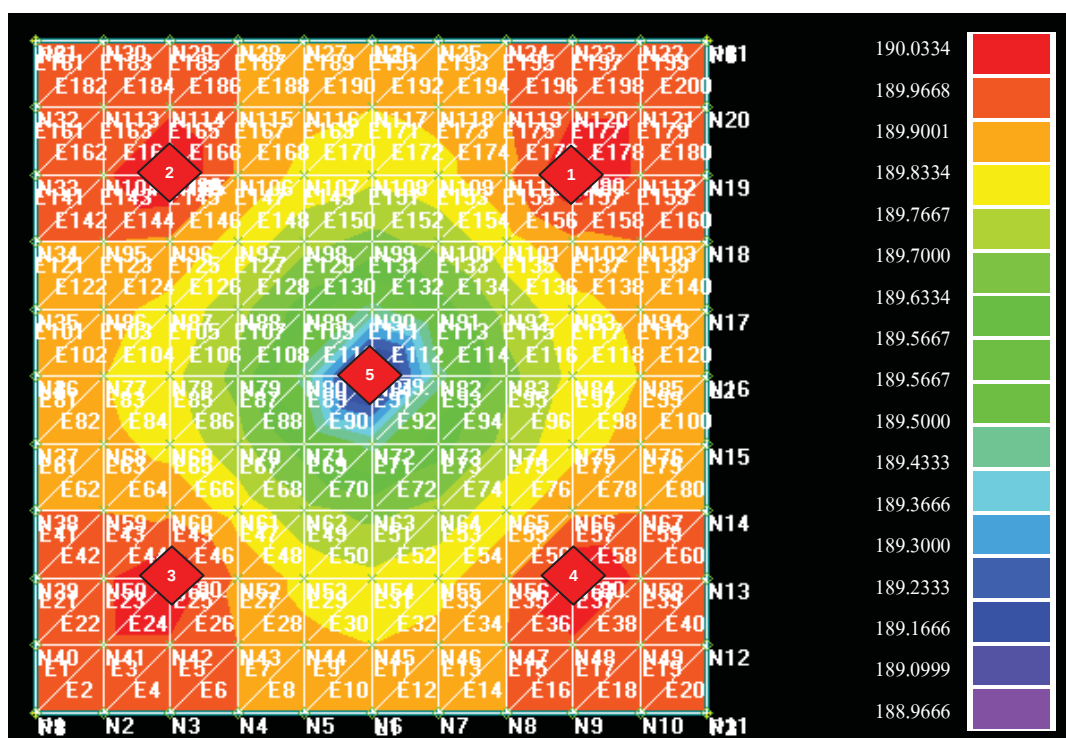
ภาพที่ 11 การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 3 ของหม้อทอดแบบฟุ้ง

4) ในระนาบที่ 4 แสดงการกระจายความร้อนในระดับที่ห่างจากด้านบนของหม้อทอด 12 เซนติเมตร พบว่า อุณหภูมิโดยเฉลี่ยบนระนาบมีค่าประมาณ 189.8 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิมีค่าลดลงจากระนาบที่ 1 ประมาณ 3 องศาเซลเซียส และลดลงจากระนาบที่ 2 และ 3 อีกประมาณ 1 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 4 ของหม้อทอดแบบฟันทอย

5) ในระนาบที่ 5 แสดงการกระจายความร้อนในระดับที่ห่างจากด้านบนของหม้อทอด 15 เซนติเมตร และห่างจากบริเวณด้านล่างของหม้อทอด 0.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับเดียวกับที่วาง ขึ้นผลิตภัณฑ์ พบว่า อุณหภูมิโดยเฉลี่ยบนระนาบมีค่าประมาณ 189.8 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ อุณหภูมิเฉลี่ยในระนาบที่ 4 ที่ระนาบดังกล่าวนี้ อุณหภูมิมีค่าลดลงจากระนาบที่ 1 ประมาณ 3 องศาเซลเซียส และลดลงจากระนาบที่ 2 และ 3 อีกประมาณละ 1 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การกระจายความร้อน (heat profile) ในระนาบที่ 5 ของหม้อทอดแบบฟ้นฝอย

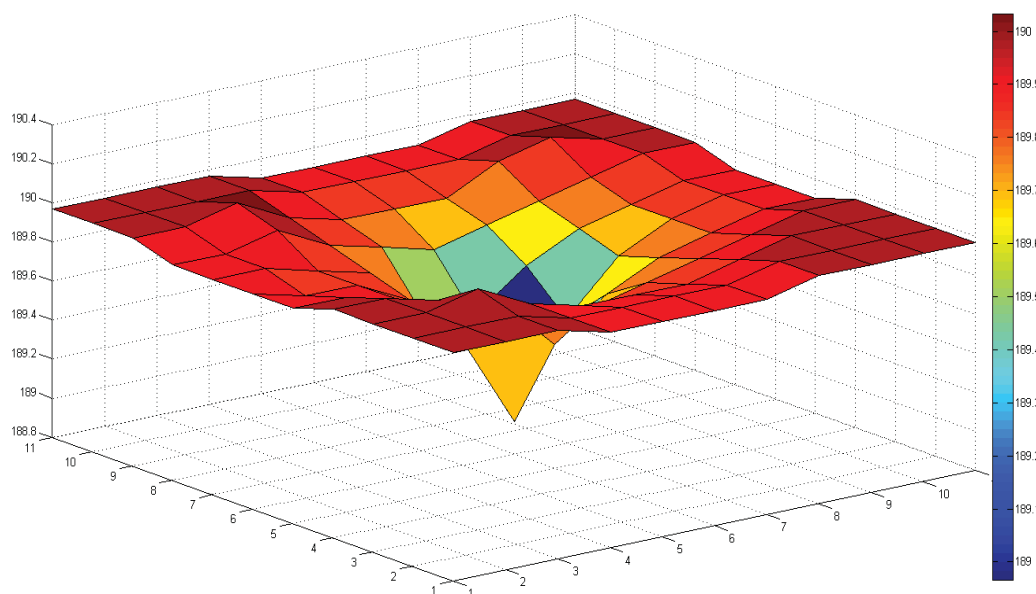
จากแผนภาพสองมิติแสดงการกระจายความร้อน (heat profile) แต่ละระนาบภายในหม้อทอด แสดงให้เห็นอุณหภูมิโดยรวมของการกระจายความร้อนของแต่ละจุดบนระนาบภายในระบบการทอดแบบฟ้นฝอย สังเกตได้ว่าการกระจายความร้อนบนระนาบที่ 1 ถึง 3 ในตอนต้น จะมีบริเวณที่เป็นจุด hot spot (จุดสีแดง) ตรงจุดที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากที่จุดดังกล่าวเป็นหัวฟ้นฝอยที่เชื่อมต่อกับท่อเข้าของน้ำมัน ทำให้ ณ จุดดังกล่าวมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าจุดอื่นๆ บนระนาบ และเมื่อพิจารณาที่ระนาบที่ 4 และ 5 พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของระนาบทั้งสองมีค่าเท่ากัน คือ 189.8 องศาเซลเซียส โดยที่การกระจายความร้อนในระนาบที่ 5 ก่อนข้างมีความสม่ำเสมอ สังเกตได้จากสีแสดงค่าอุณหภูมิบนระนาบที่เป็นโทนสีเดียวกัน ยกเว้นบริเวณตรงกลางของหม้อทอด จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณ

รอบข้าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระบบหม้อทอดแบบฟ้นฝอยที่ใช้ในการทดลอง มีการออกแบบให้มีหัวฟ้นฝอยเพียงแค่ 4 หัวบริเวณมุมของหม้อทอดเท่านั้น ทำให้ละอองน้ำมันฟ้นกระจายได้อย่างไม่ทั่วถึง ดังนั้นในการออกแบบระบบการทอดแบบฟ้นฝอยในระดับปฏิบัติการอาจมีการพัฒนาโดยการเพิ่มหัวฟ้นฝอยน้ำมันให้เพียงพอกับระบบ หรืออาจออกแบบเป็นระบบสายพาน เพื่อให้ละอองน้ำมันมีการกระจายตัวสัมผัสกับชิ้นอาหารอย่างทั่วถึง และเกิดการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการกระจายความร้อนโดยภาพรวมของทั้งระบบ กล่าวได้ว่า การกระจายความร้อนบนระนาบทั้ง 5 ระนาบภายในระบบหม้อทอดแบบฟ้นฝอยค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ ซึ่งอุณหภูมิบนระนาบที่อยู่ห่างจากด้านบนของหม้อทอดบริเวณหัวฟ้นฝอยน้ำมันอาจมีแนวโน้มลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากระนาบที่ 1 จนถึงระนาบที่ 5 มีค่าอุณหภูมิลดลงประมาณ 3 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเกิดจากการสูญเสียความร้อนไปบางส่วนขณะการฟ้นฝอยน้ำมันจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของหม้อทอด จากข้อมูลดังกล่าวนี้ทำให้สามารถทำนายอุณหภูมิที่ระยะห่างจากหัวฟ้นฝอยในระดับต่างๆ ได้ ซึ่งเป็นผลดีต่อการคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์ที่จะนำลงทอดในแต่ละครั้ง รวมถึงระดับการวางผลิตภัณฑ์ และสามารถพิจารณาถึงแนวโน้มการกระจายความร้อนภายในระบบการทอดได้

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น เป็นการแสดงแผนภาพการกระจายความร้อน (heat profile) เพียง 2 มิติ ในแนวระนาบ ดังนั้นเพื่อแสดงให้เห็นการกระจายความร้อนของทั้งระบบภายในหม้อทอดแบบฟ้นฝอย จึงนำข้อมูลอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ บนระนาบดังกล่าวมาพล็อตเป็นกราฟสามมิติ โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB ช่วยในการวิเคราะห์ผลข้อมูล

เนื่องจาก MATLAB เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงเพื่อใช้ในการคำนวณทางเทคนิค ซึ่งการแสดงผลใน MATLAB สามารถแสดงออกมาได้ในลักษณะทั้ง กราฟสองมิติ และ กราฟสามมิติ สีต่าง ๆ และรูปภาพ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการสื่อความหมายให้กับผู้ใช้ข้อมูล ทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติเด่นของโปรแกรม สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 14



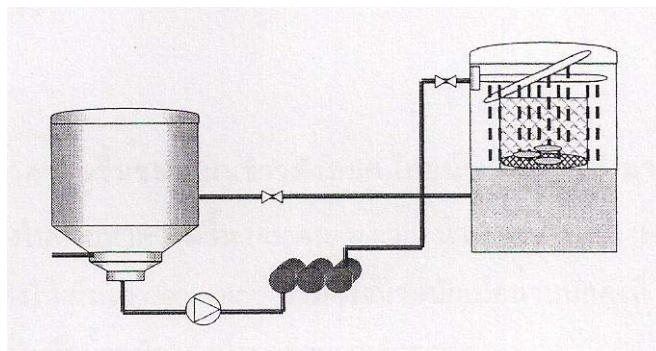
ภาพที่ 14 การกระจายความร้อน (heat profile) ในระบบการทอดแบบฟ้นฝอย

จากภาพที่ 14 เป็นแผนภาพสามมิติ แสดงให้เห็นการกระจายความร้อนของทั้งระบบภายในระบบการทอดแบบฟ้นฝอย สังเกตได้ว่าการกระจายความร้อนโดยภาพรวมค่อนข้างมีความสม่ำเสมอทั้งระบบ ส่วนอุณหภูมิบริเวณตรงกลางอาจมีค่าต่ำกว่าบริเวณโดยรอบเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากข้อจำกัดของเครื่องทอดแบบฟ้นฝอยที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนหัวฟ้นฝอยน้ำมันเพียง 4 หัวบริเวณมุมทั้งสี่ของหม้อทอด ทำให้ละอองน้ำมันอาจมีการกระจายตัวอย่างไม่ทั่วถึง และอาจเกิดจากในระบบการฟ้นฝอยน้ำมัน ละอองน้ำมันจะถูกฟ้นกระจายไปทั้งระบบ ทำให้อาจเกิดการสูญเสียความร้อนไปบางส่วนในระหว่างกระบวนการทอดได้

ดังนั้น ในการพัฒนาระบบการทอดแบบฟ้นฝอยในเชิงพาณิชย์ ควรคำนึงถึงจำนวนหัวฟ้นฝอยน้ำมัน ระยะห่างระหว่างหัวฟ้นฝอยน้ำมันและระดับการวางผลิตภัณฑ์อาหาร หรืออาจมีการออกแบบเป็นระบบสายพาน เพื่อให้ละอองน้ำมันมีการสัมผัสกับชิ้นอาหารอย่างทั่วถึง และมีการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ

4.2 การศึกษาหาอัตราการพ่นน้ำมันของเครื่องทอดแบบพ่นฝอยต้นแบบ

4.2.1 ศึกษาหาอัตราการพ่นน้ำมันและความเร็วในการหมุนของหม้อทอดของเครื่องทอดต้นแบบ



ภาพที่ 15 เครื่องทอดแบบพ่นฝอยต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

โดยศึกษาหาอัตราการพ่นน้ำมันและความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอดที่เหมาะสมสำหรับการทอดผลิตภัณฑ์ข้าวตัง โดยทดลองปรับระดับอัตราการพ่นน้ำมัน พร้อมกับระดับการหมุนของหม้อทอด (ตารางที่ 4) เพื่อให้ได้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ดีใกล้เคียงกับการทอดแบบจุ่ม โดยกำหนดอุณหภูมิน้ำมันในการทอดที่ 190 องศาเซลเซียส และใช้เวลาทอด 17 วินาที

ตารางที่ 4 กำหนดสภาวะในการทอดแบบพ่นฝอย

อัตราการพ่นน้ำมัน (ลิตร/วินาที)	ความเร็วหม้อทอด (รอบ/นาที)
0.3	60, 80, 100
0.5	60, 80, 100
0.7	60, 80, 100

จากการทดลองหาอัตราการพ่นน้ำมันของเครื่องทอดแบบพ่นฝอย พบว่าสภาวะที่ใช้ อัตราการพ่นน้ำมันที่ 0.3 ลิตรต่อวินาที ด้วยความเร็วการหมุนของหม้อทอดที่ 60 รอบต่อนาที จะให้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดกรอบที่มีรูปร่างสวยงาม พองฟู และสุกทั่วทั้งชิ้น โดยมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ผ่านการทอดแบบจุ่มมากที่สุด แต่ในสภาวะที่ใช้ อัตราการพ่นน้ำมัน 0.5 และ 0.7 ลิตรต่อวินาที พบว่าลักษณะของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดกรอบที่ได้ไม่สวยงาม มีลักษณะเป็นแผ่นโค้งงอ เนื่องจากอัตราการพ่นน้ำมันที่แรงเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะโค้งงอ และพบว่าที่สภาวะดังกล่าวมีน้ำมันบางส่วนค้างอยู่บริเวณผิวหน้าของแผ่นข้าวตัง ทำให้ผลิตภัณฑ์สุกไม่ทั่วทั้งแผ่น และมีสีที่ไม่สม่ำเสมอ

เมื่อพิจารณาถึงระดับความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด พบว่าไม่ส่งผล หรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ข้าวตัง ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะการทอดแบบพ่นฝอย มีการพ่นละอองน้ำมันร้อนอย่างทั่วถึงทั้งระบบ แม้จะไม่มี การหมุนของหม้อในระหว่างกระบวนการทอดก็ตาม แต่ในสภาวะที่มีการหมุนของหม้อทอดที่เร็วเกินไป และการใช้อัตราการพ่นน้ำมันที่แรงเกินไป อาจจะส่งผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ และอาจทำให้น้ำมันบางส่วนกระเด็นออกไปบริเวณนอกตะกร้าทอด เกิดการสูญเสียน้ำมันไปบางส่วนในระหว่างกระบวนการทอดได้ ดังนั้นจึงต้องเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอด และผลิตภัณฑ์อาหารทอด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นที่ยอมรับ และตรงตามความต้องการมากที่สุด พิจารณาได้จากผลการทดลองในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณลักษณะทางเคมี กายภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยที่
สภาวะต่างๆ

ความเร็ว รอบ (rpm)	อัตราพ่น น้ำมัน (l/s)	%	%	สี			ความ หนาแน่น	อัตราการ พองตัว	ความแข็ง (N/g)
				L*	a*	b*			
60	0.3	17.01 ^d	5.37 ^d	71.27 ^a	3.73 ^a	16.26 ^c	0.55 ^a	3.24 ^b	4.14 ^a
	0.5	17.24 ^c	5.73 ^b	70.86 ^b	3.22 ^b	16.21 ^c	0.52 ^a	3.41 ^a	3.82 ^b
	0.7	17.32 ^c	5.39 ^d	70.29 ^c	3.16 ^b	15.98 ^c	0.45 ^b	3.42 ^a	3.84 ^b
80	0.3	17.15 ^{cd}	5.59 ^c	69.14 ^d	3.17 ^b	17.19 ^{ab}	0.39 ^b	3.41 ^a	3.88 ^b
	0.5	17.49 ^{ab}	5.57 ^c	69.88 ^d	2.98 ^c	16.52 ^d	0.40 ^b	3.45 ^a	3.71 ^c
	0.7	17.49 ^{ab}	5.46 ^d	70.01 ^c	3.11 ^b	16.88 ^{cd}	0.41 ^b	3.44 ^a	3.73 ^c
100	0.3	17.41 ^b	5.74 ^b	68.39 ^c	3.12 ^b	18.23 ^a	0.41 ^b	3.22 ^b	4.15 ^a
	0.5	17.52 ^a	6.11 ^a	69.11 ^d	2.96 ^c	17.34 ^b	0.40 ^b	3.21 ^b	4.11 ^a
	0.7	17.64 ^a	5.77 ^b	68.63 ^c	2.74 ^c	18.18 ^a	0.40 ^b	3.18 ^b	4.11 ^a

จากผลการทดลองดังตารางที่ 5 พบว่า อัตราการพ่นน้ำมันมีผลต่อคุณลักษณะทางเคมี และกายภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอด กล่าวคือ อัตราการพ่นน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์ข้าวตังมีลักษณะโค้งงอ ส่งผลต่อค่าการพองตัวของผลิตภัณฑ์ และมีสีที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากอัตราการพ่นน้ำมันที่แรงเกินไป นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการพ่นน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับน้ำมันที่เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่สภาวะดังกล่าวมีน้ำมันบางส่วนค้างอยู่บริเวณผิวหน้าของแผ่นข้าวตัง

เมื่อพิจารณาถึงระดับความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด พบว่าไม่ส่งผล หรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ข้าวตัง ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะการทอดแบบพ่นฝอย มีการพ่นละอองน้ำมันร้อนอย่างทั่วถึงทั้งระบบ แม้จะไม่มีหม้อทอดในระหว่างกระบวนการทอดก็ตาม แต่ทั้งนี้การหมุนของหม้อทอดก็มีความสำคัญในระบบของการทอด

เช่นเดียวกัน เนื่องจากในระบบการทอดแบบพ่นฝอย ประกอบด้วยหัวพ่นฝอยน้ำมัน 4 หัวอยู่บริเวณมุมของหม้อทอด ที่ทำหน้าที่ในการพ่นละอองน้ำมันออกมาสัมผัสกับชิ้นผลิตภัณฑ์อาหารทอด ดังนั้นการหมุนของหม้อทอด มีส่วนป้องกันการเกิดจุดอับ หรือบริเวณที่ไม่สัมผัสกับละอองน้ำมัน (overshadow) ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถสัมผัสกับละอองน้ำมันได้อย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตามการกำหนดสภาวะความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอดต้องมีความเหมาะสมกับระบบ และผลิตภัณฑ์อาหารทอด สภาวะที่มีการหมุนของหม้อทอดที่เร็วเกินไป อาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีการดูดซับน้ำมันในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการหมุนของหม้อทอดทำให้ผลิตภัณฑ์มีโอกาสสัมผัสกับละอองน้ำมันได้มากขึ้น ดังผลการทดลองในตารางที่ 5

จากผลการทดลองดังกล่าว ทำให้ได้สภาวะการทอดแบบพ่นฝอยที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวตัง คือ อัตราการพ่นน้ำมันที่ 0.3 ลิตรต่อวินาที และความเร็วรอบของหม้อทอดที่ 60 รอบต่อนาที โดยพิจารณาจากคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดที่ได้มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบแบน สีสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น มีค่าการพองตัวที่เหมาะสม มีลักษณะทางกายภาพโดยรวมใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดแบบจุ่มน้ำมัน และเมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเคมี พบว่า ที่สภาวะดังกล่าว ผลิตภัณฑ์มีการดูดซับน้ำมันน้อยที่สุดเพียง 17.01 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น ในระหว่างกระบวนการทอดจึงต้องคำนึงถึงปัจจัย และมีการควบคุมสภาวะต่างๆ เช่น ความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด และอัตราการพ่นน้ำมัน อย่างเหมาะสม เพื่อให้ระบบการทอดแบบพ่นฝอยเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

4.2.2 ศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแผ่นข้าวตังที่ได้จากการทอดแบบจุ่ม และการทอดแบบพ่นฝอย

จากการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอดที่เหมาะสมทั้ง 2 วิธี คือ ใช้อุณหภูมิ น้ำมัน 190 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทอด 17 วินาที อัตราการพ่นน้ำมันที่ 0.3 ลิตรต่อวินาที และความเร็วรอบในการหมุนหม้อทอด 60 รอบต่อนาที สำหรับการทอดแบบพ่นฝอย แล้วนำมาวัดคุณลักษณะทางกายภาพ (สี ลักษณะเนื้อสัมผัส ความหนาแน่น และค่าการพองตัว) และทางเคมี (ความชื้น และการดูดซับน้ำมัน) พบว่า กระบวนการทอดแบบพ่นฝอยสามารถลดปริมาณน้ำมันลงได้ถึง 46 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับทอดแบบจุ่ม แต่การทอดแบบพ่นน้ำมันจะมีค่าความชื้นมากกว่าการทอดแบบจุ่มน้ำมัน (ภาพที่ 17) ทั้งนี้อาจเกิดจากในสภาวะการทอดแบบพ่นฝอย ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะมีการสัมผัสกับละอองน้ำมันร้อนในช่วงระยะเวลานั้นๆ ทำให้การถ่ายเทมวลใน

ระหว่างการทอดเกิดขึ้นเพียงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดแบบพ่นฝอยมีปริมาณความชื้นสูงกว่าการทอดแบบจุ่มน้ำมัน ซึ่งถือเป็นข้อดีสำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอด เนื่องจากในกระบวนการผลิตข้าวตังทอด เมื่อแผ่นข้าวตังผ่านกระบวนการทอดแล้ว จะถูกนำมาทาน้ำเป็นรสชาติต่างๆ เช่น ข้าวตังหน้าหมูหยองน้ำพริกเผา หรือข้าวตังหน้าธัญพืช หลังจากนั้นจะนำเข้าตู้อบลมร้อนเพื่อลดความชื้นอีกครั้ง ดังนั้นแผ่นข้าวตังที่ผ่านสภาวะการทอดแบบพ่นฝอย เมื่อนำไปผ่านกระบวนการอบอีกครั้ง จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นที่เหมาะสมพอดี ไม่แห้งหรือแฉะจนเกินไป

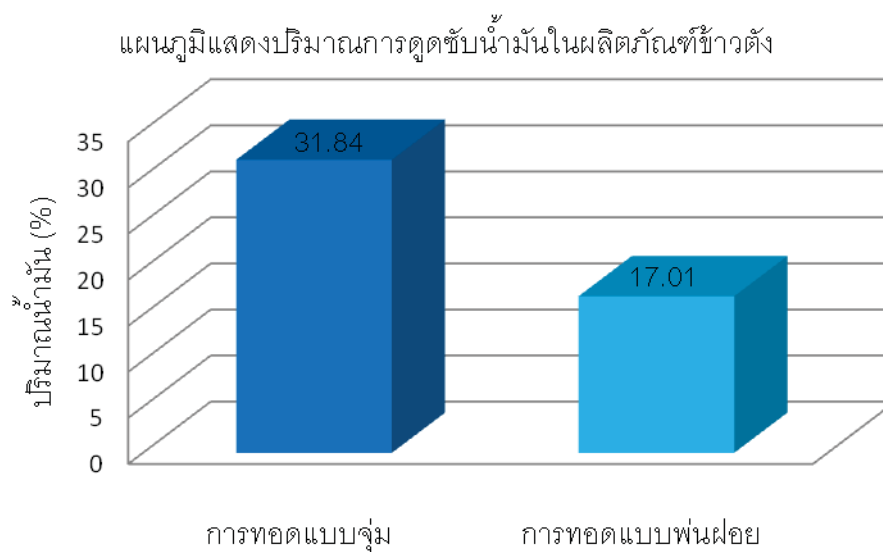
ผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ได้จากการทอดแบบพ่นฝอย มีค่าปริมาณการดูดซับน้ำมัน 17.01 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการทอดแบบจุ่ม ที่มีค่าปริมาณการดูดซับน้ำมันถึง 31.84 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 6) ทั้งนี้เนื่องจาก ในการทอดแบบพ่นฝอยจะมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันให้ร้อนอย่างต่อเนื่อง และมีอัตราการพ่นน้ำมันอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับละอองน้ำมันเพียงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น จากนั้นน้ำมันจะไหลผ่านตะแกรงลงสู่ด้านล่าง และถูกดึงกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง เป็นระบบหมุนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ อีกทั้งยังมีการหมุนของหม้อทอดในระหว่างการทอดตลอดเวลา ซึ่งเปรียบเสมือนการสลัดเหียงน้ำมันบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ออก ทำให้มีน้ำมันเหลือติดที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นผลิตภัณฑ์น้อย เป็นผลทำให้การดูดซับน้ำมันเข้าสู่ชิ้นผลิตภัณฑ์หลังกระบวนการทอดลดลง

นอกจากนี้ยังพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอดทั้ง 2 แบบมีสีและความหนาแน่นใกล้เคียงกัน โดยที่ผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดแบบพ่นฝอยจะมีสีที่สว่างกว่าการทอดแบบจุ่มน้ำมันเล็กน้อย พิจารณาได้จากค่า L^* (ตารางที่ 6) แต่เมื่อพิจารณาการพองตัว และลักษณะเนื้อสัมผัสแล้ว พบว่าแผ่นข้าวตังที่ได้จากการทอดแบบพ่นฝอยจะมีอัตราการพองตัวที่ต่ำกว่า และมีค่าความแข็ง (hardness) มากกว่า เนื่องจากการพองตัวของชิ้นอาหารที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด เกิดจากการระเบิดของโครงสร้างรูพรุนในชิ้นอาหารเมื่อสัมผัสกับน้ำมันร้อน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดแบบจุ่มมีค่าการพองตัวที่มากกว่า เนื่องจากชิ้นผลิตภัณฑ์ถูกจุ่มอยู่ในน้ำมันร้อนโดยตรง จึงทำให้โครงสร้างรูพรุนเกิดการระเบิดออกอย่างรุนแรงเนื่องจากความร้อน แต่เมื่อพิจารณาลักษณะภายนอกโดยภาพรวม พบว่าผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดจากทั้ง 2 กระบวนการ มีลักษณะทางกายภาพที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เพียงแต่ข้าวตังที่ผ่านการทอดแบบพ่นฝอยจะมีสีที่สว่างกว่า และมีลักษณะแผ่นที่ค่อนข้างเรียบกว่า แต่ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยสามารถพ่นละอองน้ำมันได้ที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นผลิตภัณฑ์เท่านั้น ทำให้กระบวนการทอดดังกล่าวมีข้อจำกัดในเรื่องลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่จะใช้ทอด กล่าวคือผลิตภัณฑ์ที่

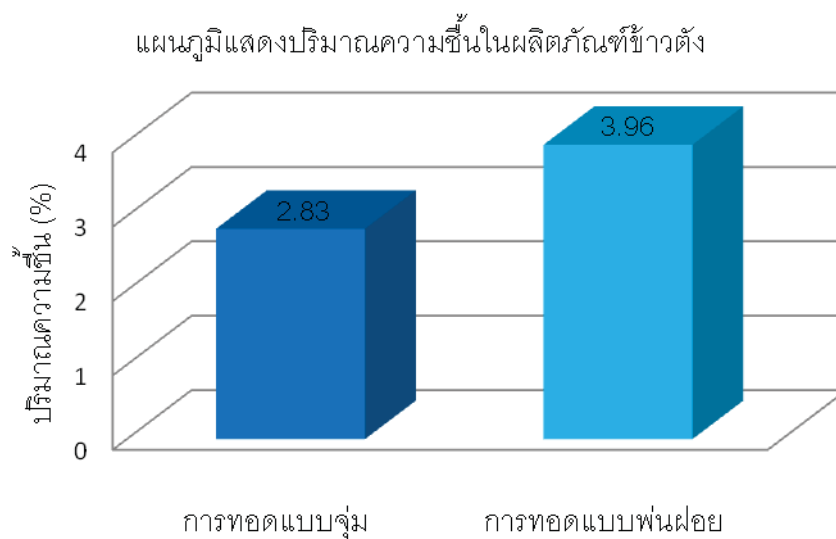
เหมาะสมควรมีลักษณะเป็นแผ่นแบนราบบาง เพื่อให้สะดวกต่อกระบวนการทอด และให้ละอองน้ำมันสามารถทะลุผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ได้อย่างทั่วถึง

