

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

จลนพลศาสตร์ในการทอดแบบจุ่มด้วยเครื่องทอดสุญญากาศ

Kinetics of Frying in Vacuum Fryer

เสนอ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

หัวหน้าโครงการ

นายชัยรัตน์ ตั้งดวงดี

กรกฎาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2540

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาจลนศาสตร์การถ่ายเทความร้อนและมวลของอาหารขณะทอดแบบน้ำมันท่วม (Deep fat frying) ในสภาวะสุญญากาศเปรียบเทียบกับที่สภาวะความดันปกติ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิน้ำมัน ความดันขณะทอด เวลาทอดและรูปทรงอาหารที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์มันฝรั่ง จากการทดลอง พบว่า การทอดที่สภาวะสุญญากาศ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำกว่า อุณหภูมิน้ำมันที่สูงขึ้นช่วยให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงลูกบาศก์จะมีสัดส่วนของ Crust/core สูงกว่ารูปทรงแผ่นราบ ทำให้มีการดูดซับน้ำมันมากกว่า จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์โดยสมมติให้ Crust บางมาก พบว่า การทอดในช่วงอุณหภูมิ 120-160°C ค่าแพร่กระจายความร้อนของน้ำมันฝรั่งทอด มีค่า $1.61 \times 10^{-7} - 3.36 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ความดันบรรยากาศและ $4.17 \times 10^{-7} - 6.34 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ความดันสุญญากาศ (270 mmHg) ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่า $2.23 \times 10^{-9} - 1.09 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ความดันบรรยากาศ และ $5.83 \times 10^{-9} - 1.49 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ความดันสุญญากาศ ตามลำดับ สำหรับการเกิด crust จะขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ การเกิด crust จะเกิดได้เร็วกว่า ที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง

คำสำคัญ: จลนศาสตร์/ การทอดแบบน้ำมันท่วม /เครื่องทอดสุญญากาศ/ มันฝรั่ง /การดูดซับน้ำมัน/ การแพร่

Abstract

The objective of this research was to study the kinetics of heat and mass transfer of food being deep-fried in a fryer under vacuum and normal pressure. The influences of frying oil temperature, pressure, frying time and product shape on the changes in temperature, moisture content and oil content were investigated. The results revealed that frying potato in the vacuum condition induced lower moisture content. High frying temperature enhanced heat and mass transfer in the product being fried. In addition, fried potato cube had higher crust/core ratio than fried potato slab, resulting in higher oil-uptake. Heat and mass transfer was modeled based on assumed negligible crust thickness. The transport parameters were determined and found that under the frying temperature range of 120-160°C, the effective thermal diffusivities were 1.61×10^{-7} – 3.36×10^{-7} m²/s under normal pressure and 4.17×10^{-7} – 6.34×10^{-7} m²/s under vacuum condition (270 mmHg), whereas the effective diffusivities of moisture during frying were 2.23×10^{-9} – 1.09×10^{-8} m²/s under normal pressure and 5.83×10^{-9} – 1.49×10^{-8} m²/s under the vacuum condition. Moreover, crust formation was affected by both temperature and pressure. The product fried under high temperature and low pressure resulted in faster crust formation than that fried under low temperature and high pressure.

Keywords: Deep-fat frying / Diffusion/ Mathematical model/ Oil-uptake Potato/ Vacuum-fryer

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
 บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
 บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 วิธีการทอด	5
2.2 ระบบการทอด	7
2.3 ปรากฏการณ์การถ่ายเทในกระบวนการทอด	8
2.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารทอด	16
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารในกระบวนการทอด	17
2.6 ผลกระทบของความร้อนในกระบวนการทอด	18
2.7 ภาพโดยรวมของระบบการทอด	21
 บทที่ 3 วารสารปริทัศน์	
3.1 การศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทอดและสภาวะที่ใช้ในการทอด ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ	23
3.2 การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลในระบบการทอด	27

3.3 บทสรุปจากงานวิจัยที่ผ่านมา	38
บทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายในกระบวนการทอด	
4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดที่พัฒนาโดย Farkas และคณะ [7]	40
4.2 การทำให้ง่ายขึ้นและการแก้สมการหาคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	50
บทที่ 5 การดำเนินงานวิจัย	
5.1 วัตถุประสงค์	58
5.2 อุปกรณ์	58
5.3 การเตรียมวัตถุดิบและการทอด	61
5.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์	61
5.5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดแบบจุ่มในน้ำมัน	62
บทที่ 6 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
6.1 ผลของปัจจัยการผลิตต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์	63
6.2 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของการถ่ายเทความร้อนและมวลในการทอดแบบจุ่มในน้ำมัน	78
บทที่ 7 การสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
7.1 การสรุปผลการวิจัย	92
7.2 ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง	95
ภาคผนวก	
ก. ผลการทดลอง	100
ข. การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์	113
ค. Gauss – Newton Method	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลของแป้งชนิดต่างๆ	20
3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่คำนวณได้ระหว่างการทอดมันฝรั่งสไลด์	32
3.2 สรุปงานวิจัยที่ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการทอด	39
6.1 ค่าการแพร่ความร้อนโดยรวม (α_{eff}) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ในกระบวนการทอดที่สภาวะการผลิตต่างๆ	78
6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวม (D_{eff}) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ในกระบวนการทอดที่สภาวะการผลิตต่างๆ	80
6.3 ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในส่วนต่างๆ ของผลิตภัณฑ์มันฝรั่งทอดภายใต้ความดัน บรรยากาศ	83
6.4 อัตราการเกิด crust ของชิ้นมันฝรั่งที่ผ่านการทอดในสภาวะการผลิตต่างๆ	83
ก.1 อุณหภูมิภายใน slab potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ที่ตำแหน่งลึก จากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid) และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C	101
ก.2 อุณหภูมิภายใน slab potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ที่ตำแหน่งลึก จากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid) และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 140°C	103
ก.3 อุณหภูมิภายใน slab potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ที่ตำแหน่งลึก จากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid) และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 160°C	105
ก.4 อุณหภูมิภายใน slab potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ที่ตำแหน่งลึก จากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid) และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C	106
ก.5 อุณหภูมิภายใน slab potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ที่ตำแหน่งลึก จากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid) และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 140°C	107
ก.6 อุณหภูมิภายใน slab potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ที่ตำแหน่งลึก จากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid) และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 160°C	108

- ก.7 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ที่ทอดด้วยน้ำมัน
อุณหภูมิ 120^oC, 140^oC และ 160^oC ที่ความดัน 760 mmHg 109
- ก.8 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ที่ทอดด้วยน้ำมัน
อุณหภูมิ 120^oC, 140^oC และ 160^oC ที่ความดัน 270 mmHg 110
- ก.9 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ cubed potatoes ที่ทอดด้วยน้ำมัน
อุณหภูมิ 120^oC, 140^oC และ 160^oC ที่ความดัน 760 mmHg 111
- ก.10 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ cubed potatoes ที่ทอดด้วยน้ำมัน
อุณหภูมิ 120^oC, 140^oC และ 160^oC ที่ความดัน 270 mmHg 112

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การส่งผ่านมวลและความร้อน (ก) การทอดแบบสัมผัส (ข) การทอดแบบน้ำมันท่วมในน้ำมัน 6	
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิระหว่างกระบวนการผลิต (ก) การทอด (ข) การอบแห้ง 10	
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการทอดแบบน้ำมันท่วมในน้ำมัน 11	
2.4 กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพูน 13	
2.5 โปรไฟล์ของความชื้นในชิ้นเนื้อที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง 14	
2.6 ลักษณะทั่วไปของอาหารที่ทอดแบบจุ่มในน้ำมัน 18	
2.7 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในแป้งก่อนและหลังการพองตัว 21	
4.1 ภาพของ semi-infinite slab ในระบบการทอด 41	
4.2 ภาพขยายของ crust/core interface 48	
5.1 เครื่องทอดสุญญากาศขนาดเล็ก 60	
6.1 อุณหภูมิภายใน slab potatoes หน้า 1.3 cm ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm 0.3 cm และ 0.65 cm ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C (ก), 140°C (ข) และ 160°C (ค) ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg) 67	
6.2 อุณหภูมิภายใน slab potatoes หน้า 1.3 cm ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm 0.3 cm และ 0.65 cm ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C (ก), 140°C (ข) และ 160°C (ค) ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg) 68	
6.3 อุณหภูมิภายใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm 0.3 cm และ 0.65 cm ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C (ก), 140°C (ข) และ 160°C (ค) ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg) 69	
6.4 อุณหภูมิภายใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm 0.3 cm และ 0.65 cm ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C (ก), 140°C (ข) และ 160°C (ค) ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg) 70	
6.5 ปริมาณความชื้นใน slab potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg) 74	
6.6 ปริมาณความชื้นใน slab potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg) 74	

6.7 ปริมาณความชื้นใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)	75
6.8 ปริมาณความชื้นใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg)	75
6.9 ปริมาณน้ำมันใน slab potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)	76
6.10 ปริมาณน้ำมันใน slab potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (760 mmHg)	76
6.11 ปริมาณน้ำมันใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)	77
6.12 ปริมาณน้ำมันใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (760 mmHg)	77
6.13 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใจกลางชิ้นมันฝรั่งจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C, 140°C และ 160°C	84
6.14 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใจกลางชิ้นมันฝรั่งจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C, 140°C และ 160°C	84
6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha_{\text{eff}}$ กับ $1/T$	85
6.16 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นเฉลี่ยของชิ้นมันฝรั่งจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C, 140°C และ 160°C	86
6.17 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นเฉลี่ยของชิ้นมันฝรั่งจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C, 140°C และ 160°C	86
6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D_{\text{eff}}$ กับ $1/T$	87
6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่สูญเสียกับปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C (ก), 140°C (ข) และ 160°C (ค) ที่ความดัน 760 mmHg	88
6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่สูญเสียกับปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C (ก), 140°C (ข) และ 160°C (ค) ที่ความดัน 270 mmHg	89

6.21	ความหนาของ crust ในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ทอดที่ความดันบรรยากาศ ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	90
6.22	ความหนาของ crust ในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	90
6.23	ความหนาของ crust ที่วัดได้จากการทดลองและจากการทำนายของ slab potatoes เมื่อทอดด้วยน้ำมันอุณหภูมิ 140°C ที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศ	91
6.24	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด crust กับอุณหภูมิของน้ำมัน	91

รายการสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ (m^2)
C	=	ค่าคงที่
D_0	=	ค่าคงที่ในสมการของ Arrhenius
D_{eff}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (m^2/s)
E_a	=	พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)
h	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_D	=	สัมประสิทธิ์การพามวล (m/s)
H_i, h_i	=	เอนทาลปีของ species i (kJ/kg)
k	=	ค่าการนำความร้อน (W/mK)
K_1	=	bulk diffusivity constant (m^2/s)
K_i	=	Darcy's law constant (m^2)
m	=	ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)
N_{ix}	=	ฟลักซ์ของ species i ในแนวแกน x ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
P	=	ความดัน (N/m^2)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol K)
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
T_i	=	อุณหภูมิของ species i ($^{\circ}\text{C}$)
U	=	อัตราการเกิด crust (m/s)
V_i	=	ปริมาตรของ species i (m^3)
$X(t)$	=	ตำแหน่งของ moving interface หรือความหนาของ core region (m)
λ	=	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
α	=	ค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวม (m^2/s)
ρ_i	=	ความหนาแน่นของ species i (kg/m^3)
ε_i	=	สัดส่วนเชิงปริมาตรของ species i (dimensionless)
μ_i	=	ความหนืดของ species i (Ns/m^2)

subscripts

β	=	liquid water
γ	=	water vapor
ϕ	=	oil
σ	=	solid
0	=	initial
bp	=	boiling point
c	=	crust
eff	=	effective property
eq	=	equilibrium
fe	=	final
g	=	gas phase
s	=	surface
sw	=	water in solid phase

superscripts

I	=	crust
II	=	core

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของการศึกษา

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารโดยใช้ความร้อนที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัส สี กลิ่น และรสชาติเฉพาะ มีการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางให้ความร้อนคือน้ำมันไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว มีการถ่ายเทของความร้อน ความชื้น และน้ำมันทั้งภายในและรอบๆ ชิ้นอาหาร และมีการเกิด crust formation ซึ่งเป็นพื้นฐานโดยทั่วไปของการทอดแบบน้ำมันท่วม (deep fat frying) อาหารที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและประกอบด้วยคาปิลลารีที่มีขนาดแตกต่างกันภายในเนื้ออาหาร ในระหว่างการทอดเมื่ออาหารสัมผัสน้ำมันร้อน ทำให้น้ำและ ไขมันเคลื่อนตัวออกจากคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่ก่อน ช่องว่างที่เกิดขึ้นถูกแทนที่ด้วยน้ำมันร้อน อาหารที่ผ่านการทอดจึงมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบในระดับหนึ่ง และมีมวลลดลงเนื่องจากการสูญเสียความชื้น ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ขึ้นกับปัจจัยการผลิตต่างๆ ได้แก่ สถานะการผลิต น้ำมันที่ใช้ และตัวอาหารเอง ซึ่งมีผลต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอด

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารขบเคี้ยวในประเทศไทย กำลังให้ความสนใจผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ทอดกรอบกันเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้คุณค่าทางอาหารสูงกว่าอาหารขบเคี้ยวประเภทแป้งทอดกรอบ แต่การที่ความดันปกติต้องใช้อุณหภูมิน้ำมันสูงและทอดเป็นเวลานานจนทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้ม สารอาหารและวิตามินบางชนิดเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหารไป ดังนั้นการทอดภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งจะเป็นการลดจุดเดือดของของเหลวภายในอาหาร ทำให้น้ำระเหยออกจากอาหารได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการทอดที่ความดันปกติ ช่วยให้อาหารสุกเร็ว มีปริมาณความชื้นลดลง ใช้เวลาการทอดสั้นลงและสามารถรักษาค่าทางอาหารไว้ได้อีกด้วย

ในการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

- ข้อดี
1. เปรียบเทียบกับการทอดโดยวิธีการทั่วไป พบว่าเมื่อทอดอาหารด้วยความดันต่ำจะสามารถใช้อุณหภูมิของน้ำมันที่ต่ำกว่าการทอดปกติ
 2. การทอดใช้ระยะเวลาสั้น
 3. วิตามินสูญเสียน้อยกว่าการทอดปกติ เพราะใช้น้ำมันอุณหภูมิต่ำและใช้ระยะเวลาสั้น

4. เกิดออกซิเดชันของน้ำมันได้ช้า ทำให้สามารถใช้น้ำมันได้นานขึ้นโดยคุณภาพไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ข้อเสีย 1. มีการลงทุนของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สูงกว่าการทอดปกติ และสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการติดตั้งด้วย

2. ขั้นตอนการทอดจะยุ่งยากและซับซ้อนกว่าการทอดปกติ

3. ผลของปัจจัยการผลิตต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการทอดที่มีต่อผลิตภัณฑ์มีข้อมูลน้อยมากและไม่ชัดเจน

4. ความเข้าใจในกลไกและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดที่ความดันต่ำกว่าปกติมีน้อยมาก

ปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการทอดโดยทั่วไป ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอด ซึ่งอยู่ในช่วง $160^{\circ}\text{C} - 190^{\circ}\text{C}$ ขึ้นกับชนิดของอาหาร และข้อกำหนดลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคต้องการ และเนื่องจากในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การถ่ายเทที่เกิดขึ้นในระบบการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ จึงมีตัวแปรของความดันเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย และปัจจัยจากตัวอาหารเองก็มีผลต่อคุณภาพของอาหารด้วย เช่น สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหาร อาหารที่มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันจึงมีคุณภาพต่างกัน ในการศึกษาสถานะที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ โดยวิจิตร ทรัพย์บุญมาตย์ [1] ซึ่งใช้เครื่องทอดสุญญากาศขนาดเล็ก (lab scale) ที่สร้างขึ้น ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำมัน ความดันขณะทอดและเวลาที่ใช้ทอด คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สนใจ คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน สี และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ จากงานวิจัยนี้พบว่าการทอดที่ความดันต่ำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสุกกรอบได้รวดเร็วกว่าการทอดที่ความดันปกติ มีปริมาณน้ำมันและความชื้นในผลิตภัณฑ์น้อยกว่าการทอดที่ความดันปกติ แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ และอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการทอดผลิตภัณฑ์ผักทอดกรอบ เกี่ยวกับการเกิด starch gelatinization และการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสระหว่างการทอดที่มีผลต่อการสุกและความกรอบของผลิตภัณฑ์ แต่ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวล และปัจจัยการผลิตต่างๆ เช่น อุณหภูมิของน้ำมันและความดันที่ใช้ทอดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายในอาหารอย่างไร เมื่อทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศยังไม่ชัดเจน ดังนั้นการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลในระบบการทอด จะช่วยให้มีความเข้าใจกลไกการเปลี่ยนแปลงภายในอาหารมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมัน ความดันขณะทอด เวลาที่ใช้ทอดและขนาดรูปร่างของชิ้นอาหารที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งทอด

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในกระบวนการทอดจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลภายในอาหารทอดซึ่งประกอบด้วย crust region และ core region ในการทอดแบบน้ำมันท่วม ภายใต้ความดันบรรยากาศ และความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ มันฝรั่ง เนื่องจากมีเนื้อแน่น สามารถตัดแต่งเป็นรูปทรงต่างๆ ได้ง่าย มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงและมีปริมาณไขมันต่ำ

1.3.2 อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทอดมี 3 ช่วงคือ 120°C , 140°C และ 160°C จากงานวิจัยโดยทั่วไป การทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศใช้อุณหภูมิของน้ำมันประมาณ $80^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$ แต่งานของ วิจิตร [1] ได้ทดลองทอดผลิตภัณฑ์ฟักทองสไลด์โดยใช้เครื่องทอดสุญญากาศขนาดเล็ก ในช่วงอุณหภูมิน้ำมัน $140^{\circ}\text{C} - 180^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ในการทอดผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบจะสุกช้าและไม่สม่ำเสมอ ต้องใช้เวลาในการทอดนาน ส่วนที่อุณหภูมิสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงภายในอาหารอย่างรวดเร็ว ทำให้ยากต่อการทำความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จึงเลือกศึกษาในช่วงอุณหภูมิ $120^{\circ}\text{C} - 160^{\circ}\text{C}$

1.3.3 ความดันที่ใช้ทอด คือ ความดันต่ำกว่าบรรยากาศที่ระดับ 270 mmHg (abs) ซึ่งมีจุดเดือดของน้ำเท่ากับ 73°C เปรียบเทียบกับการทอดที่ความดันบรรยากาศ 760 mmHg (abs) ที่มีจุดเดือดของน้ำเท่ากับ 100°C การทอดที่ความดันต่ำ เป็นการลดจุดเดือดของน้ำในอาหาร น้ำจึงระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการทอดที่ความดันปกติ แต่ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าช่วงอุณหภูมิที่สามารถเกิด starch gelatinization ของแป้งในมันฝรั่งคือ $58^{\circ}\text{C} - 66^{\circ}\text{C}$

1.3.4 ขนาดรูปร่างของอาหารมี 2 ลักษณะ คือ cubed potato ขนาด $1.3 \times 1.3 \times 1.3 \text{ cm}^3$ และ slab potato ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 cm และหนา 1.3 cm ทั้ง 2 ลักษณะมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่างกัน

1.3.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ฝรั่งและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมการถ่ายเทความร้อนใน core region ได้แก่ ค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนใน core region ที่สภาวะการผลิตต่างๆ

1.3.6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมการถ่ายเทมวลใน core region ได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวลใน core region ที่สภาวะการผลิตต่างๆ

1.3.7 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ และความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับของน้ำมันกับการเกิด crust formation และผลของอุณหภูมิน้ำมันและความดันขณะทอดที่มีต่ออัตราการเกิด crust

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

1.4.1 อาหารที่มีปริมาณความชื้นสูง เมื่อนำมาทอดจะมีการระเหยของน้ำเกิดขึ้นที่ crust/core interface ซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ที่จุดเดือดของน้ำ

1.4.2 การทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เป็นการลดจุดเดือดของน้ำในอาหาร ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียความชื้นมากกว่าการทอดปกติ

1.4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ทอดด้วยความดันต่ำ มีอัตราการเกิด crust สูงกว่าการทอดที่ความดันปกติ เนื่องจากมีการระเหยของน้ำมากกว่า

1.4.4 การดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์เป็นผลมาจากการเข้าไปแทนที่น้ำซึ่งระเหยออกไป และสะสมอยู่บริเวณ crust

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

มีความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วมภายใต้ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ชัดเจนมากขึ้น และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนกับการสูญเสียความชื้น และการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์ และผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการทอดได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎี

การทอดเป็นการปฏิบัติการแปรรูปด้วยความร้อน ที่มีการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางให้ความร้อน ได้แก่ น้ำมัน ไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว เป็นการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์ในอาหาร และทำให้ค่า water activity ที่ผิวหน้าหรือทั้งชิ้นของอาหารลดลง กรณีที่มีรูปร่างเป็นแผ่นบาง อายุการเก็บของอาหารทอดโดยส่วนใหญ่ขึ้นกับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในขณะเก็บรักษา ในระหว่างการทอดจะมีการระเหยของน้ำออกจากชิ้นอาหาร และมีการพองตัวของเม็ดแป้งเกิด gelatinization ในอาหาร ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัส และรสชาติเฉพาะ เวลาในการทอดจนได้เป็นผลิตภัณฑ์จะใช้เวลานานมาก พบว่า อาหารจะสุกในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ (transient state) โดยที่อุณหภูมิของอาหารมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำมันอยู่มาก (Fellow, [2])

การทอด เป็นกรรมวิธีการแปรรูป ที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ โดยทั่วไป (Joslyn และ Heid, [3]) ดังนี้

1. การทอดใช้เวลาสั้นมาก ส่วนใหญ่จะเสร็จภายใน 5 นาที ทั้งนี้เนื่องจาก
 - 1.1 การทอดมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางให้ความร้อน คือน้ำมันและอุณหภูมิของอาหารมาก การทอดแบบปกติจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิมากกว่าการทอดที่ความดันต่ำ
 - 1.2 ขนาดของชิ้นอาหารที่ใช้ในการทอดส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก และน้ำหนักน้อย
2. ผลิตภัณฑ์อาหารทอดโดยทั่วไป จะมีน้ำมันอยู่ในผลิตภัณฑ์ประมาณ 10 – 40% โดยน้ำหนัก เช่น potato chips
3. ผลิตภัณฑ์อาหารทอดจะมีคุณลักษณะความกรอบมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปโดยส่วนใหญ่
4. ตัวกลางส่งผ่านความร้อนที่ใช้คือ น้ำมัน ซึ่งมีผลทำให้องค์ประกอบและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเฉพาะแตกต่างกับวิธีการแปรรูปอาหารอื่นๆ

2.1 วิธีการทอด [2]

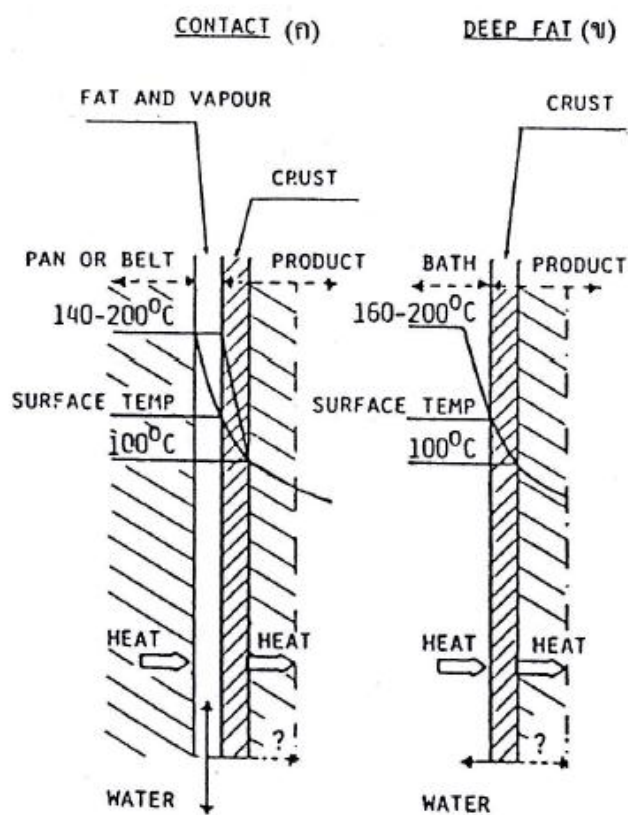
วิธีการทอดที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป มีอยู่ 2 วิธี คือ

2.1.1 การทอดแบบสัมผัส (Contact frying)

วิธีนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอนสไลด์ ไข่ เบอร์เกอร์ การส่งผ่านความร้อนจากผิวหน้าของกระทะที่ร้อนไปยังน้ำมัน (ดังรูปที่ 2.1ก) ความหนาของชั้นน้ำมันที่สัมผัสกับอาหารจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าเป็นสีน้ำตาล ขณะเดียวกันจะเกิดฟองจากไอน้ำที่ขึ้นมาจากผิวหน้าอาหาร การทอดแบบสัมผัสนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสูง อยู่ในช่วง $200-450 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

2.1.2 การทอดแบบน้ำมันท่วม (Deep-fat frying)

การส่งผ่านความร้อนโดยการทอดวิธีนี้ จะเกิดขึ้นทั้งแบบการพาความร้อน (heat convection) ภายในน้ำมันร้อนและการนำความร้อน (heat conduction) ภายในชิ้นอาหาร ผิวหน้าของอาหารจำได้รับความร้อนทุกๆด้าน จึงทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและ ลักษณะปรากฏอย่างสม่ำเสมอ (ดังรูปที่ 2.1ข) ในช่วงแรกของการทอดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าประมาณ $200-300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ แต่เมื่อทอดไปนานขึ้นมีการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าเกิด vapor bubble รอบๆชิ้นอาหารเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น เป็น $800-1000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$



รูปที่ 2.1 การส่งผ่านมวลและความร้อน (ก) การทอดแบบสัมผัส (ข) การทอดแบบน้ำมันท่วม [6]

2.2 ระบบการทอด [2]

ในระบบการทอดจะประกอบด้วย 5 ระบบย่อย คือ

2.2.1 ระบบเครื่องมือและอุปกรณ์ (Mechanical system) เป็นระบบการส่งอาหารเข้าและออกจากน้ำมัน โดยส่วนใหญ่ จะเป็นสายพานเหล็กปลอดสนิมที่มีการหมุนเวียนการทำงานด้วยแรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ โดยที่ตำแหน่งและลักษณะการทำงานของสายพานแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

2.2.2 ระบบน้ำมัน (Fat system) จะเป็นภาชนะที่บรรจุน้ำมันสำรอง และน้ำมันที่ใช้หมุนเวียนภายในเครื่องทอด โดยน้ำมันที่หมุนเวียนภายในเครื่องทอดจะช่วยควบคุมให้อุณหภูมิของน้ำมันสม่ำเสมอ

2.2.3 ระบบให้ความร้อน (Thermal system) เป็นระบบที่ให้ความร้อนกับน้ำมัน แบ่งย่อยเป็นรูปแบบต่างๆได้ดังนี้

2.2.3.1 ขดลวดต้านทานไฟฟ้า (electric immersion heating coils) เป็นวิธีที่ให้ความร้อนสัมผัสกับน้ำมันโดยตรง ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูง แต่ไม่เป็นที่แพร่หลาย เพราะต้นทุนค่าไฟฟ้ามีราคาสูง

2.2.3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) เป็นวิธีให้ความร้อนโดยการถ่ายเทความร้อนจากท่อไอน้ำ (steam pipe) ไปยังน้ำมัน นิยมใช้กันมากเนื่องจากแก๊สหรือน้ำมันเตาที่เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำมีราคาถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ แต่ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะต่ำกว่าการใช้ขดลวดต้านทานไฟฟ้า

2.2.4 ระบบระบายอากาศ (Hooding and ventilation system) เป็นระบบการดูดอากาศไอน้ำ และควัน ที่ลอยขึ้นมาจากผิวหน้าเครื่องทอด ช่วยป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำ และป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากน้ำมันที่กระเด็นออกจากเครื่องทอด และช่วยในด้านความสะอาดของผลิตภัณฑ์และบริเวณที่ติดตั้งเครื่องทอดได้เป็นอย่างดี

2.2.5 ระบบควบคุมการทำงาน (Control system) เป็นระบบการทำงานที่ทำให้สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการและสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิด แบ่งเป็น 2 แบบได้แก่

2.2.5.1 Modulating system จะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยมีความละเอียดอยู่ในช่วง $\pm 2^{\circ}\text{F}$

2.2.5.2 On-off system สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{F}$ ซึ่งจะมีความละเอียดน้อยกว่าและราคาถูกกว่าแบบ Modulating system

2.3 ปรากฏการณ์การถ่ายเทในกระบวนการทอด

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่มีความซับซ้อนมากเป็นทั้งงานศิลปะและวิทยาศาสตร์ การทอดอาหารแบบจุ่มในน้ำมัน (deep-fat frying) มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพเกิดขึ้นกับตัวผลิตภัณฑ์ได้แก่ การเสื่อมสภาพของโปรตีน (protein denaturation) การเกิดเจลของแป้ง (starch gelatinization) การระเหยของน้ำ (water vaporization) และการเกิดเปลือกแข็งชั้นนอก (crust formation) ในขณะเดียวกันก็มีการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นด้วย ในลักษณะของการเคลื่อนที่ของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ และการเคลื่อนที่ของน้ำในรูปไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ (Blumenthal, [4])

2.3.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะคือ การพาความร้อน และการนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนแบบการนำภายใต้สภาวะที่ไม่คงที่เกิดขึ้นภายในอาหารแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับคุณสมบัติเชิงความร้อนของอาหาร ได้แก่ ค่าการแพร่ของความร้อน การนำความร้อน ความจุความร้อน และความหนาแน่นของอาหาร ส่วนการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเกิดขึ้นระหว่างอาหารแข็งกับน้ำมัน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอาหารแข็งกับน้ำมันมีความยุ่งยากซับซ้อนมากเนื่องจากมีความเคลื่อนไหวอย่างรุนแรงของไอน้ำ (vapor bubble) ที่ออกจากชั้นอาหาร ปริมาณของกลุ่มไอน้ำรอบๆชิ้นอาหารลดลงเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากความชื้นในอาหารลดน้อยลง ไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้ทำให้การศึกษาเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เพื่อใช้ในกระบวนการต่างๆของการผลิตอาหารแต่ค่าที่ได้มีความแตกต่างจากการทอดอาหารในน้ำมันจริง (Singh, [5])

Hallstrom [6] อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลา ในระหว่างการทอดเปรียบเทียบกับกรอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณความชื้นในกระบวนการให้ความร้อนจากการทอดแบบน้ำมันท่วม และการให้ความร้อนแบบอื่นๆมีความคล้ายคลึงกัน โดเนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ผิวหน้าและใจกลางอาหาร แบ่งได้เป็น 4 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับค่าความดันไอ ซึ่งในการทอดแบบน้ำมันท่วมมีค่าประมาณ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในช่วงนี้ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำมันและผิวหน้าอาหาร ในการทอดแบบน้ำมันท่วมและการทอดแบบสัมผัส ผลคูณระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงจึงมีช่วงนี้สั้น แต่ในการอบแห้งมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำจึงมีช่วงนี้ยาวกว่า ช่วงแรกนี้เรียกว่า constant rate period ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่อุณหภูมิที่ผิวสูงกว่า 100°C หรืออุณหภูมิกระเปาะเปือก เรียกว่า falling rate period การสูญเสียความชื้นเนื่องจากการระเหยของน้ำและการเกิด crust formation ซึ่งนิยามว่าเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C ในช่วงที่มีการเคลื่อนที่ของ 100 °C isotherm เข้าไปในผลิตภัณฑ์ และ crust ก็เป็นส่วนที่อยู่ด้านนอกของ 100 °C

isotherm เวลาในช่วงนี้ไม่ขึ้นอยู่กับวิธีการให้ความร้อน เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการระเหยกลายเป็นไอ การเกิด crust formation ทำให้ภายในใจกลางอาหารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 3 ภายหลังการให้ความร้อนพบว่าอุณหภูมิที่ผิวลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการพาความร้อนระหว่างอากาศกับผิวหน้าอาหาร แต่ภายในชั้นอาหารมีการถ่ายเทแบบนำความร้อน (heat conduction) อย่างช้าๆ จากภายในสู่ผิว จึงทำให้อุณหภูมิใจกลางชั้นอาหารยังคงสูงกว่าผิวหน้าอาหาร ช่วงนี้สิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิที่ใจกลางมีค่าสูงสุด และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่อุณหภูมิใจกลางอาหารเริ่มลดลง ช่วงที่ 2 และ 3 เวลาในการทอดขึ้นกับขนาด และมิติของชิ้นอาหาร (dimension) ถ้าเป็นอาหารที่มีขนาดใหญ่และหนา จะมีช่วงที่ 2 และ 3 ยาวนานกว่าชิ้นบาง

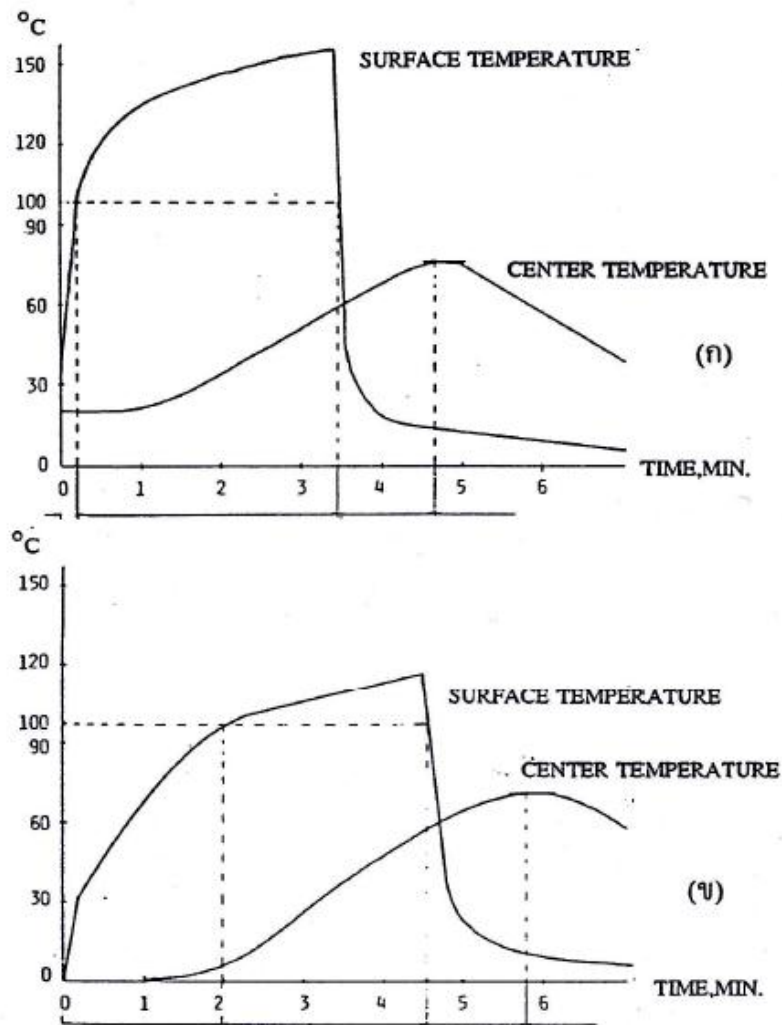
Farkas, Singh และ Rumsey [7] ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารเมื่อทอดแบบจุ่มในน้ำมัน อาหารโดยส่วนใหญ่มักมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักและมีตัวถูกละลายปะปนอยู่เล็กน้อย ดังนั้นจุดเดือดของของเหลวในตัวอย่างอาหารจึงมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ เมื่อน้ำระเหยออกจากอาหารมากขึ้น อุณหภูมิของอาหารจึงสูงกว่าจุดเดือด สรุปขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทอดได้ 4 ส่วนคือ

1. Initial heating เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ไม่กี่วินาที อุณหภูมิที่ผิวของอาหารจะเพิ่มขึ้นสู่จุดเดือดของของเหลว มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติระหว่างน้ำมันและอาหาร และยังไม่มีการระเหยของไอน้ำที่ผิวอาหาร

2. Surface boiling เป็นช่วงที่เริ่มมีการระเหยของไอน้ำที่ผิวอาหาร การถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลงเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นในน้ำมัน และมีการฟอร์มตัวของ crust เริ่มต้นที่ผิวหน้าอาหาร

3. Falling rate น้ำจากภายในอาหารแพร่ออกสู่ภายนอกมากขึ้น อุณหภูมิที่ตรงกลางชั้นอาหารสูงขึ้นเข้าสู่จุดเดือดของของเหลว มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและกายภาพของอาหาร เช่น การเกิด gelatinization ของแป้ง และการสุก ในส่วนของ core region มีการฟอร์มตัวของ crust มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมีน้ำระเหยออกไปมากพอสมควรแล้วการถ่ายเทของไอน้ำที่ผิวหน้าจะลดลง

4. Bubble end-point อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง ไม่มี bubble ที่ผิวหน้าเมื่อยังคงทอดต่อไป ให้ความหนาของ crust เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิระหว่างกระบวนการผลิต (ก) การทอด และ (ข) การอบแห้ง (6)