ตารางที่ 6 สรุปการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติที่ได้จากแผ่นข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี

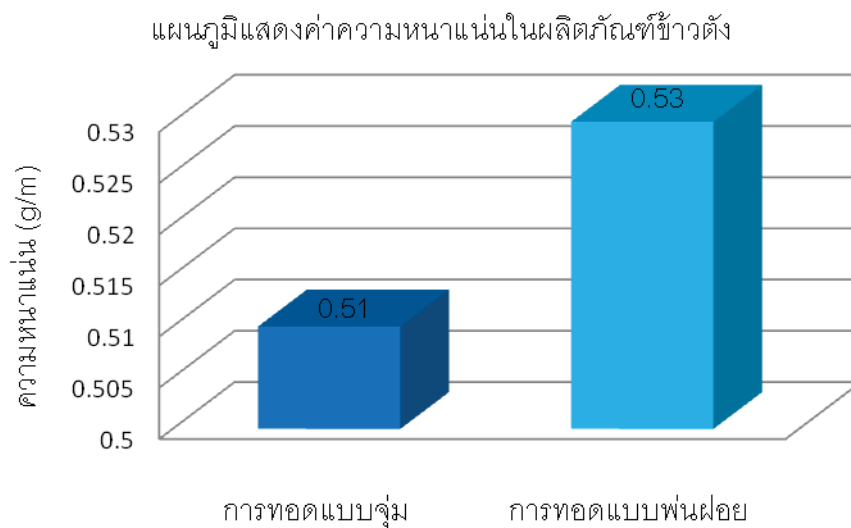
สภาวะการทอด	ปริมาณไขมัน (%)	ปริมาณความชื้น (%)	สี			ความหนาแน่น	อัตราการพองตัว	ความแข็ง (N/g)
			L*	a*	b*			
การทอดแบบจุ่มน้ำมัน	31.84 ^a	3.06 ^b	69.08 ^a	4.83 ^a	16.46 ^a	0.53 ^a	4.13 ^a	2.44 ^b
การทอดแบบพ่นน้ำมัน	17.01 ^b	5.37 ^a	71.27 ^a	3.73 ^a	16.24 ^a	0.55 ^a	3.24 ^b	4.14 ^a



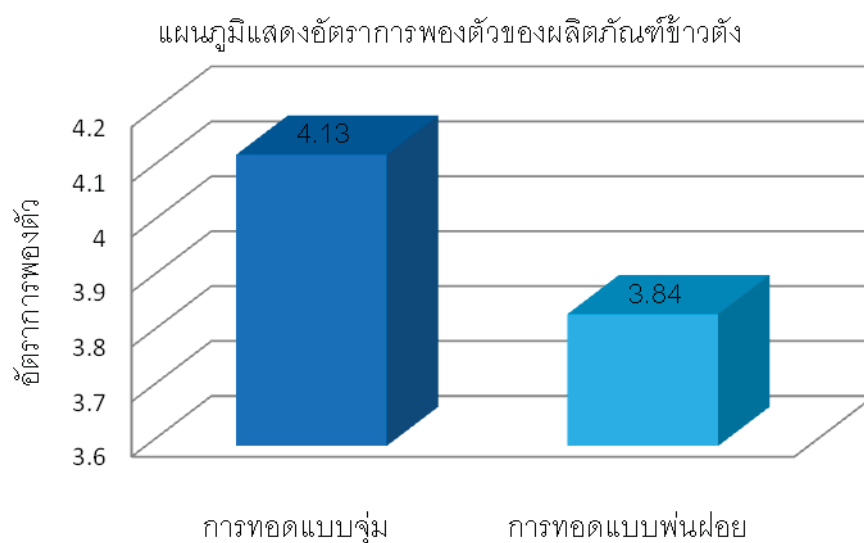
ภาพที่ 16 ปริมาณน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที



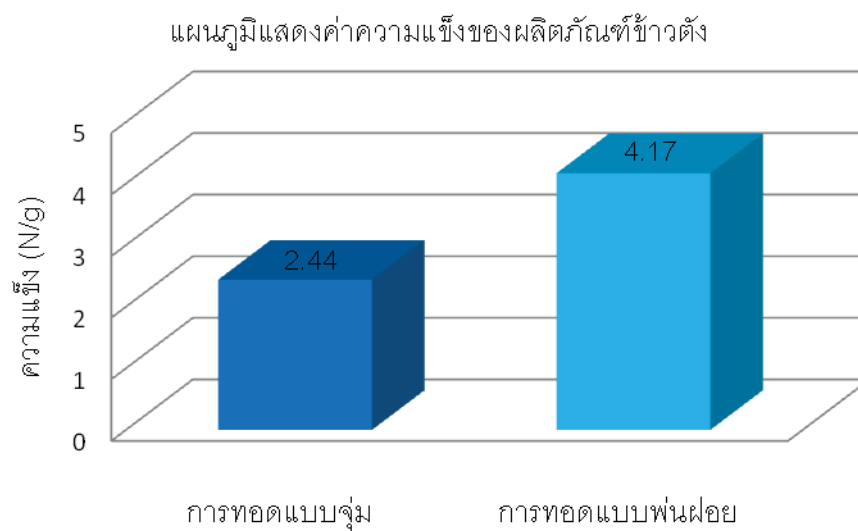
ภาพที่ 17 ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที



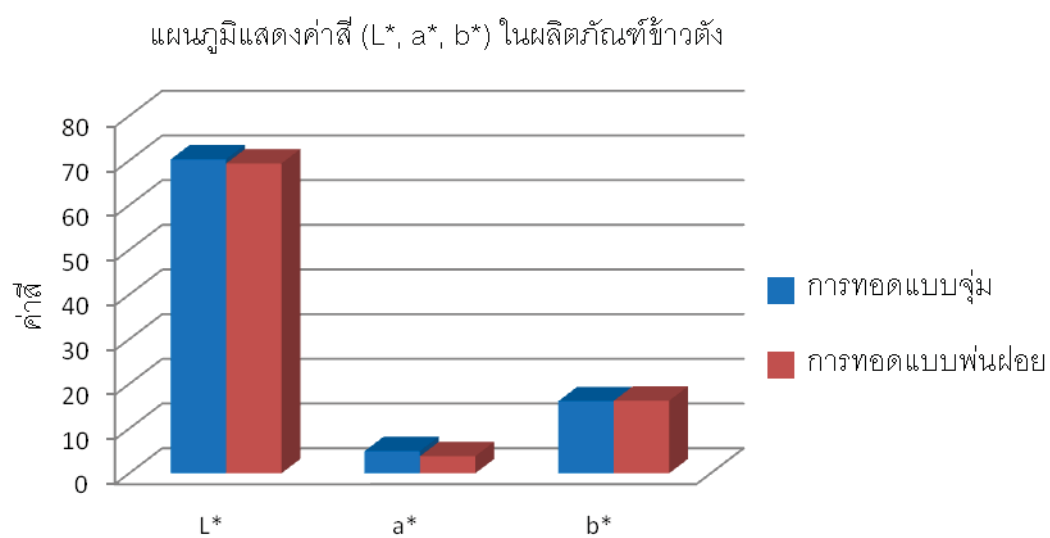
ภาพที่ 18 ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที



ภาพที่ 19 อัตราการฟองตัวของผลิตภัณฑ์ข้าวดังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที



ภาพที่ 20 ความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวดังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที



ภาพที่ 21 ค่าสีของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วินาที



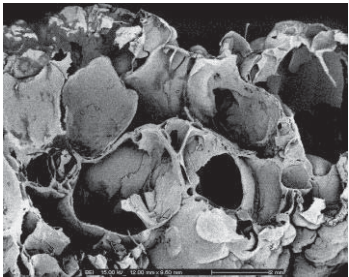
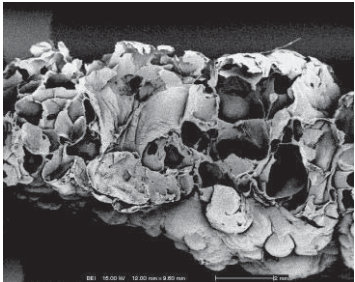
ภาพที่ 22 ลักษณะผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน



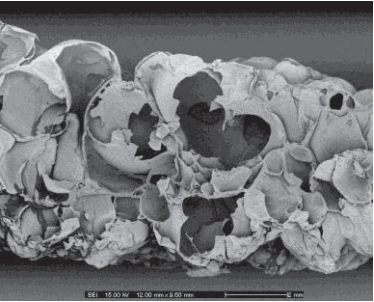
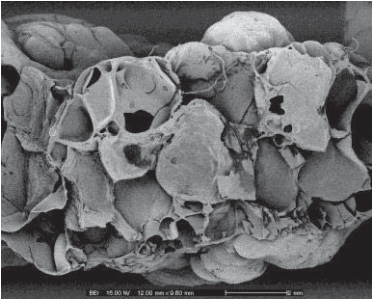
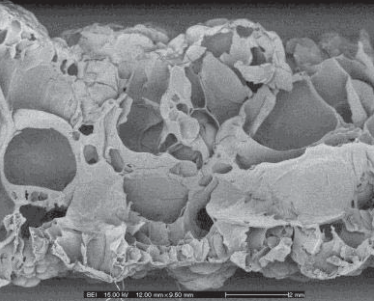
ภาพที่ 23 ลักษณะผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย

จากผลข้อมูลดังกล่าวข้างต้น พบว่า ผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยมีค่าการพองตัวต่ำกว่ากระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน ซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีสมมติฐานว่าเกิดจากโครงสร้างความเป็นรูพรุน (porosity) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการทอดนั้น เพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานดังกล่าว จึงได้พิจารณาถึงลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย เปรียบเทียบกับกระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมันด้วย ซึ่งได้ศึกษาโดยใช้กล้องถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยถ่ายภาพตามแนวตัดขวางของชิ้นตัวอย่าง ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟ ซึ่งสภาวะการทดสอบเป็นแบบ High Vacuum mode เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนของชิ้นตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทอด และวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดรูพรุนเปรียบเทียบกับสภาวะการทอดแบบจุ่มน้ำมัน (ศึกษา ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร) หลังจากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ขนาด และการกระจายตัวของรูพรุน โดยอาศัยภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งใช้โปรแกรม ImageJ จะให้ข้อมูลมาเป็นหน่วยพื้นที่ (μm^2) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานให้พื้นที่รูพรุนเป็นพื้นที่วงกลม หลังจากนั้นจึงคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนแต่ละรู ได้ผลข้อมูลดังตารางที่ 7

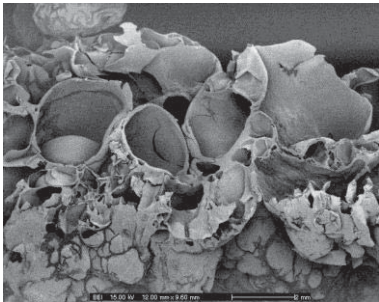
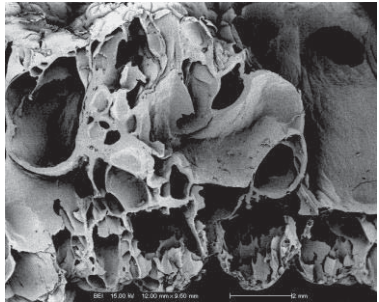
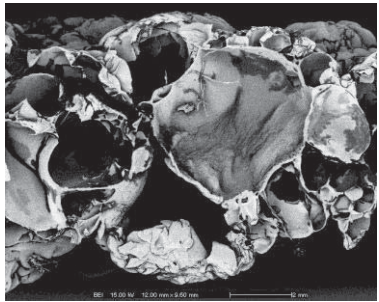
ตารางที่ 7 ลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดกรอบ

สภาวะการทอด	ภาพถ่าย SEM
การทอดแบบจุ่มน้ำมัน	
การทอดแบบพ่นฝอย 0.3 ลิตร/นาที, 60 รอบ/นาที	
การทอดแบบพ่นฝอย 0.3 ลิตร/นาที, 80 รอบ/นาที	

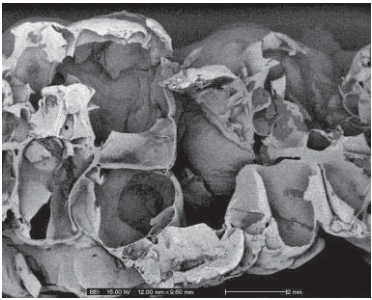
ตารางที่ 7 ลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดกรอบ (ต่อ)

สภาวะการทอด	ภาพถ่าย SEM
การทอดแบบพ่นฝอย 0.3 ลิตร/นาทีก, 100 รอบ/นาทีก	
การทอดแบบพ่นฝอย 0.5 ลิตร/นาทีก, 60 รอบ/นาทีก	
การทอดแบบพ่นฝอย 0.5 ลิตร/นาทีก, 80 รอบ/นาทีก	

ตารางที่ 7 ลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดกรอบ (ต่อ)

สภาวะการทอด	ภาพถ่าย SEM
การทอดแบบพ่นฝอย 0.5 ลิตร/นาที่, 100 รอบ/นาที่	
การทอดแบบพ่นฝอย 0.7 ลิตร/นาที่, 60 รอบ/นาที่	
การทอดแบบพ่นฝอย 0.7 ลิตร/นาที่, 80 รอบ/นาที่	

ตารางที่ 7 ลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดกรอบ (ต่อ)

สภาวะการทอด	ภาพถ่าย SEM
การทอดแบบพ่นฝอย 0.7 ลิตร/นาที่, 100 รอบ/นาที่	

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 7 แสดงภาพตัดขวางแสดงลักษณะโครงสร้างรูพรุนของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope:SEM) พบว่า ในสภาวะการทอดแบบพ่นฝอยในระดับที่ใช้อัตราการพ่นน้ำมันที่สูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างภายในของแผ่นข้าวตังมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากการพองตัวของแผ่นข้าวเนื่องจากความร้อนจากละอองน้ำมันทอด แต่เมื่อพิจารณาถึงความเร็วรอบของหม้อทอดในระดับการพ่นน้ำมันที่เท่ากัน พบว่า ความเร็วของหม้อทอดส่งผลต่อขนาดของรูพรุนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในสภาวะการทอดแบบพ่นฝอย ละอองน้ำมันจะมีการกระจายไปสู่ผิวหน้าของแผ่นข้าวตังอย่างทั่วถึงทั่วทั้งระบบ ดังนั้นการหมุนของหม้อทอดจึงส่งผลต่อสภาวะการทอดเพียงเล็กน้อย แต่ทั้งนี้ในระบบการทอดแบบพ่นฝอย ได้มีการออกแบบให้หม้อทอดสามารถหมุนได้ เนื่องจากการหมุนของหม้อทอดจะช่วยป้องกันการเกิดจุดอับ หรือบริเวณที่อาจจะไม่สัมผัสถูกละอองน้ำมัน (overshadow) ดังนั้นสภาวะการหมุนของหม้อทอดจึงมีส่วนช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสละอองน้ำมันได้อย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอ

ตารางที่ 8 ขนาดของรูพรุนในผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดที่สภาวะต่างๆ

สภาวะในการทอด	ลักษณะโครงสร้างของรูพรุนในผลิตภัณฑ์	
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	พื้นที่ (μm) ²
การทอดแบบจุ่มน้ำมัน	3.289 $\pm$ 0.02	10.428 $\pm$ 0.18
การทอดแบบพ่นฝอย 0.3 ลิตร/นาที่, 60 รอบ/นาที่	1.218 $\pm$ 0.29	1.517 $\pm$ 0.15
การทอดแบบพ่นฝอย 0.3 ลิตร/นาที่, 80 รอบ/นาที่	1.404 $\pm$ 0.14	1.873 $\pm$ 0.08
การทอดแบบพ่นฝอย 0.3 ลิตร/นาที่, 100 รอบ/นาที่	2.032 $\pm$ 0.19	2.509 $\pm$ 0.21
การทอดแบบพ่นฝอย 0.5 ลิตร/นาที่, 60 รอบ/นาที่	2.167 $\pm$ 0.12	3.429 $\pm$ 0.06
การทอดแบบพ่นฝอย 0.5 ลิตร/นาที่, 80 รอบ/นาที่	2.109 $\pm$ 0.04	3.296 $\pm$ 0.14
การทอดแบบพ่นฝอย 0.5 ลิตร/นาที่, 100 รอบ/นาที่	2.429 $\pm$ 0.33	3.651 $\pm$ 0.22
การทอดแบบพ่นฝอย 0.7 ลิตร/นาที่, 60 รอบ/นาที่	2.346 $\pm$ 0.12	5.628 $\pm$ 0.18
การทอดแบบพ่นฝอย 0.7 ลิตร/นาที่, 80 รอบ/นาที่	3.000 $\pm$ 0.13	6.332 $\pm$ 0.11
การทอดแบบพ่นฝอย 0.7 ลิตร/นาที่, 100 รอบ/นาที่	3.647 $\pm$ 0.24	6.856 $\pm$ 0.23

ในขณะที่ลักษณะความเป็นรูพรุนของแผ่นข้าวตังที่ทอดในสภาวะการทอดแบบจุ่มน้ำมัน เปรียบเทียบกับสภาวะการทอดแบบพ่นฝอย เมื่อพิจารณาจากภาพตัดขวางแสดงลักษณะโครงสร้างรูพรุนของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) พบว่า ลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของแผ่นข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบจุ่ม จะมีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่กว่า และมีการกระจายตัวของรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอ สังกัดได้จากภาพ (ตารางที่ 7) และข้อมูลในตารางที่ 8 ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะการทอดแบบจุ่ม ชั้นของอาหารจะถูกจุ่มอยู่ในน้ำมันร้อนทั่วทั้งชิ้น ทำให้มีการสัมผัสกับน้ำมันทอดโดยตรง จึงเกิดการพองตัวของแผ่นข้าว และอาจมีเกิดระเบิดของรูพรุนอย่างรุนแรง เนื่องมาจากการถ่ายเทมวลระหว่างความชื้นในชั้นผลิตภัณฑ์และน้ำมันร้อนในระหว่างกระบวนการทอด ทำให้เห็นเป็นลักษณะโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ และมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของแผ่นข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย พบว่ามีขนาดความเป็นรูพรุนเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน เพราะในกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยนั้น ชั้นอาหารจะมีการสัมผัสกับละอองน้ำมันเพียงระยะเวลานั้นๆ เท่านั้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลระหว่างความชื้นในชั้นผลิตภัณฑ์และน้ำมันร้อนในระหว่างกระบวนการทอดเพียง

ระยะเวลาหนึ่ง อีกทั้งข้อจำกัดของระบบการทอดแบบพ่นฝอยที่ใช้ในการทดลองมีการออกแบบให้มีการพ่นละอองน้ำมันจากด้านบนของหม้อเพียงด้านเดียว ทำให้ชิ้นอาหารสัมผัสกับละอองน้ำมันบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เท่านั้น ด้วยสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยเกิดการพองตัวได้ไม่เต็มที่ ทำให้โครงสร้างความเป็นรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนภายในชิ้นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทอดในสถานะต่างๆ มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะปรากฏ รวมถึงค่าการพองตัว และค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราการพ่นน้ำมัน และความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องในระบบการทอดแบบพ่นฝอย ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์อาหารทอด และเพื่อให้ระบบการทอดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อาหารทอดที่มีลักษณะคุณภาพตรงตามความต้องการมากที่สุด

4.3 การศึกษาหาสภาวะการสลัดเหวี่ยงน้ำมันออกหลังกระบวนการทอด

4.3.1 ศึกษาผลของอัตราเร็วและเวลาในการสลัดเหวี่ยงน้ำมันออกจากผลิตภัณฑ์

จากการทดลองนำแผ่นข้าวคั่วที่ผ่านการทอดด้วยสภาวะที่ดีที่สุดในตอนต้นที่ 2 ทั้ง 2 วิธี พักแผ่นข้าวคั่วทอดไว้ 10 วินาที หลังจากนั้นนำมาเหวี่ยงน้ำมันออกที่อัตราเร็วในการเหวี่ยง และระยะเวลาเหวี่ยงที่ระดับต่างๆ (ตารางที่ 9) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถลดอัตราการดูดซับน้ำมันได้มากที่สุด

ตารางที่ 9 สภาวะในการสกัดเหวี่ยงน้ำมันหลังกระบวนการทอด

วิธีการทอด	แรงเหวี่ยง (รอบ/นาที)	เวลาเหวี่ยง (นาที)
การทอดแบบจุ่ม	600	2, 4, 6
	800	2, 4, 6
	1000	2, 4, 6
การทอดแบบปั่นฝอย	600	2, 4, 6
	800	2, 4, 6
	1000	2, 4, 6

หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำการวัดค่าคุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมี ได้แก่ ปริมาณไขมัน ปริมาณความชื้น ความหนาแน่น ค่าสี ลักษณะเนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง) และ อัตราการพองตัว เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของข้าวตังที่ได้จากการทอดทั้ง 2 วิธี และหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถลดอัตราการดูดซับน้ำมัน ได้มากที่สุด

จากการทดลองดังกล่าว พบว่า เมื่อทำการสกัดเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 นาที เป็นสภาวะที่สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้มากที่สุดของกระบวนการทอดทั้ง 2 วิธี คือกระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน และกระบวนการทอดแบบปั่นฝอย โดยที่ยังคงลักษณะเดิมของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ และไม่มีการแตกหัก เมื่อพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 10 และ 11 พบว่า กระบวนการสกัดเหวี่ยงหลังกระบวนการทอดที่สภาวะดังกล่าวสามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันลงได้ถึง 31.84 เปอร์เซ็นต์ ในกระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน และ 60 เปอร์เซ็นต์ ในกระบวนการทอดแบบปั่นฝอย เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่ไม่มีการสกัดเหวี่ยง

เมื่อพิจารณาถึงความเร็วในการสกัดเหวี่ยงน้ำมันต่อปริมาณการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์ พบว่า ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงตามความเร็วรอบในการสกัดเหวี่ยงที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแรงเหวี่ยงที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำมันที่ค้างอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ถูกกำจัดออกไปมากขึ้น ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าการดูดซับน้ำมันที่ลดลง และเมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการสกัดเหวี่ยงน้ำมันออก พบว่า เวลาในการสกัดเหวี่ยงน้ำมันออกไม่มีผล หรือมีผลน้อยมากต่อปริมาณการดูดซับน้ำมัน โดยสภาวะที่ใช้เวลาในการสกัดเหวี่ยง 4 และ 6 นาที พบว่า ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ข้าวตังไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ

95 ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับน้ำมันส่วนใหญ่ จะเกิดขึ้นในช่วงการเย็นตัว (cooling) หลังกระบวนการทอด ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาแรก (1-2 นาทีแรก) ของการเย็นตัวหลังกระบวนการทอด ดังนั้นการสลัดเหวี่ยงหลังกระบวนการทอดจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก และควรดำเนินการทันทีหลังสิ้นสุดกระบวนการทอด เพื่อให้ประสิทธิภาพในการสลัดเหวี่ยงเพื่อลดปริมาณการดูดซับน้ำมันเกิดขึ้นได้ดีที่สุด ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้ระยะเวลาในการสลัดเหวี่ยง 4 นาที เป็นสถานะที่ดีที่สุดในการสลัดเหวี่ยงน้ำมันออกจากผลิตภัณฑ์ เป็นสถานะที่สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันลงได้มากที่สุด ดังผลข้อมูลตารางที่ 10 และ 11

ตารางที่ 10 อิทธิพลของสถานะในการสลัดเหวี่ยงน้ำมันต่อคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นข้าวคั่วทอด (ทอดแบบจุ่มน้ำมัน)

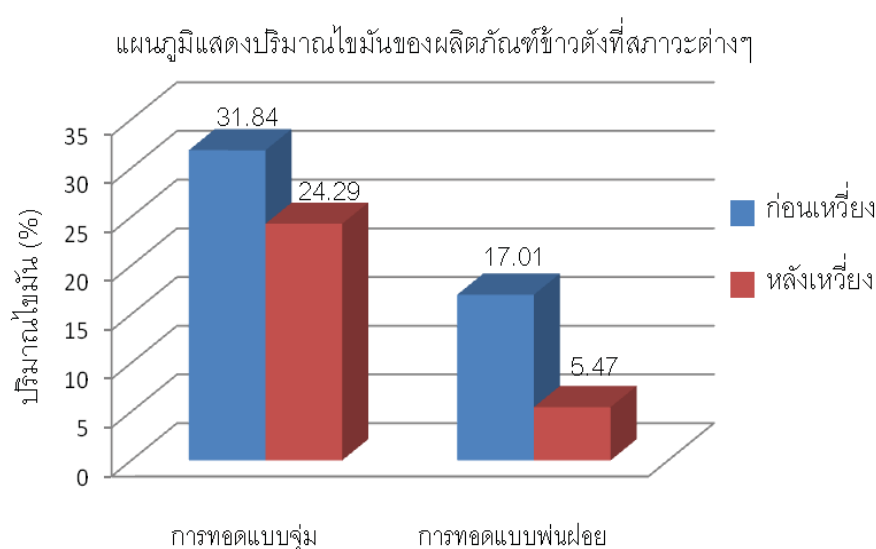
แรงเหวี่ยง (รอบ/นาที)	เวลา (นาที)	% ไขมัน	% ความชื้น	ค่าสี			ความ หนาแน่น	อัตราการ พองตัว	ความแข็ง (N/g)
				L*	a*	b*			
600	2	31.62 ^a	3.87 ^a	71.09	3.10	14.56	0.56	3.57 ^c	2.89 ^d
	4	31.06 ^a	3.56 ^b	70.84	3.16	14.28	0.53	3.55 ^c	3.14 ^d
	6	30.53 ^b	3.22 ^c	70.56	2.98	14.33	0.51	3.67 ^b	3.88 ^a
800	2	27.11 ^c	4.17 ^a	71.68	2.40	15.39	0.56	3.64 ^b	4.04 ^a
	4	22.59 ^f	4.31 ^a	71.02	2.37	14.96	0.55	3.65 ^b	3.48 ^c
	6	23.16 ^c	3.51 ^b	71.48	2.97	15.13	0.48	3.71 ^a	3.98 ^a
1000	2	24.74 ^d	3.30 ^c	70.92	3.05	14.06	0.55	3.74 ^a	4.17 ^d
	4	22.43 ^f	3.24 ^c	71.19	3.12	14.26	0.52	3.66 ^b	3.88 ^c
	6	22.67 ^f	3.33 ^c	70.66	2.96	15.08	0.55	3.58 ^c	3.62 ^b

ตารางที่ 11 อิทธิพลของสภาวะในการสลัดเหวี่ยงน้ำมันต่อคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นข้าวคังทอด
(ทอดแบบพ่นฝอย)

แรงเหวี่ยง (รอบ/นาที)	เวลา (นาที)	% ไขมัน	% ความชื้น	ค่าสี			ความ หนาแน่น	อัตราการ พองตัว	ความแข็ง (N/g)
				L*	a*	b*			
600	2	9.48 ^a	3.75 ^a	71.11	3.03	14.09	0.56	3.59 ^c	3.84 ^b
	4	8.40 ^b	3.22 ^c	70.86	2.97	13.21	0.51	3.61 ^c	3.64 ^c
	6	7.32 ^c	3.31 ^c	70.21	2.83	14.18	0.55	3.52 ^c	3.82 ^b
800	2	6.64 ^c	4.05 ^a	71.32	2.91	15.19	0.59	3.41 ^d	3.81 ^b
	4	5.37 ^d	3.39 ^c	71.08	2.90	15.02	0.56	3.55 ^c	3.79 ^b
	6	5.42 ^d	3.26 ^c	70.69	3.11	14.88	0.56	3.56 ^c	4.04 ^a
1000	2	6.17 ^c	3.55 ^b	70.25	2.62	14.73	0.51	3.94 ^a	4.15 ^a
	4	5.58 ^c	2.97 ^d	70.11	2.96	14.34	0.54	3.91 ^a	3.98 ^a
	6	5.35 ^d	3.26 ^c	71.03	3.02	15.11	0.57	3.78 ^b	4.11 ^a