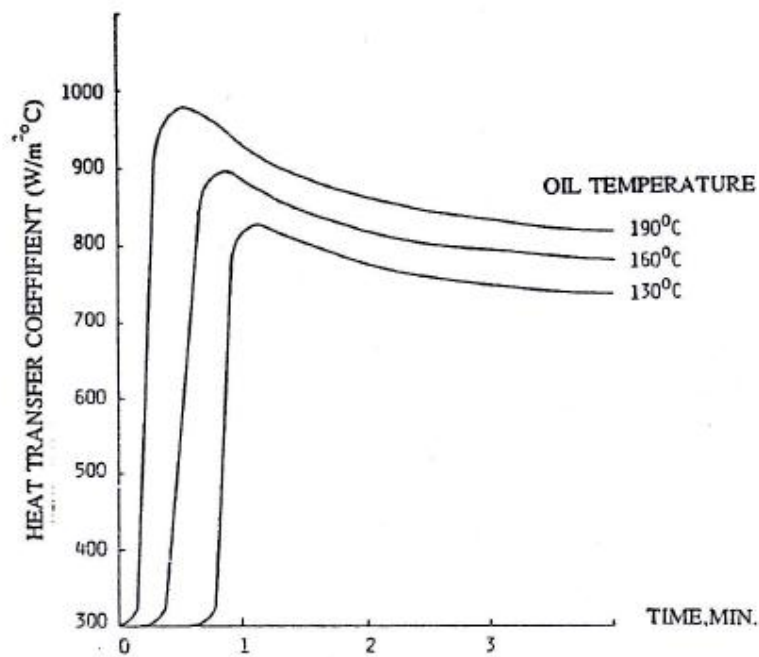
Hallstrom, [6] ได้แยกพิจารณาการถ่ายเทความร้อนเป็น 2 ส่วนคือ

2.3.1.1 การถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางสู่ผิวหน้าอาหาร

เป็นการพาความร้อนจากน้ำมันไปยังผิวหน้าอาหารในการทอดแบบน้ำมันท่วมมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงก่อนที่จะมีการระเหยของน้ำเท่ากับ $250-300 \text{ W/m}^2\text{°C}$ แต่ในขณะที่มีการระเหย bubble ที่เกิดขึ้นทำให้มีความปั่นป่วนในน้ำมัน เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป มีฟิล์มของไอน้ำอยู่รอบๆ ชิ้นอาหารมากขึ้นจนทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง รูปที่ 2.3 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในการทอดแบบน้ำมันท่วม

2.3.1.2 การถ่ายเทความร้อนภายในอาหาร

การถ่ายเทความร้อนภายในโดยหลักแล้วเป็นการนำความร้อน แต่ก็อาจมีการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำด้วย ความหนาของ crust มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นอาหาร หลังจากอุณหภูมิที่ผิวสูงถึง 100°C ประมาณได้ว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ในช่วงนี้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มีค่าสูงมีความสำคัญน้อยกว่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการทอดแบบน้ำมันท่วม [6]

2.3.2 การถ่ายเทมวล

2.3.2.1 การถ่ายเทความชื้น

ในอาหารโดยทั่วไป มีการสูญเสียน้ำออกจากอาหารจาก 2 แหล่งคือเป็นการระเหยน้ำออกจาก crust และการสูญเสียน้ำเนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity, WHC) ลดลง [6] การระเหยของน้ำเกิดขึ้นภายใน crust ขณะที่ทอดอาหารในน้ำมันร้อน จะมีการส่งผ่านความร้อนไปยังผิวหน้าอาหาร ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนประกอบด้วยคาปิลลารีที่มีขนาดแตกต่างกันไป เมื่อมีการระเหย น้ำจะระเหยออกจากคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่ก่อน และภายในอาหารมีการเคลื่อนที่ของน้ำมายังผิวหน้าอาหาร อาจมีกลไกหลายรูปแบบ Van Arsdel, Copley และ Morgan [8] ได้สรุปกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพรุนไว้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์โดยคำนึงเฉพาะการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านในช่องว่างของโครงสร้างของสารไว้ดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวผ่านรูพรุนเนื่องจากแรงคาปิลลารี (capillary force) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว

$$G = -k_w \rho_d \frac{dW}{dl} \quad (2.1)$$

เมื่อ	G	=	mass-velocity of water being transferred (kg/m ² s)
	W	=	moisture content (kg/kg db)
	dW/dl	=	moisture gradient (1/m)
	ρ_d	=	density of moisture-free material (kg/m ³)
	k_w	=	moisture conductivity (m ² /s)
	l	=	distance perpendicular to cross – section through which the flow is occurring (m)

ข. การแพร่ของของเหลวเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นภายในชิ้นอาหาร

$$G = D \rho_d \frac{dW}{dl} \quad (2.2)$$

เมื่อ	D	=	diffusivity of water in food material (m ² /s)
-------	---	---	---

ค. การแพร่ของไอน้ำภายในช่องว่างของอาหารเกิดจากความแตกต่างของความดันไอ (vapor diffusion) และน้ำจะระเหยกลายเป็นไอ

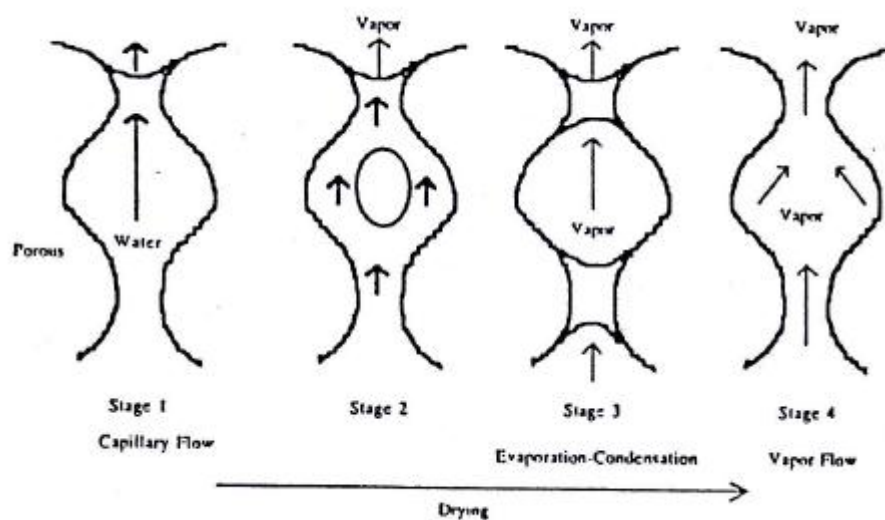
$$G = -\frac{d}{\mu} \frac{1}{R_v T} \frac{P}{(P - P_v)} \frac{dP_v}{dl} \quad (2.3)$$

เมื่อ	d	=	diffusivity of water in air (m ² /s)
	R_v	=	gas constant of water vapor (m ³ Pa/kg K)
	T	=	absolute temperature (K)
	P	=	atmospheric pressure (N/m ²)
	P_v	=	partial pressure of water vapor (N/m ²)

μ = diffusion resistance factor (dimensionless)

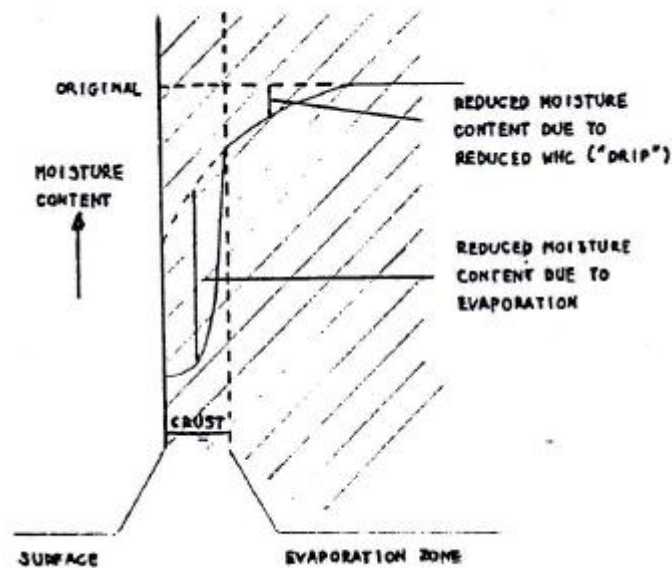
dP_v/dl = vapor pressure gradient (N/m^3)

กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพอร์นดังสมการข้างต้น อาจอธิบายได้ดังรูปที่ 2.4 ในขั้นตอนแรกการถ่ายเทของน้ำจะอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งเกิดจากการแพร่ออกสู่ภายนอก เนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เกิดเป็นช่องว่างอากาศภายในรูพอร์นแทนที่ความชื้นที่สูงเกินไป ระหว่างนี้การถ่ายเทของน้ำจะถูกดึงขึ้นไปด้วยแรงตึงผิวเกาะไปตามผนังของรูพอร์น จากนั้นน้ำในรูพอร์นจะมีทั้งในสถานะของเหลวและไอ ไอบางส่วนจะควบแน่นเป็นของเหลวที่บริเวณคอขวดของรูพอร์นในขั้นตอนที่ 3 ในรูปที่ 2.4 น้ำบางส่วนจะระเหยกลายเป็นไอและบางส่วนเคลื่อนที่เกาะไปตามผนัง จนกระทั่งเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายที่น้ำระเหยและเคลื่อนที่ในรูปของไอ น้ำ จากลักษณะการถ่ายเทของน้ำในวัสดุพอร์นเห็นได้ว่าไม่มีทฤษฎีหนึ่งที่สามารถอธิบายได้ครอบคลุมกระบวนการทั้งหมดได้อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น [8]



รูปที่ 2.4 กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุพอร์น [8]

การสูญเสียน้ำอีกส่วนหนึ่งเนื่องมาจากความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง เช่น ในกรณีให้ความร้อนแก่ชิ้นเนื้อ ด้วยอุณหภูมิและเวลาระดับหนึ่ง พบว่ามีการเสื่อมสภาพของโปรตีน (protein denaturation) โปรตีนจับตัวกันทำให้น้ำ (drip) ถูกบีบตัวออกมาภายนอก แต่ถ้ามีส่วนผสมที่เป็นแป้งประกอบด้วยอยู่ด้วย น้ำจะถูกดูดซับด้วยส่วนผสมเหล่านี้ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงที่อุณหภูมิสูง โปรไฟล์ของความชื้นเป็นดังรูปที่ 2.5 [6]



รูปที่ 2.5 โปรไฟล์ของความชื้นในชิ้นเนื้อที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง [6]

2.3.2.2 การดูดซับของน้ำมัน

กลไกการถ่ายเทของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยังมีความเข้าใจน้อยมาก แต่ก็มีการวิจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษาและให้ข้อสังเกตไว้มากมาย Reeve และ Neel [9] ตั้งแต่น้ำมันเข้าไปในอาหารโดยไปแทนที่ในช่องว่างระหว่างเซลล์และตามผนังเซลล์ แต่ไม่ได้อธิบายว่าเกิดขึ้นได้อย่างไรและเมื่อไหร่ Brown [10] อธิบายว่าความพรุนของ potato chips เป็นเหตุให้อิออนน้ำมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนจากน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง ไอออนบางส่วนที่ถูกกักอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่มากขึ้น และเมื่อไอออนเคลื่อนที่ออกไป น้ำมันจึงเข้าไปแทนที่ Gamble และคณะ [11] ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อทอดอาหาร ความชื้นภายในอาหารจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำเมื่อผิวหน้าแห้งและมีเกรเดียนต์ความดัน จึงทำให้น้ำมันที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าเข้าสู่ภายในได้ตามผิวหน้าที่ถูกทำลายเมื่อนำอาหารออกจากเครื่องทอด McDonough และคณะ [2] ใช้ ESEM (environmental scanning electron microscope) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ tortilla chips ระหว่างทอด

พบว่าน้ำมันเกาะตัวที่ผิวหน้าอาหาร โดยทันทีที่อาหารสัมผัสกับน้ำมัน และแพร่เข้าไปในอาหาร Matz [13] เสนอแนะว่าถ้าหากนำ chips ออกจากเครื่องทอดขณะที่อุณหภูมิของอาหารยังเพิ่มขึ้นอยู่ น้ำมันถูกดูดซับเข้าไปเพียง 15% เท่านั้น ส่วนที่เหลืออยู่จับตัวที่ผิวหน้าและเข้าสู่ภายในเมื่ออาหารเย็นตัวลง Pinthus และ Saguy [14] กล่าวว่า แรงดึงดูดผิวมีผลต่อการดูดซับของน้ำมันในการทอดมันฝรั่ง ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก capillary force Palau [15] สังเกตพบว่า tortilla chips ที่ทอดเป็นเวลา 5 วินาที มีลักษณะค่อนข้างยืดหยุ่นและมีน้ำมันเกาะที่ผิวหน้า และ tortilla chips ทอดเป็นเวลา 60 วินาที มีความกรอบมากกว่า เนื่องจากน้ำมันถูกดูดซับเข้าไปโดย capillary force ในช่วงที่เย็นตัวลง chips จึงมีลักษณะผิวหน้าแห้ง และมีปริมาณน้ำมันสูง

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาถึงการดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์นั้น Saguy และ Pinthus [16] ได้สรุปกลไกที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. การเข้าไปแทนที่น้ำที่ระเหยไป (replacement of moisture)
2. การเกิด crust formation นั้นมีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของน้ำมันเป็นอย่างมาก เนื่องจากพบว่าน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหารโดยส่วนใหญ่ มักปรากฏอยู่ใน crust
3. Interfacial tension เมื่อเริ่มจุ่มชิ้นอาหารในน้ำมัน น้ำมันที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าอาหาร มี interfacial tension ระหว่างผิวหน้าอาหารกับน้ำมันมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำมันด้วยกันเอง เมื่อเวลาผ่านไป interfacial tension ระหว่างอาหารและน้ำมันจะลดลงจนต่ำกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำมันกับน้ำมัน น้ำมันที่ผิวหน้าอาหารจึงเคลื่อนที่เข้าไปภายใน
4. ความเป็นรูพรุน (porosity) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับของน้ำมันของผลิตภัณฑ์ ความเป็นรูพรุนเริ่มต้นของอาหารมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ และในระหว่างการทอดทั้งค่าความเป็นรูพรุนและการดูดซับน้ำมันจะเพิ่มขึ้นและมีผลต่อกันและกัน
5. Capillary rise เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ interfacial tension และ contact angle และผกผันกับ porosity

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของน้ำมันประกอบด้วย

1. คุณภาพของน้ำมันและองค์ประกอบ องค์ประกอบในที่นี้หมายถึง by-products และ residues ที่ถูกดูดซับเข้าไป การดูดซับของน้ำมันและการเสื่อมสภาพของน้ำมันมากขึ้นเมื่อเวลาการทอดเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง น้ำมันที่สกัดจากอาหารทอดมีปริมาณโพลิเมอร์สูงกว่าน้ำมันที่อยู่ในเครื่องทอด surface-active agents ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดออกซิเดชัน มีผลต่อการดูดซับน้ำมัน surfactants บางชนิดที่เกิดขึ้นในน้ำมันร้อน มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำมันกับอาหาร โดยไปลดแรงดึงดูดผิวของ immiscible materials แต่จะพบเฉพาะในน้ำมันที่เสื่อมคุณภาพเท่านั้น

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

3. ปริมาณความชื้น มีงานวิจัยหลายชิ้นให้ข้อสรุปว่าปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของเวลาที่ใช้ทอด และน้ำมันเริ่มซึมซับเข้าไปเมื่อมีการสูญเสียไอน้ำออกไประหว่างการทอด ถ้าวัตถุดิบมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำมันสูง ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นและปริมาณน้ำมันเป็นเส้นตรง ในผลิตภัณฑ์ potato chips ปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันที่ดูดซับ (Gamble และคณะ, [11]) แต่งานวิจัยอื่นๆ ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้

4. องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันเริ่มต้นสูง มีการดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์มาก ปริมาณโปรตีน เช่น โปรตีนจากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์โดนัท สามารถลดปริมาณน้ำมันได้ แต่จะมีจุดวิกฤติอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าเดิมมากกว่าค่านี้ มีผลทำให้การดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้นได้

5. การเตรียมตัวอย่างก่อนการทอด การลวก หรือการลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นของอาหารก่อนการทอด ทำให้ปริมาณน้ำมันลดลง การล้างด้วย oil containing emulsifier ตามด้วยการใช้น้ำ ทำซ้ำๆ กันหลายๆ ครั้ง ช่วยลดการดูดซับของน้ำมันได้ การแช่แข็ง ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำมันน้อยลง การทำแห้งแบบเยือกแข็งทำให้การดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้น

2.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารทอด [3]

ในระหว่างการทอด มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในอาหารดังนี้

2.4.1 เกิดการระเหยของน้ำในอาหาร

2.4.2 ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น จนถึงระดับที่ต้องการ และมีการฟอर्मตัวของเม็ดแป้งเกิด gelatinization ภายในชิ้นอาหาร จนกระทั่งอาหารสุกและมีความกรอบ

2.4.3 การที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาล

2.4.4 มีการดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์

2.4.5 เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอาหารขณะกำลังทอด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการลอยหรือจมของชิ้นอาหารในการทอด

Guillaumin, [17] อธิบายลักษณะโครงสร้างของอาหารทอดโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ส่วน (รูปที่ 2.6) คือ

1. surface เป็นส่วนที่มีความกรอบ มีสีเหลืองทอง เนื่องจากการสูญเสียไอน้ำระหว่างการทอด เมื่ออุณหภูมิของอาหารเท่ากับจุดเดือดของของเหลวที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) ความเข้มของสีจะมากหรือน้อยขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการทอดและองค์ประกอบที่ผิว ในส่วนนี้มีปริมาณความชื้นประมาณ 3%
2. crust ระหว่างการทอดมีการระเหยของน้ำกลายเป็นไอ ทำให้เกิดการฟอรั่มตัวของ crust เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดสูงกว่า 155°C crust ประกอบด้วยช่องว่างและรูพรุนต่างๆ เป็นจำนวนมาก และมีน้ำมันเข้าไปอยู่ในช่องว่างเหล่านี้แทนที่น้ำที่ระเหยออกไป อาหารทอดแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัวและมีปริมาณน้ำมันระดับหนึ่ง ขึ้นกับสัดส่วนของ crust/core เช่น potato chips 40% potato sticks 35% French fried 8-10% fried shrimps 12-15% และ doughnuts 20-25%
3. core เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลาง มีความชื้นสูงและอาหารสุก เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันเข้าไปภายใน ในการทอดแบบน้ำมันท่วม มีส่วน core ปรากฏอยู่ตลอดเวลาการทอด ยกเว้นอาหารที่เป็นแผ่นบางๆ เช่น potato chips จะมีเฉพาะส่วน crust

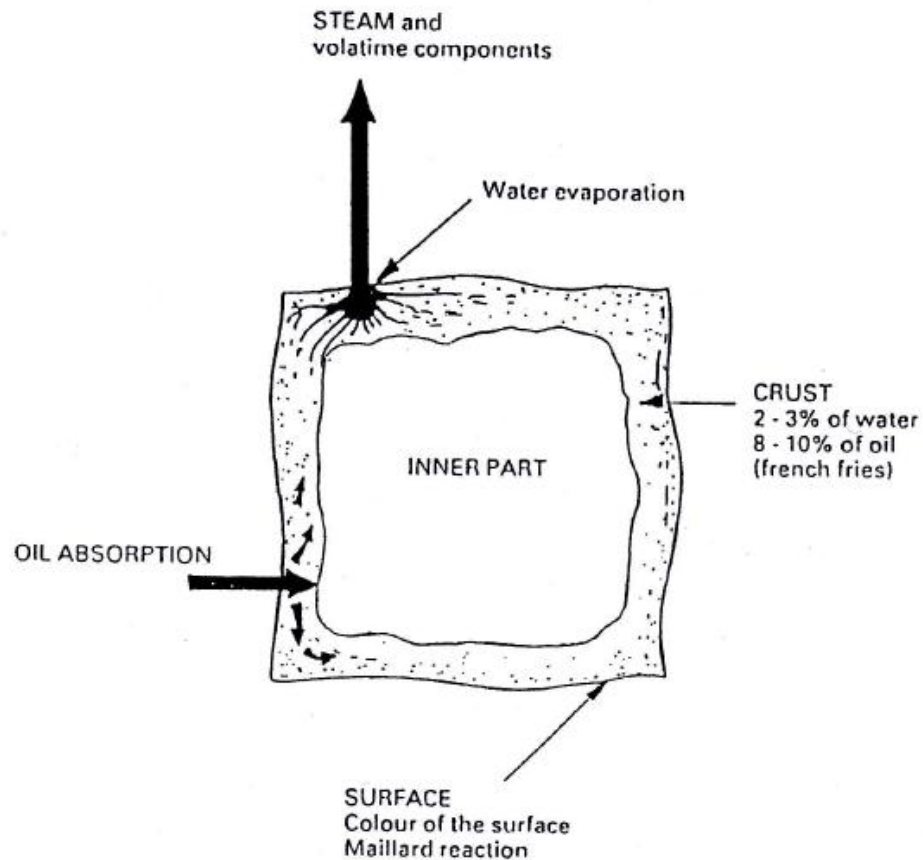
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารในกระบวนการทอด (Varela, [18])

การทอดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมาก มีตัวแปรมากมายที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารทอด โดยแบ่งพิจารณาเป็น 3 ส่วนดังนี้

2.5.1 สถานะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันและเวลาที่ใช้ทอด และวิธีการทอด เป็นแบบจุ่มในน้ำมันหรือการทอดแบบสัมผัส โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการทอดมีค่าประมาณ $163-193^{\circ}\text{C}$ ขึ้นกับชนิดของอาหารที่ทอด การเลือกอุณหภูมิที่ใช้สำหรับทอดอาจพิจารณาจากข้อกำหนดลักษณะและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของผู้บริโภค การทอดที่ใช้อุณหภูมิสูงจะลดเวลาการทอดให้สั้นลงและทำให้อัตราการทอดเร็วขึ้น

2.5.2 น้ำมันที่ใช้ทอด ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมัน สารปนเปื้อน และองค์ประกอบในน้ำมัน การทอดที่อุณหภูมิน้ำมันสูงจะเป็นตัวเร่งให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพเร็ว เนื่องจากเกิดกรดไขมันอิสระมากขึ้น และยังทำให้สี กลิ่น และความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนไป

2.5.3 ตัวอาหาร ได้แก่ การเตรียมอาหารก่อนการทอด สัดส่วนของน้ำในอาหารต่อปริมาตรของน้ำมัน และสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหาร ซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหาร



รูปที่ 2.6 ลักษณะทั่วไปของอาหารที่ทอดแบบจุ่มในน้ำมัน [17]

2.6 ผลกระทบของความร้อนในการทอด

ในการทอดจะมีการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปที่น้ำมัน และความร้อนจากน้ำมันถ่ายเทไปยังอาหาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารและน้ำมัน

2.6.1 ผลกระทบของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำมัน [2]

การให้ความร้อนกับน้ำมันเป็นเวลานานที่อุณหภูมิสูงๆ เวลาทอด จะทำให้ความชื้นและออกซิเจนออกจากอาหาร สาเหตุของการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันอาจเนื่องจากองค์ประกอบบางอย่าง เช่น volatile carbonyls, hydroxy acids, keto acids และ epoxy acids ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติ น้ำมันมีสีเข้ม และความหนืดเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันจะมีสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (anti-oxidant) อยู่ในน้ำมันตามธรรมชาติ เช่น โทโคฟีรอล (tocopherols)

2.6.2 ผลกระทบของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหาร [2]

จุดประสงค์หลักของการทอด คือ เพื่อพัฒนาสี กลิ่นรสของอาหาร โดยที่คุณภาพของอาหารจะถูกพัฒนาโดยพิจารณาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) และการดูดซับของ volatile compound ของน้ำมัน ปัจจัยหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของสี และกลิ่นรสในอาหารทอดคือ

2.6.2.1 ชนิดของน้ำมันที่ใช้ทอด

2.6.2.2 อายุการเก็บของน้ำมันที่ใช้ทอด

2.6.2.3 อุณหภูมิและเวลาในการทอด

2.6.2.4 ขนาดและผิวหน้าของอาหาร

2.6.2.5 วิธีปฏิบัติภายหลังการทอด

2.6.3 ผลกระทบของความร้อนที่มีต่อคาร์โบไฮเดรต (ศศิเกษม ทองยงค์ และ พรรณี เดชกำแหง, [19])

แป้ง (flour) ประกอบด้วย starch และสารอาหารอื่นๆ ในส่วนของ starch จะประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) 15 ถึง 20% และอะมิโลเพกติน (amylopectin) 80 ถึง 85% อะมิโลสเป็นสารที่ละลายน้ำได้ ประกอบด้วยกลูโคส 70 ถึง 300 หน่วย สำหรับอะมิโลเพกติน มักอยู่ในส่วนที่หุ้มเม็ดแป้ง ไม่ละลายน้ำ ปกติแป้งจะไม่ละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในผนังเซลล์ซึ่งเป็นเซลล์โลส เมื่อนำน้ำแป้งไปต้ม น้ำจะซึมเข้าไปในผนังเซลล์ ทำให้เกิดการพองตัว ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ที่เหนียวเรียกว่าเกิดเป็นเจลลิติน เมื่อเม็ดแป้งแตกตัวพบว่าส่วนที่เป็นอะมิโลสจะละลายน้ำ และดูดน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดการพองตัวได้มากขึ้น โมเลกุลจะเข้ามาใกล้ชิดกันและยึดเข้าด้วยกัน มีบางส่วนของอะมิโลสจะแตกออกมาอยู่ในน้ำ จะสังเกตเห็นเม็ดแป้งกระจายอยู่ในน้ำแป้ง ทำให้ได้สารละลายที่มีความข้นหนืดเป็นเจล การสุกในอาหารคือการเกิดเจลอย่างสมบูรณ์ (complete gelatinization) นั่นเอง อุณหภูมิที่แป้งพองตัวอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเป็นน้ำแป้งข้น เรียกว่า อุณหภูมิของการเกิดเจล (gelatinization temperature) แสดงในตารางที่ 2.1

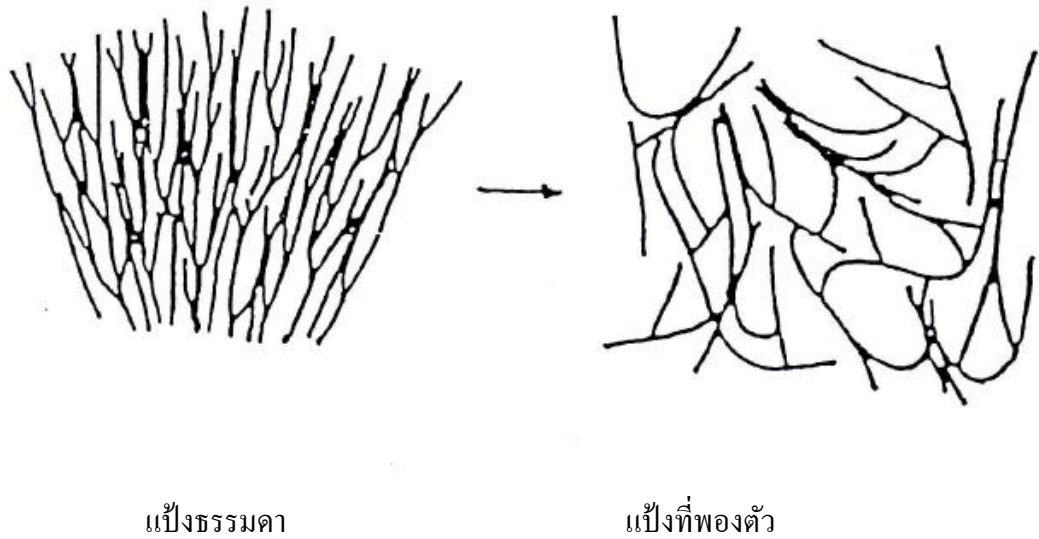
จากการศึกษาค้นคว้าของนักวิทยาศาสตร์สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการเกิดเจลได้ดังนี้คือ เมื่อมีการให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งซึ่งอยู่ในรูปของสารแขวนลอยในน้ำ ความร้อนซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่งจะไปสลายพันธะไฮโดรเจนในองค์ประกอบของกลูโคสโพลิเมอร์ในเม็ดแป้ง โดยจะเริ่มสลายพันธะไฮโดรเจนในจุดที่อ่อนที่สุด คือ ของอะมิโลเพกติน ทำให้เกิดการแทรกตัวของน้ำเข้าไปในเส้นใยของกลูโคสโพลิเมอร์ และเริ่มการจัดเรียงเส้นใยของกลูโคสโพลิเมอร์ ในรูป helices หรือ coils ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ว่างภายในเม็ดแป้ง ทำให้เกิดการดูดซึมของน้ำเข้าเม็ดแป้งได้มากขึ้น จึงทำให้เม็ดแป้งขยายตัวขึ้นจากเดิมหลายเท่า ขณะที่เกิดการพองตัว อะมิโลสจะแทรกตัวออกจากเม็ดแป้งและอะมิโลเพกตินก็ดูดซึมน้ำได้มากขึ้น สารแขวนลอยแป้งจะเริ่มใส ความหนืดของแป้ง

จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่เม็ดแป้งดูดซึมน้ำได้สูงสุดแล้ว ถ้ามีการให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ เม็ดแป้งจะเริ่มแตกและกลูโคสโพลีเมอร์ จะเริ่มกระจายตัวในน้ำ ความหนืดของสารแขวนลอยจะลดลง โดยทั่วๆ ไปแล้วแป้งได้จากพืชที่สะสมแป้งในรากและลำต้น จะค่าอยู่ในช่วงค่อนข้างแคบกว่าที่ได้จากธัญพืช และวิธีการวัดค่าอุณหภูมิของการเกิดเจลของแป้งแต่ละชนิดนั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่ให้ความแม่นยำสูงวิธีหนึ่งคือ การใช้ polarized light กับกล้องจุลทรรศน์ ประกอบกับ Kofler hot stage (อรอนงค์ นัยวิกุล, [21]) การพองตัวของเม็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลดังรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.1 ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลของแป้งชนิดต่างๆ

ชนิดของแป้ง	อุณหภูมิ (°C)		
	เริ่มต้น	จุดกึ่งกลาง	สุดท้าย
ข้าวโพด	62	66	70
ข้าวบาร์เลย์	51.5	57	59.5
ข้าวเจ้า	68	74.5	78
ข้าวไรย์	57	61	70
ข้าวสาลี	59.5	62.5	64
ถั่ว	57	65	70
มันสำปะหลัง	52	59	64
มันฝรั่ง	58	62	66

ดัดแปลงจาก Fennema [20]



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในแป้งก่อนและหลังการพองตัว [21]

2.7 ภาพโดยรวมของระบบการทอด

ในกระบวนการทอดมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เกิดขึ้นกับอาหารมากมาย เมื่อจุ่มชิ้นอาหารลงในน้ำมันร้อนทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดการระเหยของน้ำในอาหาร มีการฟอร์มตัวของ crust และมีการรวมตัวของเม็ดแป้งกับน้ำเกิด starch gelatinization ขึ้นภายในอาหารจนกระทั่งอาหารสุก ขณะเดียวกันก็มีการดูดซับน้ำมันเข้าไปสะสมอยู่ในส่วนของ crust การเปลี่ยนแปลงต่างๆ เหล่านี้เป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน และขึ้นอยู่กับปัจจัยการผลิตต่างๆ คือสภาวะการผลิต ได้แก่ วิธีการทอด อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่ใช้ทอด น้ำมันที่ใช้ทอด ได้แก่ ชนิดและคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันที่ใช้ และตัวอาหารเอง ได้แก่ ชนิดของอาหาร ความหนาแน่น ขนาดและรูปร่างของอาหาร

อาหารทอดมีลักษณะโดยทั่วไป คือ มีผิวหน้าที่มีความกรอบและมีสีเหลืองทอง มี crust เกิดขึ้นหลังจากที่น้ำระเหยออกไปและมีส่วน core ที่อยู่ตรงกลางและมีความชื้นสูง ส่วนของ crust และ core มีคุณสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพที่แตกต่างกัน ถูกคั่นด้วย interface ซึ่งเป็น zone ที่มีการระเหยของน้ำและมีอุณหภูมิคงที่ที่จุดเดือดของน้ำ

การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการทอดถูกควบคุมโดยการนำความร้อนภายในอาหาร เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวหน้าของอาหารเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงถึง 100°C อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเป็นช่วง falling rate period ซึ่งเป็นช่วงที่ยาวนานที่สุด ในช่วงนี้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มีค่าสูงจะมีความสำคัญน้อยกว่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในอาหาร ส่วนการถ่ายเทมวลมี 2 ลักษณะ คือการถ่ายเทของมวลขึ้นในรูปของการแพร่ที่มีความแตกต่างของความชื้นภายในอาหาร เป็นแรงขับเคลื่อนพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการคือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในอาหาร และการดูดซับน้ำมัน อาจเป็นผลจากการเข้าไปแทนที่น้ำในส่วนที่ระเหยออกไป หรือสัมพันธ์กับการเกิด crust formation

ความรู้ทางทฤษฎีดังที่กล่าวมาข้างต้น จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์การถ่ายเทและการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการทอด สำหรับงานวิจัยนี้

บทที่ 3

วารสารปริทัศน์

ระบบการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ จะประกอบด้วยหน่วยย่อยที่สำคัญ คือ ตัวเครื่องทอด (frying chamber) แหล่งให้ความร้อน (thermal system) หน่วยควบแน่น (condensing unit) และปั๊มดูดอากาศ (vacuum pump) เนื่องจากข้อดีของการทอดภายใต้ความดันต่ำมีอยู่หลายประการ จึงได้มีการผู้ทดลองทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทอดและผลของสภาวะที่ใช้ในการทอดต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เมื่อทอดภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศไว้พอสมควร ส่วนกลไกการถ่ายเทมวลและความร้อนในระบบการทอดนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาที่ความดันปกติเท่านั้น ผู้วิจัยได้รวบรวมงานวิจัยเหล่านี้ไว้เป็นแนวทางในการศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทมวลและความร้อนในระบบการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศต่อไป สามารถแบ่งกลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้ดังนี้

3.1 การศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทอดและสภาวะที่ใช้ในการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

Dorsey, Robert และ Strashun [22] สร้างเครื่องทอดความดันต่ำกว่าบรรยากาศ และศึกษาสภาวะที่ใช้ในการทอดแอปเปิ้ลสไลด์ ได้เสนอไว้ว่า ก่อนการทอดควรมีความดันเริ่มต้นประมาณ 25 – 100 มม.ปรอท โดยที่สภาวะความดันต่ำนี้ จะช่วยลดจุดเดือดของน้ำในอาหาร ในการทอดจะใช้น้ำมันที่อุณหภูมิประมาณ 38 – 94 องศาเซลเซียส ทำให้ได้เนื้ออาหารที่ดี และสีไม่เข้ม ภายหลังจากทอดให้ลดความดันลงเหลือ 1 มม.ปรอท เพื่อลดปริมาณน้ำมันที่ค้างอยู่ในอาหาร เมื่อทำการทอดแอปเปิ้ลสไลด์หนา 3/8 นิ้ว ที่มีความชื้นเริ่มต้น 85% ในน้ำมันมะพร้าวซึ่งมีอุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 25 มม.ปรอท เป็นเวลา 10 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเพียง 0.5% โดยน้ำหนัก สภาวะที่ใช้ทอดดังกล่าวนี้ไม่สามารถนำมาใช้กับเครื่องทอดสุญญากาศขนาดเล็กที่ออกแบบและสร้างโดย วิจิตร ทรัพย์บุญมาตย์ [1] ได้ พบว่าการทอดฟักทองที่ความดันต่ำ 150 มม.ปรอท และอุณหภูมิ น้ำมันต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ทำให้ผลิตภัณฑ์สุกช้าและมีปริมาณน้ำมันอยู่สูงมาก เนื่องจากการทอดที่ความดันต่ำ จะไปเร่งให้น้ำในอาหารระเหยได้ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิที่จะทำให้แป้งภายในอาหารเกิด gelatinization เมื่อมีการรวมตัวของน้ำกับเม็ดแป้งและได้รับความร้อนในช่วง 60 – 70 องศาเซลเซียส ถ้าหากใช้อุณหภูมิน้ำมันต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส จะมีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันไปยังชิ้นอาหารได้น้อย จึงมีการเปลี่ยนแปลงภายในชิ้นอาหารและมีการพองตัวของเม็ดแป้งผ่านจุด complete gelatinization อย่างช้าๆ ต้องใช้ระยะเวลาในการทอดนานมาก

เพื่อให้อาหารสุกและผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็มีปริมาณน้ำมันมากด้วย แต่จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า การลดความดันให้ต่ำภายหลังการทอดจะช่วยลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ได้

Forkner [23] ทำการสร้างเครื่องทอดความดันต่ำแบบ Semicontinuous และทดลองทอดผลบดเบอร์รี่แช่เยือกแข็งในน้ำมันฝ้าย อุณหภูมิที่ใช้ทอดแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก ทอดที่อุณหภูมิประมาณ 182 องศาเซลเซียส ความดัน 700 มม.ปรอท เป็นเวลา 5 นาที เป็นการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารแช่เยือกแข็งให้มีอุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส ช่วงที่สอง เป็นช่วงที่ทำให้เกิดการสุกภายในอาหาร โดยทอดที่อุณหภูมิ 90.5 องศาเซลเซียส ความดัน 700 มม.ปรอท เป็นเวลา 10 นาที ในขณะที่ทอดมีตะแกรงกดผลบดเบอร์รี่ให้จมอยู่ใต้น้ำมันตลอดเวลา จากนั้น ทำการเหวี่ยงน้ำมันออกจากเนื้ออาหารที่ความดัน 700 มม.ปรอท เป็นเวลา 3 นาที การทอดในครั้งนี้ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีกลิ่นรสที่ดี และผิวหน้าแห้ง เครื่องทอดนี้สามารถใช้ได้กับอาหารหลายชนิด ทั้งผลไม้แช่แข็ง ผลไม้สด ผัก ธัญพืช เนื้อสัตว์ และอาหารทะเล ถ้าเป็นอาหารที่มีขนาดใหญ่ ควรมีการตัดแต่ง หั่น หรือสไลด์เป็นชิ้นหนาไม่เกิน 5/8 นิ้ว และน้ำหนักแต่ละชิ้นไม่เกิน 10 กรัม จึงจะใช้กับเครื่องมือนี้ได้ดี จากงานวิจัยนี้จึงได้มีการออกแบบตะกร้าที่มีฝาปิดสำหรับใส่ตัวอย่างอาหารไว้ใช้กับเครื่องทอดสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย และกดให้อาหารจมอยู่ใต้น้ำมันตลอดเวลาเพื่อให้ชิ้นอาหารได้รับความร้อนในทุกๆ ด้านอย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีและลักษณะปรากฏของอาหารที่สม่ำเสมอ ภายหลังการทอดก็ได้ทำการเหวี่ยงน้ำมันออกจากเนื้ออาหารที่ความดันต่ำเป็นเวลา 3 นาที ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำมันต่ำลงด้วย