นอกจากนี้ จากการศึกษากระบวนการสลัดเหวี่ยงหลังกระบวนการทอด พบว่า กระบวนการดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณไขมันลดลงจากเดิม นอกจากนี้ยังส่งผลต่อปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ ทำให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์ลดลงจากเดิม เนื่องจากกระบวนการสลัดเหวี่ยงจะเกิดขึ้นภายหลังกระบวนการทอดทันที ทำให้ภายในระบบยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ ประมาณ 100-120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ที่ผลิตภัณฑ์ยังคงระเหยต่อไปได้ ทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการสลัดเหวี่ยงมีค่าลดลงดังผลการทดลองในตารางที่ 10 และ 11 ด้วยเหตุผลดังกล่าว ยังส่งผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ ที่อาจมีสีคล้ำขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิในระบบเช่นเดียวกัน พิจารณาได้จากค่าความสว่าง (L*) ที่มีค่าลดลงจากเดิม (ตารางที่ 10 และ 11) แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการสลัดเหวี่ยงน้ำมันหลังกระบวนการทอดดังกล่าวไม่ส่งผลหรือส่งผลน้อยมากต่อคุณลักษณะทางกายภาพ หรือลักษณะปรากฏโดยรวมของผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการสลัดเหวี่ยง

ดังนั้น จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย ที่ให้ คุณลักษณะเนื้อสัมผัสและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวตังใกล้เคียงกับกระบวนการทอดแบบจุ่มมากที่สุด พบว่า การทอดที่อุณหภูมิของน้ำมัน 190 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการพ่นน้ำมัน 0.3 ลิตรต่อวินาที ความเร็วรอบในการหมุนหม้อทอด 60 รอบต่อนาที จะช่วยลดปริมาณการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์ข้าวตังลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทอดแบบจุ่ม โดยที่จากเดิมมีการดูดซับน้ำมันถึง 31.84 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 17.01 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาสภาวะการสลัดเหวี่ยง น้ำมันออกหลังกระบวนการทอด พบว่าการสลัดเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 4 นาที เป็นสภาวะการสลัดเหวี่ยงน้ำมันออกที่ดีที่สุดของกระบวนการทอดทั้ง 2 วิธี คือ กระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน และกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย ซึ่งสามารถลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ลงจากเดิมได้มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกระบวนการทอดแบบจุ่มน้ำมัน และ 60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย ตามลำดับ พิจารณาจากภาพที่ 23



ภาพที่ 24 เปรียบเทียบปริมาณไขมันของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธี หลังการสลัดเหวี่ยงที่สภาวะ 800 รอบ/นาที เป็นเวลา 4 นาที

ข้อดีของกระบวนการสลัดเหวี่ยงน้ำมัน เพื่อลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอด คือ สามารถทำได้ง่ายและมีความสะดวกรวดเร็ว จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ถ้าใช้ความเร็วรอบสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกหักเสียหายได้ และสามารถลดปริมาณน้ำมันได้เพียงที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของอาหารเท่านั้น ดังนั้นจึงควร

คำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และควรกำหนดสถานะในการสลับเหวี่ยงให้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิด เพื่อให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันลงได้มากที่สุด โดยยังคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้

4.4 การศึกษาหาสถานะการทอดแบบพ่นฝอยที่เหมาะสมด้วยวิธี Response Surface Method (RSM)

เมื่อได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการพ่นฝอยน้ำมัน ความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด และสถานะในการสลับเหวี่ยงน้ำมัน ที่มีผลต่อกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยดังกล่าวข้างต้นนั้น การศึกษาในขั้นตอนนี้ได้ทำการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการทอดผลิตภัณฑ์ข้าวตัง เพื่อลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทอด และพัฒนาคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้ ในการศึกษาครั้งนี้มีการใช้เทคนิคการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology (RSM)) โดยวางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ดังแสดงในตารางที่ 7 ทำการทอดที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 17 วินาที ตัวแปรสำคัญในการศึกษาระหว่างการทอด ได้แก่ อัตราการพ่นฝอยน้ำมัน 0.3-0.7 ลิตร/วินาที และความเร็วในการหมุนของหม้อทอด 60-100 รอบต่อนาที ส่วนตัวแปรสำคัญในการศึกษาสถานะการเหวี่ยงน้ำมันหลังการทอด ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุน 600-1000 รอบต่อนาที และเวลา 2-6 นาที ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาสร้างแบบจำลอง เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert 6.0.5

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดปัจจัยในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย คือ ตัวแปรอิสระ (independent variable) ได้แก่ อัตราการพ่นน้ำมัน (x_1) ความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด (x_2) สำหรับกระบวนการทอด และความเร็วรอบในการสลับเหวี่ยง (x_1) และระยะเวลาในการสลับเหวี่ยง (x_2) สำหรับกระบวนการสลับเหวี่ยง และตัวแปรตาม (dependent variation) โดยแปรระดับของตัวแปรอิสระ 5 ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD)

สภาวะ	ตัวแปรอิสระ	สัญลักษณ์	ระดับของตัวแปรอิสระ				
			-1.414	-1.000	0.000	+1.000	+1.414
การทอด	อัตราการพ่น น้ำมัน (l/s)	X_1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
	ความเร็วรอบ (rpm)	X_2	60	70	80	90	100
การสลัด เหวี่ยง	ความเร็วรอบ (rpm)	X_1	600	700	800	900	1000
	เวลา (min)	X_2	2	3	4	5	6

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกสภาวะในกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวตัง ที่มีปริมาณไขมันต่ำที่สุด ดังนั้นตัวแปรตามในการทดลองครั้งนี้คือ ปริมาณไขมัน ซึ่งการทดลองในครั้งนี้ได้วางแผนการสุ่มตัวอย่างทดลอง เพื่อลดจำนวนหน่วยทดลอง แต่ครอบคลุมจุดที่สำคัญ โดยใช้แผนการทดลองแบบ central composite design (CCD) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ จุดที่อยู่บนแกน coordinate 8 จุด จุดที่อยู่บนแกนหลัก 6 จุด และจุดศูนย์กลาง 1 จุด รวมเป็นหน่วยการทดลองทั้งหมด 15 จุด โดยแต่ละจุดทำการทดลอง 3 ซ้ำ ได้ผลข้อมูลดังตารางที่ 13

ผลข้อมูลจากการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ถูกติดตามผลด้วยทฤษฎีการถดถอยแบบ second-order polynomial regression analysis ใช้วิธี least square regression โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert 6.0.5 เพื่อตั้งเกดค่าตัวแปร (parameters) ที่สนใจของสมการจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2$$

เมื่อ

Y = ค่าตอบสนองที่เกิดจากการแปรค่าตัวแปร

b_0 = ค่าคงที่

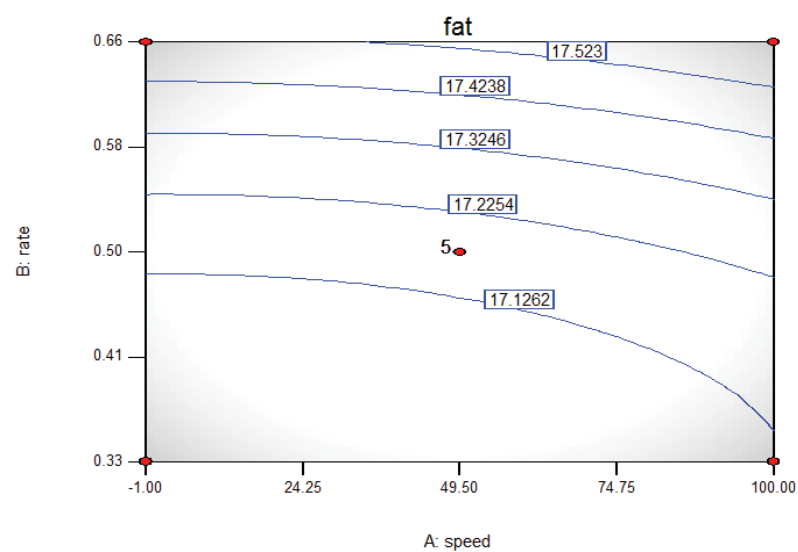
b_n = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

x_n = ตัวแปรอิสระ

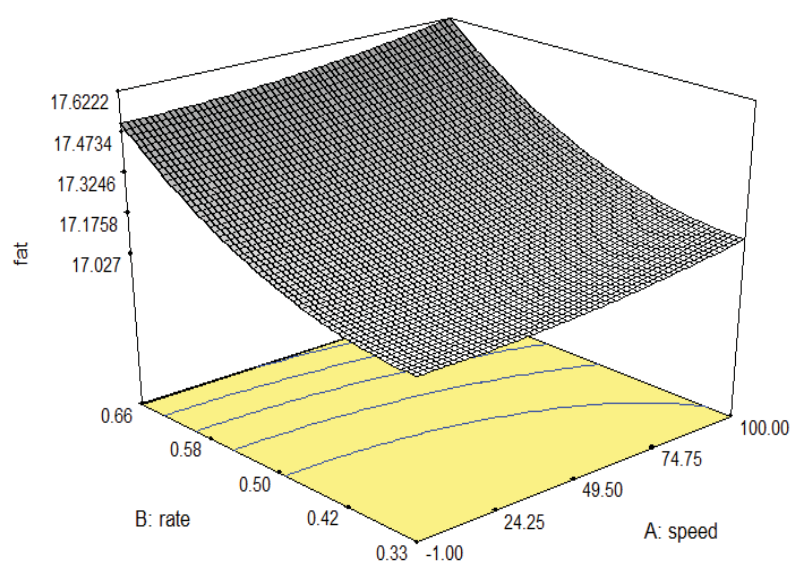
ตารางที่ 13 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านกระบวนการทอดแบบพ่นฝอย (ไม่สไลด์เหวี่ยง)

ครั้งที่	ความเร็ว รอบ (rpm)	อัตราการ พ่นน้ำมัน (l/s)	%	%	ความ หนาแน่น (g/ml)	ปริมาตร	สี		
							L*	a*	b*
1	0.000	1.414	17.81	4.94	0.381	4.76	69.48	3.24	22.25
2	0.000	0.000	17.18	5.79	0.394	4.71	70.24	3.17	22.97
3	-1.000	1.000	17.48	5.41	0.389	4.75	69.89	3.26	22.48
4	1.000	-1.000	17.13	6.29	0.408	4.76	70.56	3.09	23.18
5	-1.414	0.000	17.15	6.14	0.402	4.71	70.28	3.22	23.02
6	0.000	0.000	17.21	5.86	0.398	4.73	70.18	3.13	23.05
7	-1.000	-1.000	17.06	6.58	0.412	4.68	70.64	3.11	23.19
8	0.000	-1.414	17.03	6.99	0.416	4.66	70.88	2.94	23.17
9	1.000	1.000	17.57	5.16	0.394	4.78	69.66	3.28	22.64
10	0.000	0.000	17.22	5.88	0.394	4.73	70.2	3.14	22.89
11	0.000	0.000	17.14	5.82	0.391	4.72	70.24	3.17	22.96
12	1.414	0.000	17.33	5.63	0.413	4.78	69.91	3.2	22.78
13	0.000	0.000	17.12	5.84	0.394	4.73	70.22	3.14	22.98

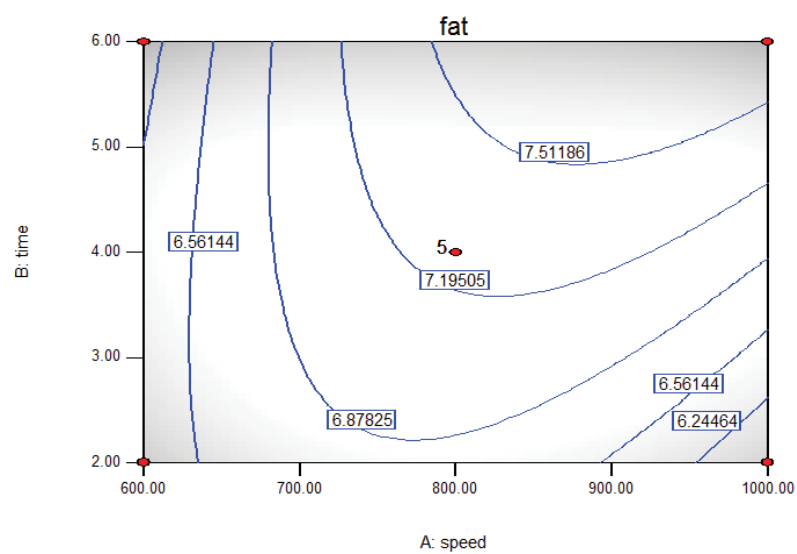
หลังจากนั้น นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพ่นน้ำมัน และความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด จะได้กราฟสองมิติ (contour plot) ดังแสดงในภาพที่ 25 และ 26 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และระยะเวลาในการสไลด์เหวี่ยงน้ำมัน ดังแสดงในภาพที่ 27 และ 28



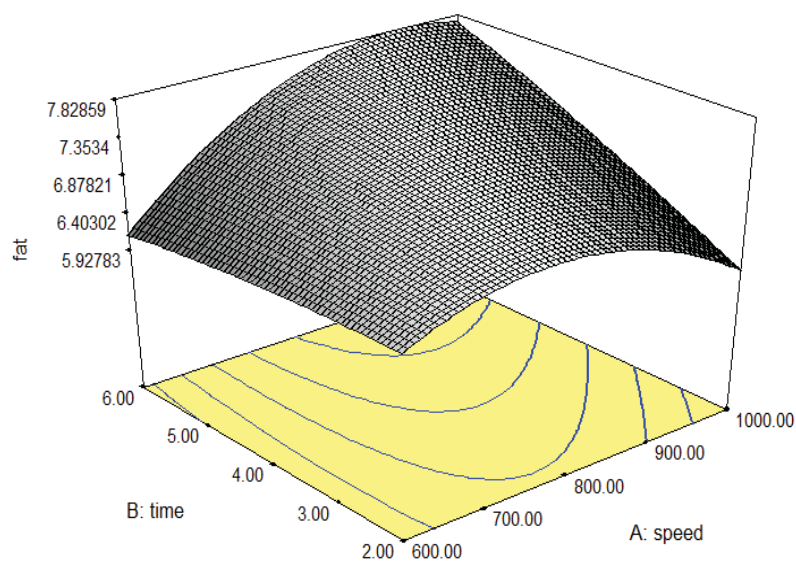
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพ่นน้ำมัน และความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด
ต่อปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ข้าวตัง



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพ่นน้ำมัน และความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด
ต่อปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ข้าวตัง



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และระยะเวลาในการสลัดเหวี่ยงต่อปริมาณน้ำมัน
ในผลิตภัณฑ์ข้าวตัง



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และระยะเวลาในการสลัดเหวี่ยงต่อปริมาณน้ำมัน
ในผลิตภัณฑ์ข้าวตัง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อร้อยละของปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ คือ อัตราการพ่นน้ำมัน และความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด ในกระบวนการทอด และความเร็วรอบ และระยะเวลาในการสลัดเหวี่ยงหลังกระบวนการทอด โดยความเร็วรอบในการหมุนสลัดเหวี่ยงน้ำมันมีผลต่อปริมาณไขมันอย่างมาก เมื่อเทียบกับคุณลักษณะอื่นๆ ซึ่งสมการ quadratic ที่ใช้ทำนายปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ข้างต้นให้ค่า regression coefficient (R^2) 0.9973 โดยสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยสำหรับผลิตภัณฑ์ข้างต้นที่มีปริมาณไขมันต่ำที่สุด ร้อยละ 17.12 คือทอดที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 17 วินาที โดยใช้อัตราการพ่นน้ำมัน 0.4 ลิตรต่อวินาที ความเร็วรอบในการหมุนของหม้อทอด 74 รอบต่อนาที (ภาพที่ 25 และ 26) และสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการสลัดเหวี่ยงน้ำมันหลังกระบวนการทอดสำหรับผลิตภัณฑ์ข้างต้นที่มีปริมาณไขมันต่ำที่สุด ร้อยละ 5.87 คือการสลัดเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 854 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 5 นาที (ภาพที่ 27 และ 28)

บทที่ 5

บทสรุป

จากกระบวนการทอดแบบจุ่ม ทั้งในสภาวะความดันบรรยากาศ และในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งเป็นกระบวนการทอดในรูปแบบเก่า จะทำให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับน้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานกว่ากระบวนการทอดแบบพ่นฝอย ที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการทอด ลดปริมาณการดูดซับน้ำมัน และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทอดให้ดีขึ้น

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบการทอดแบบพ่นฝอย พบว่าสภาวะที่ใช้อัตราการพ่นน้ำมันที่ 0.3 ลิตรต่อวินาที ด้วยความเร็วการหมุนของหม้อทอดที่ 60 รอบต่อนาที และทำการสลัดเหวี่ยงน้ำมันที่อัตราเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 นาที จะให้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ข้าวตังทอดกรอบที่มีรูปร่างสวยงาม พองฟู และสุกทั่วทั้งชิ้น ซึ่งเป็นสภาวะที่สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้มากที่สุด โดยที่ยังคงลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ผ่านการทอดแบบจุ่มมากที่สุดอีกด้วย

ผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ได้จากระบบการทอดแบบพ่นฝอย มีค่าปริมาณการดูดซับน้ำมันที่ต่ำกว่าระบบการทอดแบบจุ่ม ทั้งนี้เนื่องจาก ในระบบการทอดแบบพ่นฝอยจะมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันให้ร้อนอย่างต่อเนื่อง และมีอัตราไหลอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับละอองน้ำมันเพียงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น จากนั้นน้ำมันจะไหลผ่านตะแกรงลงสู่ด้านล่าง และถูกดึงกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง เป็นระบบหมุนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ อีกทั้งยังมีการหมุนของหม้อทอดในระหว่างการทอดตลอดเวลา ซึ่งเปรียบเสมือนการสลัดเหวี่ยงน้ำมันบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ออก ทำให้มีน้ำมันเหลือติดที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นผลิตภัณฑ์น้อย เป็นผลทำให้การดูดซับน้ำมันเข้าสู่ชิ้นผลิตภัณฑ์หลังกระบวนการทอดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอดทั้ง 2 แบบมีสีและความหนาแน่นใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาการพองตัว และลักษณะเนื้อสัมผัสแล้วพบว่าแผ่นข้าวตังที่ได้จากการทอดแบบพ่นฝอยจะมีอัตราการพองตัวที่ต่ำกว่า และมีค่าความแข็ง (hardness) มากกว่า เนื่องจากการพองตัวของชิ้นอาหารที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด เกิดจากการระเหิดของโครงสร้างรูพรุนในชิ้นอาหารเมื่อสัมผัสกับน้ำมันร้อน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดแบบจุ่มมีค่าการพองตัวที่มากกว่า เนื่องจากชิ้นผลิตภัณฑ์ถูกจุ่มอยู่ในน้ำมันร้อน

โดยตรง จึงทำให้โครงสร้างรูพรุนเกิดการระเบิดออกอย่างรุนแรงเนื่องจากความร้อน แต่เมื่อพิจารณาลักษณะภายนอกโดยภาพรวม พบว่าผลิตภัณฑ์ข้าวตังที่ผ่านการทอดจากทั้ง 2 กระบวนการมีลักษณะทางกายภาพที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เพียงแต่ข้าวตังที่ผ่านการทอดแบบพ่นฝอยจะมีสีที่สว่างกว่า และมีลักษณะแผ่นที่ค่อนข้างเรียบกว่า แต่ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทอดแบบพ่นฝอยที่ใช้ในการทดลองได้ออกแบบให้มีการพ่นละอองน้ำมันจากด้านบนเพียงด้านเดียว ทำให้สามารถพ่นละอองน้ำมันได้ที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นผลิตภัณฑ์เท่านั้น ทำให้กระบวนการทอดดังกล่าวมีข้อจำกัดในเรื่องลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่จะใช้ทอด กล่าวคือผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมควรมีลักษณะเป็นแผ่นแบนราบบาง เพื่อให้สะดวกต่อกระบวนการทอด และให้ละอองน้ำมันสามารถทะลุผ่านชิ้นผลิตภัณฑ์ได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นจากผลข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการทอดแบบพ่นฝอยเพื่อต่อยอดในเชิงพาณิชย์ต่อไป โดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบ และอาจมีการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบการทอดแบบพ่นฝอยใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ระบบการทอดแบบพ่นฝอย (spray frying) เป็นอีกหนึ่งนวัตกรรมของกระบวนการทอดในรูปแบบใหม่ เพื่อปรับปรุงกระบวนการ และข้อจำกัดบางประการของกระบวนการทอดในรูปแบบเก่า เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อาหารทอดที่มีคุณภาพ คงคุณค่าทางโภชนาการ และมีปริมาณการดูดซับน้ำมันที่ต่ำลงเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค แต่ทั้งนี้ควรคำนึงถึงปัจจัย และเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นที่ยอมรับ และตรงตามความต้องการมากที่สุด

บรรณานุกรม

- ปิยาภรณ์ ถีประเสริฐ และสุวธิดา ตันติศักดิ์. 2550. การพัฒนากระบวนการทอดแบบพ่นน้ำมัน เพื่อลดการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์ข้าวตังทรงเครื่อง. จุลินพนธ์ปริญญาตรี สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร.
- วิไล รังสาดทอง. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร Food Processing Technology. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2547.
- Aguilera, J.M., Cadoche, L., López, C. and Gutierrez, G. 2001. Microstructural changes of potato cells and starch granules heated in oil. *Food Research International*. 34(10): 939-947.
- Alvis, A., Vélez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M. and Villada, H.S. 2009. Heat transfer coefficient during deep-fat frying. *Food Control*. 20: 321-325.
- Annapure, U.S., Sinhal, R.S. and Kulkarni, P.R. 1998. Studies on deep fat fried snacks from some cereals and legumes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 76: 377-382.
- Bouchon, P. and Aguilera, J.M. 2001. Microstructural analysis of frying of potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*. 36: 669-676.
- Bouchon, P., Aguilera, J.M. and Pyle, D.L. 2003. Structure oil absorption relationships during deep-fat frying. *Journal of Food Science*. 68(9): 2711-2716.
- Dana, D. and Saguy, I.S. 2006. Review: mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth. *Advances in Colloid and Interface Science*. 128-130, 267-272.
- Da Silva, P. and Moreira, R. 2008. Vacuum frying of high-quality fruit and vegetable-based snacks. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*. 41(10): 1758-1767.
- Debnath, S., Rastogi, N.K., Krishna, A.G.G. and Lokesh, B.R. 2009. Oil partitioning between surface and structure of deep-fat fried potato slices: A kinetic study. *LWT- Food Science and Technology*. 42: 1054-1058.
- Dobarganes, C., Marquez-Ruiz, G. and Velasco, J. 2000. Interactions between fat and food during deep fat frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 102: 521-528.

- Dueik, V., Robert, P. and Bouchon, P. 2010. Vacuum frying reduce oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. *Food Chemistry*. 119: 1143-1149.
- Fan, L., Zhang, M. and Mujumdar, A.S. 2005a. Vacuum frying of carrots chips. *Drying Technology*. 23: 645-656.
- Fan, L., Zhang, M., Xiao, G., Sun, J. and Tao, Q. 2005b. The optimization of vacuum frying to dehydrate carrot chips. *International Journal of Food Science and Techonology*. 40: 911-919.
- Fellows, P.J. 2000. *Food Processing Technology*. 2nd. Washington: Wood head. p. 575.
- Gamble, M.H., Rice, P. and Selman, J.D. 1987. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from the UK tubers. *International Journal of Food Science and Technology*. 22: 233-241.
- Garayo, J. and Moreira, R. 2002. Vacuum frying of potatoes chips. *Journal of Food Engineering*. 55: 181-191.
- Granda, C., Moreira, R.G. and Tichy, S.E. 2004. Reduction of acrylamide formation in potato chips by low-temperature vacuum frying. *Journal of Food Science*. 69(8): 405-411.
- Guillaumin, R. 1988. Kinetics of fat penetration in food. In G. Varala, A.E. Bender and I.D. Morton (Editors). *Frying of food: Principles, changes, new approaches*. Chichester: Ellis Horwood Ltd. pp. 82-89.
- Gupta, P., Shivhare, U.S. and Bawa, A.S. 2000. Studies on frying kinetics and quality of French fries. *Drying Technology*. 18(1,2): 311-321.
- Hallstrom, B. 1980. Heat and mass transfer in industrial cooking. In P. Linko, Y. Malkk, J. Olkku and J. Larinkari (Editors). *Food process engineering, vol.1, Food processing systems*. Applied Science. London. pp. 457-465.
- Hallstrom, B., Skjoldebrand, C. and Tragardh, C. 1988. *Heat transfer and food products*. New York. Elsevier Applied Science.
- Kita, A., Lisinska, G., Tajner-Czopek, A. and Rytel, E. 1998. The effects of potato variety and other factors on fat contents of chips. *International conference: The present and future of crop science and bee keeping*. Kaunas. Lithuanian Agricultural Academy. pp. 231-238.

- Kita, A. 2002. The influence of potato chemical composition on crisp texture. *Food Chemistry*. 76: 173-179.
- Kita, A., Lisinska, G. and Powolny, M. 2005. The influence of frying media degree of degradation on fat uptake and texture of French fries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 85: 113-118.
- Kochhar, P.S. and Certz, C. 2004. New theoretical and practical aspects of the frying process. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 106: 722-726.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V. and Maroulis, Z.B. 2000a. Water loss and oil uptake as function of frying time. *Journal of Food Engineering*. 44: 39-46.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V. and Maroulis, Z.B. 2000b. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering*. 43: 147-154.
- Lamberg, I., Hallstrom, B. and Olsson, H. 1990. Fat uptake in a potato drying/frying process. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 23: 295-300.
- Maneerote, J., Noomhorm, A. and Takhar, P.S. 2009. Optimization of processing conditions to reduce oil uptake and enhance physic-chemical properties of deep fried rice crackers. *LWT-Food Science and Technology*. 42: 805-812.
- Mariscal, M. and Bouchon, P. 2008. Comparision between atmospheric and vacuum frying of apple slices. *Food Chemistry*. 107(4): 1561-1569.
- Mellema, M. 2003. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science and Technology*. 14: 364-373.
- Mir-Bel, J., Oria, R. and Salvador, M.L. 2009. Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering*. 95: 416-422.
- Moreira, R.G., Palau, J.E. and Sun, X.Z. 1995. Simultaneous heat and mass transfer during the deep fat frying of tortilla chips. *Journal of Food Process Engineering*. 18: 307-320.
- Moreira, R.G., Sun, X. and Chen, Y. 1997. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep fat frying. *Journal of Food Engineering*. 31: 485-498.
- Moreira, R.G. and Barrufet, M.A. 1998. A new approach to describe oil absorption in fried foods: a simulation study. *Journal of Food Engineering*. 35(1): 1-22.

- Moreira, R.G., Da Silva, P.F. and Gomes, C. 2009. The effect of a de-oiling mechanism on the production of high quality vacuum fried potato chips. *Journal of Food Engineering*. 92: 297-304.
- Pedreschi, F., Cocio, C., Moyano, P. and Troncoso, E. 2008. Oil distribution in potato slices during frying. *Journal of Food Engineering*. 87(2): 200-212.
- Pinthus, E.J. and Saguy, I.S. 1994. Initial interfacial tension and oil uptake by deep-fat fried foods. *Journal of Food Science*. 59(4): 804-807.
- Rossell, B.J. 2001. Factors affecting the quality of frying oils and fats: Improving quality. Cambridge, UK. CRC Press. pp. 115-336.
- Rossell, J.B. 2003. Developments in oils for commercial frying. *Lipid Technology*. 1, 5-8.
- Saguy, I.S. and Pinthus, I.J. 1995. Oil uptake during deep fat frying: factors and mechanisms. *Food Technology*. 49(4): 142-145.
- Saguy, I.S. and Dana, D. 2003. Integrated approach to deep fat frying: engineering nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*. 56: 143-152.
- Saravacos, G.D. and Maroulis, Z.B. 2001. Transport properties of foods. New York. Marcel Dekker, Inc.
- Schneiter, T. 1993. Trends in the design of frying fats. Proceeding of the 1993 PORIM international palm oil congress. 30-31.
- Sharma, S.K., Mulvaney, S.J. and Rizvi, S.S.H. 2000. Food Process Engineering Theory and Laboratory Experiments. A John Wiley of Sov Inc., Publication. New York. pp. 259-263.
- Shyu, S. and Hwang, L. 2001. Effect of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips. *Food Research International*. 34(2-3): 133-142.
- Shyu, S., Hau, L. and Hwang, L. 2005. Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried carrot chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 85: 1903-1908.
- Singh, R.P. 1995. Heat and mass transfer in food during deep-fat frying. *Food Technology*. 49(4): 134-137.
- Smith, O. 1951. Factors affecting the oil content of potato chips: National potato chip institute. *Fats and Oils Article*. 8, 1-6.

- Tangduangdee, C., Bhumiratana, S. and Tia, S. 2004. The role of moisture movement and crust thermal property on heat and mass transfer process during deep-fat frying. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 31(1): 73-84.
- Troncoso, E. and Pedreschi, F. 2009. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT-Food Science and Technology*. 42: 1164-1173.
- Ufheil, G. and Escher, F. 1996. Dynamics of oil uptake during deep fat frying of potato slices. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie-Food Science and Technology*. 52: 640-644.
- Ziaifar, A.M., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I. and Trystram, G. 2008. Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science and Technology*. 43(8): 1410-1423.