Oka and Ueoka [24] ทดลองทอดตัวอย่างอาหารหลายชนิด คือ เส้นก๋วยเตี๋ยว ไส้กรอก ปลา แอปเปิ้ล สตรอเบอร์รี่ และผักชนิดต่างๆ เช่น แครอท พริกหยวก ถั่วลันเตา แตงกวา มะเขือยาว มันฝรั่ง ฟักทอง ฯลฯ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ คือ ที่ความดัน 700 มม.ปรอท เปรียบเทียบกับการทอดที่ความดันบรรยากาศคือ 760 มม.ปรอท ได้ข้อสรุปจากการทดลองคือ การทอดที่ความดันปกติ จะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 135 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบ แต่มีสีเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่การทอดภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ โดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรสชาติ และกลิ่นรสที่ดี แต่หากทอดเป็นเวลานาน ก็อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดสีน้ำตาลและมีสีเปลี่ยนไปได้ เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ (น้ำหนักหลังทอด/น้ำหนักก่อนทอด $\times$ 100%) จะมีความแตกต่างกันตามชนิดของอาหาร เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทอดที่ความดันปกติและการทอดภายใต้ความดันต่ำ พบว่า การทอดที่ความดันปกติมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้สูงกว่าการทอดภายใต้ความดันต่ำ และมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำมันในผลิตภัณฑ์หลังการทอดมากกว่าการทอดภายใต้ความดันต่ำด้วย จากงานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปว่าการทอดที่ความดันต่ำมีข้อดีคือสามารถใช้อุณหภูมิของน้ำมันต่ำและระยะเวลาสั้นในการทอด ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าและมีการดูดซับน้ำมันน้อยกว่าการทอดที่ความดันปกติ

งานวิจัยจาก UK. Patent Application [25] มีการสร้างเครื่องทอดขนาดเล็กชนิด batch-type โดยใช้ท่อไอน้ำ (steam pipe) เป็นแหล่งให้ความร้อนกับน้ำมัน และได้เสนอความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทอดอาหารชนิดต่างๆ รวมทั้งข้อแนะนำในการใช้งานไว้ดังนี้ คือ

1. ควรใช้น้ำมันเป็นปริมาณมาก และปริมาณของอาหารจำนวนน้อยๆ ในการทอด เพื่อป้องกันการลดลงของอุณหภูมิน้ำมัน
2. ควรมีการหมุนตะกร้าในระหว่างการทอด เพื่อให้เวลาในการทอดลดลง และผลิตภัณฑ์มีสีสม่ำเสมอ
3. การทอดอาหารที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ประมาณ 20 – 100 มม.ปรอท และอุณหภูมิประมาณ 80 – 130 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการทอดที่ความดันปกติ
4. การลดความชื้นของอาหารก่อนนำไปทอด ทำได้โดยนำอาหารแช่น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นประมาณ 10–60% เป็นเวลา 0.5–24 ชั่วโมง วิธีนี้เรียกว่า การลดความชื้นด้วยแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ช่วยให้อาหารเกิดการสุกอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความชื้นในอาหารลดลง ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรสชาติและเนื้อสัมผัสดี

การศึกษาครั้งนี้สรุปสถานะที่เหมาะสมต่อการทอดเป็นช่วงกว้าง และไม่ได้บอกเวลาที่เหมาะสมในการทอดจริงๆ ของอาหารแต่ละชนิด ให้รายละเอียดเกี่ยวกับคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดน้อยมากและไม่ได้กล่าวถึงเกณฑ์การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่างๆ

วิจิตร ทรัพย์บุญมาตย์ [1] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องทอดสุญญากาศขนาดเล็กชนิด batch-type vacuum fryer และศึกษาทดลองเครื่องทอดสุญญากาศกับตัวอย่างอาหารคือ ฟักทองสไลด์ที่มีความหนา 1 มม. เพื่อทดสอบปัจจัยหลักที่สำคัญ 3 ปัจจัย ที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ คือ ความดันที่ใช้ทอด อุณหภูมิน้ำมันขณะทอดและเวลาที่ใช้ทอด นำผลิตภัณฑ์หลังการทอดมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการวัดค่าแรงเหนียวขณะเกิดการแตกหักของผลิตภัณฑ์ สีของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองจะพบว่าปัจจัยความดันนั้นไม่มีผลโดยตรงต่อการเกิด gelatinization เนื่องจากเม็ดแป้งเกิด gelatinization ได้ต้องรวมตัวกับน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 60–70 องศาเซลเซียส แต่ก็พบว่าในการทอดที่ความดันต่ำนั้นมักได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าแรงเหนียวแตกหักต่ำกว่าการทอดที่ความดันปกติเล็กน้อย เมื่อทอดที่อุณหภูมิต่ำทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงเหนียวขณะเกิดการแตกหักได้ชัดเจนกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง

สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดที่เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำมันสูง จะมีการเปลี่ยนแปลงสีเร็วกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความดันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ การดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์จากการทอดที่อุณหภูมิสูงซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีค่าต่ำ สำหรับการทอดที่ความดันต่ำกว่าปกตินั้นทำให้ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์น้อยกว่าการทอดที่ความดันปกติเล็กน้อยเนื่องมาจากการลดความดันหลังการทอด โดยการเหวี่ยงผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะความดันต่ำกว่าปกติ

ประมาณ 3 นาที จึงทำให้ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ลดน้อยลงกว่าการทอดที่ความดันปกติ ส่วนปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดภายใต้ความดันต่ำน้อยกว่าการทอดที่ความดันปกติ เนื่องจากการลดความดันทำให้น้ำในอาหารระเหยได้เร็วขึ้น และการทอดที่อุณหภูมิต่ำทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง

จากงานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปที่สำคัญคือปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์คือ อุณหภูมิของน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดที่อุณหภูมิสูงจะมีสีเข้มกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนปัจจัยความดันในขณะทอด มีผลต่อการสุกของชิ้นอาหาร เมื่อทอดที่ความดันต่ำจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์สุกเร็วขึ้น เนื่องจากเม็ดแป้งมีการพองตัวผ่านจุด complete gelatinization ได้รวดเร็วกว่าการทอดที่ความดันปกติ ปริมาณความชื้นและน้ำมันในผลิตภัณฑ์น้อยลง แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีในผลิตภัณฑ์ และการทอดฟักทองสไลด์ที่ความดัน 150 มม.ปรอท อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 นาที ให้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับได้มากที่สุด

การศึกษาของ Vasanti, Seow และ Suleble [26] เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลของเวลาการทอด อุณหภูมิของน้ำมัน และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่อการสูญเสียของปริมาณความชื้น การดูดซับน้ำมัน และการขยายตัวของแผ่น topioca ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ในระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วม การสูญเสียความชื้นส่งผลต่อการดูดซับน้ำมันและการขยายตัวของแผ่น topioca แตกต่างกัน การดูดซับน้ำมันเป็นกระบวนการแทนที่น้ำส่วนที่สูญเสียไป ส่วนการขยายตัวเป็นผลเนื่องมาจากการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทอด คุณภาพที่ศึกษาคือ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน และการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นพบว่าผลของอุณหภูมิ น้ำมัน ปริมาณความชื้นเริ่มต้นและเวลาการทอดที่มีต่อการสูญเสียความชื้นระหว่างการทอด ให้ผลที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.001$ ทั้งจากปัจจัยหลัก และปฏิสัมพันธ์ร่วม ที่อุณหภูมิของน้ำมันต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส เริ่มมีการระเหยของน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นอย่างชัดเจนในช่วง 40 วินาที หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูง มีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นมาก และเมื่ออุณหภูมิ น้ำมัน เพิ่มขึ้นการสูญเสียความชื้นจะเกิดเร็วขึ้น จึงตั้งสมมุติฐานว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ น้ำมัน

ในการศึกษาผลของเวลาการทอด อุณหภูมิ น้ำมัน และปริมาณความชื้นเริ่มต้น และปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยหลัก ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ พบว่าให้ผลที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.001 และเมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันและปริมาณความชื้นมี correlation สูงมาก ($r = 0.935$) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของน้ำมันเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการแทนที่น้ำ จากการทดลองสามารถเลือกสภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น 15% อุณหภูมิ น้ำมัน เท่ากับ 200 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ 40 วินาที โดย

พิจารณาที่การขยายตัวเชิงเส้นของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบ มีการพองตัวดี และมีสีเป็นที่ยอมรับ

งานวิจัยนี้ได้ชี้แนะว่าสภาวะดังกล่าวข้างต้นให้ผลดีกับบางชุดทดลองเท่านั้น เมื่อนำไปใช้กับ treatment อื่นๆ ที่มีส่วนผสม และองค์ประกอบที่แตกต่างกันไป เนื่องจากมี error จากธรรมชาติของวัตถุดิบแต่ละชนิด และกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียความชื้นและการดูดซับน้ำมันว่าการดูดซับน้ำมันเป็นผลมาจากกระบวนการแทนที่น้ำ

3.2 การศึกษาเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลในระบบการทอด

มีผู้เสนอกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในระบบการทอดไว้หลายท่าน งานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดนี้เป็นการศึกษาที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งผู้วิจัยได้รวบรวมผลของงานต่างๆ ไว้ดังต่อไปนี้

งานวิจัยของ Mittelman, Mizrahi และ Berk [27] เป็นการศึกษากลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการทอดและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการนี้ โดยใช้ rigid urea-formaldehyde foam เป็นตัวแทนของวัสดุที่ไม่เกิด crust ซึ่งมีบทบาทต่อการแพร่ผ่านของน้ำ และใช้แผ่นมันฝรั่งเป็นตัวแทนของวัสดุที่เกิด crust และหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ฟิล์มโดยใช้ทองแดงทรงกลม เสียบ thermocouple ที่ตรงกลางของทรงกลม ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมันจากสมการการถ่ายเทความร้อนของทรงกลมที่สภาวะไม่คงที่ ได้ค่าเท่ากับ $1800 \text{ w/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ 135-137 องศาเซลเซียส

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทมวลของการทอดตัวอย่าง rigid foam ซึ่งอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 100 องศาเซลเซียส และคงที่ที่ 100 องศาเซลเซียส ตั้งสมมุติฐานว่ามีการระเหยของน้ำเฉพาะที่ผิวหน้าของวัสดุ จากการส่งผ่านความร้อนจากน้ำมันมายังวัสดุและวัสดุมีสัดส่วนเชิงมวลต่ำ เป็นไปตามสมการ

$$m^2 = 2 \frac{kA^2\rho}{\lambda} (T_j - T_w)(t - t_0) \quad (3.1)$$

m	=	ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)
A	=	พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)
k	=	ค่าการนำความร้อนของ dry layer ($\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$)
ρ	=	ความหนาแน่นของวัสดุที่เปียกน้ำ (kg/m^3)
λ	=	ความร้อนแฝงของการระเหย (kJ/kg)

T_ϕ	=	อุณหภูมิของน้ำมัน ($^{\circ}\text{C}$)
T_w	=	อุณหภูมิที่จุดเดือดของน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)
t	=	เวลาในการทอด (s)
t_0	=	เวลาที่เริ่มมีการระเหยของน้ำ (s)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวลในการทอดตัวอย่างแผ่นมันฝรั่ง (potato strips) ขนาด $1 \times 1 \times 7 \text{ cm}^3$ ที่มีการฟอร์มตัวของ crust หลังจากมีการระเหยของน้ำ ความหนาของ crust จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้อัตราการระเหยน้ำลดลง ดังนั้นภายใต้ crust จึงมีความดันเพิ่มขึ้นและทำให้ส่วนของ crust พองตัวเป็นกระเปาะ จนกระทั่งระเบิดออกในที่สุด หลังจากนั้นอัตราการระเหยของน้ำจะคงที่ ในช่วงนี้ตั้งสมมุติฐานว่ามีความหนาของ crust คงที่ อุณหภูมิภายในอาหารคงที่เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส และอัตราการระเหยของน้ำขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่าน crust จากสมมุติฐานเหล่านี้เขียนในรูปสมการได้เป็นสมการที่ 3.2 ซึ่งใช้ทำนายเฉพาะในช่วงหลังที่มีความหนาของ crust คงที่เท่านั้น เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงไปในสมการ สามารถคำนวณความหนาของ crust ได้เท่ากับ 0.6 mm เปรียบเทียบกับที่วัดได้ electron microscopy ความหนาของ crust เท่ากับ 0.3 mm

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{x_c}{k_c}} \frac{A}{\lambda} (T_j - T_w) \quad (3.2)$$

เมื่อ	x_c	=	ความหนาของ crust(m)
	k_c	=	ค่าการนำความร้อนของ crust($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกแบบหนึ่งของการถ่ายเทมวลในการทอดมันฝรั่งที่ครอบคลุมทั้งช่วงของการแห้งคงที่และช่วงการแห้งลดลง โดยตั้งสมมุติฐานว่าอัตราการระเหยน้ำของทั้ง 2 ช่วงนี้ขึ้นกับการแพร่ของความชื้นภายในของมันฝรั่งเท่านั้น อัตราการระเหยของน้ำโดยประมาณสามารถอธิบายได้ตามสมการ

$$\frac{dm}{dt} = \frac{K m_\infty D^{1/2}}{at} \quad (3.3)$$

เมื่ออินทิเกรตที่ $t = t_0$ ถึง $t = t$ และยกกำลัง 2 ทั้งหมด ได้เป็น

$$m^2 = \frac{K' m_\infty^2 D(t - t_0)}{a^2} \quad (3.4)$$

เมื่อ	K'	=	ค่าคงที่ (dimensionless)
	m_∞	=	ปริมาณน้ำที่ระเหยที่เวลา infinity
	D	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (m^2/s)
	a	=	ครึ่งหนึ่งของความหนาของ slab (m)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวลในตัวอย่างวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น และปริมาณของแข็ง เป็นผลทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพต่างกัน วัสดุที่เป็น foam มีสัดส่วนเชิงมวลต่ำ เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันมายังวัสดุ จะมีการระเหยของน้ำจากผิวหน้าและพลังงานความร้อนที่ได้จากน้ำมันใช้ในการระเหยน้ำเท่านั้น ไม่มี crust เกิดขึ้นหลังจากที่ระเหยออกไป ส่วนตัวอย่างมันฝรั่งมีความหนาแน่นสูงและสัดส่วนเชิงมวลสูง เมื่อมีการระเหยของน้ำออกไป จะมี crust เกิดขึ้น อัตราการระเหยของน้ำจึงขึ้นกับความต้องการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกและความต้านทานการนำความร้อนในส่วน crust ด้วย ทำให้มีการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่ภายในลดลง

จากการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอดที่มีต่ออัตราการระเหยของน้ำ พบว่ามีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$n = C \exp(0.0113T_\phi) \quad (3.5)$$

เมื่อ	n	=	$K' m_\infty^2 D/a^2$
	C	=	ค่าคงที่จากการทดลอง = 0.1635
	T_ϕ	=	อุณหภูมิของน้ำมัน ($^{\circ}C$)

เมื่อรวมสมการเข้าด้วยกัน ได้เป็น

$$m^2 = C \exp(0.0113T_\phi)(t - t_0) \quad (3.6)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นตัวแทนของวัสดุทั้ง 2 ชุดนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการแพร่ของความชื้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของเวลาที่ใช้ทอดและผู้วิจัยได้ให้ความคิดเห็นว่าแบบจำลองนี้ใช้งานได้ดีในระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยไม่สามารถควบคุมได้ และแบบจำลองนี้ไม่ได้พิจารณาในเรื่องการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆ ด้วย

Gamble และคณะ [11] นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Mittelman และคณะ [27] พัฒนาขึ้นไปใช้ในการศึกษาอัตราการแห้งของมันฝรั่งระหว่างการทอด และอัตราการดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน นั่นคือปริมาณความชื้นที่สูญเสียและปริมาณน้ำมันที่ดูดซับเข้าไปในระหว่างการทอดมันฝรั่งสไลด์ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเชิงเส้นตรงกับรากที่สองของเวลาที่ใช้ทอด เป็นไปตามสมการข้างล่างนี้

$$X = 100 - 5.34t^{1/2} \quad (3.7)$$

$$Y = -9.30 - 2.53t^{1/2} \quad (3.8)$$

เมื่อ X = ปริมาณความชื้น(%)
 Y = ปริมาณน้ำมัน (%)
 T = เวลา (s)

อีกทั้งยังศึกษาถึงความสัมพันธ์ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$Y = 37.8 - 0.438X \quad (3.9)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Gamble และคณะ [11] นี้เป็นสมการ empirical มีข้อจำกัดในการใช้งานคือนำไปใช้กับตัวอย่างอาหารเฉพาะอย่าง ในช่วงอุณหภูมิจำกัด 145-175 องศาเซลเซียส และที่ระดับความหนาหนึ่งๆเท่านั้น ถ้าหากมีการเปลี่ยนตัวอย่างอาหารที่มีคุณสมบัติแตกต่างออกไป หรือมีสภาวะการทดลองนอกเหนือจากนี้ก็ไม่สามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้ประโยชน์ได้

ดังนั้นงานวิจัยของ Rice และ Gamble [28] จึงใช้สมการการแพร่ของ Fick ซึ่งเป็นการพิจารณาอัตราการสูญเสียไอน้ำโดยอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎี เพื่อศึกษาถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างการทอดมันฝรั่งสไลด์โดยนำข้อมูลผลการทดลองของ Gamble และคณะ [11] มาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นและพลังงานกระตุ้นของกระบวนการนี้ จากสมการการแพร่ของ Fick พิจารณาตัวอย่างที่เป็น slab และมีการแพร่เกิดขึ้นในทิศทางเดียว

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3.10)$$

ในการทดลองมันฝรั่งสไลด์มีความหนา $2a$ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ c_0 ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ เท่ากับ w และปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าของอาหาร c_1 เท่ากับ 0 เมื่อคิดว่า ความต้านทานการถ่ายเทที่ผิวมีค่าน้อยมากๆ ไอน้ำระเหยออกจากผิวหน้าของอาหารแพร่ผ่านน้ำมันออกสู่ภายนอกอย่างรวดเร็ว แก๊สการของ Fick โดยใช้วิธีการแยกตัวแปร ขยายรูปสมการ และทำให้ง่ายขึ้นตัดเทอมอื่นๆทิ้งเหลือเฉพาะตอนแรกของสมการ

$$\frac{w - c_1}{c_0 - c_1} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{a^2}\right) + \frac{1}{9} \exp\left(-\frac{9\pi^2}{4} \frac{Dt}{a^2}\right) + \dots \right\} \quad (3.11)$$

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือมันฝรั่งสไลด์ที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองคำนวณหา D ที่เวลาต่างๆ (ตารางที่ 3.1) จะเห็นว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งที่มีการระเหยของน้ำคงที่ แต่เมื่อเวลาผ่านไปแนวโน้มของการสูญเสียไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไป ค่า D จึงแตกต่างจากเดิมอย่างชัดเจน และได้ตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ว่ามีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำมันเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ของ Arrhenius (สมการที่ 3.12)

$$D = D_0 \exp(-E_a/RT) \quad (3.12)$$

เมื่อ	D_0	=	ค่าคงที่
	E_a	=	พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol K)
	T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่คำนวณได้ระหว่างการทอดมันฝรั่งสไลด์

Time (sec)	D 145 ⁰ C (m ² s ⁻¹ × 10 ¹⁰)	D 165 ⁰ C (m ² s ⁻¹ × 10 ¹⁰)	D 185 ⁰ C (m ² s ⁻¹ × 10 ¹⁰)
30	14	155	150
60	24	82	126
90	45	89	120
120	43	83	122
150	53	91	121
180	59	83	109
210	58	99	103
240	55	87	118
270	66	96	141
300	80	110	135

จากการศึกษาของ Rice และ Gamble [28] พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในช่วงอุณหภูมิ 145-185 องศาเซลเซียส มีค่าระหว่าง $5.8 \times 10^{-9} - 10.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ และมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ $24.2 \pm 4.0 \text{ kJ/mol}$ ในงานวิจัยนี้ได้เสนอไว้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นไปตามสมการของ Arrhenius ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการใช้อุณหภูมิของน้ำมันไม่สามารถบ่งบอกถึงสมการของ Arrhenius นี้ได้อย่างชัดเจน ถ้าหากอุณหภูมิของอาหารไม่เท่ากับอุณหภูมิของน้ำมัน แต่ในกรณีนี้เนื่องจากชิ้นอาหารมีขนาดบางและมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำมันอย่างรวดเร็วจึงมีความสัมพันธ์เป็นไปตามนั้นได้ และงานชิ้นนี้ก็ไม่ได้สนใจศึกษาเกี่ยวกับกลไกการดูดซับน้ำมันอีกเช่นกัน

Moreira, Palau และ Sun [29] ทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกที่เกิดขึ้นในการทอด tortilla chips แบบจุ่มในน้ำมัน เพื่อลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์และปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอด เมื่อให้ chip มีรูปร่างเป็น infinite slab มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในมิติเดียว โดยมีสมมุติฐานดังนี้

1. มีอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นสม่ำเสมอ
2. ไม่มีการหดตัวของผลิตภัณฑ์
3. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนและความชื้นคงที่
4. น้ำมันเริ่มเข้าสู่อาหารในช่วงของการลดอุณหภูมิ

สมการของการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวล เป็นดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \right) \quad (3.14)$$

$$\text{I.C. :} \quad T(x,0) = T_0 \quad , \quad M(x,0) = M_0 \quad (3.15)$$

$$\text{B.C. :} \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad , \quad \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3.16)$$

$$D \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=L} = h_D (M_s - M_{eq}) \quad (3.17)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h(T_s - T_\phi) - \lambda D \rho \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=L} \quad (3.18)$$

เมื่อ	T	=	temperature ($^{\circ}\text{C}$)
	T_ϕ	=	temperature of oil ($^{\circ}\text{C}$)
	T_0	=	initial temperature ($^{\circ}\text{C}$)
	t	=	time (s)
	M	=	moisture content (%db)
	M_0	=	initial moisture content (%db)
	M_{eq}	=	equilibrium moisture content (%db)
	M_s	=	surface moisture content (%db)
	x	=	variable distance across thickness of tortilla chips (m)
	α	=	thermal diffusivity (m^2/s)
	ρ	=	density (kg/m^3)
	D	=	mass diffusivity (m^2/s)
	h	=	convective heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)
	h_D	=	convective mass transfer coefficient (m/s)
	λ	=	latent heat of vaporization (kJ/kg)

k = thermal conductivity (W/m °C)

L = half-thickness of slab (m)

ส่วนปริมาณน้ำมันโดยเฉลี่ยใน tortilla chips หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันกับเวลาการทอด ในรูปของสมการ first-order exponential

$$\overline{M_f}(t) = M_{fe}[1 - \exp(-k't)] \quad (3.19)$$

เมื่อ k' = constant (1/s)

M_f = oil content (%)

M_{fe} = final oil content (%)

t = time (s)

ในการทดลองเพื่อทดสอบแบบจำลองใช้ตัวอย่าง tortilla chips ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส พบว่ามีการสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 วินาทีแรก และจากนั้นจะค่อนข้างคงที่ เข้าสู่สมดุลที่เวลา 20 – 30 วินาที การดูดซับน้ำมันส่วนใหญ่ก็เกิดขึ้นในช่วง 15 วินาทีแรก สามารถใช้สมการ first-order exponential ทำนายปริมาณน้ำมันที่เวลาต่างๆ ได้เป็นอย่างดี แต่เมื่อนำมาใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันที่ใช้ตัวอย่างเป็น slab ค่าของปริมาณน้ำมันที่ทำนายได้แตกต่างจากผลการทดลองมาก แสดงว่า สมการที่ 3.19 ใช้งานได้ในกรณีที่อาหารมีลักษณะเป็น chips ที่มีการระเหยของน้ำและการดูดซับน้ำมันอย่างรวดเร็วเท่านั้น ส่วนการถ่ายเทความร้อน โปรไฟล์ของอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายและจากการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกัน อุณหภูมิที่ใจกลางของ tortilla chips เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที

แบบจำลองนี้ใช้ในกรณีที่ตัวอย่างอาหารเป็น chips ซึ่งมีขนาดบางมาก และพิจารณาว่ามีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนและมวลจากภายนอก ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ $9.348 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ และค่าการแพร่ความร้อนเท่ากับ $3.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันใช้สมการ empirical ในการทำนาย ให้ค่า k' ในสมการ 3.19 เท่ากับ 0.223 s^{-1} ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

Pravisani และ Calvelo [30] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในชิ้นอาหารที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการทอดและคำนวณหาเวลาสั้นที่สุดที่ใช้สำหรับทอดอาหารโดยให้แน่ใจว่าที่ตรงกลางอาหารสุก โดยใช้ค่าแรงเฉือนสูงสุดเป็นพารามิเตอร์ในการวัดลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่าเวลาที่ใช้นั้นไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำมันแต่ขึ้นกับขนาดของชิ้นมันฝรั่งขนาด $1.0 \times 1.0 \times 5.0 \text{ cm}^3$ ในอ่างน้ำมันที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้และศึกษาในช่วง 154-200 องศาเซลเซียส เมื่อวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางแผ่นมันฝรั่ง แม้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันมากกว่า 200 องศาเซลเซียส แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่กึ่งกลางก็เข้าสู่ 103 องศาเซลเซียส และคงที่ที่อุณหภูมินี้ มีกระเดียนท์ของอุณหภูมิเกิดขึ้นช่วงเวลาหนึ่งแล้วจึงเข้าสู่ asymptotic point 103 องศาเซลเซียส กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสามารถอธิบายได้ว่ามี moving boundary อยู่ใกล้กับผิวของอาหาร และมีการระเหยของน้ำเกิด ตำแหน่งของ boundary และระเหยออกไปในรูปของไอน้ำ และเคลื่อนที่ผ่าน crust ออกสู่ภายนอกการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมัน ทำให้อัตราการเคลื่อนตัวของ boundary เข้าไปภายในอาหารเร็วขึ้น แต่อุณหภูมิกคงที่ที่ 103 องศาเซลเซียส และมีความหนาของ crust ประมาณ 0.5 มิลลิเมตร

จากการวิจัยนี้ ทำให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลในระบบการทอดปกติได้ชัดเจนขึ้นคือในระบบการทอดชิ้นอาหารจะมีการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า และเกิดการเคลื่อนตัวของ moving boundary ซึ่งเป็นส่วนที่มีการระเหยของน้ำและมีอุณหภูมิกคงที่ที่ 103 องศาเซลเซียส เข้าไปภายใน และพบว่าอุณหภูมิของน้ำมันมีผลต่ออัตราการเคลื่อนตัวของ moving boundary แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใจกลางอาหาร งานของ Pravisani และ Calvelo [30] ไม่ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอดนี้

Farkas, Singh และ McCarthy [31] ใช้ magnetic resonance imaging (MRI) กับอาหารทอดเพื่อศึกษากระเดียนท์ความเข้มข้นของน้ำและน้ำมัน และ interface ที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างอาหาร พบว่ามีความแตกต่างระหว่างส่วนของ crust ที่อุดมไปด้วยน้ำมัน และส่วนของ core ที่ยังมีน้ำอยู่มาก และ interface นั้นอยู่ลึกเข้าไปในอาหารประมาณ 1-2 มิลลิเมตร การศึกษาครั้งนี้ยืนยันได้ว่าการเคลื่อนไหวของตัวของ moving boundary จริงในระบบการทอด สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา

Farkas และคณะ [7] พิจารณาการเคลื่อนที่ของ crust/core interface ในลักษณะของ moving boundary problem ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ของ crust และ core มีความแตกต่างกัน ในส่วนของ crust ประกอบด้วยน้ำปริมาณน้อยมากๆ และมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของของเหลว และอธิบายสมการการถ่ายเทความร้อนและมวล ในส่วนของ crust และ core ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนในส่วน core

$$k^{\text{II}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + N_{\beta x} C_{p\beta} \frac{\partial T}{\partial x} = (\sigma_{\beta} \rho_{\beta} C_{p\beta} + \epsilon_{\sigma} \rho_{\sigma} C_{p\sigma}) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.20)$$

2. การถ่ายเทมวลในส่วน core

$$\frac{\partial C_{\beta}}{\partial t} = D_{\beta\sigma} \frac{\partial^2 C_{\beta}}{\partial x^2} \quad (3.21)$$

3. การถ่ายเทความร้อนในส่วน crust

$$(\epsilon_{\gamma} \rho_{\gamma} C_{p\gamma} + \epsilon_{\sigma} \rho_{\sigma} C_{p\sigma}) \frac{\partial T}{\partial t} = k^{\text{I}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + N_{\gamma x} C_{p\gamma} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.22)$$

4. การถ่ายเทมวลในส่วน crust

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_{\gamma} \frac{\partial P_{\gamma}}{\partial x} \right] = 0 \quad (3.23)$$

เมื่อ	N_{ix}	=	flux of species i in x-direction ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
	ϵ_i	=	volume fraction of species i (dimensionless)
	k	=	effective thermal conductivity ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
	P	=	pressure (N/m^2)
	D_{ij}	=	diffusivity of i in j species (m^2/s)

Subscripts and superscripts

I = crust

II = core

β, γ, σ = liquid water, water vapor and solid

ชุดของสมการเหล่านี้ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข(numerical method) ในการหาคำตอบและแก้สมการโดยใช้ Guass-Seidel iteration จากนั้นทำการทดลองกับตัวอย่าง rehydrated potatoes ที่มีรูปร่างเป็น semi-infinite slab หนา 2.5 cm ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 160 และ 180 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่า

1. โปรไฟล์ของอุณหภูมิในส่วน crust เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของน้ำมัน และใน crust ที่มีขนาดบางจะมีโปรไฟล์ของอุณหภูมิเป็นเส้นตรง
2. ในส่วน core โปรไฟล์ของอุณหภูมิไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำมัน และมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือดของของเหลว
3. อัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วน core ขึ้นกับค่าการนำความร้อนและความจุความร้อนของอาหาร
4. ปริมาณความชื้นสุดท้ายของอาหารทอด เป็นผลโดยตรงเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในอาหาร
5. ความหนาของ crust ขึ้นกับ ค่าการนำความร้อนของ crust อุณหภูมิของน้ำมัน ปริมาณความชื้นของอาหาร และค่าการนำความร้อนของส่วน core
6. ความหนาของ crust เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิน้ำมันสูงขึ้น

จากเอกสารอ้างอิงของ [30] และ [31] ที่ยืนยันว่ามีการเคลื่อนตัวของ moving boundary จริงในระบบการทอด จึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Frakas และคณะ [7] ที่เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งอธิบายการถ่ายเทความร้อนและมวลในระบบการทอดไว้ค่อนข้างชัดเจน โดยพิจารณาจากลักษณะของอาหารทอดโดยทั่วไปและกลไกการถ่ายเทที่เกิดขึ้น แต่ต้องใช้คุณสมบัติหลายชนิด กระบวนการหาคำตอบและการนำไปใช้งานก็มีความยุ่งยากมาก

3.3 บทสรุปจากงานวิจัยที่ผ่านมา

เมื่อประมวลความรู้จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น การศึกษาเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในกระบวนการทอดที่ความดันปกติ สามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

3.3.1 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดที่เป็นสมการ empirical โดย Gamble และคณะ [11] และสมการ semi-empirical โดย Mittelman และคณะ [27] มีข้อจำกัดในการใช้งานคือใช้ได้กับตัวอย่างอาหารและในช่วงอุณหภูมิจำกัดที่ใช้ในการทดลองและที่ระดับความหนาของตัวอย่างหนึ่งๆ เท่านั้นและในระหว่างการทอดมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเกิดขึ้นด้วย

3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Rice และ Gamble [28] ใช้สมการการแพร่ของ Fick อธิบายการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอดมันฝรั่งสไลด์

3.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบการทอดของตัวอย่างที่เป็น chip มีการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าอาหาร และมีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลจากภายนอก โดย Moreira และคณะ [29] ตัวอย่างที่ผ่านการทอดมีลักษณะเป็น pure crust น้ำมันเริ่มเข้าสู่อาหารในช่วงของการลดอุณหภูมิทำนายปริมาณน้ำมันโดยสมการ first-order exponential

3.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาระบบการทอดเป็น Stefan type problem มีการระเหยของน้ำที่ moving interface ซึ่งคั่นอยู่ระหว่าง crust region และ core region ที่มีคุณสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพแตกต่างกัน มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นในขณะเดียวกัน ได้พัฒนาขึ้นโดย Farkas และคณะ [7]

ผู้วิจัยได้สรุปงานวิจัยที่ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการทอดไว้ในตารางที่ 3.2 และพบว่างานของ Farkas และคณะ [7] ที่พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดแบบน้ำมันท่วมภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็น predictive mathematical model ที่ทำให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นได้ค่อนข้างชัดเจน ผู้วิจัยจึงได้เลือกงานของ Farkas และคณะ [7] เป็นต้นแบบในการพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนและพารามิเตอร์จำนวนมากในการแก้สมการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ และใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในกระบวนการทอดได้

ตารางที่ 3.2 สรุปงานวิจัยที่ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการทอด

ผู้วิจัย	ลักษณะสมการ	การถ่ายเทความร้อน	การถ่ายเทความชื้น	การดูดซับน้ำมัน
Mittelman และคณะ [27]	semi-empirical	-	$m \propto t^{1/2}$	-
Gamble และคณะ [11]	empirical	-	$X = 100 - 5.34t^{1/2}$	$Y = -9.30 - 2.53t^{1/2}$
Rice และ Gamble [28]	theoretical	-	Fick	-
Moreira และคณะ [29] ¹	theoretical	Fourier	Fick	first-order exponential
Farkas และคณะ [7] ²	theoretical	Fourier	Fick	-

¹ ไม่มี crust/core interface

² มี crust/core interface

บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายในกระบวนการทอด

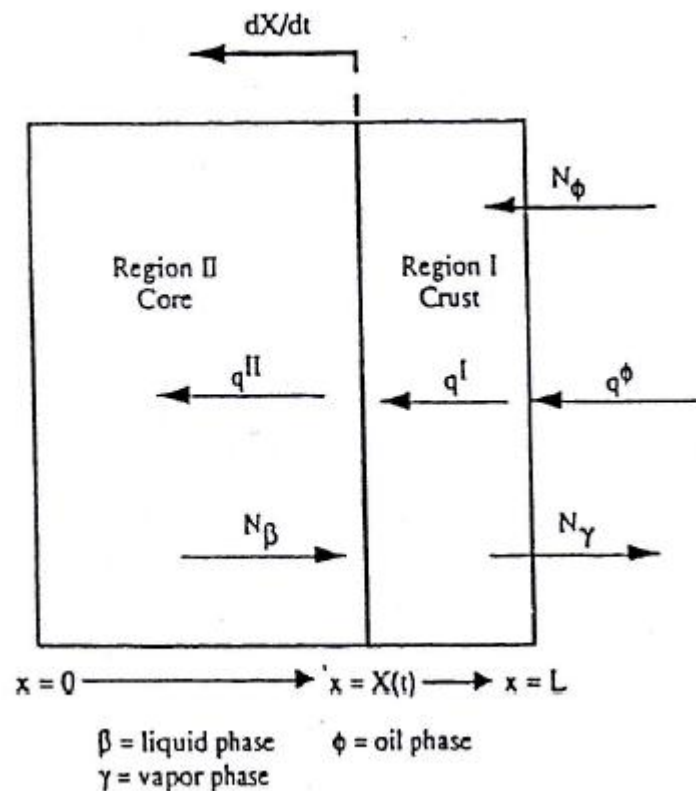
ในบทนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 4.1 จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาโดย Farkas และคณะ [7] ซึ่งพิจารณาการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของการทอดแบบน้ำมันท่วม ที่ความดันบรรยากาศในลักษณะของ Stefan type problem ที่มีขอบเขตที่เคลื่อนที่ (moving interface) เป็นตัวแบ่งแยก 2 ส่วน ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพแตกต่างกัน คือ crust และ core เช่นเดียวกับในกระบวนการทำละลาย การแช่เยือกแข็ง การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และการอบแห้งแบบเยือกแข็ง มีทั้งการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นพร้อมๆกัน และในส่วนที่ 4.2 ผู้วิจัยได้นำงานจาก 4.1 มาทำให้ง่ายขึ้น โดยแยกศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลออกจากกัน และพิจารณาว่า crust/core interface ที่เกิดขึ้นนั้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยมากๆ crust ที่เกิดขึ้นมีความหนาน้อยมาก จึงให้ระบบเป็น non-moving boundary และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการศึกษากลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสำหรับการทอด เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล ได้แก่ ค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวมและสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนโดยรวมในการทอดที่ความดันบรรยากาศ และนำแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้มาประยุกต์ใช้กับการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศซึ่งมีสภาวะขอบเขตที่แตกต่างกันด้วย

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดที่พัฒนาโดย Farkas และคณะ [7]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดที่พัฒนาขึ้นโดย Farkas และคณะ[7] เพื่อใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นภายในอาหารระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วมภายใต้ความดันบรรยากาศ สำหรับตัวอย่างอาหารที่มีรูปร่างเป็น semi-infinite slab โดยมีสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้

1. ระบบมีสมมาตร และมีการถ่ายเทความร้อนและมวลในมิติเดียว
2. ส่วน core ประกอบด้วยน้ำและส่วนที่เป็นของแข็ง
3. ส่วน crust ประกอบด้วยไอน้ำ น้ำมันและของแข็ง
4. ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ

5. คุณสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ขนานกับฟลักซ์ของความร้อนและมวลเท่านั้น
6. ฟลักซ์ของความร้อนและฟลักซ์ของมวลมีทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้า
7. ไม่มีพลังงานความร้อนจากฟลักซ์ของน้ำมันที่เข้าสู่อาหาร เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับฟลักซ์ของความร้อนจากการนำความร้อนและการพาความร้อนระหว่างการทอด
8. สัดส่วนปริมาตรของน้ำมันในอาหารมีค่าน้อยมาก และไม่มีผลต่อฟลักซ์ความร้อนและฟลักซ์ของมวลอื่นๆ