ภาคผนวก ก

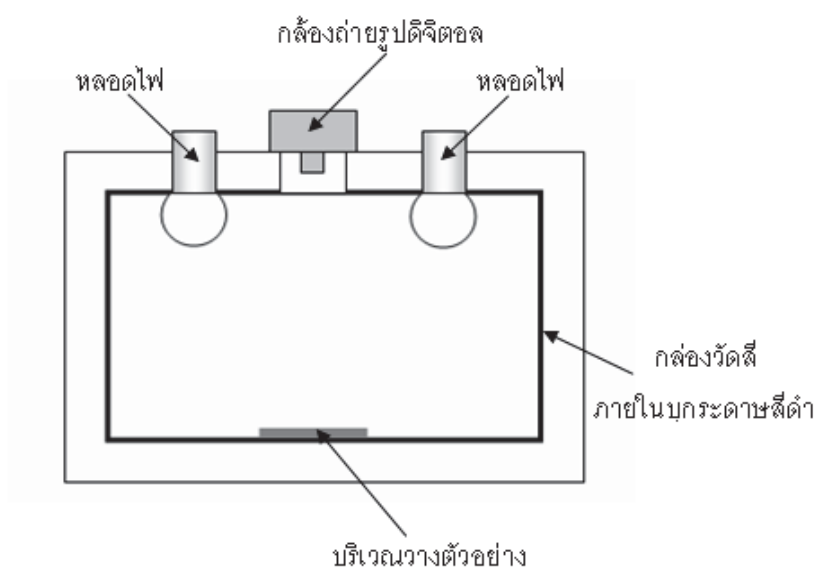
วิธีการวิเคราะห์ทางกายภาพ

1. ค่าสี (ในระบบ CIE) โดยใช้วิธี image analysis (ดัดแปลงจากวิธีของ Leon และคณะ, 2006)

อุปกรณ์

- 1) กล้องถ่ายรูปดิจิทัล (Canon PowerShot S40)
- 2) หลอดไฟ (Philips รุ่น TORNADO, 11 W, CoolDaylight, 660lm, 63Lm/w, I=80 mA, 220-240 V, 50-60 Hz)
- 3) กล้องอุปกรณ์วัดสี ภายในบุกระดาดสีดำ ขนาด กว้าง 16 เซนติเมตร ยาว 24 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร หลอดไฟวางตำแหน่งห่างกัน 20 เซนติเมตร

วิธีการจัดอุปกรณ์ถ่ายภาพ



ภาพที่ 29 การจัดอุปกรณ์เพื่อถ่ายภาพ



ภาพที่ 30 อุปกรณ์ถ่ายภาพที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการถ่ายภาพ

ปรับโปรแกรมของกล้องเป็นระบบ M ใช้โหมด macro ปิดแฟลช ปรับค่ารับแสง F2.8 ค่าความไวชัตเตอร์ 1/100 วินาที ค่าความไวแสง (iso) 100

วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่าย

- 1) ใช้โปรแกรม imageJ ในการวิเคราะห์ค่าสีบริเวณเนื้องกล้วยและแกนกล้วยในระบบ RGB
- 2) นำค่าที่ได้มาทำการเทียบมาตรฐาน (calibration)
- 3) นำค่าสีในระบบ RGB ที่ทำการเทียบมาตรฐานแล้วมาแปลงเป็นระบบ CIE (L^* value, a^* value และ b^* value) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป color converter

วิธีการเทียบมาตรฐาน (calibration)

- 1) นำแผ่นสีในระบบ munsell ที่มีลักษณะสีใกล้เคียงกับตัวอย่าง มาถ่ายภาพโดยใช้สถานะเดียวกับตัวอย่าง
- 2) นำภาพจากแผ่นสีในระบบ munsell วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม imageJ ได้ค่าสีในระบบ RGB
- 3) นำค่าของแผ่นสีในระบบ munsell (ด้านหลังของแผ่นสี) แปลงค่าสีเป็นระบบ RGB โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป color converter

- 4) นำค่าสีในระบบ RGB ที่ได้จากแผ่นสี munsell และค่าสี RGB จากการวิเคราะห์จากภาพถ่ายมาหาค่าความแตกต่างสีทั้งค่า R G และ B เพื่อใช้เป็นค่าเทียบมาตรฐาน (calibration)

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์ทางเคมี

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ใช้หลักการ AOAC วิธี 960.08 (AOAC, 1995)

วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำผลิตภัณฑ์มาบดให้ละเอียด
- 2) ชั่งน้ำหนักประมาณ 2.00 กรัม
- 3) ใส่ในภาชนะที่ทราบน้ำหนักแน่นอน
- 4) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) นำออกมาปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 6) ชั่งน้ำหนักสุดท้ายซ้ำจนได้ค่าคงที่

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

2. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน (oil content) ใช้หลักการ AOCS วิธี Aa 4-38 (AOCS, 1993)

ปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์สกัดโดยใช้เครื่องสกัดไขมัน (Soxhtec system) รุ่น HT6 โดยใช้น้ำหนักตัวอย่างประมาณ 3-5 กรัม ต่อ ปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether) 30 มิลลิลิตร ใช้ระยะเวลาการสกัด (boiling) 60 นาที การปล่อยสารละลายออก (rinsing) 120 นาที และการระเหย (evaporation) 30 นาที

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

The SAS System

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RPM	3	60 80 100

Number of observations 15

Dependent Variable: FAT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	7.32396853	3.66198427	14.93	0.0006
Error	12	2.94285440	0.24523787		
Corrected Total	14	10.26682293			

R-Square	Coeff. Var	Root MSE	FAT Mean
0.713363	1.363600	0.495215	36.31673

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RPM	2	7.32396853	3.66198427	14.93	0.0006

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RPM	2	7.32396853	3.66198427	14.93	0.0006

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for FAT

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	12
Error Mean Square	0.245238
Critical Value of t	2.17881
Least Significant Difference	0.6824

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	37.2882	5	100
B	35.9878	5	80
B			
B	35.6742	5	60

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	0.332 0.498 0.664
RPM	3	60 80 100

Number of observations 45

Dependent Variable: FAT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	11.47497671	1.43437209	17.70	<.0001
Error	36	2.91751120	0.08104198		
Corrected Total	44	14.39248791			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	FAT Mean
0.797289	1.627029	0.284679	17.49684

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	4.02670698	2.01335349	24.84	<.0001
RPM	2	5.87732858	2.93866429	36.26	<.0001
RATE*RPM	4	1.57094116	0.39273529	4.85	0.3311

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	4.02670698	2.01335349	24.84	<.0001
RPM	2	5.87732858	2.93866429	36.26	<.0001
RATE*RPM	4	1.57094116	0.39273529	4.85	0.3311

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for FAT

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.081042
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.2108

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	17.8574	15	0.664
B	17.5082	15	0.498
C	17.1249	15	0.332

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for FAT

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.081042
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.2108

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	17.8928	15	100
B	17.5787	15	80
C	17.0190	15	60

Level of RATE	Level of RPM	N	Mean	Std Dev
0.332	60	5	16.8178000	0.21747690
0.332	80	5	17.3326000	0.34449862
0.332	100	5	17.2244000	0.18976907
0.498	60	5	17.0760000	0.11796822
0.498	80	5	17.3358000	0.38642166
0.498	100	5	18.1128000	0.40713474
0.664	60	5	17.1632000	0.20018417
0.664	80	5	18.0678000	0.25917118
0.664	100	5	18.3412000	0.30191009

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	600 800 1000
TIME	3	2 4 6

Number of observations 45

Dependent Variable: FAT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	95.3785407	11.9223176	68.99	<.0001
Error	36	6.2210092	0.1728058		
Corrected Total	44	101.5995499			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	FAT Mean
0.938769	1.405293	0.415699	29.58096

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	62.31778084	31.15889042	180.31	<.0001
TIME	2	14.72258778	7.36129389	42.60	<.0001
RATE*TIME	4	18.33817209	4.58454302	26.53	0.0521

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	62.31778084	31.15889042	180.31	<.0001
TIME	2	14.72258778	7.36129389	42.60	<.0001
RATE*TIME	4	18.33817209	4.58454302	26.53	0.0521

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for FAT

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.172806
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.3078

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	31.2376	15	600
B	28.8901	15	800
B			
B	28.6151	15	1000

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for FAT

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.172806
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.3078

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	TIME
A	30.3874	15	2
B	29.2324	15	4
B	29.1231	15	6

Level of	Level of	-----FAT-----		
RATE	TIME	N	Mean	Std Dev
600	2	5	31.5096000	0.29120663
600	4	5	30.8022000	0.17499771
600	6	5	31.4010000	0.29173618
800	2	5	30.8828000	0.30770879
800	4	5	27.9558000	0.37833940
800	6	5	27.8318000	0.21511787
1000	2	5	28.7698000	0.71147361
1000	4	5	28.9392000	0.71197521
1000	6	5	28.1364000	0.23981722

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	600 800 1000
TIME	3	2 4 6

Number of observations 45

Dependent Variable: FAT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	13.08405560	1.63550695	52.55	<.0001
Error	36	1.12033360	0.03112038		
Corrected Total	44	14.20438920			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	FAT Mean
0.921128	2.402354	0.176410	7.343200

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	3.91199573	1.95599787	62.85	<.0001
TIME	2	6.33643000	3.16821500	101.81	<.0001
RATE*TIME	4	2.83562987	0.70890747	22.78	0.0601

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	3.91199573	1.95599787	62.85	<.0001
TIME	2	6.33643000	3.16821500	101.81	<.0001
RATE*TIME	4	2.83562987	0.70890747	22.78	0.0601

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for FAT

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.03112
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.1306

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	7.75867	15	600
B	7.16613	15	1000
B			
B	7.10480	15	800

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for FAT

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.03112
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.1306

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	TIME
A	7.87387	15	2
B	7.08087	15	6
B	7.07487	15	4

Level of		Level of	-----FAT-----	
RATE	TIME	N	Mean	Std Dev
600	2	5	8.77480000	0.17228523
600	4	5	7.27020000	0.16571874
600	6	5	7.23100000	0.15846293
800	2	5	7.48460000	0.10848640
800	4	5	6.85060000	0.27189115
800	6	5	6.97920000	0.26129045
1000	2	5	7.36220000	0.04322846
1000	4	5	7.10380000	0.13274863
1000	6	5	7.03240000	0.15610990

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RPM	3	60 80 100

Number of observations 15

Dependent Variable: MC

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	0.08441333	0.04220667	1.71	0.0226
Error	12	0.29668000	0.02472333		
Corrected Total	14	0.38109333			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	MC Mean
0.221503	5.702486	0.157237	2.757333

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RPM	2	0.08441333	0.04220667	1.71	0.2226

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RPM	2	0.08441333	0.04220667	1.71	0.2226

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for MC

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	12
Error Mean Square	0.024723
Critical Value of t	2.17881
Least Significant Difference	0.2167

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	2.85800	5	60
A			
A	2.73600	5	80
A			
A	2.67800	5	100

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	0.332 0.498 0.664
RPM	3	60 80 100

Number of observations 45

Dependent Variable: MC

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	25.31752444	3.16469056	71.65	<.0001
Error	36	1.59000000	0.04416667		
Corrected Total	44	26.90752444			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	MC Mean
0.940909	3.523262	0.210159	5.964889

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	24.81293778	12.40646889	280.90	<.0001
RPM	2	0.06855111	0.03427556	0.78	0.4678
RATE*RPM	4	0.43603556	0.10900889	2.47	0.0621

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	24.81293778	12.40646889	280.90	<.0001
RPM	2	0.06855111	0.03427556	0.78	0.4678
RATE*RPM	4	0.43603556	0.10900889	2.47	0.0621

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for MC

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.044167
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.1556

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	6.89533	15	0.332
B	5.92133	15	0.498
C	5.07800	15	0.664

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for MC

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.044167
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.1556

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	6.02000	15	60
A	5.94000	15	100
A	5.93467	15	80

Level of	Level of		-----MC-----	
RATE	RPM	N	Mean	Std Dev
0.332	60	5	7.06800000	0.15023315
0.332	80	5	6.75800000	0.30678983
0.332	100	5	6.86000000	0.27973201
0.498	60	5	5.87200000	0.23477649
0.498	80	5	5.86400000	0.30770115
0.498	100	5	6.02800000	0.14549914
0.664	60	5	5.12000000	0.06519202
0.664	80	5	5.18200000	0.10848963
0.664	100	5	4.93200000	0.12477981

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	60 80 100

Number of observations 15

Dependent Variable: a

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	0.15985333	0.07992667	0.17	0.8443
Error	12	5.58668000	0.46555667		
Corrected Total	14	5.74653333			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	a Mean
0.027817	18.52445	0.682317	3.683333

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.15985333	0.07992667	0.17	0.8443

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.15985333	0.07992667	0.17	0.8443

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for a

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	12
Error Mean Square	0.465557
Critical Value of t	2.17881
Least Significant Difference	0.9402

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	3.7680	5	80
A			
A	3.7440	5	60
A			
A	3.5380	5	100

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	0.332 0.498 0.664
RPM	3	60 80 100

Number of observations 45

Dependent Variable: a

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	10.91240000	1.36405000	9.92	0.0061
Error	36	4.95240000	0.13756667		
Corrected Total	44	15.86480000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	a Mean
0.687837	13.97864	0.370900	2.653333

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	9.70401333	4.85200667	35.27	0.0061
RPM	2	1.10812000	0.55406000	4.03	0.0564
RATE*RPM	4	0.10026667	0.02506667	0.18	0.9461

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	9.70401333	4.85200667	35.27	0.0061
RPM	2	1.10812000	0.55406000	4.03	0.0564
RATE*RPM	4	0.10026667	0.02506667	0.18	0.9461

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for a

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.137567
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.2747

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	2.9893	15	0.664
A			
A	2.9740	15	0.332
B	1.9967	15	0.498

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for a

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.137567
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.2747

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	2.8747	15	100
B	2.5567	15	80
B	2.5287	15	60

Level of	Level of		-----a-----	
RATE	RPM	N	Mean	Std Dev
0.332	60	5	2.79600000	0.43912413
0.332	80	5	2.93200000	0.44812945
0.332	100	5	3.19400000	0.35920746
0.498	60	5	1.96000000	0.36421148
0.498	80	5	1.84400000	0.31245800
0.498	100	5	2.18600000	0.25832151
0.664	60	5	2.83000000	0.30683872
0.664	80	5	2.89400000	0.49064244
0.664	100	5	3.24400000	0.28901557