รูปที่ 4.1 ภาพของ semi-infinite slab ในระบบการทอด [7]

จากรูปที่ 4.1 เทอมของ N_{ix} หมายถึงฟลักซ์ของมวล โดย $i = \beta, \phi, \gamma$ สำหรับน้ำ น้ำมันและไอน้ำ ตามลำดับ ส่วนของแข็งใช้สัญลักษณ์เป็น σ และ $N_{\sigma x} = 0$ เทอม q^i หมายถึงฟลักซ์ของพลังงานจากการนำความร้อน $i = I, II$ เป็น 2 ส่วนที่แตกต่างกัน ส่วน I เป็น crust : $X(t) \leq x \leq L$ ส่วน II เป็น core : $0 \leq x \leq X(t)$ crust และ core ถูกแบ่งแยกด้วย interface ที่ตำแหน่ง $x = X(t)$ ซึ่งมีการเคลื่อนที่จาก $x = L$ เมื่อเริ่มต้นเข้าไปภายในด้วยอัตรา dX/dt

4.1.1 การถ่ายเทความร้อนในส่วน core ($0 < x < X(t)$)

การถ่ายเทความร้อนที่ปรากฏในส่วน core มี 2 ลักษณะคือ การนำความร้อนและการพาความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำ ทำสมดุลพลังงานรอบปริมาตรควบคุมในส่วน core ได้เป็น

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} + N_{\beta_x} \frac{\partial h_\beta}{\partial x} = \varepsilon_\beta \rho_\beta \frac{\partial h_\beta}{\partial t} + \varepsilon_\sigma \rho_\sigma \frac{\partial h_\sigma}{\partial t} \quad (4.1)$$

กำหนดให้ $\partial h_i = C_{p_i} \partial T_i$ ได้สมการเป็น

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} + N_{\beta_x} C_{p_\beta} \frac{\partial T_\beta}{\partial x} = \varepsilon_\beta \rho_\beta C_{p_\beta} \frac{\partial T_\beta}{\partial t} + \varepsilon_\sigma \rho_\sigma C_{p_\sigma} \frac{\partial T_\sigma}{\partial t} \quad (4.2)$$

assume ว่ามี local thermal equilibrium ($\langle T_\sigma \rangle = \langle T_\beta \rangle$) และจากกฎของ Fourier ($q_x = -k \partial T / \partial x$) ได้รูปสมการเป็น

$$k_{\text{eff}}^I \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + N_{\beta_x} C_{p_\beta} \frac{\partial T}{\partial x} = (\varepsilon_\beta \rho_\beta C_{p_\beta} + \varepsilon_\sigma \rho_\sigma C_{p_\sigma}) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

ใช้สัญลักษณ์ k_{eff}^I เพื่อแสดงว่าวัสดุอาหารมีลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบที่สลับซับซ้อนโดยธรรมชาติ จึงใช้เป็นค่าการนำความร้อนโดยรวม (effective thermal conductivity)

Hallstrom [6] กล่าวว่าไว้ในกระบวนการทอดมีการถ่ายเทความร้อนภายในอาหารแบบการนำความร้อนเป็นกลไกหลัก ดังนั้นสมการที่ 4.3 จึงสามารถตัดส่วนของฟลักซ์ของความร้อนซึ่งเป็นการพาความร้อนเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของน้ำทิ้งไป และพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนจากการเคลื่อนที่ของน้ำมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การนำความร้อนและพิจารณาความหนาแน่นเป็นความหนาแน่นเฉลี่ยของวัสดุและให้สัดส่วนเชิงปริมาตรของส่วนที่เป็นน้ำและของแข็งรวมกันเท่ากับ 1 เนื่องจากในส่วน core ประกอบด้วย น้ำและส่วนที่เป็นของแข็ง และอาหารที่ใช้ในการศึกษาคือมันฝรั่ง มีน้ำเป็นองค์ประกอบสูงถึง 80-85 เปอร์เซ็นต์ สมการที่ได้จึงเป็น

$$k_{\text{eff}}^{\text{II}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = (\rho C_p)_{\text{eff}}^{\text{II}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.4)$$

4.1.2 การถ่ายเทมวลในส่วน core ($0 < x < X(t)$)

การถ่ายเทมวลในส่วน core มีเฉพาะการเคลื่อนที่ของน้ำ N_{β_x} เท่านั้น โดย assume ว่า $\rho_\beta, \rho_\sigma, \varepsilon_\sigma$ คงที่ ทำสมมูลมวลรอบปริมาตรควบคุมในส่วน core ได้เป็นสมการ

$$\rho_\beta \frac{\partial(\varepsilon_\beta)}{\partial t} = - \frac{\partial(N_{\beta_x})}{\partial x} \quad (4.5a)$$

กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำที่เป็นไปได้มีอยู่หลายแบบ ที่รู้จักกันดีได้แก่การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากการแพร่ (diffusion) และการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงคาปิลลารี (capillary action) ในระบบการทอดนี้การเคลื่อนที่ของน้ำก็มีโอกาสเกิดขึ้นจากแรงขับเคลื่อนต่างๆ เหล่านี้ แต่ในงานวิจัยของ Farkas และคณะ[7] นั้นได้ให้ความเห็นว่าการเคลื่อนที่ของน้ำเป็นลักษณะของการแพร่ที่มีความแตกต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน เนื่องจากการแพร่ในวัสดุอาหารโดยส่วนใหญ่แล้วได้รับการยอมรับว่าเป็นการเคลื่อนที่ในรูปของของเหลวเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น เมื่อ $\varepsilon_\beta \rho_\beta = C_\beta$ และ $N_{\beta_x} = -D(\partial C_\beta / \partial x)$ ดังนั้นสมการของการแพร่เมื่อสัมพันธ์กับการแพร่มีค่าคงที่จึงเป็น

$$\frac{\partial C_\beta}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C_\beta}{\partial x^2} \quad (4.5b)$$

จากสมการที่ 4.5b เนื่องจากมีความต้านทานการแพร่ภายในอาหารเป็นตัวควบคุมอัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการทอด พารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการคือสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นโดยรวม (D_{eff}) การใช้สัมประสิทธิ์การแพร่ที่เป็นค่าคงที่เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ ในความเป็นจริงแล้วค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อาจเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ความชื้น และโครงสร้างทางกายภาพก็ได้

4.1.3 การถ่ายเทความร้อนในส่วน crust ($X(t) < x < L$)

สมการของการถ่ายเทความร้อนในส่วน crust มีทั้งเทอมของการนำความร้อนและการพาความร้อน ส่วนนี้เป็นเพียงชั้นบางๆ ประมาณ 2 มม. ใน French fried potatoes อยู่ระหว่าง core และน้ำมัน เมื่อเริ่มต้นยังไม่ปรากฏส่วนนี้ แต่จำมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในระหว่างการทอด crust เป็น moving layer ที่มีคุณสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพคล้ายกับฉนวน มีค่าการนำความร้อนต่ำ และมีความพรุนสูง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ อัตราการระเหยของน้ำต่ำและอาหารสุกช้าลง ทำสมมูลพลังงานรอบปริมาตรควบคุมในส่วน crust ได้เป็นสมการ

$$\varepsilon_\gamma \rho_\gamma C_{p_\gamma} \frac{\partial T_\gamma}{\partial t} + \varepsilon_\sigma \rho_\sigma C_{p_\sigma} \frac{\partial T_\sigma}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} + N_{\gamma x} C_{p_\gamma} \frac{\partial T_\gamma}{\partial x} \quad (4.6)$$

assume ว่า thermal equilibrium ($\langle T_\sigma \rangle = \langle T_\gamma \rangle$) และจากกฎของ Fourier ได้สมการเปลี่ยนรูปเป็น

$$(\varepsilon_\gamma \rho_\gamma C_{p_\gamma} + \varepsilon_\sigma \rho_\sigma C_{p_\sigma}) \frac{\partial T}{\partial t} = k_{\text{eff}}^\Pi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + N_{\gamma x} C_{p_\gamma} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.7a)$$

ในสมการที่ 4.7a มีทั้งเทอมของฟลักซ์ของความร้อนจากการนำความร้อนและการพาความร้อนจากการเคลื่อนที่ของไอน้ำ คัดส่วนของฟลักซ์ของความร้อนเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของไอน้ำทิ้งไป และพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนการเคลื่อนที่ของไอน้ำมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การนำความร้อนภายใน crust และจากสมมุติฐานข้อ 8 เมื่อสัดส่วนเชิงปริมาตรของน้ำมันในอาหารมีค่าน้อยมาก และไม่มีผลต่อฟลักซ์ของความร้อน และฟลักซ์ของมวลอื่นๆ ดังนั้นในสมการที่ 4.7a จึงไม่มีเทอมของฟลักซ์ของความร้อนจากน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหาร เมื่อพิจารณาความหนาแน่นและความจุความร้อนจำเพาะของอาหารเป็นค่าเฉลี่ยของวัสดุและให้สัดส่วนเชิงปริมาตรของส่วน crust ซึ่งประกอบด้วยน้ำ น้ำมัน และของแข็ง รวมกันเท่ากับ 1 ดังนั้น จึงได้สมการเป็น

$$(\rho C_p)_{\text{eff}}^I \frac{\partial T}{\partial t} = k_{\text{eff}}^I \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.7b)$$

4.1.4 การถ่ายเทมวลในส่วน crust ($X(t) < x < L$)

การถ่ายเทมวลในส่วน crust อยู่ในรูปของฟลักซ์ของไอน้ำที่เคลื่อนที่จาก crust/core interface ไปยังผิวหน้า และการเคลื่อนที่ของน้ำมันจากภายนอกเข้าสู่ crust ใช้สมมุติฐานข้อที่ 7 และ 8 การถ่ายเทมวลของน้ำมันใน crust จึงตัดทิ้งไป เขียนสมดุลมวลรอบปริมาตรควบคุม ได้เป็นสมการ

$$\rho_\gamma \frac{\partial \varepsilon_\gamma}{\partial t} + \varepsilon_\gamma \frac{\partial \rho_\gamma}{\partial t} = \frac{\partial N_{\gamma x}}{\partial x} \quad (4.8)$$

เทอมแรกทางซ้ายมืออาจตัดทิ้งได้ โดย assume ว่าใน crust region มีความพรุนคงที่ ; $\partial \epsilon_{\sigma} / \partial t = 0$ และสัดส่วนเชิงมวลรวมมีค่าเท่ากับ 1 ; $\epsilon_{\gamma} + \epsilon_{\sigma} = 1$ ดังนั้น $\partial \epsilon_{\gamma} / \partial t = 0$ และไอน้ำใน crust region นี้ไม่สามารถบีบอัดได้ ; $\partial \rho_{\gamma} / \partial t = 0$ สมการที่ 4.8 จึงลดรูปเป็น

$$\frac{\partial N_{\gamma x}}{\partial x} = 0 \quad (4.9)$$

จากการศึกษาการอบแห้งวัสดุพรุนที่มีรูปร่างเป็น semi-infinite slab พบว่ามีเกรเดียนต์ของความดันเกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง และประมาณค่าได้จาก Darcy's Law จึงสันนิษฐานว่ามีการเคลื่อนที่ของไอน้ำเนื่องจากเกรเดียนต์ของความดันจาก crust/core interface ไปยังผิวหน้าและสามารถอธิบายกระบวนการนี้ได้โดยใช้ Darcy's Law

$$v_{\gamma x} = -\frac{K_{\gamma}}{\mu_{\gamma}} \left[\frac{\partial P_{\gamma}}{\partial x} + \rho_{\gamma} g_x \right] \quad (4.10)$$

คูณทั้ง 2 ข้างของสมการ 4.10 ด้วย ρ_{γ} และ assume ว่า $\rho_{\gamma} g_x$ มีค่าน้อยมาก จึงตัดทิ้งไป จะได้เทอมของ $N_{\gamma x}$ เป็นฟังก์ชันของมวลใน crust

$$N_{\gamma x} = -\frac{\rho_{\gamma} K_{\gamma}}{\mu_{\gamma}} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4.11)$$

ดังนั้นสมการการแพร่กระจายของความดันใน crust จึงเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_{\gamma}}{\mu_{\gamma}} \frac{\partial P}{\partial x} \right] = 0 \quad (4.12a)$$

สมการนี้สามารถลดรูปลงให้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและระยะทาง ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอและความหนาแน่นกับอุณหภูมิ โดยใช้กฎของก๊าซ และสมการของ Clausius-Clapeyron และ assume ว่าความหนืดมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา ได้เป็นสมการ 4.12b

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_\gamma \frac{\partial P}{\partial x} \right] = 0 \quad (4.12b)$$

แสดงให้เห็นว่าสมการของการถ่ายเทมวลใน crust อาจเขียนในเทอมของอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ถ้าความดันไอและความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และอุณหภูมิภายใน crust ก็ได้มาจากสมการการถ่ายเทความร้อนใน crust ค่าความดันไอก็หาค่าได้เมื่อทราบอุณหภูมิของ crust

4.1.5 สภาวะขอบเขตและสภาวะเริ่มต้น

สมการอนุพันธ์อันดับสองที่ใช้อธิบายการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการทอดมี 4 สมการ จำเป็นต้องมีสมการสภาวะขอบเขต 8 สมการ และสภาวะเริ่มต้น 3 สมการ

4.1.5.1 สภาวะขอบเขตของ core region

สมการที่ 4.3 เป็นสมการการถ่ายเทความร้อนในส่วน core มีสภาวะขอบเขต 2 สมการ ดังนี้คือ

$$\text{BC1 :} \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x = 0, t > 0 \quad (4.13)$$

เนื่องจากมีความสมมาตรที่ centerline ; $x = 0$ ซึ่งการนำความร้อนจากเส้นกึ่งกลางของอาหารมีค่าเป็นศูนย์

$$\text{BC2 :} \quad T = T_{bp} \quad \text{at } x = X(t), t > 0 \quad (4.14)$$

แสดงสภาวะขอบเขตที่ crust/core interface, $x = X(t)$ เป็น moving surface ซึ่งมีการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิจุดเดือด

สมการที่ 4.5b เป็นสมการของการถ่ายเทมวลในส่วน core มีสภาวะขอบเขตคล้ายคลึงกับสมการของการถ่ายเทความร้อนดังนี้คือ

$$\text{BC3 :} \quad \frac{\partial C_\beta}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x = 0, t > 0 \quad (4.15)$$

$$\text{BC4 :} \quad C_\beta = 0 \quad \text{at } x = X(t), t > 0 \quad (4.16)$$

BC4 เกิดจากการตั้ง assumption ว่าไม่มีความเข้มข้นของน้ำในส่วน crust จึงมีค่าเป็นศูนย์ และที่ผิวของ interface ที่ $x = X(t)$ ความเข้มข้นของน้ำก็มีค่าน้อยมากๆ ดังนั้น $C_\beta = 0$

4.1.5.2 สภาวะขอบเขตของ crust region

สมการที่ 4.7 เป็นสมการการถ่ายเทความร้อนใน crust มีสภาวะขอบเขตที่ซับซ้อนขึ้นได้มาจากการพิจารณาหลักของ continuity of flux คือความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนจากน้ำมันไปยังผิวหนังอาหารเท่ากับความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนจากผิวหนังอาหารเข้าสู่ภายใน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{BC5 :} \quad k_{\text{eff}}^I \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_\phi - T|_{x=L}) \quad \text{at } x = L, t > 0 \quad (4.17)$$

4.1.5.3 สภาวะขอบเขตที่ crust/core interface

จากภาพขยายของ crust/core interface ในรูปที่ 4.2 มีสัญลักษณ์ที่ใช้ดังนี้คือ

A = area of interface (m^2)

$dX(t)/dt = U$ = velocity at which interface moves (m/s)

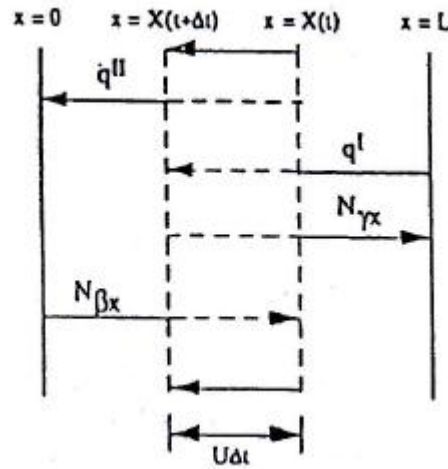
$UA\Delta t$ = distance which interface moves from time t to time $t+\Delta t$ (m)

$UA\Delta t(\epsilon_\sigma \rho_\sigma h_\sigma^I + \epsilon_\beta \rho_\beta h_\beta)$ = energy in volume $UA\Delta t$ at t_j (J/m^3)

$UA\Delta t(\epsilon_\sigma \rho_\sigma h_\sigma^I + \epsilon_\beta \rho_\beta H_\gamma)$ = energy in volume $UA\Delta t$ at $t_j + \Delta t$ (J/m^3)

$q^I A \Delta t + N_{\beta x} h_\beta A \Delta t$ = energy into volume $UA\Delta t$ during Δt (J)

$q^II A \Delta t + N_{\gamma x} H_\gamma A \Delta t$ = energy out from volume $UA\Delta t$ during Δt (J)



รูปที่ 4.2 ภาพขยายของ crust/core interface [7]

ทำสมดุลพลังงานรอบ interface ได้เป็นสมการ

$$At(q' + N_{\beta}h_{\beta} - q'' - N_{\gamma}H_{\gamma}) = UA\Delta t(\epsilon_{\sigma}\rho_{\sigma}h_{\sigma}^I + \epsilon_{\gamma}\rho_{\gamma}H_{\gamma} - \epsilon_{\sigma}\rho_{\sigma}h_{\sigma}^{II} - \epsilon_{\beta}\rho_{\beta}h_{\beta}) \quad (4.18)$$

ทำให้ง่ายขึ้น โดยรวมกลุ่มที่คล้ายกันไว้ด้วยกัน

$$BC6 : \quad q' - q'' + N_{\beta}h_{\beta} - N_{\gamma}H_{\gamma} = U[\epsilon_{\sigma}\rho_{\sigma}(h_{\sigma}^I - h_{\sigma}^{II}) + \epsilon_{\gamma}\rho_{\gamma}H_{\gamma} + \epsilon_{\beta}\rho_{\beta}h_{\beta}] \quad (4.19)$$

ทำสมดุลมวลรอบ $UA\Delta T$ ได้สมการสภาวะขอบเขตของการถ่ายเทมวล

$$BC7a : \quad N_{\beta} - N_{\gamma} = U(\epsilon_{\gamma}\rho_{\gamma} - \epsilon_{\beta}\rho_{\beta}) \quad \text{at } x = X(t), t > 0 \quad (4.20)$$

หรือใช้สภาวะขอบเขตที่อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิของไอน้ำที่ interface

$$BC7b : \quad P_{\gamma} = P_{bp} \quad \text{at } x = X(t), t > 0 \quad (4.21)$$

จากสมการที่ 4.20 อาจเขียนใหม่เป็นรูปสมการแสดงความเร็วที่ interface เคลื่อนที่

$$U = \frac{dX}{dt} = \frac{N_\beta - N_\gamma}{\varepsilon_\gamma \rho_\gamma - \varepsilon_\beta \rho_\beta} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ 4.20 คูณด้วย h_β แล้วนำผลที่ได้ไปลบออกจากสมการ 4.19 ได้ BC6 อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นดังสมการที่ 4.23

$$\text{BC6 :} \quad -k_{\text{eff}}^I + k_{\text{eff}}^{\text{II}} + N_\gamma(h_\beta - H_\gamma) = U[\varepsilon_\sigma \rho_\sigma(h_\sigma^I - h_\sigma^{\text{II}}) + \varepsilon_\gamma \rho_\gamma(H_\gamma - h_\beta)]$$

at $x = X(t)$, $t > 0$ (4.23)

สภาวะขอบเขตสุดท้ายของการถ่ายเทมวลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอ, P_γ ที่ผิวหน้าของวัสดุกับอุณหภูมิที่ผิวตามสมการของ Clausius-Clapeyron

$$\frac{\partial P_\gamma}{\partial T} = \frac{\Delta \hat{H}_\gamma}{T(\hat{V}_\gamma - \hat{V}_\beta)} \quad (4.24)$$

แก้สมการที่ 4.24 ได้เป็นสมการ

$$\text{BC8 :} \quad P_\gamma = \exp\left(\frac{-\Delta \hat{H}_\gamma}{RT} + B\right) \quad \text{at } x = L, t > 0 \quad (4.25)$$

$\Delta \hat{H}_\gamma$ = latent heat of vaporization (J/mol)

$\hat{V}_\gamma$ = specific molar volume of vapor (m^3/mol)

$\hat{V}_\beta$ = specific molar volume of liquid (m^3/mol)

P_γ = pressure (Pa)

R = ideal gas constant (8.314 J/mol K)

B = constant determined from steam table data

4.1.5.4 สภาวะเริ่มต้น

เมื่อเริ่มต้นอาหารประกอบด้วยส่วน core เพียงอย่างเดียว มีสภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในการแก้ปัญหาก่อนเกิด crust 2 สมการ และเนื่องจาก BC6 เป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งจึงมีสภาวะเริ่มต้นที่ 3 อีก 1 สมการ

$$\text{IC1 :} \quad T = T_0 \quad \text{for all } x, t = 0 \quad (4.26)$$

$$\text{IC2 :} \quad C_\beta = C_0 \quad \text{for all } x, t = 0 \quad (4.27)$$

$$\text{IC3 :} \quad X(t) = L \quad \text{at } t = 0 \quad (4.28)$$

4.2 การทำให้ง่ายขึ้นและการแก้สมการหาคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simplification and Solution of Mathematical Model)

ชุดของสมการอนุพันธ์อันดับสองที่อธิบายการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในกระบวนการทอดที่กล่าวมาข้างต้น เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาโดย Farkas และคณะ [7] สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่าง slab สมการนี้เป็น nonlinear เนื่องจากมี moving boundary ซึ่งแบ่งแยก crust region และ core region ออกจากกันและมีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน (simultaneous heat and mass transfer) จึงทำให้การหาคำตอบของสมการนี้มีความยุ่งยากซับซ้อนและต้องการข้อมูลมากในการแก้สมการหาคำตอบ ดังนั้นสำหรับการทอดที่มี crust น้อยๆ อาจจะทำให้ง่ายขึ้น โดยให้ระบบเป็น non-moving boundary และศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลใน core region แยกออกจากกัน จึงสามารถหาคำตอบของสมการการถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการทอดแบบน้ำมันท่วมได้ง่าย เนื่องจากระบบการทอดเป็นระบบที่ซับซ้อนมาก โดยเฉพาะในการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ซึ่งไม่สามารถหาคุณสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพที่จะนำมาแทนค่าในสมการเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณความชื้นได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลองคณิตศาสตร์อย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ในสมการของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลใน core region ได้แก่ ค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม โดยใช้ non-linear regression ส่วนใน crust region ที่มีขนาดของ crust บางมากและมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ในงานของ Farkas และคณะ [7] ไม่มีการพิจารณาเกี่ยวกับฟลักซ์ของความร้อนจากน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปสะสมอยู่ภายใน crust ในสมการของการถ่ายเทความร้อนและไม่มีการถ่ายเทของน้ำมันภายใน crust เนื่องจากได้ตั้งสมมุติฐานว่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของน้ำมันใน crust มีค่าต่ำมาก ฟลักซ์ของความร้อน

จากน้ำมันจึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับฟลักซ์ของความร้อนจากการนำความร้อนภายใน crust แต่ในงานวิจัยจะให้ความสนใจเกี่ยวกับน้ำมันซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญภายใน crust โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิด crust formation กับปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหาร อัตราการเกิด crust และผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ทอดที่มีต่ออัตราการเกิด crust เพื่อให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในกระบวนการทอดและผลของอุณหภูมิและความดันขณะทอดที่มีต่อพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น

4.2.1 การถ่ายเทความร้อนใน core

สมการที่ 4.4 เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในส่วน core รูปแบบของสมการสำหรับการนำความร้อนแบบมิติเดียวในสถานะไม่สม่ำเสมอ พร้อมทั้งสถานะเริ่มต้นและสถานะขอบเขตดังสมการข้างล่างนี้

$$k_{\text{eff}}^I \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.4)$$

$$\text{สถานะขอบเขต :} \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x = 0, t > 0 \quad (4.13)$$

$$T = T_{\text{bp}} \quad \text{at } x = X(t), t > 0 \quad (4.14)$$

$$\text{สถานะเริ่มต้น :} \quad T = T_0 \quad \text{for all } x, t = 0 \quad (4.26)$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้สมมุติว่ามีความหนาของ crust น้อยมากๆ จึงทำให้ระยะของ interface เท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนา ($X(t) = L$) นั่นคือพิจารณาให้ส่วน core มี fixed interface เพราะ interface มีการเคลื่อนตัวเข้ามาภายในด้วยอัตราที่ต่ำมาก จากนั้นแก้สมการหาคำตอบของสมการการถ่ายเทความร้อนในส่วน core นี้ได้โดยวิธีแยกตัวแปร (separation of variables method) จากสถานะขอบเขตในสมการที่ 4.14 เปลี่ยนขอบเขตจากที่ $x = X(t)$ เป็น $x = L$ มีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดเนื่องจากทอดทางขวามือไม่เป็นเอกพันธ์ (nonhomogeneous) ดังนั้นจึงกำหนดพารามิเตอร์ใหม่ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย

$$\bar{x} = \frac{x}{L} \quad (4.29)$$

$$\bar{t} = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (4.30)$$

$$\bar{T} = \frac{T - T_{bp}}{T_0 - T_{bp}} \quad (4.31)$$

เมื่อ

L = ครึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นอาหาร

α = ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) = $k_{eff}/\rho C_p$

T_{bp} = จุดเดือดของน้ำในอาหารที่สภาวะต่างๆ

ดังนั้น

แทนค่าตัวแปรเหล่านี้ลงในสมการ 4.4, 4.13, 4.14 และ 4.26 ได้เป็นสมการเอกพันธ์

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} \quad (4.32)$$

สภาวะเริ่มต้น : $\bar{T}(\bar{x}, 0) = 1 \quad (4.33)$

สภาวะขอบเขต : $\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}}(0, \bar{t}) = 0 \quad (4.34)$

$$\bar{T}(1, \bar{t}) = 0 \quad (4.35)$$

ได้คำตอบเป็นอนุกรม (series) ดังสมการข้างล่างนี้

$$T = T_{bp} + \frac{4}{\pi} (T_0 - T_{bp}) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos \left[\frac{(2n+1)\pi x}{2L} \right] \exp \left[\frac{-\alpha (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right] \quad (4.36)$$

4.2.2 การถ่ายเทความร้อนใน core

สมการที่ 4.5b เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในส่วน core เป็นกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ สำหรับการแพร่ในสภาวะที่ไม่คงที่ (Fick's second law for unsteady state

diffusion) เมื่อพิจารณาให้สัมประสิทธิ์การแพร่ในสมการเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (effective moisture diffusivity)

$$\frac{\partial C_\beta}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C_\beta}{\partial x^2} \quad (4.6)$$

$$\text{สภาวะขอบเขต :} \quad \frac{\partial C_\beta}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x = 0, t > 0 \quad (4.15)$$

$$C_\beta = 0 \quad \text{at } x = X(t), t > 0 \quad (4.16)$$

$$\text{สภาวะเริ่มต้น :} \quad C_\beta = C_0 \quad \text{for all } x, t = 0 \quad (4.27)$$

ถ้าหากในระบบการทอดมีความหนาของ crust น้อยมากเนื่องจากการเคลื่อนตัวของ interface เข้าไปภายในอาหารช้ามาก ๆ สามารถ assume ได้ว่าความหนาของส่วน core เท่ากับความหนาของชั้นอาหาร ดังนั้นที่สภาวะขอบเขตในสมการ 4.16 C_β มีค่าเท่ากับ 0 ที่ interface ($x = L$) ชุดของสมการนี้หาคำตอบได้โดยใช้วิธีการแยกตัวแปร จะได้สมการอัตราส่วนความชื้นเป็นฟังก์ชันกับเวลา มีคำตอบเป็นอนุกรม (series)

$$\frac{C_\beta}{C_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right] \exp\left[\frac{-D_{\text{eff}} (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (4.37)$$

เมื่อพิจารณาเป็นความเข้มข้นเฉลี่ยทั้งชิ้นอาหาร ดังนั้นสมการที่ 4.37 จึงกลายเป็น

$$\frac{\bar{C}_\beta}{C_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-D_{\text{eff}} (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (4.38)$$

4.2.3 การถ่ายเทความร้อนใน crust

สมการที่ 4.7 เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองของการถ่ายเทความร้อนในส่วน crust ซึ่งมีทั้งเทอมของการนำความร้อนและการพาความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอน้ำ ในสมการนี้ไม่ได้กล่าวถึงฟลักซ์ของน้ำมันเนื่องจาก สมมุติฐานข้อที่ 7 และ 8 ที่ว่าสัดส่วนเชิงมวลของน้ำมันในอาหารมีค่าน้อยมากจึงไม่มีผลต่อฟลักซ์ของความร้อนและมวล และมีพลังงานจากฟลักซ์ของน้ำมันน้อยมากเมื่อเทียบกับฟลักซ์ของความร้อนจากการนำความร้อนและการพาความร้อนระหว่างการถ่ายเท

$$(\varepsilon_\gamma \rho_\gamma C_{p_\gamma} + \varepsilon_\sigma \rho_\sigma C_{p_\sigma}) \frac{\partial T}{\partial t} = k_{\text{eff}}^I \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + N_{\gamma x} C_{p_\gamma} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.7)$$

งานวิจัยนี้ interface มีการเคลื่อนที่น้อยมากและมีอัตราการเกิด crust ต่ำ จึงสมมุติให้ระบบเป็น non-moving boundary และจากการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ที่ Saguy และ Pinthus [8] ได้สรุปไว้คือการแพร่กระจายของน้ำมันมีความสัมพันธ์กับการเกิด crust formation โดยพบว่าน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปส่วนใหญ่สะสมอยู่ภายใน crust เมื่อภายใน crust มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นอุณหภูมิภายใน crust จึงเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมัน และจากสถานะขอบเขตในสมการที่ (4.17) มีการพาความร้อนจากน้ำมันสู่ผิวหน้าอาหาร ดังนั้นการนำความร้อนที่ผิวของอาหารจึงเท่ากับการพาความร้อนจากน้ำมันไปยังผิวหน้าอาหาร แต่เนื่องจากในระบบการทอดนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าประมาณ 800-1000 W/m²K เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนภายใน crust จากงานวิจัยของ Buhri และ Singh [32] โดยใช้ DSC (differential scanning calorimeter) ได้ค่าประมาณ 0.1302-0.1531 W/mK ที่อุณหภูมิ 100-120°C จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวหน้าอาหารมีค่าสูงกว่าค่าการนำความร้อนภายใน crust มากๆ ($h \gg k$) ดังนั้นอุณหภูมิที่ผิวจึงมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมัน และไม่มีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสถานะขอบเขตในสมการที่ 4.17 จึงกลายเป็นสมการที่ 4.39

$$k_{\text{eff}}^I \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_\phi - T|_{x=L}) \quad \text{at } x = L, t > 0 \quad (4.17)$$

$$T_{\text{crust}} = T|_{x=L} = T_\phi \quad \text{at } t > 0 \quad (4.39)$$

4.2.4 การถ่ายเทมวลใน crust

ในงานของ Farkas และคณะ[7]นั้น ไม่มีการถ่ายเทของน้ำมันภายใน crust เนื่องจากได้ตั้งสมมุติฐานว่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของน้ำมันใน crust มีค่าต่ำมาก พลั๊กซ์ของความร้อนจากน้ำมันจึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลั๊กซ์ของความร้อนจากการนำความร้อนภายใน crust แต่ในงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจเกี่ยวกับการดูดซับของน้ำมันซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญภายใน crust โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิด crust formation กับการดูดซับของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ ส่วนการเคลื่อนที่ของไอน้ำมันเนื่องจากสมมุติฐานให้ crust มีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นมันฝรั่งและความพรุนสูง เมื่อมีการระเหยของน้ำกลายเป็นไอน้ำที่ interface ไอน้ำจึงสามารถผ่านสู่ผิวหน้าอาหารอย่างรวดเร็ว การระเหยของน้ำจึงควบคุมโดยการแพร่ของน้ำจากภายใน พลั๊กซ์ของไอน้ำในส่วน crust จึงเท่ากับพลั๊กซ์ของน้ำที่แพร่จากส่วน core และระเหยกลายเป็นไอน้ำที่ interface ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้หาคำตอบของสมการของการถ่ายเทความร้อนในส่วน crust แต่เป็นการศึกษาการเกิด crust information ที่มีความสัมพันธ์กับการดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ โดยสันนิษฐานว่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในผลิตภัณฑ์เท่ากับปริมาณน้ำมันที่สะสมอยู่ภายใน crust (สมการ 4.40) ตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการทดลองมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 cm และหนา 1.3 cm จึงสามารถคำนวณความหนาของ crust ได้จากสมการที่ 4.41 และอัตราการเกิด crust จากสมการที่ 4.42

$$V_{oil} = V_{crust} \quad (4.40)$$

$$m_{oil}/\rho_{oil} = \pi(R - x)^2(L - 2x) \quad (4.41)$$

$$U = \Delta x / \Delta t \quad (4.42)$$

เมื่อ	V_{oil}	= ปริมาตรของน้ำมัน
	V_{crust}	= ปริมาตรของ crust
	m_{oil}	= น้ำหนักของน้ำมันในผลิตภัณฑ์
	ρ_{oil}	= ความหนาแน่นของน้ำมัน
	R	= รัศมีของชิ้นอาหาร
	x	= ความหนาของ crust
	L	= ความหนาของชิ้นอาหาร
	U	= อัตราการเกิด crust
	t	= เวลาการทอด

เมื่อทำการ simplify แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดแบบน้ำมันท่วมภายใต้ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศจากแบบจำลองของ Farkas และคณะ [7] แล้วจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายสำหรับการถ่ายเทความร้อนใน core region ที่จะนำไปวิเคราะห์หาค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวม ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทความร้อนในระบบการทอด ได้แก่สมการ 4.36 โดยที่ความดันบรรยากาศ 760 mmHg มีอุณหภูมิที่ interface เท่ากับจุดเดือดคือ $T_{bp} = 100^{\circ}\text{C}$ และที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 270 mmHg มีอุณหภูมิที่ interface เท่ากับจุดเดือดคือ $T_{bp} = 73^{\circ}\text{C}$

$$T = T_{bp} + \frac{4}{\pi}(T_0 - T_{bp}) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right] \exp\left[\frac{-\alpha(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (4.36)$$

แบบจำลองคณิตศาสตร์อย่างง่ายของการถ่ายเทมวลใน core region ในสมการ 4.38 ใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยรวมที่สภาวะการผลิตต่างๆ ทั้งที่ความดันบรรยากาศและที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

$$\frac{\bar{C}_\beta}{C_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-D_{eff}(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (4.38)$$

ในส่วน crust region การถ่ายเทความร้อนสามารถอธิบายได้ดังสมการ 4.39 เนื่องจาก crust มีขนาดบางมาก จึงไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายใน crust และในระบบการทอดนั้น สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่ามากกว่าการนำความร้อนภายใน crust มากๆ ($h \gg k$) จึงสมมุติว่า อุณหภูมิที่ผิวมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมัน ไม่มีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายนอก ดังนั้น อุณหภูมิภายใน crust จึงเท่ากับอุณหภูมิที่ผิวอาหารและเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมัน

$$T_{ct} = T|_{x=L} = T_\phi \quad \text{at } t > 0 \quad (4.39)$$

การถ่ายเทมวลใน crust region เป็นการศึกษาการดูดซับของน้ำมันที่เข้าไปสะสมอยู่ภายใน crust จากสมมุติฐานที่ว่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในผลิตภัณฑ์สะสมอยู่ภายใน crust เท่านั้น จึงสามารถคำนวณหาความหนาของ crust และอัตราการเกิด crust ได้จากสมการที่ 4.41 และ 4.42 ตามลำดับ สมการที่ 4.42 คือ ค่าความชื้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ crust กับเวลาการทอดที่สภาวะการผลิตต่างๆ

$$m_{oil}/\rho_{oil} = \pi(R - x)^2(L - 2x) \quad (4.41)$$

$$U = \Delta x/\Delta t \quad (4.42)$$

นำสมการที่ 4.36 และ 4.38 ไปใช้ในการศึกษากลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลใน core region เพื่อหาค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวม และสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนโดยรวม และผลของอุณหภูมิน้ำมันและความดันที่ใช้ทอดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านี้ และใช้สมการที่ 4.39 และ 4.41 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลใน crust region อันเป็นผลมาจากน้ำมันที่สะสมอยู่ภายใน crust และศึกษาถึงอัตราการเกิด crust ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดในสภาวะการผลิตต่างๆ จากสมการ 4.42 และผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่ออัตราการเกิด crust ด้วย

บทที่ 5

การดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ตัวอย่างของอาหารที่ใช้ทอดคือมันฝรั่ง เนื่องจากสามารถตัดแต่งเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย มีเนื้อแน่น ปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงและมีไขมันต่ำ และในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการต่างๆ เช่น การอบแห้ง และการทอด ซึ่งทดลองกับมันฝรั่ง จึงสามารถรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อน แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของตัวผลิตภัณฑ์ และน้ำมันที่ใช้ทอด นำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ จึงเลือกมันฝรั่งเป็นวัตถุดิบในงานวิจัย

5.1 วัตถุดิบ

5.1.1 มันฝรั่ง

5.1.2 น้ำมันพืช

5.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์น้ำมันในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ เฮกเซน หรือ ปิโตรเลียมอีเทอร์ โดยใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดไขมันออกจากอาหารทอด

5.2 อุปกรณ์

5.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมวัตถุดิบ

5.2.1.1 มีดหั่นสไลด์ชิ้นบาง และมีดตัดแต่ง

5.2.1.2 ถาดอะลูมิเนียมสำหรับแช่ตัวอย่าง

5.2.1.3 เขียงสำหรับหั่นและตัดแต่ง

5.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทอด

5.2.2.1 เครื่องทอดความดันต่ำ[11] ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักต่าง ๆ ดังนี้

(รูปที่ 5.1)

ก. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ยี่ห้อ GAST รุ่น 0822-V2 ชนิด rotary pump ขนาดกำลัง ½ hp 1 phase 220 V 1725 rpm

ข. อุปกรณ์ทำความร้อนและควบคุมอุณหภูมิ (heater and thermostat) ขดลวดต้านทานไฟฟ้า เป็นวงจร 2 ชั้น ขนาด 2.0 kW 3 phase ส่วน thermostat เป็นแบบ On-off system ช่วงอุณหภูมิที่ควบคุมได้ประมาณ ± 3 องศาเซลเซียส

ค. เกจวัดความดัน (pressure gauge)

ง. มอเตอร์ไฟฟ้า ยี่ห้อ ORION 1 phase ขนาดกำลัง 6 W 220 V ความเร็วรอบ 0-90 rpm

จ. ตะกร้าทอด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 120 มม. สูง 106 มม. ทำด้วยแผ่นเหล็กไร้สนิม (stainless steel) เจาะรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

ฉ. ตัวเครื่องทอด ทำจากแผ่นเหล็กไร้สนิมหนา 4 มม. สูง 40 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 160 มม.

5.2.2.2 นาฬิกาจับเวลา

5.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์

5.2.3.1 ตู้อบความร้อน (hot air oven) รุ่น 800 ของ Memmert

5.2.3.2 ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความร้อน

5.2.3.3 ชุดอุปกรณ์สกัดไขมัน (Sox-tech apparatus) ยี่ห้อ Tecator รุ่น 1043

5.2.3.4 หลอดใส่ตัวอย่าง (extraction thimble)

5.2.3.5 เดสิคเคเตอร์ (desiccators)

5.2.3.6 เครื่องชั่งไฟฟ้าชนิด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น RS 250 S

5.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้บันทึกอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์

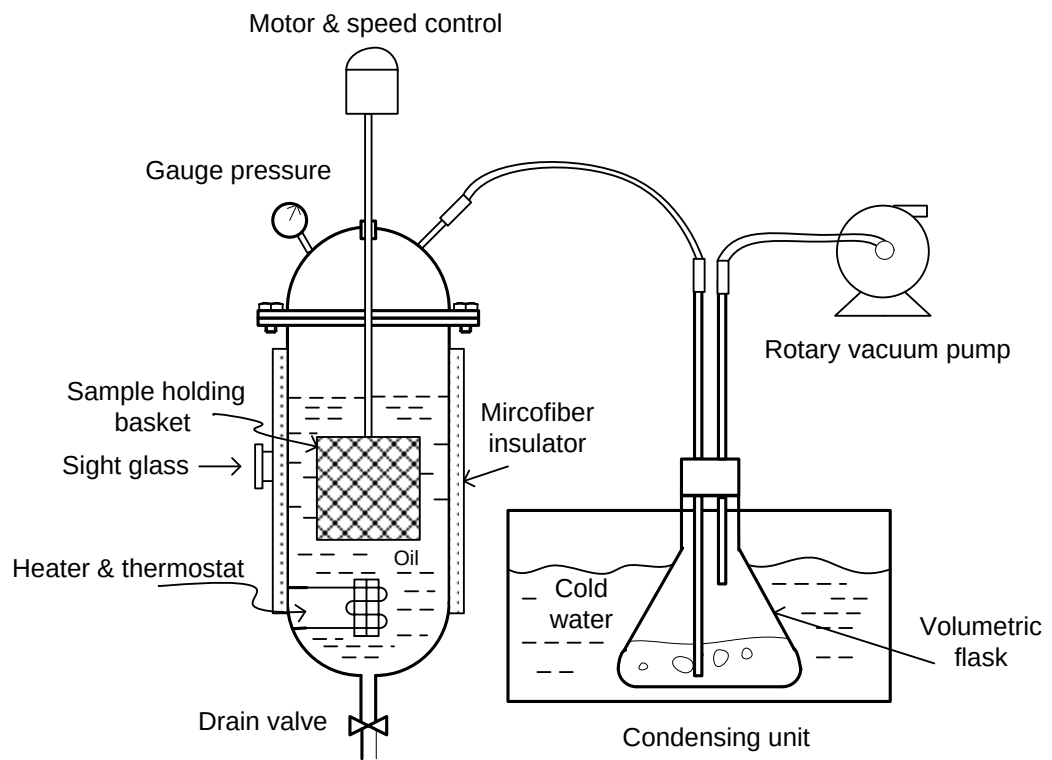
5.2.4.1 สายเทอร์โมคัปเปิล type T

5.2.4.2 Datalogger รุ่น HR 1300 ของ Yagogawa

5.2.4.3 โปรแกรมสำเร็จรูป Hrsoft HR 1300

5.2.4.4 คอมพิวเตอร์ PC

5.2.4.5 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์



รูป 5.1 เครื่องทอดสุญญากาศขนาดเล็ก

5.3 การเตรียมวัตถุดิบและการทอด (preparing & frying)

5.3.1 การคัดเลือกและการเก็บรักษา (selection & storage)

นำมาล้างทำความสะอาด และเก็บไว้ในที่ห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ถ้ายังไม่ทำการแปรรูป

5.3.2 การปอกเปลือกและตัดแต่ง (coring & slicing)

เมื่อล้างทำความสะอาดแล้วนำมาปอกเปลือก และสไลด์เป็นแผ่นให้มีความหนาประมาณ 1.3 cm และตัดเป็นรูปร่างตามต้องการ โดยใช้อุปกรณ์ชุดใบมีดตัดให้ได้ชิ้นขนาดสม่ำเสมอผิวเรียบ เพื่อป้องกันการดูดซับน้ำมันที่อาจมากกว่าปกติ แล้วนำมาแช่น้ำ จากนั้นสะเด็ดน้ำให้แห้งก่อนนำไปทอด

5.3.3 การทอด (frying)

นำน้ำมันใส่เครื่องทอดในระดับที่ท่วมตะกร้า เปิดเครื่องให้ความร้อน และตั้งอุณหภูมิที่ต้องการ นำตัวอย่างใส่ลงในตะกร้าทอด ในขณะที่ยกตะกร้าสูงจากผิวน้ำมัน จากนั้นปิดฝาเครื่องทอดให้แน่น เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกจนได้ความดันที่ต้องการ ตรวจสอบอุณหภูมิน้ำมันและความดัน ก่อนปล่อยตะกร้าให้จมอยู่ในน้ำมัน เพื่อทำการทอดที่เวลาต่าง ๆ จากนั้นยกตะกร้าทอดให้อยู่เหนือน้ำมันและหมุนตะกร้าภายใต้ความดันต่ำ เพื่อให้ไขมันออกจากอาหารมากที่สุด แล้วปิดเครื่องทำความร้อนและปั๊มสุญญากาศ เปิดวาล์วให้อากาศเข้า และเปิดฝาเครื่องทอด ส่วนการทอดที่ความดันบรรยากาศ หลังจากทอดจนได้เวลาตามที่ต้องการแล้ว ให้ยกตะกร้าทอดให้อยู่เหนือน้ำมันเช่นเดียวกันและหมุนตะกร้าภายใต้ความดันบรรยากาศเพื่อสะเด็ดน้ำมัน

5.3.4 การบรรจุ (packaging)

นำผลิตภัณฑ์มันฝรั่งทอดที่สภาวะการทอดต่าง ๆ ซับน้ำมันที่ผิวหน้าออก และบรรจุในถุงโพลิเอทิลีน ปิดปากถุงให้แน่น เก็บไว้ในเคสติกเกตเตอร์ เพื่อป้องกันการดูดความชื้นกลับของผลิตภัณฑ์

5.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

5.4.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

สำหรับตัวอย่างอาหารที่รูปร่าง slab ทำการวัดอุณหภูมิภายในชิ้นอาหารที่ 3 ตำแหน่งคือ 1) ตำแหน่งลึกจากผิวหน้าลงไป 0.1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับผิวมากที่สุดที่สามารถวัดได้ ถ้าหากวัดที่ใกล้ผิว เมื่อทอดเป็นระยะเวลาานานปลายเทอร์โมคัปเปิลจะโผล่ออกมาจากตัวอย่างอาหารเนื่องจากอาหารเกิดการหดตัว และอุณหภูมิที่วัดได้หลังจากนี้จะเป็นอุณหภูมิของน้ำมัน 2) ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.3 เซนติเมตร เป็นตำแหน่งที่อยู่กึ่งกลางระหว่างผิวหน้ากับใจกลางอาหาร

และ 3) ที่ใจกลางอาหารหรือตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.65 เซนติเมตร ปลายเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 3 เส้น จะอยู่ที่จุดกึ่งกลางของชิ้นอาหาร

สำหรับ cube potatoes วัดอุณหภูมิในชิ้นอาหาร 2 ตำแหน่ง คือ ที่ใจกลางอาหาร และตำแหน่งห่างจากผิวหน้า 0.1 เซนติเมตร เนื่องจากชิ้นอาหารมีขนาดเล็ก มีการหัดตัวมาก จึงวัดอุณหภูมิเพียง 2 จุดเท่านั้น

บันทึกอุณหภูมิโดยใช้ datalogger ต่อเข้ากับ คอมพิวเตอร์ PC จนกระทั่ง อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ และตรวจสอบตำแหน่งของปลายเทอร์โมคัปเปิลในชิ้นตัวอย่างหลังการทอด ด้วย จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง

5.4.2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์

วิเคราะห์หาความชื้นโดยอบตัวอย่างใน hot air oven ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 15-18 ชม. (ภาคผนวก ข)

5.4.3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์

วิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันด้วย Sox-tech apparatus (ภาคผนวก ข)

5.4.4 การเปลี่ยนแปลงความหนาของ crust

วัดความหนาของ crust โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (ภาคผนวก ข)

5.5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองการทางคณิตศาสตร์ของการทอดแบบน้ำมันท่วม

ใช้ Non-linear regression วิธีของ Gauss-Newton Method (ภาคผนวก ค) หาค่า unknown parameters ในสมการของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลใน core ซึ่งได้แก่ ค่าการแพร่ความร้อนโดยรวม (effective thermal diffusivity) และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (effective moisture diffusivity) เปรียบเทียบผลจากการคำนวณจากสมการคณิตศาสตร์กับผลจากการทดลอง เพื่อให้เกิดค่าผลต่างยกกำลังสองของค่าที่คำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองน้อยที่สุด

บทที่ 6

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำมัน ความดันที่ใช้ทอด เวลาการทอด และขนาดรูปร่างของชิ้นมันฝรั่ง ที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ในการทอดแบบน้ำมันท่วม คือ อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ และอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอด และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายที่อธิบายการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในกระบวนการทอดที่พัฒนาขึ้นในบทที่ 4 มาใช้วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการ ดังนั้นในบทนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 6.1 เป็นผลของปัจจัยจากการผลิตต่าง ๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ และส่วนที่ 6.2 เป็นผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในการทอดแบบน้ำมันท่วม

6.1 ผลของปัจจัยการผลิตต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์

6.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์

รูปที่ 6.1ก เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในชิ้นมันฝรั่งที่มีความหนา 1.3 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร เมื่อทอดในน้ำมันที่มีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ (760 มิลลิเมตรปรอท) พบว่าอุณหภูมิภายในชิ้นอาหารที่ตำแหน่งใกล้ผิวซึ่งห่างจากผิวหน้า 0.1 เซนติเมตร มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่อยู่ลึกลงไป คือที่ตำแหน่งห่างจากผิวหน้า 0.3 เซนติเมตร และ 0.65 เซนติเมตร (ใจกลางอาหาร) โดยมีอุณหภูมิที่ใกล้ผิวเท่ากับจุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศคือ 100 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 200 วินาที และคงที่ที่อุณหภูมิจุดเดือดเป็นเวลาประมาณ 40 วินาที ก่อนที่อุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เข้าใกล้อุณหภูมิของน้ำมัน มีอุณหภูมิสุดท้ายที่สภาวะคงที่ (steady state) เท่ากับ 110 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิที่ใจกลางอาหารมีอุณหภูมิกว่าที่อุณหภูมิจุดเดือด

รูปที่ 6.1ข เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำมัน 140 องศาเซลเซียสในการทอดชิ้นมันฝรั่งที่มีความดันบรรยากาศ พบว่า อุณหภูมิภายในอาหารที่ตำแหน่งใกล้ผิวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดเดือดได้เร็วกว่าการทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นั่นคือใช้เวลาเพียง 150 วินาทีและคงที่ที่ 100 องศา

เซลเซียส ประมาณ 30 วินาที ที่สภาวะคงที่มีอุณหภูมิสุดท้ายที่ใกล้เคียงเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ส่วนใจกลางอาหารมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดเล็กน้อย

รูปที่ 6.1ค เป็นการทอดมันฝรั่งในอุณหภูมิน้ำมัน 160 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใกล้ผิวสู่จุดเดือดอย่างรวดเร็วภายใน 60 วินาทีและคงที่ที่อุณหภูมินี้ 20 วินาที จากนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จนคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส ที่ใจกลางอาหารมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสเล็กน้อย

จากรูปที่ 6.1 อธิบายผลของอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในอาหารได้ดังนี้ พบว่าเมื่ออุณหภูมิน้ำมันสูงขึ้น ระยะเวลาที่อุณหภูมิอาหารที่ตำแหน่งใกล้ผิวหน้ามีอุณหภูมิสูงถึงจุดเดือดจะเร็วขึ้น นั่นคือมีอุณหภูมิถึงจุดเดือดเมื่อเวลาผ่านไป 200 วินาที, 150 วินาที และ 60 วินาที ที่อุณหภูมิน้ำมันเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (heat convection) จากน้ำมันมายังผิวหน้าอาหาร อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำมันกับอุณหภูมิที่ผิวหน้าอาหารและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว (surface heat transfer coefficient) ส่วนที่ใจกลางอาหารและตำแหน่งห่างจากผิวหน้า 0.3 เซนติเมตร มีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (heat conduction) ภายในชิ้นอาหาร ความร้อนจะถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าคือที่ผิวหน้าเข้ามาสู่ภายใน หากที่ผิวหน้ามีอุณหภูมิสูง มีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางอาหารมากทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นอาหาร และค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของอาหาร ในช่วงที่อุณหภูมิที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือด เรียกว่าเป็นช่วง initial heating period ซึ่งยังไม่มีภาระของน้ำเกิดขึ้น หลังจากผิวหน้ามีอุณหภูมิถึงจุดเดือด ก็จะเริ่มมีการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของอาหารอุณหภูมิในช่วงนี้คงที่อยู่ระยะหนึ่ง เรียกว่า constant rate period เนื่องจากในอาหารมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักและมีตัวถูกละลายปะปนอยู่ด้วยในระดับหนึ่ง ดังนั้นจุดเดือดของของเหลวจึงสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ เมื่อน้ำระเหยออกไปปริมาณหนึ่ง ความเข้มข้นของของเหลวจึงมากขึ้น ทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือด 100 องศาเซลเซียส เมื่ออาหารมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพเกิดขึ้น เช่น การเกิด crust formation และ gelatinization ของแป้ง มีการดูดซับน้ำมันเข้าสะสมอยู่บริเวณ crust จึงทำให้อุณหภูมิที่ใกล้ผิวหน้าของอาหารมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิของน้ำมัน ช่วงนี้เรียกว่า falling rate period เป็นช่วงเวลาที่ยาวนานที่สุดในกระบวนการทอด และอุณหภูมิที่ใจกลางอาหารได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือด

จากงานวิจัยของ Farkas และคณะ[28] และ Gamble และคณะ[9] กล่าวว่า น้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหารสะสมอยู่ในส่วนของ crust เกือบทั้งหมด ดังนั้นอุณหภูมิของ crust จึงควรเป็นอุณหภูมิของน้ำมันหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำมัน ในงานวิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิที่

ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 เซนติเมตร ซึ่งจุดนี้ไม่ใช่ crust เพราะผลจากการทดลองความหนาของ crust ที่วัดได้ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่า 0.5-0.8 มิลลิเมตร โดยประมาณ ที่ตำแหน่งห่างจากผิวหน้า 0.1 เซนติเมตร จึงเป็นส่วนของ core อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันกับอุณหภูมิของน้ำในอาหาร และเนื่องมาจากความเป็นรูปทรงของมันฝรั่ง ทำให้น้ำที่ระเหยกลายเป็นไอบางส่วนถูกกักอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น จะกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวด ซึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าจุดเดือดของน้ำ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันและอุณหภูมิของชิ้นมันฝรั่งที่ตำแหน่งใกล้ผิวนั้นมีค่าประมาณ 20 องศาเซลเซียส ทั้งที่ความดันปกติมีความแตกต่างของอุณหภูมิเพียง 10 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิน้ำมันเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส ในการทอดที่สภาวะสุญญากาศ มีความแตกต่างกัน 25 องศาเซลเซียส

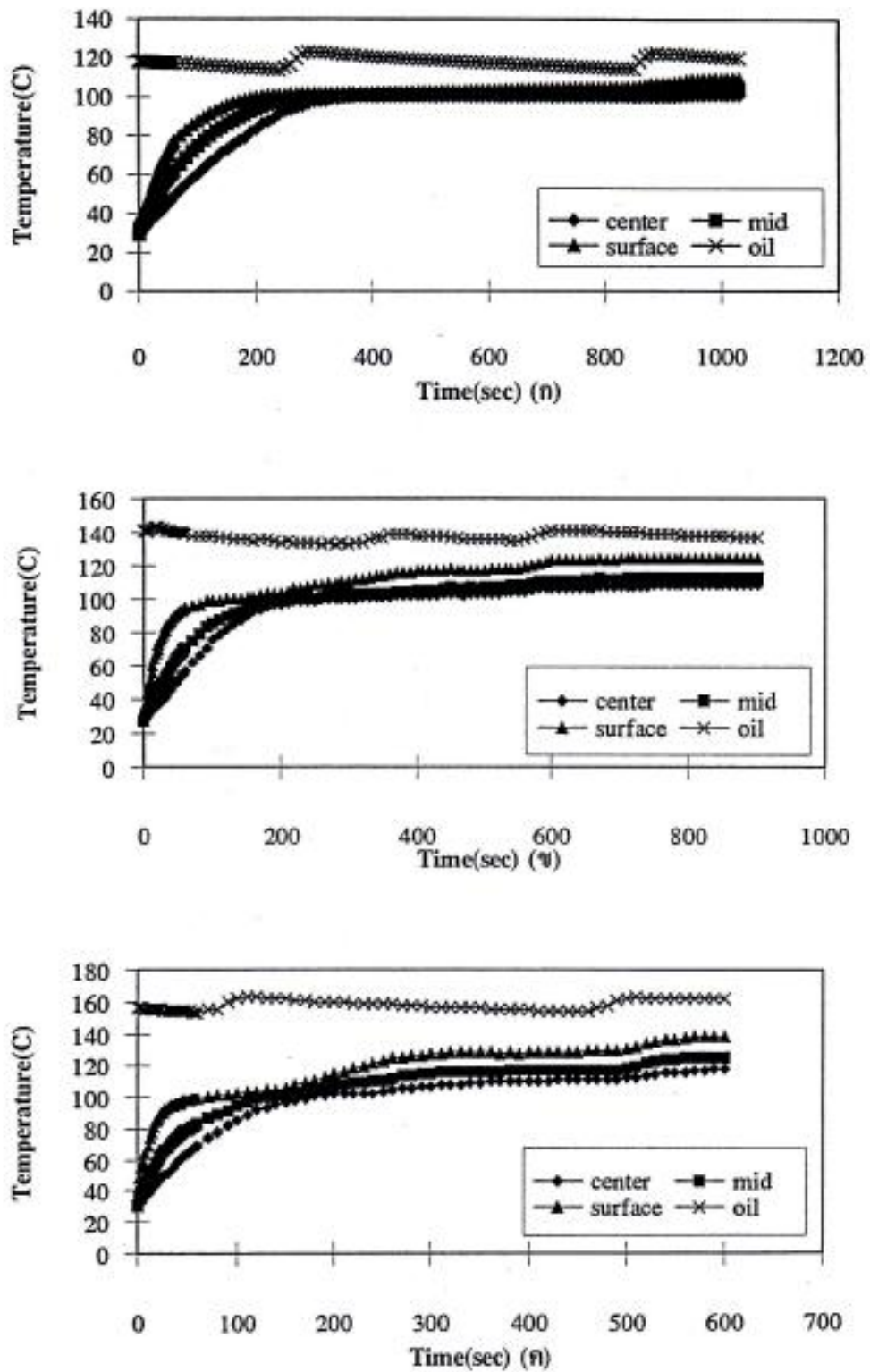
ผลของความดันขณะทอดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแผ่นมันฝรั่งที่มีความหนา 1.3 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร เมื่อทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 มิลลิเมตรปรอท) และความดันบรรยากาศ (760 มิลลิเมตรปรอท) เนื่องจากที่ความดัน 270 มิลลิเมตรปรอท จุดเดือดของน้ำเท่ากับ 73 องศาเซลเซียส ดังนั้นน้ำในอาหารจึงระเหยได้ที่อุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิด gelatinization ของแป้งที่อยู่ภายในชิ้นมันฝรั่งได้ ดังนั้นการทอดชิ้นมันฝรั่งที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ จึงมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แตกต่างจากการทอดที่ความดันบรรยากาศ อันเป็นผลมาจากการลดจุดเดือดของน้ำในอาหาร น้ำจึงสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ทอดที่ความดันบรรยากาศ พบว่า อุณหภูมิของอาหารที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 เซนติเมตร จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ประมาณ 70-75 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นจุดเดือดของน้ำในช่วงสั้นๆ และเพิ่มสูงขึ้นอีกจนถึงระดับหนึ่งและคงที่ที่อุณหภูมินั้น

เปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชิ้นมันฝรั่งที่ความดันบรรยากาศ และความดันต่ำกว่าบรรยากาศ พบว่าการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ในเครื่องทอดสุญญากาศมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ ใกล้ผิว กึ่งกลาง และใจกลางอาหาร ซึ่งอยู่ลึกจากผิวเข้าไป 0.1 เซนติเมตร, 0.3 เซนติเมตร และ 0.65 เซนติเมตร ตามลำดับ ต่างไปจากการทอดที่ความดันปกติ อุณหภูมิภายในชิ้นมันฝรั่งซึ่งทอดในความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เข้าสู่จุดเดือดของน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 73 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลานั้น ๆ เพียง 40 วินาที, 30 วินาที และ 12 วินาที เท่านั้น เมื่อทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ(รูปที่ 6.2) เปรียบเทียบการทอดที่ความดันบรรยากาศที่มีจุดเดือดของน้ำเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีช่วง initial heating period ใช้เวลาประมาณ 60-200 วินาที สรุปได้ว่าในการทอดที่ความดันต่ำนั้นช่วงเวลาที่อุณหภูมิของอาหารเพิ่มสูงขึ้นจนเท่ากับจุดเดื่อนั้นจะสั้นกว่าการทอดที่ความดันปกติ มีช่วง initial heating period ในกระบวนการทอดสั้นกว่า ดังนั้นจึงมีการระเหยของน้ำได้เร็วกว่าเมื่อทอดที่ความดันปกติ อุณหภูมิภายในชิ้นมันฝรั่งที่ตำแหน่งห่างจากผิวหน้า 0.1 เซนติเมตร เมื่อทอดในน้ำมัน 140 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส (รูปที่ 6.2ข และ 6.2ค)

อาหารมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และมีการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าออกไปเร็วมาก จึงไม่พบว่ามีช่วง constant rate period เกิดขึ้นเลย

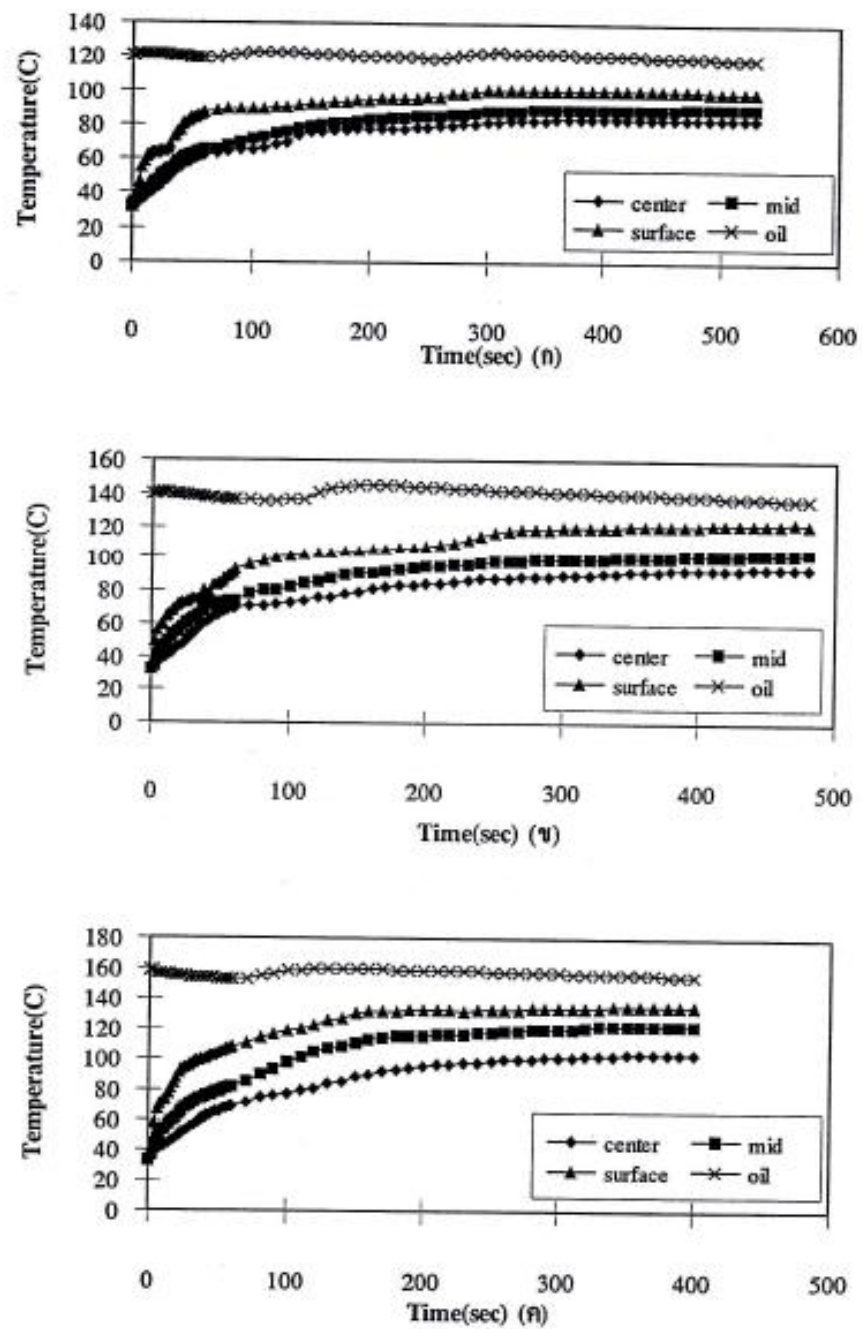
ผลของขนาดรูปร่าง (dimension) ทดลองโดยใช้ตัวอย่าง คือ cubed potatoes ขนาด 1.3 เซนติเมตร มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 10.14 ตารางเซนติเมตร และมีปริมาตร 2.20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นจึงมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเท่ากับ 4.61 เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็น slab ซึ่งมีพื้นที่ผิว ปริมาตร และสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร เท่ากับ 50.19 ตารางเซนติเมตร 20.68 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 2.43 ตามลำดับ cubed potatoes มีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่า slab potatoes เนื่องจาก cubed potatoes มีการถ่ายเทความร้อนจากทุก ๆ ด้าน ที่ใกล้ผิวหน้าอาหารได้รับความร้อนจากทั้งด้านบนและด้านล่าง จึงมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้เร็วมาก ส่วน slab มีการถ่ายเทความร้อนจากด้านบนมากกว่าด้านล่างมาก ๆ อุณหภูมิที่ใกล้ผิวซึ่งอยู่ห่างจากผิวหน้าของอาหาร 0.1 เซนติเมตรจึงมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิช้ากว่า เมื่อนำ cubed potatoes มาทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ มี initial heating period เท่ากับ 80, 30 และ 20 วินาที ตามลำดับ (รูปที่ 6.3) และเมื่อทอดที่ความดันต่ำ 270 มิลลิเมตรปรอท พบว่ามีช่วงนี้สั้นมาก โดยใช้เวลาเพียง 10 วินาทีเท่านั้น (รูปที่ 6.4) ช่วง constant rate period ในการทอดที่ความดันปกติใช้เวลาประมาณ 20-50 วินาที ส่วนที่ความดันต่ำไม่พบช่วงนี้เลย อุณหภูมิที่ใจกลางอาหารสำหรับการทอดที่ความดันปกติมีช่วงที่อุณหภูมิคงที่ 40-60 วินาที แต่ไม่พบว่ามีช่วงอุณหภูมิคงที่ในการทอดที่ความดันต่ำ อุณหภูมิสุดท้ายที่ใกล้ผิวเป็น 110, 130 และ 140 องศาเซลเซียส เทียบกับอุณหภูมิที่ใจกลางอาหารเป็น 100, 120 และ 120 องศาเซลเซียส จากการทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าว สuggest ได้ว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้ผิวนั้นมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิน้ำมันกับอุณหภูมิที่ใจกลางอาหาร โดยมีอุณหภูมิสุดท้ายในผลิตภัณฑ์ทั้งที่ใกล้ผิวหน้าอาหารใกล้เคียงกับการทอดที่ความดันปกติ

ระยะเวลาในแต่ละช่วงของการทอดขึ้นกับขนาดและรูปร่างของชิ้นอาหาร ความดันและอุณหภูมิของน้ำมัน หากใช้อุณหภูมิน้ำมันสูงและทอดในสถานะสุญญากาศ ไม่ปรากฏว่ามีช่วง constant rate period ในกระบวนการทอด ช่วงหลังเป็น falling rate period มีระยะเวลานานมาก เมื่อใช้เวลานาน ๆ อุณหภูมิภายในอาหารเข้าสู่ steady state ซึ่งมีอุณหภูมิสุดท้ายสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำมัน



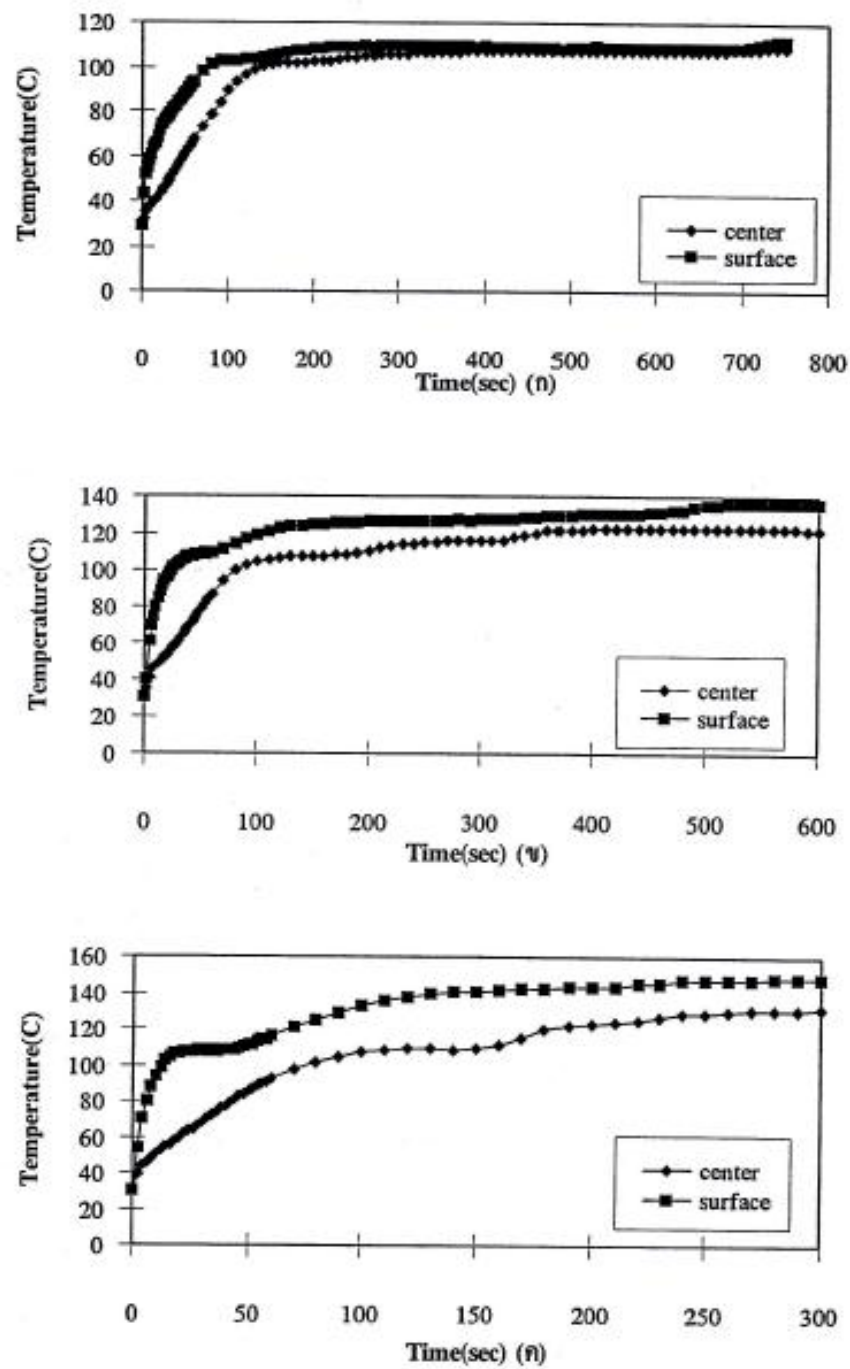
รูปที่ 6.1

อุณหภูมิภายใน slab potatoes หนา 1.3 cm ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm, 0.3 cm และ 0.65 cm ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C (ก), 140°C (ข) และ 160°C (ค) ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)



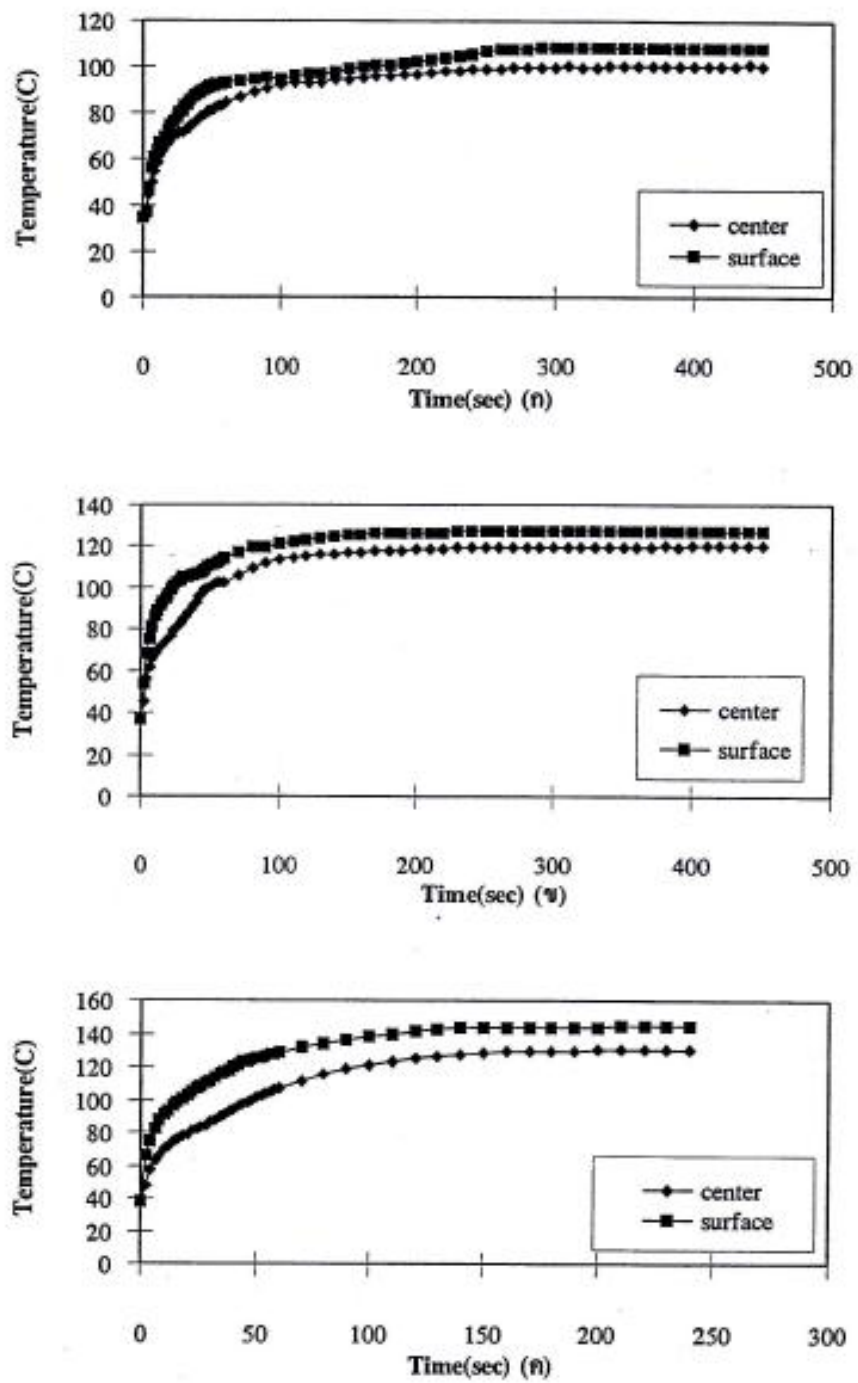
รูปที่ 6.2

อุณหภูมิภายใน slab potatoes หนา 1.3 cm ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm, 0.3 cm และ 0.65 cm ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C (ก), 140°C (ข) และ 160°C (ค) ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg)



รูปที่ 6.3

อุณหภูมิภายใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm และใจกลางอาหาร เมื่อทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C(ก), 140°C(ข) และ 160°C(ค) ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)



รูปที่ 6.4

อุณหภูมิภายใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm และใจกลางอาหาร เมื่อทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120°C(ก), 140°C(ข) และ 160°C(ค) ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg)

6.1.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น

รูปที่ 6.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งทอดรูปร่าง slab หน้า 1.3 เซนติเมตร ทอดที่ความดันบรรยากาศ ในน้ำมันอุณหภูมิ 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วง 60 วินาทีแรก ปริมาณความชื้นของอาหารมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวหน้าอาหารยังคงมีค่าต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ จึงยังไม่มีการระเหยของน้ำที่ผิว เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำมันต่ำ มีการสูญเสียความชื้นน้อยกว่าการใช้น้ำมันอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิน้ำมันเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นอย่างชัดเจนเมื่อเวลาเปลี่ยนไป 240 วินาที และที่เวลาการทอด 750 วินาที ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณความชื้นสูงถึง 3.8 (มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) มีการสูญเสียความชื้นอย่างชัดเจน ที่เวลา 180 วินาที และ 120 วินาที และผลิตภัณฑ์ที่นำมาทอดเป็นเวลา 750 วินาที มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 2.3 (มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) และ 2.0 (มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) มีความชื้นลดลง 41.01% และ 51.55% ตามลำดับ

การสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์อธิบายได้ว่า ก่อนนำมันฝรั่งไปทอด ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของมันฝรั่งมีความสม่ำเสมอทั้งชิ้น และที่ผิวหน้ามีน้ำอิสระอยู่ปริมาณหนึ่ง เมื่อจุ่มชิ้นอาหารลงในน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง ผิวหน้าของอาหารจะได้รับความร้อนที่ถ่ายเทมาจากตัวกลางให้ความร้อนคือน้ำมัน โดยการพาความร้อน ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเท่ากับจุดเดือดของน้ำ ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสหรืออาจสูงกว่าเล็กน้อย สำหรับการทอดที่ความดันบรรยากาศ น้ำที่ผิวหน้าของอาหารจะระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในช่วงแรกเป็นการพาความร้อน ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำมันกับอุณหภูมิที่ผิวหน้าอาหารและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว ดังนั้นเมื่อใช้น้ำมันอุณหภูมิสูง จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ผิวหน้าของอาหารได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดและมีการระเหยของน้ำได้เร็วกว่า จึงมีปริมาณความชื้นลดลงมากกว่าการทอดในน้ำมันอุณหภูมิต่ำเปรียบเทียบกับเวลาการทอดเท่ากัน จากนั้นผิวหน้าของอาหารจะเริ่มแห้ง ความชื้นที่ผิวหน้าลดลง มีเกรเดียนต์ของความชื้นเกิดขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ภายในอาหารเคลื่อนที่มายังผิวหน้า โดยมีกลไกของการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในมายังผิวหน้าของอาหารหลายรูปแบบ แต่ในอาหารโยส่วนใหญ่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะของการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความชื้นภายในอาหาร การระเหยของน้ำในเวลาต่อมาจึงถูกควบคุมโดยการแพร่ของน้ำจากภายในนั่นเอง

เมื่อทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ พบว่าการสูญเสียความชื้นผลิตภัณฑ์มีมากกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศ ทั้งที่อุณหภูมิน้ำมันเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส (รูปที่ 6.6) ที่สถานะสุญญากาศ อุณหภูมิที่ใกล้ผิวหน้าอาหารเท่ากับจุดเดือดของน้ำประมาณ 73.3 องศาเซลเซียสอย่างรวดเร็วภายใน 40 วินาที จึงทำให้ปริมาณความชื้นลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำตั้งแต่ 60 วินาทีแรก โดยมีปริมาณความชื้นเท่ากับ 4.7 (มาตรฐานน้ำหนักแห้ง), 4.1 (มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) และ 3.9 (มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) เมื่อทอดในน้ำมันอุณหภูมิ

120 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดเป็นเวลา 750 วินาที มีปริมาณความชื้น 2.6(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง), 1.8(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) และ 1.4(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) มีการสูญเสียความชื้นเท่ากับ 39.61%, 54.23% และ 54.43% ที่เวลาเดียวกัน ดังนั้นการทอดในสภาวะสุญญากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าการทอดที่ความดันปกติ เนื่องจากอาหารมีอุณหภูมิถึงจุดเดือดและมีการระเหยของน้ำเร็วกว่า

สำหรับมันฝรั่งที่มีรูปร่างเป็น cube ขนาด 1.3 เซนติเมตร เมื่อนำไปทอดภายใต้ความดันบรรยากาศ มีการสูญเสียความชื้นใน 60 วินาทีแรก 3.09%, 11.34% และ 23.71%(รูปที่ 6.7) เปรียบเทียบกับการทอดที่สุญญากาศ (รูปที่ 6.8) ซึ่งเริ่มมีการระเหยของน้ำที่เวลา 30 วินาที มีการสูญเสียความชื้นเท่ากับ 7.22%, 21.65% และ 31.96% ที่ระดับอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำมันเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส มีปริมาณความชื้นลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 120 วินาที ในการทอดที่ความดันปกติ และ 90 วินาที สำหรับการทอดที่สุญญากาศ

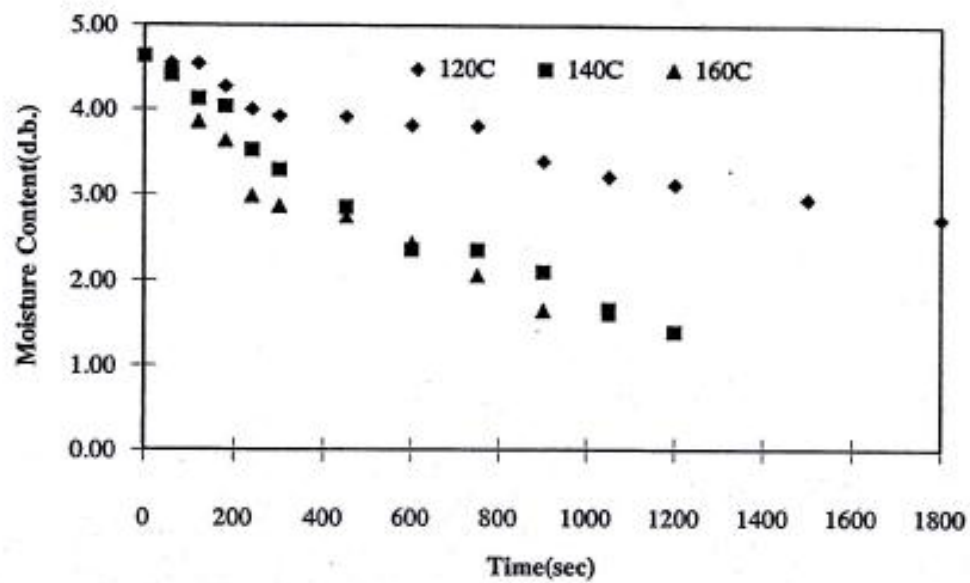
6.1.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมัน

รูปที่ 6.9 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการทอด slab potatoes ที่ความดันบรรยากาศในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ พบว่าในช่วงแรกของการทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และ 140 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์น้อยมาก และเริ่มมีปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมากที่เวลาการทอด 300 วินาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และ 180 วินาที ที่อุณหภูมิน้ำมัน 140 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิน้ำมันเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหารตั้งแต่ 60 วินาทีแรกของการทอด ความแตกต่างของปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ซึ่งทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส มีน้อยมากในช่วงเวลา 180-750 วินาที แต่หลังจากนั้นที่เวลาการทอด 900 วินาที และ 1050 วินาทีในน้ำมันอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นสูงมาก เนื่องจากอาหารได้รับความร้อนสูงมาก และผิวหน้าของอาหารไหม้เกรียมอย่างรวดเร็ว โครงสร้างของอาหารถูกทำลายจนผิดปกติไป ทำให้น้ำมันเข้าไปสะสมอยู่ตามเซลล์ที่ถูกทำลายเหล่านี้ ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหารจึงมีมากกว่าปริมาณน้ำที่สูญเสียไป โดยปริมาณน้ำมันเท่ากับ 32.35%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) และ 37.39%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) ที่เวลาการทอดเป็น 900 วินาที และ 1050 วินาที มันฝรั่งทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ มีปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์สุดท้าย 7.36%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) ในขณะที่มีการสูญเสียน้ำเพียง 29.07%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง)

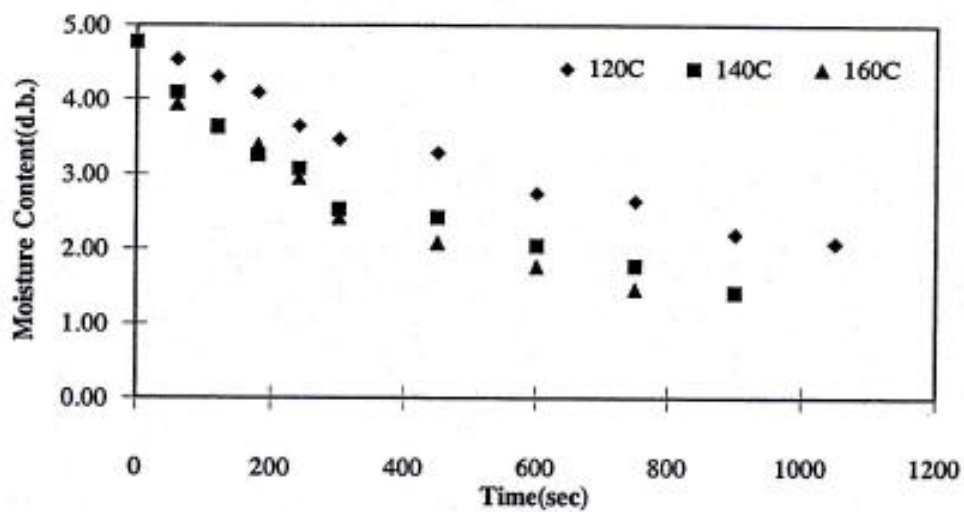
การทอดภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ รูปที่ 6.10 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งเมื่อทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส พบว่ามันฝรั่งทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 140 และ 160 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่เวลาการทอดเป็น 60 วินาที และมีปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับใกล้เคียงกัน แต่หากทอดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 750 วินาที และที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 900 วินาที ผลิตภัณฑ์มีผิวหน้าไหม้เกรียมและมีปริมาณน้ำมันสูงมาก เนื่องจากโครงสร้างของอาหารถูกทำลายจนผิดปกติ และน้ำมันได้เข้าไปอยู่ในเซลล์ที่ถูกทำลายเหล่านั้น ส่วนที่อุณหภูมิน้ำมันเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส การทอดในสภาวะสุญญากาศมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันมากกว่าการทอดที่ความดันปกติเปรียบเทียบที่เวลาทอดเท่ากัน เนื่องจากการสูญเสียน้ำมันมากกว่าคือ ที่เวลา 1050 วินาที มีการสูญเสียไป 47.22%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) และมีปริมาณน้ำมันเท่ากับ 22.84%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง)

รูปที่ 6.11 เป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ cubed potatoes ซึ่งทอดภายใต้ความดันบรรยากาศ ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเมื่อทอดเป็นเวลา 450 วินาที มีปริมาณน้ำมันเท่ากับ 42.63%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) เมื่อมีการสูญเสียน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ 62.47%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) และที่เวลาเดียวกันนี้เมื่อทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำมันเท่ากับ 23.78%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) ขณะที่มีการสูญเสีย 37.53%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) และที่ระดับอุณหภูมินี้เมื่อใช้เวลาการทอดมากกว่า 450 วินาที ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย มีค่าค่อนข้างคงที่จนถึง 900 วินาที และที่อุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำมัน 33.84%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง) โดยมีการสูญเสียน้ำออกไป 59.75%(มาตรฐานน้ำหนักแห้ง)

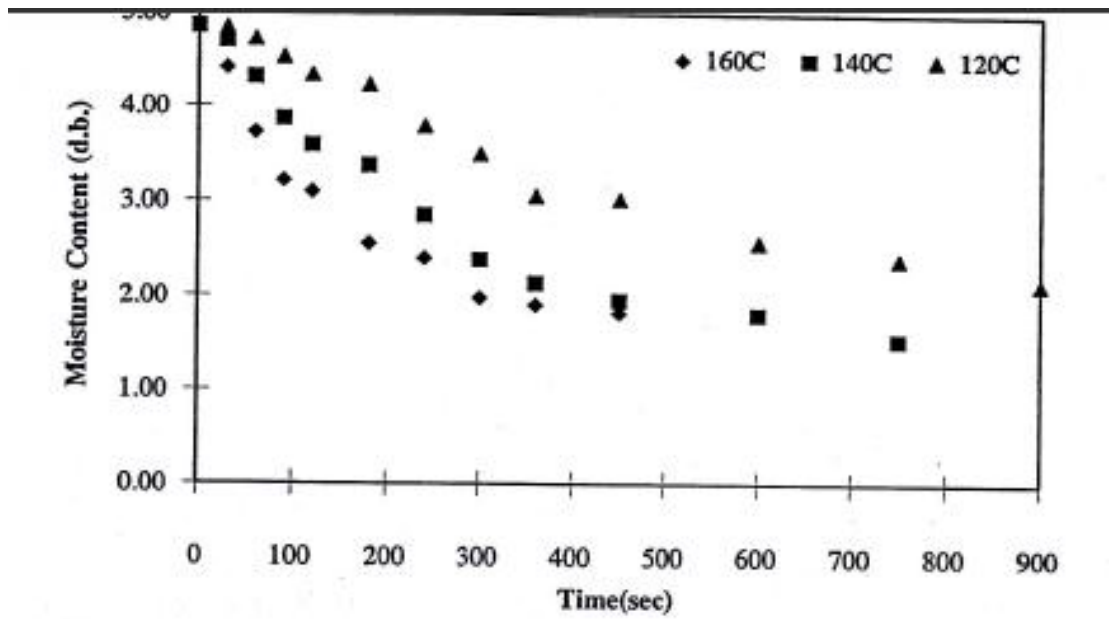
การทอด cubed potatoes ในสภาวะสุญญากาศ(รูปที่ 6.12) พบว่ามีการดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์เร็วมาก เมื่อทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที มีปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ 14.55% และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในช่วงเวลา 30-90 วินาที ส่วนการทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำมันเท่ากับ 8.48% และเวลาการทอดมากกว่า 180 วินาทีขึ้นไป ปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 140 และ 160 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันน้อยมาก และที่เวลาการทอด 450 วินาที น้ำมันในอาหารมีปริมาณสูงถึง 65.33% และ 70.73% ตามลำดับ จะได้เห็นได้ว่าปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปมากกว่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย เมื่ออาหารได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานจนผิวหน้าส่วนนอกไหม้เกรียม



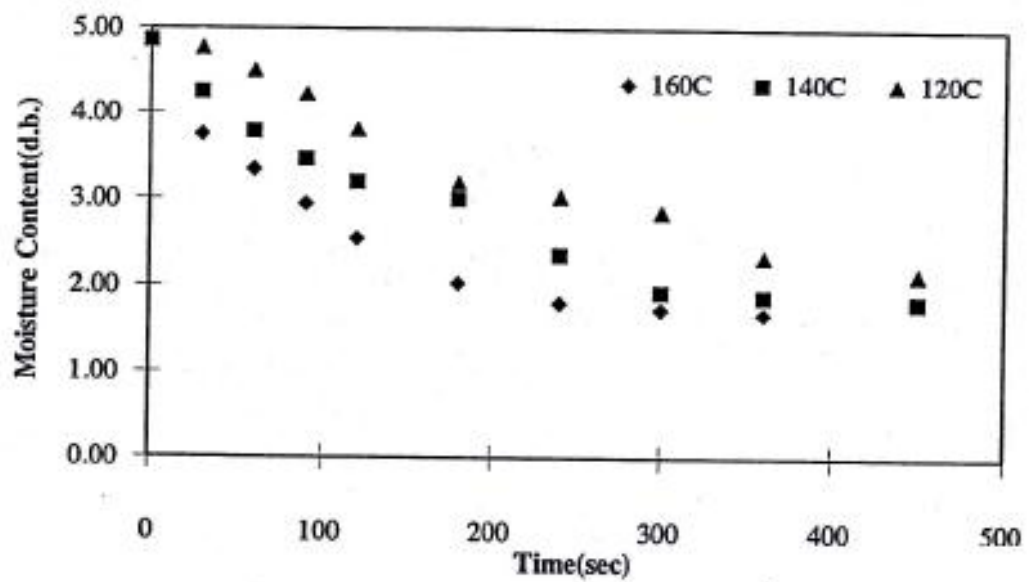
รูปที่ 6.5 ปริมาณความชื้นใน slab potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)



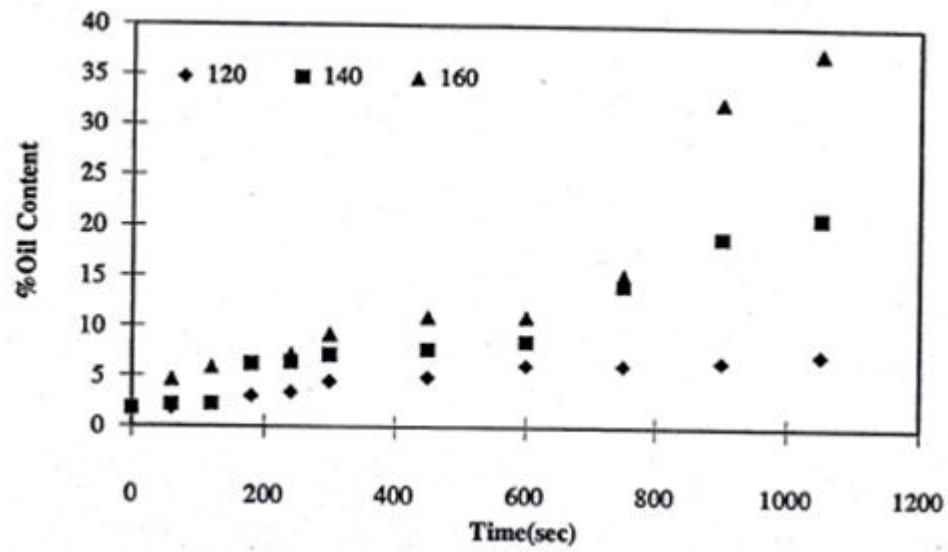
รูปที่ 6.6 ปริมาณความชื้นใน slab potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg)



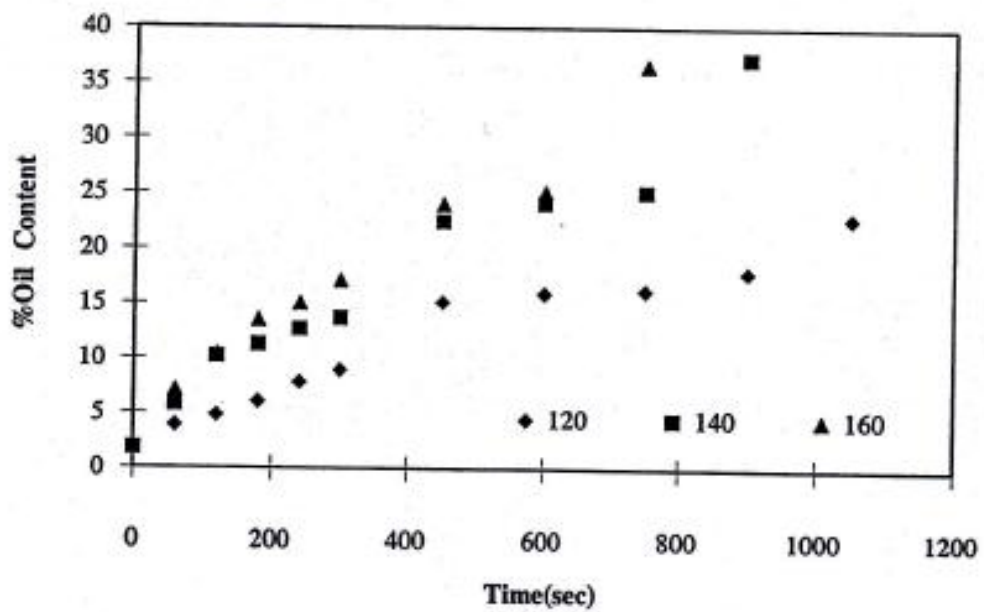
รูปที่ 6.7 ปริมาณความชื้นใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)



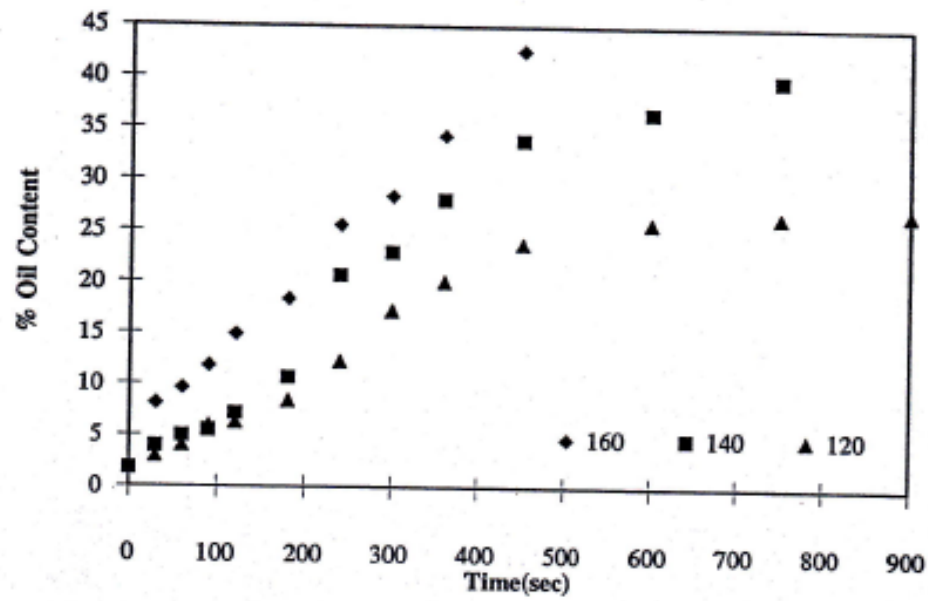
รูปที่ 6.8 ปริมาณความชื้นใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg)



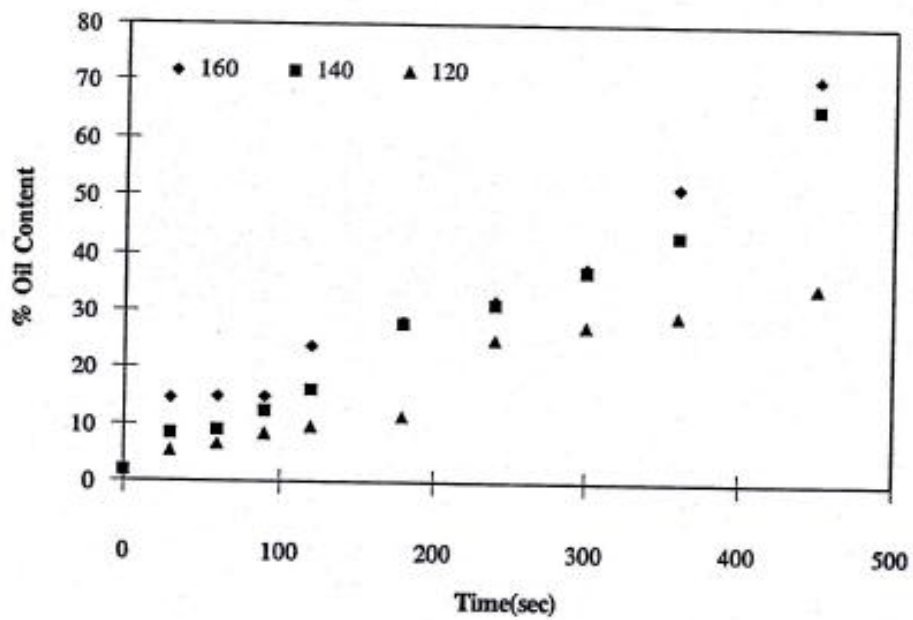
รูปที่ 6.9 ปริมาณน้ำมันใน slab potatoes หนา 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)



รูปที่ 6.10 ปริมาณน้ำมันใน slab potatoes หนา 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg)



รูปที่ 6.11 ปริมาณน้ำมันใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg)



รูปที่ 6.12 ปริมาณน้ำมันใน cubed potatoes หน้า 1.3 cm หลังการทอดในน้ำมันอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 mmHg)

6.2 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของการถ่ายเทความร้อนและมวลในการทอดแบบน้ำมันท่วม

เมื่อพิจารณาลักษณะโดยทั่วไปของอาหารทอดที่ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ surface, crust และ core และระหว่างส่วน crust และ core ถูกแบ่งแยกด้วย interface ที่เคลื่อนที่จากผิวหน้าเข้าสู่ภายในเนื่องจากการระเหยของน้ำ จึงได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลกับตัวอย่างมันฝรั่งที่มีรูปร่างเป็น slab ที่มีความหนา 1.3 เซนติเมตร โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ crust และ core

6.2.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนใน Core region

$$T = T_{bp} + \frac{4}{\pi} (T_0 - T_{bp}) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos \left[\frac{(2n+1)\pi x}{2X(t)} \right] \exp \left[\frac{-\alpha_{eff} (2n+1)^2 \pi^2 t}{4X(t)^2} \right] \quad (4.36)$$

สมการที่ 4.36 เป็นคำตอบของสมการการถ่ายเทความร้อนในส่วน core แต่เนื่องจากในการศึกษาผลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์พบว่าอาหารทอดนั้นมีความหนาของ crust มีขนาดบางมาก ส่วนของ core จึงมี fixed boundary นั่นคือ $X(t) = L$ จากนั้นใช้ Non-linear regression หาค่าพารามิเตอร์ซึ่งในที่นี้คือค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวม (effective thermal diffusivity) จากสมการที่ 4.36 และผลจากการทดลอง ได้ผลแสดงในรูปที่ 6.13 เมื่อทอดที่ความดันบรรยากาศ (760 มม.ปรอท) และรูปที่ 6.14 เมื่อทอดในสภาวะสุญญากาศ (270 มม.ปรอท) ซึ่งมีค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวม (α_{eff}) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวม (α_{eff}) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ในกระบวนการทอดที่สภาวะการผลิตต่าง ๆ

อุณหภูมิ	ความดัน 270 มม.ปรอท		ความดัน 760 มม.ปรอท	
(องศาเซลเซียส)	$\alpha_{eff} \text{ (m}^2/\text{s)}$	R^2	$\alpha_{eff} \text{ (m}^2/\text{s)}$	R^2
120	4.17×10^{-7}	0.9753	1.61×10^{-7}	0.9910
140	5.87×10^{-7}	0.9907	2.25×10^{-7}	0.9931
160	6.34×10^{-7}	0.9802	3.36×10^{-7}	0.9828

ค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวมของผลิตภัณฑ์มันฝรั่ง สำหรับการทอดภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศมีค่าสูงกว่าที่ความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เนื่องจากการ simplify ได้พิจารณาให้ระบบเป็น non-moving boundary problem เพราะ crust มีความหนาน้อยมาก แต่สำหรับการทอดมันฝรั่งในสภาวะสุญญากาศนั้น พบว่า ผลิตภัณฑ์มีอัตราการเกิด crust สูงกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2 เท่า การตั้งสมมติฐานให้ $X(t) = L$ ในกรณีที่เป็นการทอดสุญญากาศจึงทำให้การคำนวณค่าการแพร่กระจายของความร้อนโดยรวมนั้นได้ค่าที่สูงกว่าการทอดที่ความดันปกติ เพราะ crust/core interface มีการเคลื่อนตัวเข้าไปในอัตราสูง ดังนั้นการศึกษากายภาพความร้อนในกระบวนการทอดภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ จึงควรใช้ moving boundary problem ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในอาหารจะมีความถูกต้องมากกว่า

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแพร่กระจายความร้อนกับอุณหภูมิของน้ำมันเป็นไปตามสมการของ Arrhenius (สมการที่ 6.1)

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_0 \exp(-E_a / RT) \quad (6.1)$$

เมื่อ α_0 = ค่าคงที่
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 J/mol K
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 E_a = พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha_{\text{eff}}$ กับ $1/T$ (รูปที่ 6.15) จากค่าความชันสามารถหาพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ได้เท่ากับ 26 และ 14.96 kJ/mol ที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ตามลำดับ ค่าการแพร่กระจายความร้อนโดยรวมของผลิตภัณฑ์มันฝรั่งที่ทอดในสภาวะปกติมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ทอดในสภาวะสุญญากาศ เมื่อทอดในน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น

6.2.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวลใน Core region

การถ่ายเทมวลในกระบวนการทอดเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ การสูญเสียความชื้นและการดูดซับน้ำมัน แต่เนื่องจากในส่วนของ core ประกอบด้วยน้ำและของแข็ง ไม่มีการดูดซับของน้ำมัน ดังนั้นการถ่ายเทมวลใน core จึงมีเฉพาะสมการการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียว

$$\frac{\bar{C}_\beta}{C_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-D_{\text{eff}} (2n+1)^2 \pi^2 t}{4X(t)^2} \right] \quad (4.38)$$

สมการที่ 4.38 นี้เป็นคำตอบของสมการการถ่ายเทความชื้นในส่วน core เมื่อความหนาของ crust น้อยมากๆ เปรียบเทียบกับความหนาของชั้นมันฝรั่ง จึงสมมุติให้ $X(t) = L$ จากนั้นใช้ Non-linear regression เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งในที่นี้คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (Effective moisture diffusivity) จากสมการที่ 4.38 และผลการทดลอง เมื่อทอดที่ความดันบรรยากาศ (760 มม.ปรอท) และที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (270 มม.ปรอท) ได้ผลแสดงในรูปที่ 6.16 และ 6.17 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (D_{eff}) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ตามตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (D_{eff}) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ในกระบวนการทอดที่สภาวะการผลิตต่าง ๆ

อุณหภูมิ	ความดัน 270 มม.ปรอท		ความดัน 760 มม.ปรอท	
(องศาเซลเซียส)	$D_{\text{eff}} \text{ (m}^2/\text{s)}$	R^2	$D_{\text{eff}} \text{ (m}^2/\text{s)}$	R^2
120	5.83×10^{-9}	0.9190	2.23×10^{-9}	0.9419
140	1.27×10^{-8}	0.9829	9.44×10^{-9}	0.9597
160	1.49×10^{-8}	0.9586	1.09×10^{-8}	0.9517

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิของน้ำมันเป็นไปตามสมการของ Arrhenius (สมการที่ 6.2)

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp(-E_a / RT) \quad D_{\text{eff}} = D_0 \exp(-E_a / RT) \quad (6.2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln D_{\text{eff}}$ กับ $1/T$ (รูปที่ 6.18) จากค่าความชันสามารถหาพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ได้เท่ากับ 56.93 และ 33.57 กิโลจูล/โมล ที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศตามลำดับ แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น ค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนโดยรวมของผลิตภัณฑ์มันฝรั่งในกระบวนการทอดภายใต้ความดันบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

6.2.3 สมการทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนใน Crust region

จากบทที่ 4 ที่กล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดแบบน้ำมันท่วม ได้แบ่งพิจารณาการถ่ายเทความร้อนและมวลของอาหารทอดเป็น 2 ส่วน คือ core และ crust ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกายภาพและความร้อนต่างกัน ระหว่าง 2 ส่วนนี้เป็น moving interface ที่เคลื่อนที่จากผิวหน้าเข้าสู่ภายใน core จากการสมมุติให้ crust มีขนาดบางมาก ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของชิ้นอาหาร และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงกว่าค่าการนำความร้อนของอาหารมาก ๆ ไม่มีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายนอก อุณหภูมิที่ผิวหน้าอาหารจึงเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมัน การถ่ายเทความร้อนภายใน crust เป็นแบบนำความร้อน อุณหภูมิภายใน crust ที่มีน้ำมันสะสมอยู่นั้นจึงเท่ากับอุณหภูมิน้ำมัน จากการทดลองความหนาของ crust ที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 0.5-0.8 มม. ทำให้ไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในส่วนนี้ได้ อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 ซม. ก็ไม่ใช่อุณหภูมิใน crust แต่เป็นส่วนที่ใกล้กับ interface ซึ่งมีอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในอาหารช้ามาก หลังจากที่มีน้ำระเหยออกไปจากคาปิลลารีหรือรูต่าง ๆ ทำให้เกิดช่องว่างภายในเซลล์ มีการเคลื่อนที่ของน้ำมันจากภายนอกเข้าไปสะสมที่ crust และมีการส่งผ่านความร้อนจากน้ำมันที่อยู่ภายใน crust ไปยังส่วนที่เป็น interface และใจกลางอาหาร ทำให้อุณหภูมิในตำแหน่งที่ใกล้กับ interface สูงขึ้น และผลการทดลองที่ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในอาหาร (รูปที่ 6.1 และ 6.2) สังเกตได้ว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 ซม. นั้น มีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิน้ำมันกับอุณหภูมิที่ใจกลางอาหาร โดยมีอุณหภูมิสุดท้ายต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำมันประมาณ 10-20 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่ามีน้ำมันสะสมอยู่ใน crust และทำให้อุณหภูมิของ crust มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันจริง

6.2.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวลใน Crust region

การถ่ายเทมวลใน crust เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำในรูปไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดัน และการเคลื่อนที่ของน้ำมัน เนื่องจากความหนาของ crust ในผลิตภัณฑ์มีความหนาน้อยมาก(0.5-0.8 มม.) เมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นมันฝรั่ง(13 มม.) และหาก crust มีความพรุนสูงเมื่อมีการระเหยของน้ำกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำจึงสามารถผ่านสู่ผิวหน้าอาหารอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการระเหยของน้ำจึงถูกควบคุมโดยการแพร่ของน้ำจากภายใน ฟลักซ์ของไอน้ำในส่วน crust จึงเท่ากับฟลักซ์ของไอน้ำที่แพร่จากส่วน core และระเหยกลายเป็นไอน้ำที่ interface มีงานวิจัยหลายชิ้นอธิบายถึงกลไกการดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์ไว้หลายรูปแบบ เช่น Gamble และคณะ[9] กล่าวว่า การดูดซับน้ำมันเป็นผลมาจากการเข้าไปแทนที่น้ำในส่วนที่ระเหยออกไป(replacement of moisture) โดย

อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังนี้คือ หลังจากที่น้ำระเหยออกไปจนเกิด crust formation ซึ่งเป็นตัวต้านทานการแพร่ของน้ำ(diffusion barrier) น้ำจากภายในอาหารจึงแพร่ออกสู่ภายนอกได้น้อยลง เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำภายในอาหารเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และพยายามเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกทางโครงสร้างของเซลล์ที่ยึดเหนี่ยวกันอย่างหลวม ๆ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพื่อหาทางออกสู่ภายนอกทางคาปิลลารีหรือช่องว่างต่าง ๆ ได้แล้วนั้น ความดันภายในก็จะลดลง ขณะเดียวกันน้ำมันซึ่งเกาะติดอยู่กับผิวหน้าอาหารก็แทรกซึมเข้าสู่อาหาร และไปสะสมอยู่ตามช่องว่างหรือคาปิลลารีขนาดต่าง ๆ ที่น้ำระเหยออกไป แสดงว่าการดูดซับน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างการทอด และได้ชี้แนะเพิ่มเติมว่าปริมาณน้ำมันอาจเพิ่มขึ้นอีกในขณะที่นำอาหารออกจากเครื่องทอด เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำที่ยังเหลืออยู่ภายในอาหารเมื่ออุณหภูมิเย็นลงและความดันภายในลดลง น้ำมันจึงถูกดึงเข้าสู่อาหารพร้อม ๆ กับการควบแน่นของไอน้ำด้วย จากงานวิจัยนี้ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์จึงควรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความชื้นที่สูญเสียไป จากผลการทดลองเมื่อนำค่าปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปพลอตกับปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ซึ่งทอดที่ความดันบรรยากาศ ในน้ำมันอุณหภูมิ 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส(รูปที่ 6.19) เปรียบเทียบการทอดที่ความดันต่ำ (รูปที่ 6.20) พบว่ามีแนวโน้มของความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แต่มี R^2 ค่อนข้างต่ำ และจากความชันของกราฟแต่ละรูปที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของน้ำมันไม่มีผลต่อสัดส่วนของปริมาณน้ำมันกับปริมาณความชื้นที่สูญเสียไป ทั้งที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศ แต่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศพบว่าความชันที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์นี้มีค่าสูงกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2 เท่า จึงเป็นไปได้ว่าความดันมีผลต่อสัดส่วนของปริมาณน้ำมันกับปริมาณความชื้นที่สูญเสียไป

กลไกการดูดซับน้ำมันอีกลักษณะหนึ่งกล่าวว่าการดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์กับการเกิด crust formation เนื่องจากน้ำมันที่ถูกดูดซับส่วนใหญ่สะสมอยู่บริเวณ crust [6][10][16] จึงตั้งสมมุติฐานว่าปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์อยู่ภายใน crust เท่านั้น จากการแยกส่วนของ crust และ core ของผลิตภัณฑ์ซึ่งทอดที่ความดันบรรยากาศ ในน้ำมันอุณหภูมิ 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำมันในส่วน crust มากกว่าในส่วน core ประมาณ 11 เท่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าใน core มีน้ำมันน้อยมาก ๆ น้ำมันส่วนใหญ่อยู่บริเวณ crust ดังนั้นความหนาของ crust ที่เกิดขึ้นสามารถทำนายได้จากปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในผลิตภัณฑ์นั่นเอง จากผลการทำนายความหนาของ crust ในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดในสถานะต่างๆ แสดงในรูปที่ 6.21 ที่ความดันบรรยากาศ และรูปที่ 6.22 ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เปรียบเทียบความหนาของ crust ที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองทอดมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสทั้งที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศ(รูปที่ 6.23) พบว่าความหนาของ crust ที่ทำนายได้มีค่าใกล้เคียงกับที่วัดได้จากการทดลองความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ crust กับเวลาการทอด จากรูปที่ 6.21 และ

6.22 หมายถึง อัตราการเกิด crust ของผลิตภัณฑ์มีค่าดังแสดงในตารางที่ 6.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด crust กับอุณหภูมิของน้ำมันดังรูปที่ 6.24 สรุปได้ว่า อัตราการระเหิด crust มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิของน้ำมันและที่ความดันต่ำ มีอัตราการเกิด crust สูงกว่าความดันปกติ

ตารางที่ 6.3 ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในส่วนต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์มันฝรั่งทอดภายใต้ความดันบรรยากาศ

Oil temperature	%oil content		crust/core	Time of frying
($^{\circ}\text{C}$)	Crust	Core	Ratio	(s)
120	5.82	0.48	12.1	600
140	5.52	0.58	9.6	300
160	6.83	0.58	11.7	240

ตารางที่ 6.4 อัตราการเกิด crust ของผลิตภัณฑ์มันฝรั่งที่ผ่านการทอดในสภาวะการผลิตต่าง ๆ

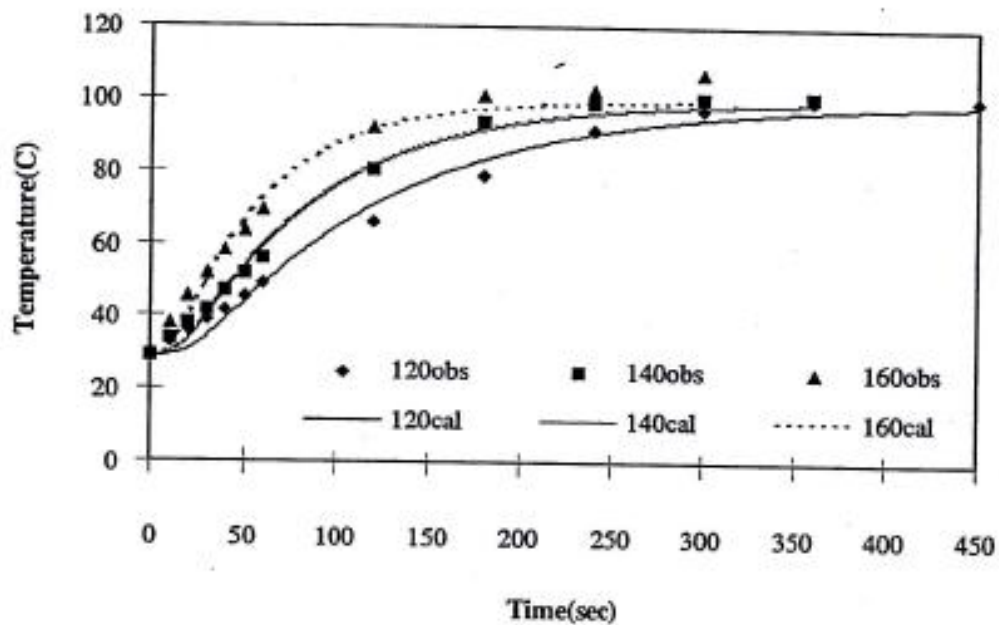
อุณหภูมิน้ำมัน	อัตราการเกิด crust (มม./วินาที)	
(องศาเซลเซียส)	ความดัน 270 มม.ปรอท	ความดัน 760 มม.ปรอท
120	0.003	0.00007
140	0.005	0.002
160	0.006	0.003

จากตารางที่ 6.4 พบว่าในการทอดที่ความดัน 270 มม.ปรอท มีการเคลื่อนที่ของ interface เข้าไปภายในอาหารเนื่องจากการระเหยของน้ำในอัตราที่เร็วกว่าการทอดปกติ

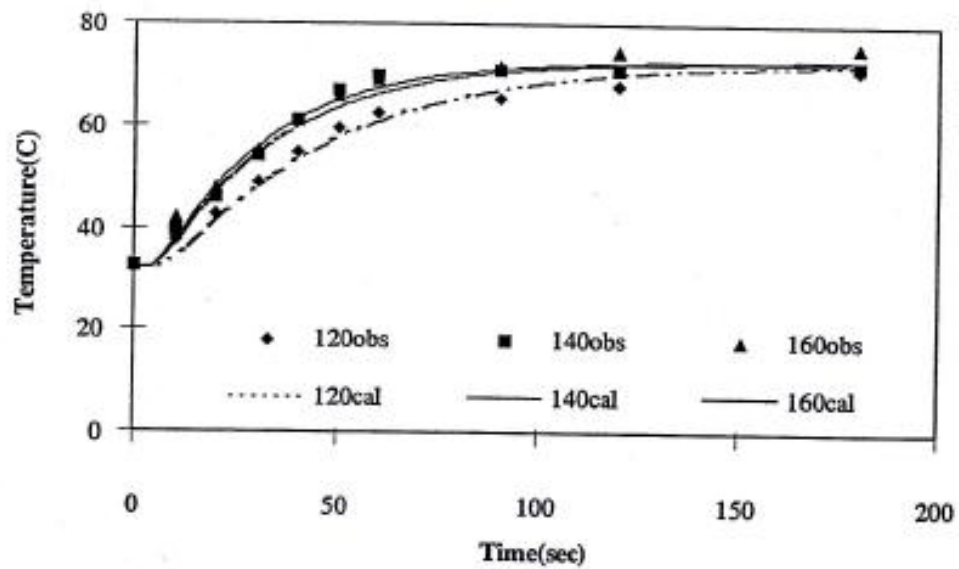
ประมาณ 2 เท่า และเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำมันสูงจะมีอัตราการเกิด crust สูงกว่าการทอดด้วยน้ำมันที่มีอุณหภูมิต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด crust ของผลิตภัณฑ์มันฝรั่งกับอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอดเป็นเส้นตรง ตามสมการที่ 6.3 และ 6.4 เมื่อทอดที่ความดัน 760 และ 270 มิลลิเมตรปรอทตามลำดับ

$$U = 7.0 \times 10^{-5} T_{\phi} - 0.0086, R^2 = 0.9675 \quad (6.3)$$

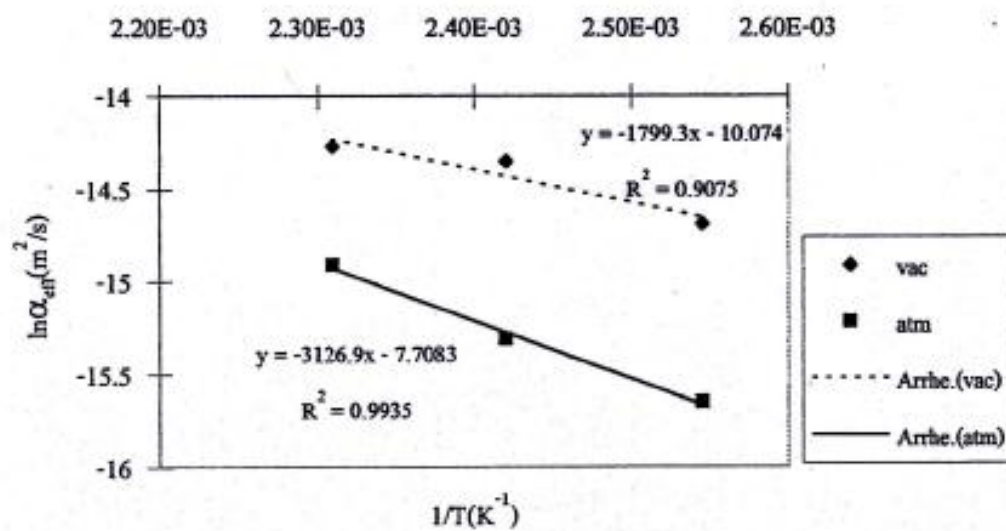
$$U = 8.0 \times 10^{-5} T_{\phi} - 0.0058, R^2 = 0.9643 \quad (6.4)$$



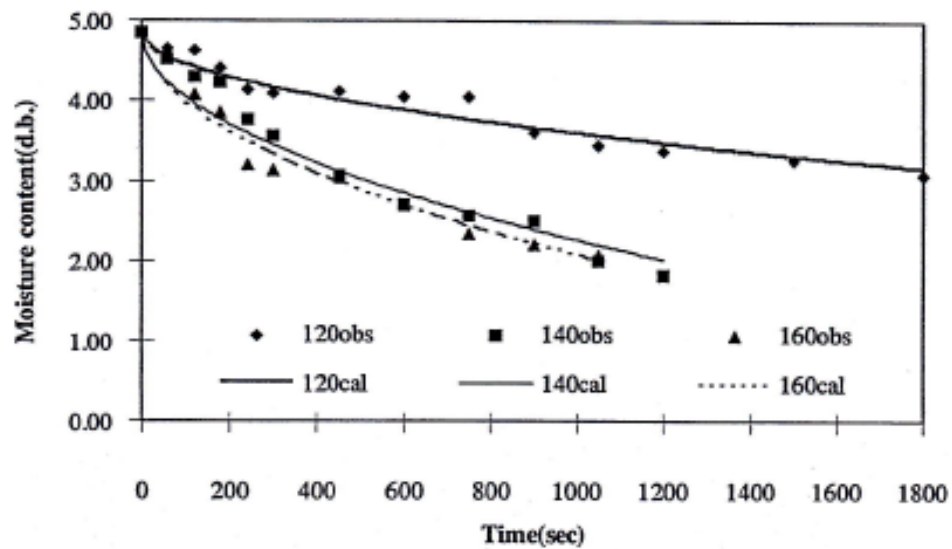
รูปที่ 6.13 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใจกลางชิ้นมันฝรั่งจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิ 120°C, 140°C และ 160°C



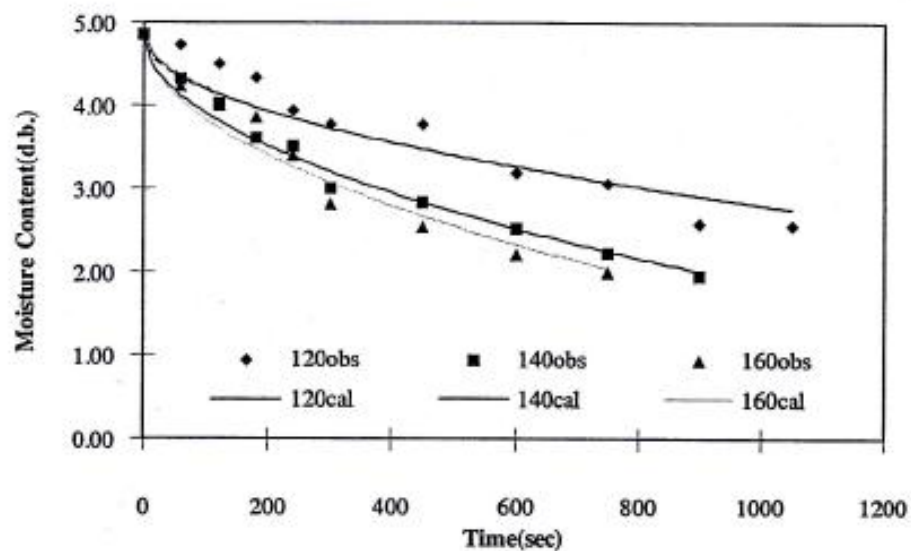
รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใจกลางชิ้นมันฝรั่งจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิ 120°C, 140°C และ 160°C



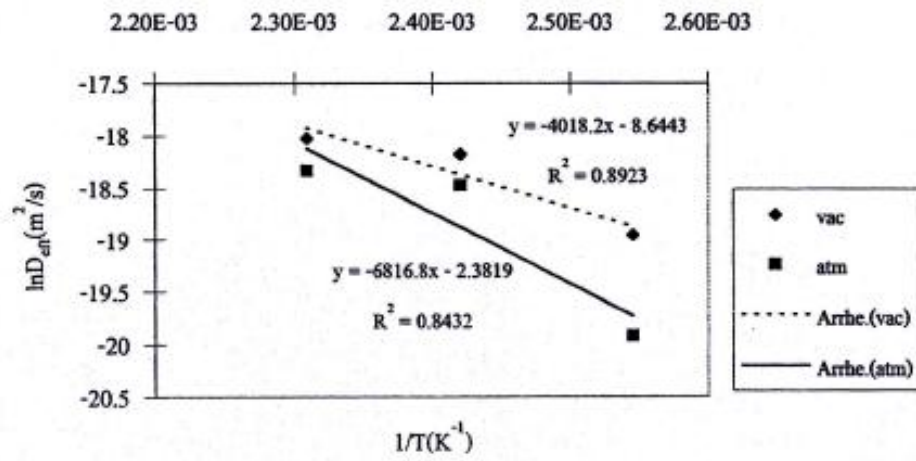
รูปที่ 6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha_{eff}$ กับ $1/T$



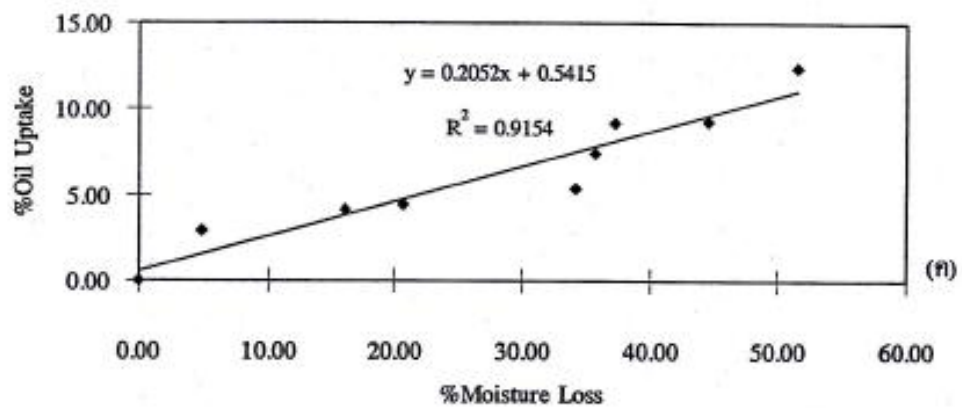
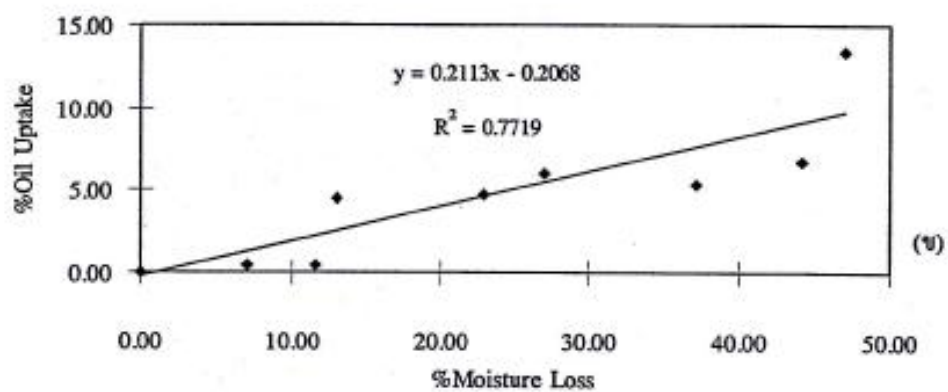
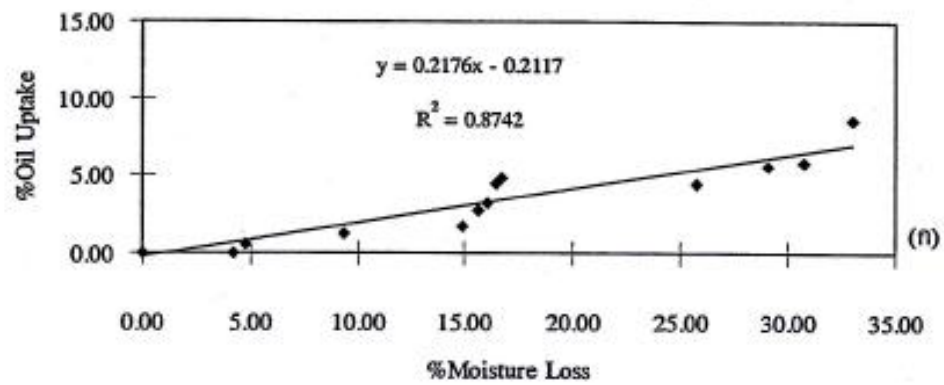
รูปที่ 6.16 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความชื้น เมื่อทอดชิ้นมันฝรั่งที่ความดัน 760 mmHg ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิ 120°C, 140°C และ 160°C



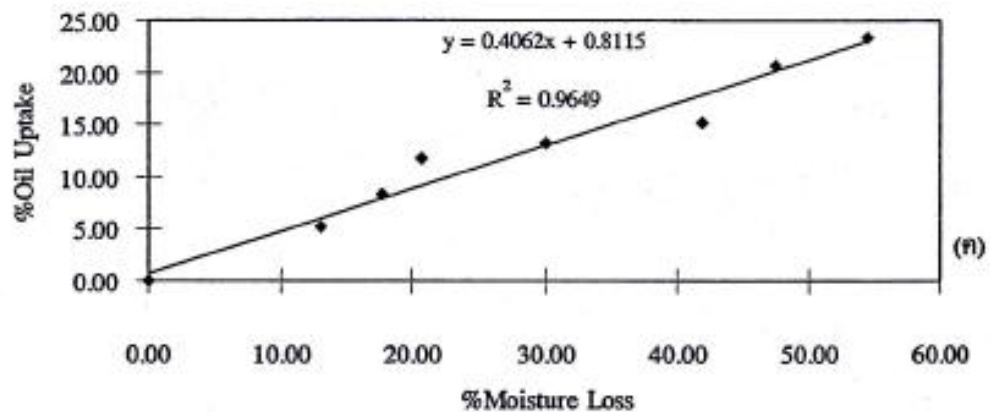
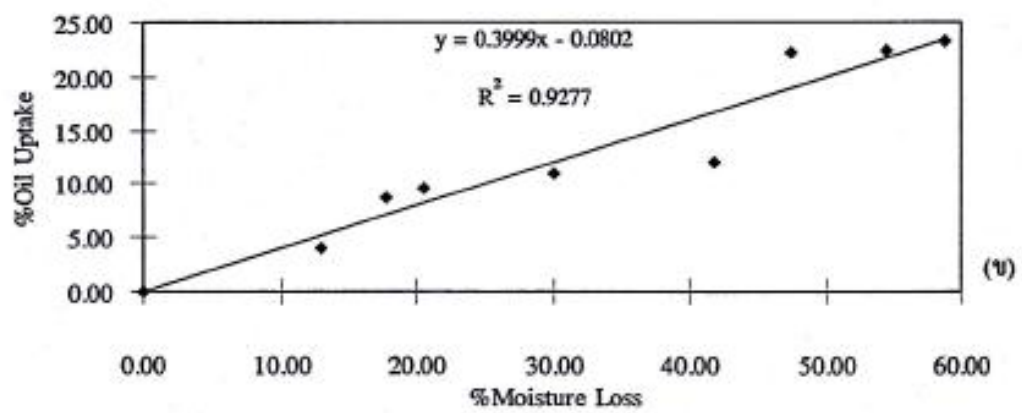
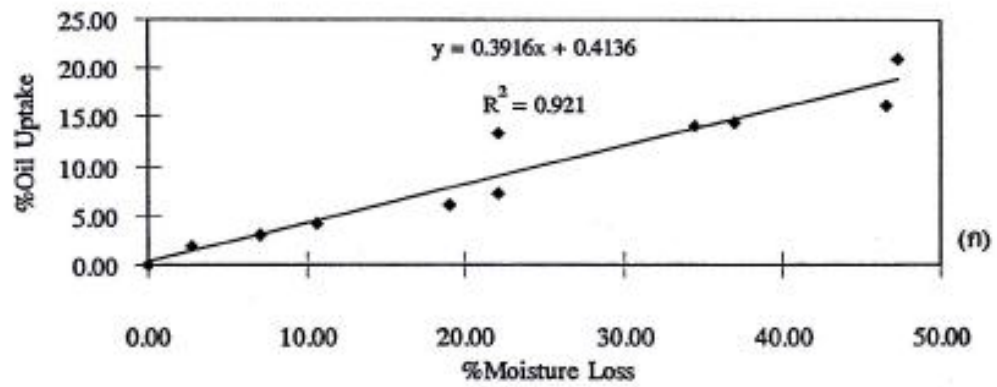
รูปที่ 6.17 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความชื้น เมื่อทอดชิ้นมันฝรั่งที่ความดัน 270 mmHg ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิ 120°C, 140°C และ 160°C



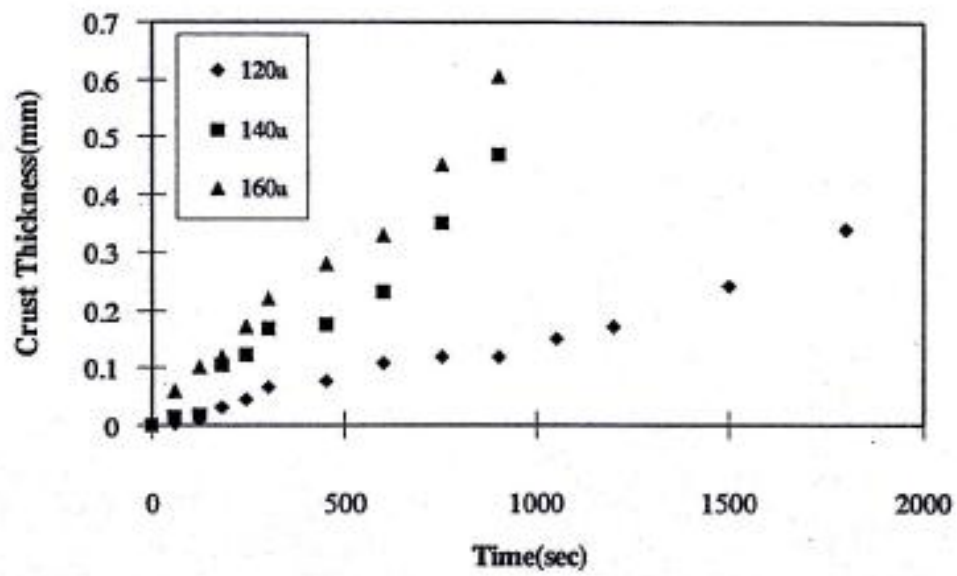
รูปที่ 6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D_{\text{eff}}$ กับ $1/T$



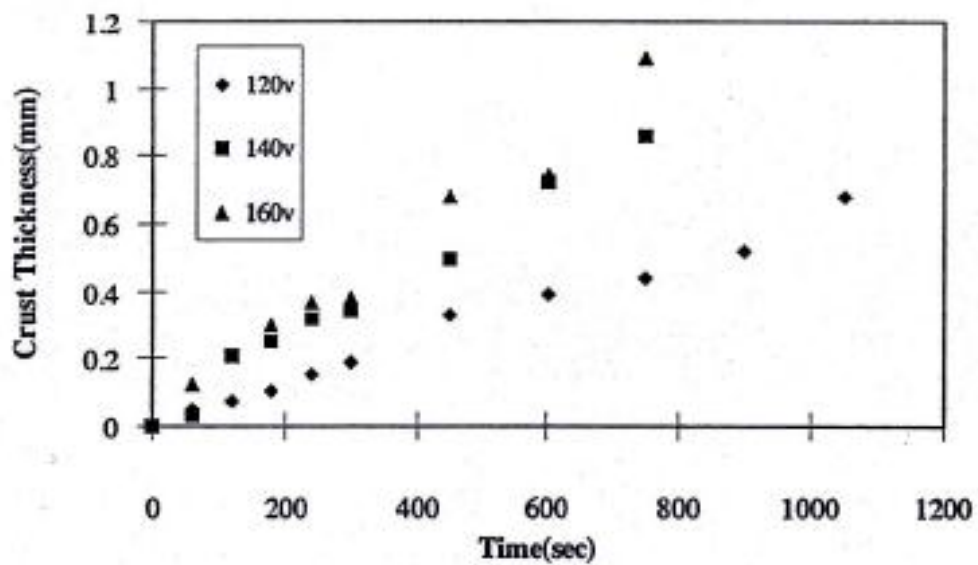
รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นเกี่ยวกับปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ (ก)120°C, (ข)140°C และ (ค)160°C ที่ความดัน 760 mmHg



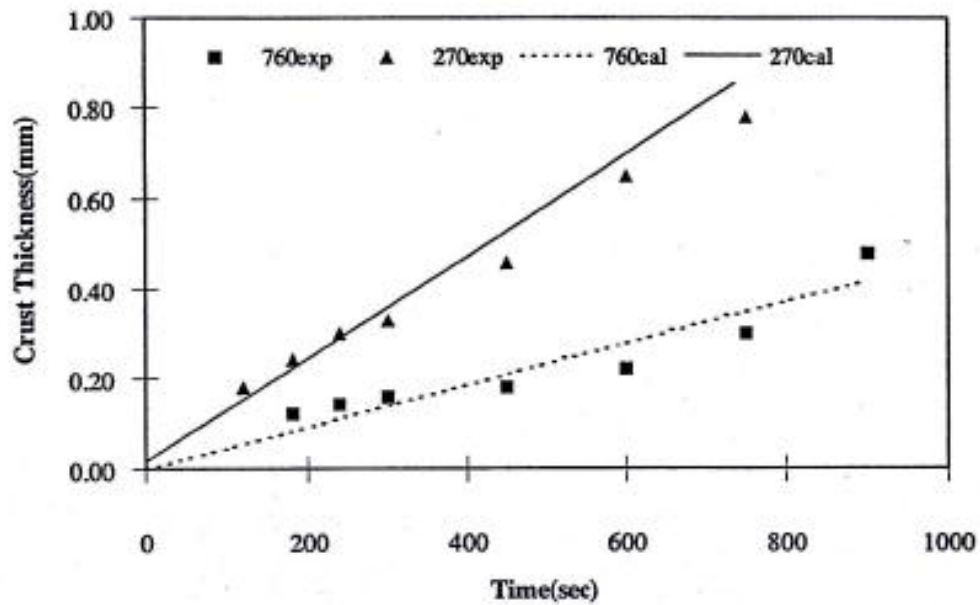
รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นเกี่ยวกับปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ (ก)120°C, (ข)140°C และ (ค)160°C ที่ความดัน 270 mmHg



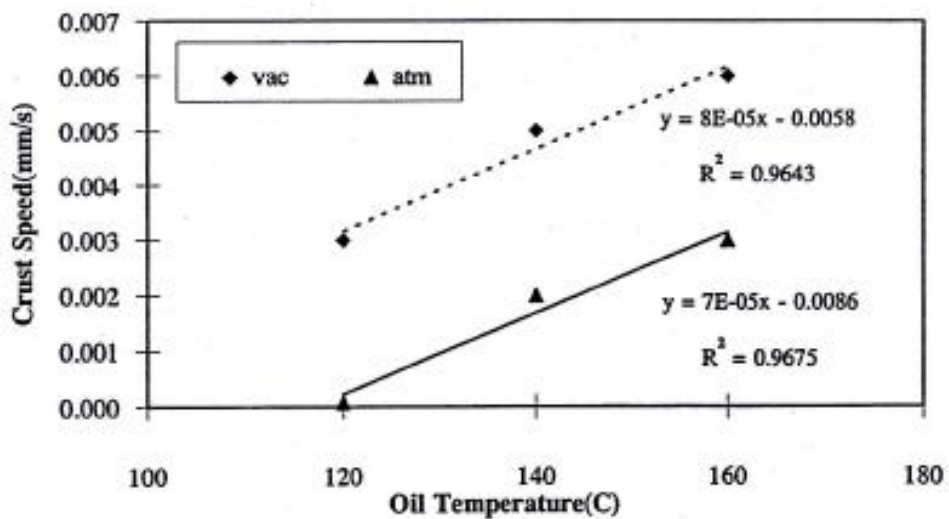
รูปที่ 6.21 ความหนาของ crust ในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ทอดที่ความดันบรรยากาศ ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 6.22 ความหนาของ crust ในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ในน้ำมันที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 6.23 ความหนาของ crust ที่วัดได้จากการทดลองและจากการทำนายของ slab potatoes เมื่อทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 140°C ที่ความดันบรรยากาศ และความดันต่ำกว่าบรรยากาศ



รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด crust กับอุณหภูมิของน้ำมัน

บทที่ 7

การสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 การสรุปผลการวิจัย

7.1.1 การทอดในสภาวะสุญญากาศ เป็นการลดจุดเดือดของน้ำในอาหาร ทำให้อุณหภูมิของอาหารเข้าสู่จุดเดือดและมีการระเหยของน้ำเร็วกว่าการทอดปกติ ส่งผลให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ทอดในสภาวะสุญญากาศมีการสูญเสียความชื้นมากกว่าการทอดปกติ

7.2.2 การดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์ เกิดจากการเข้าไปแทนที่น้ำส่วนที่ระเหยออกไปและมีความสัมพันธ์กับการเกิด crust formation เนื่องจากน้ำมันส่วนใหญ่สะสมอยู่ในส่วนของ crust การทอดที่อุณหภูมิสูงและ/หรือที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิมีการสูญเสียน้ำออกไปมากกว่าและมีปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์สูงกว่าการทอดน้ำมันที่มีอุณหภูมิต่ำ อัตราการเกิด crust มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอด ขนาดและรูปร่างของอาหารมีผลต่อการดูดซับของน้ำมันคืออาหารที่มีสัดส่วนของ crust/core สูง (cubed potatoes) มีปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์มากกว่าอาหารที่มีสัดส่วนของ crust/core ต่ำ (slab potatoes)

7.1.3 ลักษณะของอาหารทอดโดยทั่วไป ประกอบด้วย surface , crust region และ core region ระหว่าง crust และ core ถูกแบ่งแยกด้วย interface ที่มีการเคลื่อนที่เข้าไปภายในเมื่อมีการระเหยของน้ำ และมีอุณหภูมิกึ่งกลางที่จุดเดือดของน้ำ (ที่ความดัน 760 มม.ปรอท จุดเดือดของน้ำเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 270 มม.ปรอท น้ำมีจุดเดือดที่ 73 องศาเซลเซียส) กรณีที่ crust มีขนาดบางมากเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ interface เข้าไปภายในด้วยอัตราที่ต่ำมาก จึงทำให้ง่ายขึ้นโดยพิจารณาให้ระบบการทอดในงานวิจัยนี้เป็น non-moving boundary problem

7.1.4 ใน core region มีการแพร่ของน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นภายในชิ้นอาหาร (concentration diffusion) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในมันฝรั่งจากกระบวนการทอดในช่วงอุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียส เท่ากับ $2.23 \times 10^{-9} - 1.09 \times 10^{-8}$ ตร.ม./วินาที เมื่อทอดด้วยความดันบรรยากาศ และ $5.83 \times 10^{-9} - 1.49 \times 10^{-8}$ ตร.ม./วินาที สำหรับการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากงานวิจัยของ Rice และ Gamble[28] ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.8 \times 10^{-9} - 1.09 \times 10^{-8}$ ตร.ม./วินาที ในช่วงอุณหภูมิ 145-185 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าใกล้เคียงของสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำอยู่ในอันดับเดียวกัน โดยการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศ ความสัมพันธ์ระหว่าง

อุณหภูมิน้ำมันกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมตามสมการของ Arrhenius ได้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 56.93 และ 33.57 กิโลจูล/โมล ที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศตามลำดับ

7.1.5 การถ่ายเทความร้อนใน core region ถูกควบคุมโดยการนำความร้อนภายในและมีค่าการแพร่กระจายความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียส สำหรับการทอดที่ความดันบรรยากาศเท่ากับ $1.61 \times 10^{-7} - 3.36 \times 10^{-7}$ ตร.ม./วินาที และที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศเท่ากับ $4.17 \times 10^{-7} - 6.34 \times 10^{-7}$ ตร.ม./วินาที เปรียบเทียบกับค่าการแพร่ความร้อนของน้ำมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 1.70×10^{-7} ตร.ม./วินาที (Singh,[33] ซึ่งมีค่ายกกำลังอยู่ในอันดับเดียวกัน และการทอดที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศมีค่าการแพร่กระจายความร้อนสูงกว่าที่ความดันบรรยากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำมันกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวมตามสมการของ Arrhenius ได้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 26 กิโลจูล/โมล ที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ตามลำดับ

7.1.6 ในส่วนของ crust region มีน้ำมันเข้าไปสะสมอยู่ ทำให้อุณหภูมิภายใน crust มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมัน และสามารถทำนายความหนาของ crust และอัตราการเกิด crust ได้จากปริมาณน้ำมันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งที่ทอดในสภาวะปกติและสุญญากาศ

7.1.7 ในงานวิจัยนี้พบว่า สามารถแยกศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลออกจากกันได้ในการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ถ่ายเทการถ่ายเทที่เกิดขึ้น จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมกระบวนการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในงานวิจัยนี้ได้พยายามทำความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การถ่ายเทที่เกิดขึ้นในระบบการทอดแบบน้ำมันท่วม ทั้งการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวล เปรียบเทียบระหว่างการทอดที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำกว่าบรรยากาศ พบว่าที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศให้ผลิตภัณฑ์หลังการทอดที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าการทอดที่ความดันปกติ แต่ในขณะเดียวกันผลิตภัณฑ์นั้นก็มีปริมาณน้ำมันสูงด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์นั้นเป็นผลมาจากการเข้าไปแทนที่น้ำในส่วนที่ระเหยออกไป (replacement of moisture) หรืออาจเนื่องจากกลไกอื่น ๆ ที่ซับซ้อนมากกว่านี้ จะมีวิธีการอย่างไรที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดในเครื่องทอดสุญญากาศ มีปริมาณน้ำมันต่ำ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา และเพื่อสุขภาพที่ดีของผู้บริโภคที่นิยมรับประทานอาหารทอด

7.2.2 การดูดซับน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นได้อย่างไร ในช่วงไหน ก็ยังไม่ชัดเจนจึงควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการดูดซับน้ำมันให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น อาจช่วยให้สามารถปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ลงได้

7.2.3 สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความชื้นในงานวิจัยนี้ ใช้ศึกษากับตัวอย่างที่มีความหนาพอประมาณ และมีส่วนประกอบที่มีทั้ง crust และ core อาจไม่สามารถนำไปใช้ได้กับตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง เช่น potato chips ได้ เนื่องจาก potato chips เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเฉพาะ crust เท่านั้น

7.2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Farkas และคณะ[7] เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในกระบวนการทอดมากกว่าแบบจำลองอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้น แต่ควรเพิ่มเติมในส่วนของฟลักซ์ของพลังงานความร้อนและฟลักซ์เชิงมวลเนื่องจากน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปสะสมอยู่บริเวณ crust ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. วิจิตร คุรุปัญญามาตย์, 2537, การศึกษาสภาวะที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ผักทอดกรอบด้วยเครื่องทอดสุญญากาศ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-64.
2. Fellow, P.J., 1990, Food Processing Technology Principles and practices, London, Ellis Horwood, pp. 329-340.
3. Joslyn, M.A. and Heid, J.I., 1964, Food Processing Operation, Wesport, The AVI Publ., pp. 124-125
4. Blumenthal, M.M., 1991, "A New Look at the Chemistry and Physics of Deep Fat Frying," **Food Technology**, Vol. 45, No. 2, pp. 68-71, 94.
5. Singh, R.P., 1995, "Heat and Mass Transfer in Foods during Deep Fat Frying," **Food Technology**, Vol. 49, No.4, pp. 134-137.
6. Hallstrom, B., 1984, "Heat and Mass Transfer Development," **In Engineering and Food Vol.1 Engineer Science and Food Industry**, Edited by Brian, M., Mckenna, Elsevier Applied Science Publisher, pp. 457-465.
7. Farkas, B.E., Singh, R.P. and Rumsey, T.R. 1996, "Modeling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying I: Model Development," **Journal of Food Engineering**, Vol. 29, No. 1, pp. 211-226
8. Van Arsdel, W.B., 1973, "Drying Phenomena," **In Food Dehydration, Vol.1: Drying Method and Phenomena**, 2nd ed., Edited by Van Arsdel, W.B., Copley, M.J. and Morgan, A.I., Wesport, AVI Publ., pp. 37-53.
9. Reeve, R.M. and Neel, E.E., 1960, "Microscopic Structure of Potato Chips," **American's Potato Journal**, Vol.37, No.1, pp.45-49.

10. Brown, H.D., 1960, 'Problems of the Potato Chip Industry Processing and Technology," **Advance in Food Research**, Vol.56, No.1, pp.586-590

11. Gamble, M.H., Rice, P. and Selman, J.D. 1987, "Relationship between Oil Uptake and Moisture Loss during Frying of Potato Slices from c.v. Record U.K. Tubers," **International Journal of Food Science and Technology**, Vol.22, No.1, pp. 233-241.

12. McDonough, C., Gomez, M.H. and Lee, J.K., 1993, "Environmental Scanning Electron Microscopy Evaluation of Tortilla Chips Microstructure during Deep Fat Frying," **Journal of Food Science**, Vol.58, No.1, pp.199-203.

13. Matz, S.A., 1993, **Snack Food Technology**, 3rd ed., New York, AVI Publ., pp. 211-224

14. Pinthus, E.J. and Saguy, I.S., 1994, "Initial International Tension and Oil Uptake by Deep-Fat Fried Foods," **Journal of Food Science**, Vol.59, No.2, pp. 804-807, 823.

15. Palau, J., 1993, **Deep-Fat frying of Tortilla Chips: An Integrated Approach**. Master of Engineering Thesis, Agricultural Engineering Program, Texas A&M University. Pp. 1-87.

16. Saguy, I.S. and Pinthus, E.J, 1995, "Oil Uptake during Deep Fat Frying: Factors and Mechanism," **Food Technology**, Vol.49, No.4, pp.142-145.

17. Guillaumin, R., 1988, "Kinetics of Fat Penetration in Food," **In Frying of Food: Principle, Changes, New Approach**, Edited by Varela, G. Bender, A.E. and Morton, I.D., Chichester, Ellis Horwood, pp. 83-89.

18. Varela, G., 1988, "Current Facts about the Frying of Food," **In Frying of Food: Principle, Changes, New Approach**, Edited by Varela, G. Bender, A.E. and Morton, I.D., Chichester, Ellis Horwood, pp. 9-23.

19. ศศิเกษม ทองขงค์ และพรณี เดชกำแหง, 2530, เคมีอาหารเบื้องต้น, สำนักพิมพ์ โอเดียนสโตร์, หน้า 59-143.

20. Fennema, O.R., 1976, Food Chemistry, New York, Mercel Dekker, pp.30-255.
21. อรอนงค์ นัยวิกุล, 2537, ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแป้งและสตาร์ช, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 1-35.
22. Dorsey, W.R., Robert, R.L. and Strashum, S.I., 1965, US. Patent No. 3,194,670: Method of Dehydrating Food, pp.1-3.
23. Forker, J.H., 1966, US. Patent No. 3,295,221: Forker Processing Hot Oil under Partial Vacuum, pp.1-5.
24. Oka, H. and Ueoka, Y., 1981, "Studies on Manufacturing Condition of Drying Food by Frying under Reduced Pressure," **Nippon Shokukin Kagyo Gakkaishi**, Vol. 28, No. 2, pp. 32-36
25. UK.Patent Application, 1985, Process for Preparing Dry Food, London, The patent Office, pp. 1-6.
26. Vasanti-Nair, C.K., Seow, C.C. and Suleble, G.A., 1966, "Effect of Frying parameters on Physical Changes of Tapioca Chips During Deep Fat Frying," **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 31, No. 3, pp. 249-256.
27. Mittleman, N., Mizrahi, Sh. And Berk, Z., 1982, "Heat and Mass Transfer in Frying," **In Engineering and Foods**, Edited by McKeena, B.M., London, Elsevier applied Science, pp. 109-116.
28. Rice, P. and Gamble, M.H., 1989, " Technical Note: Modelling Moisture Loss During Potato Slice Frying," **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 24, pp. 83-187.
29. Moreira, R., Palau, J. and Sun, X. 1995, "Simultaneous Heat and Mass Transfer during Frying of Tortilla Chips," **Journal of Food Process Engineering**, Vol. 18, pp. 307-320.

30. Pravisini, C.I. and Calvelo, A., 1986, "Minimum Cooking Time for Patato Strip Frying," **Journal of Food Science**, Vol. 51, No. 3, pp. 614-617.
31. Farkas, B.E., Singh, R.P. and McCarthy, M.J., 1992, "Measurement of Oil/Water Interface in Food during Frying," **In Advances in Food Engineering**, Edited by Singh, R.P. and Wirakartakusumah, A., Boca Raton, CRC Press, pp.237-245.
32. Buhri, A.B. and Singh, R.P., 1994, "Thermal Property Measurement of Fried Food Using Differential Scanning Calorimeter," **In Development in Food Engineering part I**, Edited by Yano, T., Matsuno, R. and Nakamura, K., Proceeding of the 6th International Congress on Engineering and Food, London, Chapman&Hall pp. 283-285.
33. Singh, R.P., 1982, "Thermal Diffusivity in Food Processing," **Food Technology**, Vol. 36, No. 2, pp. 86-91.

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 อุณหภูมิภายใน Slab Potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid), และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 120 °C

เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface
0	29.3	29.3	29.3	54	46.6	59.7	74.6	300	97.4	100.0	101.6
2	30.1	31.9	34.0	56	47.7	60.2	75.6	310	97.6	100.1	101.6
4	30.7	33.0	36.0	58	48.5	61.0	76.1	320	97.8	100.1	101.6
6	31.4	34.2	38.0	60	49.2	61.5	77.0	330	98.9	100.2	101.6
8	32.0	35.3	39.9	70	52.1	65.0	80.0	340	99.3	100.2	101.3
10	32.8	36.3	41.7	80	55.2	68.4	82.8	350	99.6	100.3	101.7
12	33.6	37.4	43.5	90	58.0	71.8	85.3	360	99.9	100.4	101.8
14	34.4	38.5	45.4	100	60.5	74.6	87.4	370	100.1	100.6	101.9
16	35.2	39.5	47.2	110	63.3	77.4	89.4	380	100.1	100.6	101.9
18	35.9	40.5	49	120	66.1	79.9	91.2	390	100.1	100.6	101.9
20	36.7	42.7	50.6	130	68.6	82.2	92.9	400	100.2	100.6	102.0
22	37.3	44.3	52.3	140	71.4	84.1	94.2	410	100.2	100.8	102.1
24	37.7	46.0	53.9	150	73.0	85.9	95.6	420	100.1	100.9	102.1
26	38.2	47.2	55.5	160	75.4	87.6	96.7	430	100.3	100.8	102.2
28	38.6	48.4	56.9	170	77.6	89.2	97.7	440	100.3	100.9	102.2
30	39.1	49.2	58.6	180	78.9	90.6	98.4	450	100.2	101.0	102.3
32	39.9	50.2	60.4	190	82.0	92.2	99.2	460	100.3	101.0	102.3
34	40.3	51.1	62.3	200	83.4	93.4	99.7	470	100.4	101.0	102.4
36	40.3	51.9	64.0	210	86.4	94.7	100.1	480	100.3	101.0	102.5
38	41.2	53.0	65.1	220	87.5	95.8	100.5	490	100.3	101.1	102.6
40	42.0	53.7	66.3	230	89.1	96.7	100.8	500	100.3	101.1	102.6
42	42.7	55.0	67.7	240	91.3	97.5	100.8	510	100.2	101.1	102.6
44	43.5	56.0	68.5	250	92.7	98.1	101.0	520	100.3	101.2	102.7
46	44.0	56.8	69.6	260	93.3	98.7	101.5	530	100.4	101.3	102.8
48	44.9	57.4	70.9	270	94.4	99.2	101.5	540	100.2	101.3	102.9
50	45.4	57.9	72.4	280	95.1	99.7	101.5	550	100.4	101.3	102.5
52	46.0	58.8	73.9	290	96.5	99.9	101.5	560	100.4	101.3	102.9

រំងាប់ (s)	Center	Mid	Surface	រំងាប់ (s)	Center	Mid	Surface
570	100.3	101.3	103.0	840	100.2	101.4	104.9
580	100.3	101.4	103.1	850	100.2	101.4	104.9
590	100.3	101.5	103.2	860	100.2	101.6	105.3
600	100.3	101.5	103.3	870	100.2	101.8	106.0
610	100.2	101.5	103.3	880	100.2	102.1	106.6
620	100.2	101.6	103.4	890	100.2	102.2	106.8
630	100.1	101.6	103.6	900	100.2	102.2	106.9
640	100.2	101.7	103.6	910	100.2	102.3	107.0
650	100.2	101.7	103.8	920	100.3	102.5	107.2
660	100.2	101.7	103.8	930	100.4	102.7	107.7
670	100.3	101.6	103.9	940	100.7	103.1	108.4
680	100.3	101.5	104.0	950	100.9	103.3	108.8
690	100.4	101.6	104.1	960	100.9	103.4	109.0
700	100.4	101.5	104.1	970	101.0	103.8	109.2
710	100.3	101.5	104.1	980	101.1	103.9	109.2
720	100.3	101.6	104.2	990	101.1	103.8	109.4
730	100.3	101.5	104.3	1000	101.1	103.8	109.4
740	100.3	101.5	104.4	1010	101.0	103.6	109.5
750	100.3	101.6	104.5	1020	101.1	103.8	109.6
760	100.3	101.6	104.5	1030	101.1	103.7	109.7
770	100.3	101.5	104.6	1040	101.1	103.7	109.7
780	100.2	101.5	104.6	1050	101.1	103.7	109.7
790	100.2	101.5	104.6				
800	100.3	101.4	104.7				
810	100.3	101.4	104.7				
820	100.2	101.5	104.8				
830	100.3	101.4	104.8				

ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิภายใน Slab Potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid), และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 140 °C

เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface
0	27.3	27.4	27.2	58	55.75	69.75	93.85
2	28.45	30.1	32.5	60	56.55	70.65	94.25
4	29.5	32.2	38.6	70	61.6	74.5	94.25
6	30.3	33.2	43.3	80	66.25	78.5	97.1
8	31.4	34.7	47.9	90	70.6	82.65	98.6
10	32.4	35.7	52.1	100	75.6	85.7	99.25
12	33.3	36.9	56.1	110	79.05	87.4	99.4
14	34.1	38.5	59.9	120	82.35	89.25	99.8
16	35.2	40.5	63.8	130	85.4	91.35	100.2
18	36.2	42.2	67.1	140	87.7	92.85	100.15
20	36.95	44	70	150	90.7	94.95	100.8
22	37.75	45.55	72.5	160	92.45	95.9	101.3
24	38.6	47.15	74.95	170	93.85	97.05	101.95
26	39.5	48.75	77.25	180	95.4	98.2	102.75
28	40.3	49.9	79.25	190	96.8	98.7	103.25
30	41.1	51.45	81.25	200	96.95	98.8	103.6
32	42.15	53.15	82.9	210	97.95	99.55	104.65
34	42.95	54.45	84.25	220	98.9	100.3	105.9
36	43.8	55.9	85.35	230	99.3	100.2	106.65
38	45.05	57.55	86.6	240	99.25	100.15	107.4
40	46.05	58.95	87.7	250	99.45	100.4	108
42	47.2	60.3	88.65	260	99.65	101.05	108.8
44	48.3	61.75	89.5	270	99.85	101.85	109.4
46	49.25	63.1	90.25	280	100	102.4	110
48	50.4	64.3	90.95	290	100.05	102.3	110.35
50	51.45	65.5	91.6	300	100.2	102.85	110.9
52	52.55	66.7	92.15	310	100.5	102.8	111.3
54	53.6	67.8	92.75	320	100.95	102.95	111.75
56	54.7	68.9	93.45	330	101.25	103.1	112.55

រោង (s)	Center	Mid	Surface	រោង (s)	Center	Mid	Surface
340	101.4	103.15	113.2	630	106.45	110.95	122.9
350	101.45	103.4	113.3	640	106.45	111.05	122.95
360	101.55	103.4	114.35	650	106.5	111.15	122.9
370	101.65	103.9	115.3	660	106.75	111.35	123.2
380	101.8	104	115.4	670	106.85	112.15	123.75
390	101.8	104.3	115.8	680	107.25	111.95	123.6
400	101.75	105.05	116.4	690	107.45	111.6	123.3
410	101.85	105.2	116.65	700	107.45	112.05	123.75
420	102.3	105.55	117.1	710	107.75	112.35	123.9
430	102.55	105.75	117.2	720	107.85	112.4	124
440	102.7	106.45	117.25	730	107.85	112.4	123.95
450	102.7	106.85	117.45	740	107.85	112.4	123.95
460	102.65	106.55	117.2	750	108	112.5	124.05
470	102.5	106.35	116.85	760	108.05	112.65	124.05
480	102.75	106.85	117.05	770	108	112.65	124.15
490	102.95	106.8	117.1	780	108	112.6	124.15
500	103.25	107.15	117.2	790	108.05	112.6	124.1
510	103.35	107.55	117.4	800	108.15	112.5	124.1
520	103.55	107.6	117.45	810	108.1	112.6	124.05
530	103.7	107.8	117.45	820	108.15	112.6	124.05
540	103.8	107.9	117.5	830	108.15	112.75	124.05
550	104	108.3	117.8	840	108.1	112.75	124.1
560	104.45	108.9	119.05	850	108.05	112.75	124.05
570	105.4	109.85	120.3	860	108.1	112.8	124.1
580	105.9	110.3	121.15	870	108.2	112.8	124.2
590	106.35	110.75	122.15	880	108.2	112.8	124.2
600	106.2	110.85	122.85	890	108.2	112.8	124.1
610	106.1	111.05	123.05	900	108.2	112.8	124.1
620	106.35	111	122.85				

ตารางที่ ก.3 อุณหภูมิภายใน Slab Potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 760 mmHg ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid), และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 160 °C

เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface
0	29.9	29.9	29.9	58	68.2	82.5	98.8	340	108.7	116.0	128.3
2	31.4	37.5	48.1	60	69.2	83.2	99.2	350	109.3	116.2	128.4
4	33.1	39.7	54.9	70	73.9	86.1	99.8	360	109.9	116.4	128.3
6	34.8	41.9	59.0	80	77.7	89.0	101.0	370	110.0	116.4	127.4
8	36.4	44.4	63.8	90	81.9	91.6	101.8	380	110.2	116.5	127.7
10	38.0	46.8	68.8	100	85.4	94.2	102.1	390	110.5	116.6	127.3
12	39.7	49.2	74.3	110	89.1	97.0	103.0	400	110.7	116.8	127.8
14	41.2	51.3	78.2	120	91.8	98.8	104.0	410	110.8	117.0	128.3
16	42.7	53.6	81.4	130	93.9	100.3	104.3	420	110.8	117.0	128.5
18	44.2	56.0	84.5	140	95.8	100.8	105.1	430	110.9	116.9	128.5
20	45.7	58.0	85.8	150	96.8	101.5	106.3	440	111.0	117.0	128.8
22	46.9	60.8	88.2	160	97.8	102.3	107.7	450	111.5	117.1	128.5
24	48.0	63.1	89.5	170	99.5	102.8	109.1	460	111.7	117.1	129.2
26	49.5	65.0	90.5	180	101.0	103.9	110.4	470	111.7	117.2	129.2
28	50.7	66.8	92.0	190	101.4	105.4	112.5	480	111.8	117.1	129.1
30	50.7	66.8	92.0	200	102.4	106.7	114.4	490	111.9	117.2	129.4
32	53.4	69.8	94.0	210	102.3	107.7	116.2	500	112.5	117.9	130.4
34	54.5	70.8	94.5	220	102.0	108.8	118.2	510	113.0	119.2	131.4
36	55.6	72.1	94.7	230	101.9	109.3	119.8	520	114.2	121.0	133.9
38	57.1	73.5	95.2	240	102.4	109.8	121.5	530	115.2	122.4	135.3
40	58.2	74.1	95.4	250	103.2	110.7	122.8	540	115.7	123.3	136.1
42	59.3	75.5	96.2	260	104.2	111.8	124.4	550	116.2	124.0	136.7
44	60.3	76.3	96.9	270	105.5	113.2	125.3	560	116.4	124.5	137.5
46	61.8	77.4	97.5	280	106.2	114.2	126.0	570	117.0	124.8	138.1
48	62.7	78.4	97.8	290	106.8	114.8	126.5	580	117.5	125.2	138.7
50	63.6	79.0	97.9	300	107.2	115.1	127.1	590	117.7	125.3	138.6
52	65.1	80.1	98.3	310	107.7	115.4	127.6	600	117.7	125.1	138.4
54	66.0	81.0	98.5	320	108.0	115.6	127.9				
56	67.0	81.5	98.7	330	108.2	115.8	128.1				

ตารางที่ ก.4 อุณหภูมิภายใน Slab Potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า

0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid), และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 120 °C

เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface
0	31.8	32.0	32.0	56	61.4	64.1	85.1	320	92.7	88.4	100.5
2	32.9	34.4	36.8	58	62.1	64.8	86.3	330	83.2	88.6	100.5
4	34.0	36.1	41.4	60	62.6	65.2	86.9	340	83.4	88.8	100.5
6	35.0	37.6	46.5	70	63.7	65.7	88.3	350	83.5	88.8	100.4
8	36.4	39.4	55.4	80	64.8	67.8	88.7	360	83.5	88.7	100.3
10	37.6	41.0	58.5	90	65.3	69.9	89.1	370	83.6	88.7	100.3
12	38.4	42.0	61.0	100	65.5	71.6	89.6	380	83.5	88.8	100.3
14	39.2	42.9	62.6	110	66.0	72.9	89.5	390	83.7	88.9	100.3
16	40.5	44.2	63.5	120	68.0	74.6	90.2	400	83.9	88.8	100.2
18	42.0	45.8	63.6	130	70.0	76.0	90.7	410	83.9	88.8	100.3
20	42.9	46.8	63.7	140	73.3	77.5	91.4	420	84.0	88.9	100.2
22	47.0	47.8	63.9	150	75.4	78.6	92.2	430	84.0	88.9	100.4
24	45.5	49.4	64.4	160	76.0	79.5	92.8	440	84.0	88.9	100.3
26	47.1	51.0	64.6	170	76.8	80.5	93.4	450	84.0	89.4	100.3
28	48.1	52.0	64.9	180	77.1	81.3	93.9	460	84.1	89.5	100.3
30	49.1	53.0	66.0	190	77.5	82.0	94.3	470	84.1	89.8	100.2
32	50.1	54.0	68.0	200	77.9	82.5	94.7	480	84.1	89.9	100.2
34	51.6	55.5	72.1	210	78.0	83.1	95.1	490	84.2	89.9	100.1
36	53.0	56.9	74.1	220	77.9	83.8	95.3	500	84.2	89.9	100.1
38	53.9	57.9	75.9	230	78.2	84.3	95.4	510	84.2	89.9	100.0
40	54.8	58.7	77.2	240	79.0	85.0	96.1	520	84.2	89.9	100.1
42	56.0	59.8	79.7	250	79.0	85.0	96.1	530	84.2	90.0	100.0
44	57.2	60.7	80.7	260	79.4	85.3	97.0				
46	57.8	61.4	91.7	270	79.9	85.9	98.1				
48	58.5	61.8	82.6	280	80.7	86.5	99.0				
50	59.4	62.4	83.9	290	81.3	87.2	99.7				
52	60.2	62.9	84.1	300	81.9	87.9	100.4				
54	60.7	63.4	84.6	310	82.3	88.3	100.5				

ตารางที่ ก.5 อุณหภูมิภายใน Slab Potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า

0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid), และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 140 °C

เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface
0	32.1	32.5	32.6	56	68.9	73.2	89.5	320	90.0	99.6	119.2
2	34.0	33.9	49.0	58	69.2	73.8	90.7	330	90.6	99.7	119.7
4	36.6	39.1	55.2	60	69.7	74.0	92.4	340	90.9	100.0	119.9
6	37.4	43.1	58.2	70	70.8	77.9	96.4	350	91.3	100.2	120.4
8	38.4	45.5	60.2	80	70.9	79.7	98.5	360	91.6	100.4	120.6
10	39.6	47.3	64.3	90	71.8	80.2	99.9	370	92.0	100.6	120.3
12	41.0	49.0	65.3	100	72.6	82.1	101.3	380	92.4	100.7	120.6
14	41.9	51.5	66.8	110	73.7	84.1	102.2	390	92.5	100.9	120.8
16	42.9	53.1	68.3	120	75.3	85.5	103.1	400	92.7	101.2	121.0
18	45.0	54.6	70.7	130	76.1	88.0	103.6	410	92.9	101.3	121.4
20	46.2	56.0	71.0	140	77.4	89.4	104.2	420	93.1	101.5	121.2
22	47.4	57.9	72.3	150	78.7	90.2	104.8	430	93.2	101.8	121.2
24	49.2	59.6	72.5	160	80.6	90.9	105.4	440	93.4	102.3	121.4
26	51.1	60.6	73.6	170	82.2	92.0	106.1	450	93.5	102.4	121.7
28	52.1	61.7	74.2	180	82.9	93.2	106.4				
30	54.0	62.5	74.2	190	83.6	93.9	107.1				
32	55.3	64.2	74.5	200	84.2	94.5	107.8				
34	56.5	65.5	74.8	210	84.7	95.2	108.8				
36	58.4	67.1	77.0	220	85.5	95.6	110.0				
38	60.1	68.3	77.3	230	86.2	96.2	111.0				
40	61.0	70.0	79.1	240	87.0	96.8	114.2				
42	61.9	70.9	79.6	250	87.6	97.9	116.0				
44	63.8	71.4	82.9	260	88.0	98.5	117.2				
46	64.7	71.5	83.0	270	88.2	98.6	118.0				
48	65.5	71.8	83.8	280	88.5	98.9	118.4				
50	66.8	72.3	85.0	290	88.8	99.2	118.7				
52	67.6	72.6	87.7	300	89.2	99.3	119.1				
54	68.2	73.1	88.9	310	89.5	99.4	119.2				

ตารางที่ ก.6 อุณหภูมิภายใน Slab Potatoes เมื่อทอดที่ความดัน 270 mmHg ที่ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 0.1 cm (surface), 0.3 cm (mid), และ 0.65 cm (center) ในน้ำมันอุณหภูมิ 140 °C

เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface	เวลา (s)	Center	Mid	Surface
0	32.6	32.7	32.9	52	66.6	79.5	105.5	280	101.1	120.0	133.9
2	33.7	36.0	39.2	54	67.4	80.3	106.2	290	101.5	120.3	134.2
4	37.7	43.0	57.4	56	68.1	81.2	107.0	300	101.7	120.7	134.5
6	39.3	47.1	66.6	58	68.8	82.0	107.8	310	102.2	121.0	134.7
8	41.0	50.5	70.5	60	69.2	82.4	108.5	320	102.6	121.5	134.7
10	42.0	52.1	72.0	70	71.5	85.8	111.6	330	102.9	122.5	134.8
12	43.5	53.4	73.8	80	74.5	90.0	114.4	340	103.4	122.7	135.2
14	44.5	55.6	76.6	90	75.7	94.0	116.6	350	103.5	122.7	135.4
16	46.0	57.9	80.5	100	77.3	98.3	119.2	360	103.7	122.7	135.4
18	47.0	59.4	84.0	110	79.5	101.3	120.7	370	103.7	122.8	135.5
20	48.0	61.0	87.2	120	81.1	105.4	123.2	380	103.9	122.8	135.5
22	49.6	63.3	90.8	130	83.8	107.9	125.8	390	103.9	122.8	135.7
24	51.2	65.9	93.2	140	88.3	111.0	130.4	400	103.9	122.8	135.9
26	52.2	67.7	94.3	150	88.3	111.0	130.4				
28	53.4	69.0	95.7	160	90.6	113.1	132.4				
30	55.1	70.1	97.5	170	92.0	114.9	131.8				
32	56.0	71.4	98.4	180	93.5	115.2	13.5				
34	57.6	72.6	99.5	190	94.6	115.6	133.0				
36	58.8	73.2	99.4	200	95.7	116.3	133.1				
38	60.4	73.6	100.0	210	96.5	116.5	133.3				
40	61.2	74.4	100.4	220	97.1	117.1	133.1				
42	62.6	75.4	101.7	230	97.7	117.3	132.6				
44	63.6	76.3	102.4	240	98.8	117.8	133.0				
46	64.3	77.1	103.3	250	99.6	118.3	133.5				
48	65.1	77.9	103.9	260	100.4	118.7	133.8				
50	65.9	78.7	104.7	270	100.7	119.6	133.6				

ตารางที่ ก.7 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ที่ทอดด้วยน้ำมันอุณหภูมิ 120 °C, 140 °C และ 160 °C ที่ความดัน 760 mmHg

เวลา (sec)	ปริมาณความชื้น (g water/g dry solid)			ปริมาณน้ำมัน (g oil/100g dry solid)		
	120 °C	140 °C	160 °C	120 °C	140 °C	160 °C
0	4.85	4.85	4.85	1.78	1.78	1.78
60	4.62	4.51	4.61	1.79	2.17	4.63
120	4.65	4.22	4.07	2.33	2.24	5.89
180	4.4	4.29	3.85	3.05	6.25	6.26
240	4.13	3.74	3.19	3.45	6.45	7.17
300	4.09	3.54	3.12	4.51	7.75	9.22
450	4.1	3.05	3.04	4.97	7.17	10.99
600	4.04	2.57	2.69	6.20	8.55	11.06
750	4.05	2.71	2.35	6.62	15.22	14.16
900	3.6	2.49	2.18	6.24		
1050	3.44	2	2.21	7.36		
1200	3.36	1.83		7.67		
1500	3.25			10.41		
1800	3.07			13.03		

ตารางที่ ก.8 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ slab potatoes ที่ทอดด้วยน้ำมันอุณหภูมิ 120 °C, 140 °C และ 160 °C ที่ความดัน 270 mmHg

เวลา (sec)	ปริมาณความชื้น (g water/g dry solid)			ปริมาณน้ำมัน (g oil/100g dry solid)		
	120 °C	140 °C	160 °C	120 °C	140 °C	160 °C
0	4.85	4.85	4.85	1.78	1.78	1.78
60	4.72	4.32	4.22	3.87	5.77	7.09
120	4.51	4.02	3.99	4.81	10.39	10.16
180	4.34	3.61	3.85	6.05	11.28	13.49
240	3.93	3.49	3.39	7.85	13.69	15.02
300	3.78	2.84	2.82	8.95	12.68	17.08
450	3.78	2.99	2.55	15.16	23.99	22.46
600	3.18	2.53	2.21	15.96	24.12	25.10
750	3.06	2.22	2	16.28	25.12	
900	2.59	1.95		17.94		
1050	2.56			22.84		

ตารางที่ ก.9 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ cubed potatoes ที่ทอดด้วยน้ำมัน
อุณหภูมิ 120 °C, 140 °C และ 160 °C ที่ความดัน 760 mmHg

เวลา (sec)	ปริมาณความชื้น (g water/g dry solid)			ปริมาณน้ำมัน (g oil/100g dry solid)		
	120 °C	140 °C	160 °C	120 °C	140 °C	160 °C
0	5.03	5.04	5.05	1.77	1.75	1.75
30	4.98	4.48	4.08	2.84	4.69	7.47
60	4.97	4.15	3.40	3.85	3.75	8.73
90	4.84	3.67	2.88	5.51	5.18	10.54
120	4.55	3.35	2.70	5.87	6.63	12.96
180	3.99	3.05	2.02	5.87	9.61	15.47
240	3.50	2.36	1.98	7.73	17.10	22.08
300	3.20	1.94	1.52	8.43	18.65	20.34
450	2.75	1.67	1.47	9.14	21.91	25.52
600	2.51	1.46	1.28	19.23	25.29	29.89
750	2.04	1.32		20.51	26.75	
900	1.90	1.10		20.97	28.46	
1050	1.69			21.22		
1200	1.29			25.55		

ตารางที่ ก.10 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ cubed potatoes ที่ทอดด้วยน้ำมัน
อุณหภูมิ 120 °C, 140 °C และ 160 °C ที่ความดัน 270 mmHg

เวลา (sec)	ปริมาณความชื้น (g water/g dry solid)			ปริมาณน้ำมัน (g oil/100g dry solid)		
	120 °C	140 °C	160 °C	120 °C	140 °C	160 °C
0	4.83	4.83	4.83	1.71	1.71	1.71
30	4.52	4.25	3.75	3.72	8.85	14.55
60	4.46	3.78	3.76	8.07	8.57	14.84
90	4.16	3.19	3.46	9.00	12.38	15.06
120	3.67	3.00	2.94	9.73	15.88	23.90
180	3.14	3.34	2.54	11.50	27.69	27.88
240	2.97	2.35	2.03	25.27	34.43	31.19
300	2.55	1.93	1.80	27.75	36.64	36.88
360	2.24	1.88	1.73	28.95	43.60	52.15
450	1.95	1.82		34.96	66.68	
600	1.62	1.55		57.44	82.96	
750	1.18	1.26		75.35	77.79	

ภาคผนวก ข

- ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น
- ข.2 การวัดความหนาของ crust
- ข.3 การสกัดไขมันโดยใช้ Soxtec Apparatus

ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

1. อบถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 100°C ประมาณ 2 ชม. ทำให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนัก
2. บดตัวอย่างมันฝรั่งทอดให้ละเอียด
3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนในภาชนะพร้อมฝาปิด
4. นำไปอบที่ 105°C เฝ้ารอประมาณ 50 องศา จนกระทั่งแน่ใจว่าน้ำหนักคงที่ประมาณ 16-18 ชม. แล้วปิดฝาให้สนิททันที ทำให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก หาปริมาณความชื้นตามสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น(g water/g dry solid)} = (M_3 - M_2) / (2M_2 - M_1 - M_3)$$

เมื่อ

M_1 = น้ำหนักภาชนะพร้อมฝา(g)

M_2 = น้ำหนักภาชนะและตัวอย่างก่อนอบ(g)

M_3 = น้ำหนักภาชนะและตัวอย่างหลังอบ(g)

ข.2 การวัดความหนาของ crust

1. นำตัวอย่าง slab potatoes ที่ผ่านการทอดที่เวลาใด ๆ มาตัดแบ่งเป็น 4 ส่วน ตามแนวรัศมี
2. ใช้มีดปาดเฉพาะส่วนที่เป็นเปลือกแข็งภายนอกซึ่งนิยามว่าเป็น crust ออกมา
3. วัดความหนาที่ 8 ตำแหน่ง คือ ด้านบน และด้านล่าง ของแต่ละ section ที่ตัดแบ่งไว้ดังข้อ 1 โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์
4. หาค่าความหนาเฉลี่ยของ crust ที่เวลาใด ๆ

ข.3 การสกัดไขมันโดยใช้ Soxtec Apparatus

Extraction เป็นวิธีการแยกสารที่สามารถละลายได้ เช่น crude fat, additive ต่าง ๆ ,ยากำจัดศัตรูพืช , และองค์ประกอบย่อยในสารประกอบเชิงซ้อน

หลักการของ Soxlet เป็นหลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์โดยวิธีการสกัด มีการยอมรับกันอย่างกว้างขวางในแง่ของความแม่นยำและความถูกต้อง นอกจากนี้ตัวทำละลายสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก แต่การวิเคราะห์แบบ Soxlet เป็นวิธีที่ต้องใช้เวลาในการสกัดนานและเสี่ยงอันตรายจากการระเบิดของตัวทำละลายได้

Soxtec ใช้หลักการสกัดเช่นเดียวกับ Soxlet และสามารถนำตัวทำละลายได้มากกว่า รวดเร็วกว่า และปลอดภัยกว่า เมื่อเทียบกับ soxlet ซึ่งวิธีนี้สามารถลดเวลาในการสกัดเหลือเพียง 20% จากเวลาของ Soxlet และสามารถเก็บตัวทำละลายมาใช้ใหม่ได้ถึง 60-70% และยังมีความปลอดภัยสูง เนื่องจากมีตัวให้ความร้อนอยู่แยกต่างหาก

การสกัดแบบ Soxtec สามารถใช้กับตัวทำละลายได้หลายชนิด และสามารถวิเคราะห์สารประกอบที่ได้จากวัตถุหลายชนิด เช่น อาหาร อาหารสัตว์ ดิน สารเชื้อรา ผลิตภัณฑ์ทางเคมีและทางเภสัชวิทยา เป็นต้น

ใส่ตัวอย่างใน thimble จากนั้นนำไปใส่ในเครื่อง Extraction Unit หลังจากเติมตัวทำละลายใน extraction cups แล้ว สารที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายจะถูกสกัดออกมาในตัวทำละลาย โดยมี 2 ขั้นตอนและตามด้วยการกลั่นเอาตัวทำละลายออก จากนั้นนำ extraction cups ไปอบและชั่งน้ำหนัก

Service Unit เป็นเครื่องให้ความร้อนกับ Extraction Unit ซึ่งใช้น้ำมันเป็นตัวกระจายความร้อน จนตัวทำละลายสามารถระเหยได้ ท่อที่เชื่อมระหว่าง Service Unit และ Extraction Unit มีการออกแบบให้สามารถทนต่อน้ำมันที่ร้อนได้ โดยท่อมีความยาว 1.5 เมตร ทำให้สามารถแยกเครื่องทั้งสองไว้ต่างห้องได้ ใน Service Unit มีปั๊มลมทำหน้าที่ระเหยตัวทำละลายส่วนที่เหลืออยู่เล็กน้อยให้ออกจาก extraction cups

หลักการทำงานและอุปกรณ์

1. Extraction Unit การสกัดด้วยตัวทำละลายสำหรับเครื่อง Extraction Unit จะมีการสกัด 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ตัวอย่างจะจุ่มในตัวทำละลายที่ร้อน ซึ่งที่สามารถละลายได้ จะละลายออกมาได้มากที่สุด在这一ขั้นตอนที่ 2 ตัวอย่างจะถูกยกขึ้นมาอยู่เหนือตัวทำละลายเพื่อให้ตัวทำละลายที่ควบแน่นมาจาก condenser ไหลลงมาล้างตัวอย่าง ภายหลังการสกัดเสร็จ ปิด valve ของ condenser โดยการหมุนปุ่ม valve $\frac{1}{4}$ รอบ หลังจากผ่านไป 2-3 นาที ตัวทำละลายจะถูกระเหยรวมไว้ใน condenser ส่วนตัวทำละลายส่วนที่เหลือจะถูกทำให้ระเหยขึ้นไปรวมกันจนหมด เมื่อเปิด valve ของอากาศ

2. Service Unit เป็นแหล่งจ่ายความร้อนให้กับเครื่อง Extraction Unit น้ำมันร้อนจากถังน้ำมันที่อยู่ภายในเครื่อง น้ำมันจะถูกปั๊มจาก Service Unit ไปที่ hot plate ของเครื่อง Extraction Unit
3. Extraction Cup และ Cup Holder ทำจากอลูมิเนียม
4. Thimble มีขนาดมาตรฐานคือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 26 มม.และยาว 60 มม.
5. กระดาษกรองเบอร์ 1
6. ตัวทำละลายที่ใช้ ได้แก่ ปีโตรเลียมอีเทอร์ และเฮกเซน

วิธีวิเคราะห์ไขมัน

1. เปิดสวิตช์เครื่อง Service Unit
2. เปิดสวิตช์เครื่อง Cooling
3. บดตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ให้ละเอียด
4. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 3 กรัม (W_1) กระดาษกรองและห่อให้มิดชิด จากนั้นนำมาใส่ลงใน thimbles
5. นำ thimbles ใส่ใน Soxtec System HT โดยให้ Adapter สวม
6. นำ extraction cups ไปอบและชั่งน้ำหนัก (W_2)
7. เติมตัวทำละลายลงใน extraction cups ประมาณ 50-75 มล.
8. นำ extraction cups เข้าไปใน Soxtec System HT พร้อมทั้งโยกคันโยกลง
9. เลื่อนคันโยกไปที่ตำแหน่ง boiling และสกัดเป็นเวลา 15-20 นาที จากนั้นเลื่อนคันโยกมาที่ตำแหน่ง rinsing ทำการ rinsing เป็นเวลา 30-45 นาที
10. ระบายตัวทำละลายพร้อมกับปิด condenser valve และปิดสวิตช์ของอากาศ
11. นำ extraction cups ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 นาที
12. ทิ้ง extraction cups ให้เย็นใน desiccators ชั่งน้ำหนัก (W_3) คำนวณ %Fat/Oil ตามสูตร

$$\%Fat / Oil = (W_3 - W_2) / W_1 \times 100\%$$

ภาคผนวก ค

Gauss-Newton Method

Gauss-Newton Method

ในการตัดสินใจปัญหาทางวิศวกรรม มักต้องทำการตัดสินใจภายใต้ตัวแปรจำนวนอย่างน้อย 2 ตัวหรือมากกว่าที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งมีความจำเป็นต้องทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้เพื่อการตัดสินใจที่ดี การวิเคราะห์การถดถอย(regression analysis)เป็นกลวิธีทางสถิติวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวินิจฉัยและสร้างตัวแบบสำหรับความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ให้ความสนใจ ตัวแบบทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยนี้จะได้มาจากการกำหนดตัวแปรอิสระจำนวน k ตัวซึ่งจะต้องเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้โดยจะเรียกตัวแปรนี้ว่าตัวแปรถดถอย (regressor) หรือตัวทำนาย(predictor)และเมื่อกำหนดค่าตัวแปรถดถอยค่าหนึ่ง ๆ แล้วจะทำการศึกษาถึงค่าตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่มและจะเรียกตัวแปรประเภทนี้ว่าตัวแปรตอบสนอง(response variable) วิศวกรโรงงานมีวัตถุประสงค์หลักในการทำงานดังนี้คือ เพื่อควบคุม ปรับปรุงและหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตดังนั้นจึงต้องมีแบบจำลองที่จะทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างส่วนต่าง ๆ เพื่อสร้างแบบจำลองนำมาใช้ในการ simulate แบบจำลองโดยทั่วไปเป็นสมการ differential ซึ่งอาจเขียนอยู่ในรูปของ performance equation คือ

$$Y' = g(x, Y, b) \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ

- $Y' =$ vector of derivatives of Y
- $g =$ vector of functions
- $x =$ independent variable
- $Y =$ vector of dependent variables
- $b =$ vector of parameters

หากสมมุติว่ามีการกำหนดสภาวะขอบเขตและประมาณค่า b ได้ สมการ ค.1 สามารถอินทิเกรตได้เป็น

$$Y = f(x, b) \quad (\text{ค.2})$$

ในกรณีทั่วไปเมื่อแบบจำลองประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว ค่า sum of square residuals หาได้จาก

$$\Phi = \epsilon^T \epsilon = (Y^* - Y)^T (Y^* - Y) \quad (\text{ค.3})$$

เมื่อ

Y^* = vector of experimental observations of the dependent variable

Y = vector of calculated values of the dependent variables obtained from eq. 2

ถ้าหาก Y เป็น nonlinear เนื่องจากตัวพารามิเตอร์ เมื่อหาอนุพันธ์ของ Φ เมื่อเทียบกับ b จะได้สมการที่เป็น nonlinear ที่จะแก้สมการเพื่อหาคำตอบของ b ได้ยาก ปัญหานี้ได้มีการแก้ไขโดย Gauss ซึ่งหาค่านี้โดย fit ฟังก์ชันที่เป็น nonlinear ด้วยการทำ least square โดยใช้ iterative method จะได้คำตอบเป็น series ของคำตอบจากการประมาณค่าที่เป็น linear และแต่ละครั้งของการทำ iteration จะได้คำตอบที่ใช้สำหรับการประมาณค่าครั้งต่อไป วิธีนี้เรียกว่า Gauss-Newton method แปลงปัญหาที่เป็น nonlinear ให้เป็น linear ในการประมาณค่า Y โดยกระจายฟังก์ชัน Y ในรูป Taylor series ด้วยค่าโดยประมาณของพารามิเตอร์ b

$$Y = (x, b + \Delta b) = Y(x, b) + \frac{\partial Y}{\partial b} \Delta b \quad (\text{ก.4})$$

การหาค่า b ที่ถูกต้อง หลังจากการเติม Δb เข้าไปแล้วทำให้ b ที่ทำให้ sum of square residuals มีค่าน้อยที่สุด จึงแทนค่า Y ในสมการ 3 ด้วยเทอมทางขวามือของสมการ 4 ได้เป็นสมการ

$$\Phi = (Y^* - Y - A\Delta b)^T (Y^* - Y - A\Delta b) \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อ

A = Jacobian matrix of partial derivatives of Y with respect to b evaluated at all point where experimental observations are available

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y_1}{\partial b_1} & \cdots & \frac{\partial Y_1}{\partial b_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Y_n}{\partial b_1} & \cdots & \frac{\partial Y_n}{\partial b_k} \end{bmatrix} \quad (\text{ก.6})$$

หาอนุพันธ์ของ Φ เทียบกับ b แล้ว set ให้เท่ากับ 0 จะ solve ค่า Δb ได้จาก

$$\Delta b = (A^T A)^{-1} A^T (Y^* - Y) \quad (\text{ก.7})$$

Δb เป็น