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	60 80 100

Number of observations 15

Dependent Variable: b

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	0.32644000	0.16322000	0.77	0.4840
Error	12	2.53936000	0.21161333		
Corrected Total	14	2.86580000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	b Mean
0.113909	2.023821	0.460014	22.73000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.32644000	0.16322000	0.77	0.4840

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for b

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	12
Error Mean Square	0.211613
Critical Value of t	2.17881
Least Significant Difference	0.6339

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	22.8480	5	60
A			
A	22.8200	5	80
A			
A	22.5220	5	100

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	0.332 0.498 0.664
RPM	3	60 80 100

Number of observations 45

Dependent Variable: b

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	16.00624000	2.00078000	4.16	0.0203
Error	36	17.31448000	0.48095778		
Corrected Total	44	33.32072000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	b Mean
0.480369	3.118960	0.693511	22.23533

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	6.93424000	3.46712000	7.21	0.0203
RPM	2	3.26049333	1.63024667	3.39	0.0648
RATE*RPM	4	5.81150667	1.45287667	3.02	0.1302

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for b

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.480958
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.5136

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	22.7900	15	0.332
B	21.9780	15	0.664
B			
B	21.9380	15	0.498

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for b

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.480958
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.5136

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	22.5660	15	80
A	22.2333	15	100
A	21.9067	15	60

Level of	Level of		-----b-----	
RATE	RPM	N	Mean	Std Dev
0.332	60	5	22.8920000	0.66217067
0.332	80	5	22.6080000	0.44924381
0.332	100	5	22.8700000	0.64245622
0.498	60	5	21.0700000	0.83725743
0.498	80	5	22.4840000	0.87774142
0.498	100	5	22.2600000	0.68520070
0.664	60	5	21.7580000	0.94115355
0.664	80	5	22.6060000	0.41307384
0.664	100	5	21.5700000	0.52749408

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	60 80 100

Number of observations 15

Dependent Variable: L

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	0.47308000	0.23654000	0.48	0.6297
Error	12	5.90412000	0.49201000		
Corrected Total	14	6.37720000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	L Mean
0.074183	1.004920	0.701434	69.80000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.47308000	0.23654000	0.48	0.6297

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.47308000	0.23654000	0.48	0.6297

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for L

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	12
Error Mean Square	0.49201
Critical Value of t	2.17881
Least Significant Difference	0.9666

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	69.9960	5	100
A			
A	69.8380	5	60
A			
A	69.5660	5	80

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	0.332 0.498 0.664
RPM	3	60 80 100

Number of observations 45

Dependent Variable: L

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	32.95768000	4.11971000	21.46	<.0001
Error	36	6.91044000	0.19195667		
Corrected Total	44	39.86812000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	L Mean
0.826668	0.623535	0.438129	70.26533

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	31.76572000	15.88286000	82.74	<.0001
RPM	2	0.85356000	0.42678000	2.22	0.1229
RATE*RPM	4	0.33840000	0.08460000	0.44	0.7783

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	31.76572000	15.88286000	82.74	<.0001
RPM	2	0.85356000	0.42678000	2.22	0.1229
RATE*RPM	4	0.33840000	0.08460000	0.44	0.7783

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for L

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.191957
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.3245

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	71.0040	15	0.498
A			
A	70.7020	15	0.332
B	69.0900	15	0.664

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for L

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.191957
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.3245

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	70.4593	15	60
A	70.1833	15	80
A	70.1533	15	100

Level of	Level of		-----L-----	
RATE	RPM	N	Mean	Std Dev
0.332	60	5	69.1540000	0.58722227
0.332	80	5	69.0520000	0.75483111
0.332	100	5	69.0640000	0.24296090
0.498	60	5	71.0420000	0.16483325
0.498	80	5	70.6040000	0.50549975
0.498	100	5	70.4600000	0.52215898
0.664	60	5	71.1820000	0.12517987
0.664	80	5	70.8940000	0.19152023
0.664	100	5	70.9360000	0.38246568

The SAS System

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RPM	3	60 80 100

Number of observations 15

Dependent Variable: DEN

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	0.00350653	0.00175327	0.87	0.4426
Error	12	0.02409720	0.00200810		
Corrected Total	14	0.02760373			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	DEN Mean
0.127031	7.589222	0.044812	0.590467

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RPM	2	0.00350653	0.00175327	0.87	0.4426

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RPM	2	0.00350653	0.00175327	0.87	0.4426

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for DEN

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	12
Error Mean Square	0.002008
Critical Value of t	2.17881
Least Significant Difference	0.0618

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	0.60860	5	100
A			
A	0.59160	5	80
A			
A	0.57120	5	60

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	0.332 0.498 0.664
RPM	3	60 80 100

Number of observations 45

Dependent Variable: DEN

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	0.00334218	0.00041777	1.22	0.3140
Error	36	0.01229960	0.00034166		
Corrected Total	44	0.01564178			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	DEN Mean
0.213670	4.527908	0.018484	0.408222

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.00062098	0.00031049	0.91	0.4121
RPM	2	0.00104404	0.00052202	1.53	0.2307
RATE*RPM	4	0.00167716	0.00041929	1.23	0.3165

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.00062098	0.00031049	0.91	0.4121
RPM	2	0.00104404	0.00052202	1.53	0.2307
RATE*RPM	4	0.00167716	0.00041929	1.23	0.3165

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for DEN

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.000342
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.0137

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	0.413467	15	0.332
A			
A	0.405867	15	0.664
A			
A	0.405333	15	0.498

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for DEN

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.000342
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.0137

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	0.414800	15	60
A	0.406467	15	80
A	0.403400	15	100

Level of	Level of		-----DEN-----	
RATE	RPM	N	Mean	Std Dev
0.332	60	5	0.41840000	0.01712600
0.332	80	5	0.41500000	0.01773415
0.332	100	5	0.40700000	0.01632483
0.498	60	5	0.42060000	0.00850294
0.498	80	5	0.39240000	0.03449348
0.498	100	5	0.40300000	0.00956556
0.664	60	5	0.40540000	0.02048902
0.664	80	5	0.41200000	0.01617096
0.664	100	5	0.40020000	0.01287245

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	60 80 100

Number of observations 15

Dependent Variable: EXP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	0.00105333	0.00052667	0.21	0.8114
Error	12	0.02972000	0.00247667		
Corrected Total	14	0.03077333			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	EXP Mean
0.034229	1.200534	0.049766	4.145333

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.00105333	0.00052667	0.21	0.8114

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.00105333	0.00052667	0.21	0.8114

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for EXP

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	12
Error Mean Square	0.002477
Critical Value of t	2.17881
Least Significant Difference	0.0686

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	4.15400	5	100
A			
A	4.14800	5	60
A			
A	4.13400	5	80

The SAS System
The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
RATE	3	0.332 0.498 0.664
RPM	3	60 80 100

Number of observations 45

Dependent Variable: EXP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	0.28556444	0.03569556	3.15	0.0083
Error	36	0.40816000	0.01133778		
Corrected Total	44	0.69372444			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	EXP Mean
0.411640	2.234554	0.106479	4.765111

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.05235111	0.02617556	2.31	0.0039
RPM	2	0.15155111	0.07577556	6.68	0.1134
RATE*RPM	4	0.08166222	0.02041556	1.80	0.1501

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
RATE	2	0.05235111	0.02617556	2.31	0.0039
RPM	2	0.15155111	0.07577556	6.68	0.1134
RATE*RPM	4	0.08166222	0.02041556	1.80	0.1501

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for EXP

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.011338
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.0789

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RATE
A	4.81333	15	0.332
A			
B	4.74200	15	0.498
B			
B	4.74000	15	0.664

The SAS System
The GLM Procedure

t Tests (LSD) for EXP

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	36
Error Mean Square	0.011338
Critical Value of t	2.02809
Least Significant Difference	0.0789

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	RPM
A	4.82800	15	100
A	4.77933	15	60
A	4.68800	15	80

Level of	Level of		-----EXP-----	
RATE	RPM	N	Mean	Std Dev
0.332	60	5	4.88000000	0.02121320
0.332	80	5	4.71600000	0.03361547
0.332	100	5	4.84400000	0.04615192
0.498	60	5	4.71000000	0.09354143
0.498	80	5	4.73200000	0.04658326
0.498	100	5	4.78400000	0.08324662
0.664	60	5	4.74800000	0.11410521
0.664	80	5	4.61600000	0.25264600
0.664	100	5	4.85600000	0.06024948

The SAS System
The RSREG Procedure

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
METHOD	1.500000	0.500000
RATE	800.000000	200.000000
TIME	4.000000	2.000000

Response Surface for Variable FAT

Response Mean	18.462078
Root MSE	0.614570
R-Square	0.9973
Coefficient of Variation	3.3288

Type I

Regression	DF	Sum of Squares	R-Square	F Value	Pr > F
Linear	3	11181	0.9946	9867.97	<.0001
Quadratic	2	13.995066	0.0012	18.53	<.0001
Crossproduct	3	16.582315	0.0015	14.63	<.0001
Total Model	8	11212	0.9973	3710.61	<.0001
Residual	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Lack of Fit	9	23.252046	2.583561	25.34	<.0001
Pure Error	72	7.341343	0.101963		
Total Error	81	30.593388	0.377696		

Parameter Estimate from Coded

Parameter	DF	Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t	Data
Intercept	1	75.776656	2.560298	29.60	<.0001	17.689022
METHOD	1	-26.768956	0.721375	-37.11	<.0001	-11.118878
RATE	1	-0.040369	0.005721	-7.06	<.0001	-0.803750
TIME	1	-1.531550	0.359230	-4.26	<.0001	-0.514333
METHOD*METHOD	0	0	.	.	.	0
RATE*METHOD	1	0.005075	0.000793	6.40	<.0001	0.507483
RATE*RATE	1	0.000017423	0.000003436	5.07	<.0001	0.696917
TIME*METHOD	1	0.117833	0.079341	1.49	0.1414	0.117833
TIME*RATE	1	0.000215	0.000243	0.89	0.3779	0.086150
TIME*TIME	1	0.115667	0.034356	3.37	0.0012	0.462667

The SAS System
The RSREG Procedure

Factor	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
METHOD	3	11143	3714.311772	9834.13	<.0001
RATE	4	64.223933	16.055983	42.51	<.0001
TIME	4	21.283490	5.320873	14.09	<.0001

The RSREG Procedure
Canonical Analysis of Response Surface Based on Coded Data

Factor	Critical Value	
	Coded	Uncoded
METHOD	-55.898032	-26.449016
RATE	20.572735	4914.547073
TIME	5.758621	15.517241

Predicted value at stationary point: 318.702120

Eigenvalues	Eigenvectors		
	METHOD	RATE	TIME
0.790278	0.312842	0.932803	0.178908
0.455249	0.018604	-0.194344	0.980757
-0.085943	0.949623	-0.303493	-0.078153

Response: fat (spray frying without centrifuge)**Sequential Model Sum of Squares**

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Mean	3874.52	1	3874.52			
Linear	0.50	2	0.25	21.89	0.0002	
2FI	1.000E-004	1	1.000E-004	7.838E-003	0.9314	
<u>Quadratic</u>	<u>0.098</u>	<u>2</u>	<u>0.049</u>	<u>20.37</u>	<u>0.0012</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	8.514E-003	2	4.257E-003	2.56	0.1718	Aliased
Residual	8.324E-003	5	1.665E-003			
Total	3875.14	13	298.09			

"Sequential Model Sum of Squares": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Linear	0.11	6	0.018	9.52	0.0235	
2FI	0.11	5	0.021	11.42	0.0176	
<u>Quadratic</u>	<u>9.317E-003</u>	<u>3</u>	<u>3.106E-003</u>	<u>1.65</u>	<u>0.3126</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	8.035E-004	1	8.035E-004	0.43	0.5489	Aliased
Pure Error	7.520E-003	4	1.880E-003			

"Lack of Fit Tests": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std.Dev.	R-Squared	Adjusted	Predicted	PRESS	
			R-Squared	R-Squared		
Linear	0.11	0.8141	0.7769	0.6697	0.20	
2FI	0.11	0.8142	0.7523	0.6002	0.25	
<u>Quadratic</u>	<u>0.049</u>	<u>0.9728</u>	<u>0.9533</u>	<u>0.8738</u>	<u>0.078</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.041	0.9865	0.9677	0.8978	0.063	Aliased

"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

Response: fat (spray frying with centrifuge)**Sequential Model Sum of Squares**

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
<u>Mean</u>	<u>3842.14</u>	<u>1</u>	<u>3842.14</u>			<u>Suggested</u>
Linear	0.18	2	0.088	1.49	0.2712	
2FI	7.225E-003	1	7.225E-003	0.11	0.7459	
<u>Quadratic</u>	<u>0.31</u>	<u>2</u>	<u>0.15</u>	<u>3.97</u>	<u>0.0703</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.26	3	0.087	27.44	0.0040	Aliased
Residual	0.013	4	3.159E-003			
Total	3842.90	13	295.61			

"Sequential Model Sum of Squares": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Linear	0.58	6	0.096	30.43	0.0027	
2FI	0.57	5	0.11	36.06	0.0020	
<u>Quadratic</u>	<u>0.26</u>	<u>3</u>	<u>0.087</u>	<u>27.44</u>	<u>0.0040</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.000	0				Aliased
Pure Error	0.013	4	3.159E-003			

"Lack of Fit Tests": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0.24	0.2297	0.0756	-0.3390	1.02	
2FI 0.25	0.2391	-0.0145	-0.8781	1.44		
<u>Quadratic</u>	<u>0.20</u>	<u>0.6437</u>	<u>0.3892</u>	<u>-1.4628</u>	<u>1.88</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.056	0.9835	0.9505		+	Aliased

+ Case(s) with leverage of 1.0000: PRESS statistic not defined

"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวจันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล

ที่อยู่ 123 ถ.ผดุงราษฎร์ ต.ปากแพรก อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช 80110

วัน/เดือน/ปี เกิด วันที่ 6 เดือน กรกฎาคม พ.ศ.2530

การศึกษา

ระดับปริญญาตรี

- วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร)

มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

ระดับมัธยมศึกษา

- โรงเรียนสตรีทุ่งสง อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช

ผลงาน

- นำเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่า (ระดับนานาชาติ) ในการประชุมทางวิชาการ

“ศิลปากรวิจัย ครั้งที่ 5” จัดโดย สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร

วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

วันที่ 26 มกราคม พ.ศ.2555 ณ หอประชุมอาคารศิลป์ พีระศรี คณะมัณฑนศิลป์

มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม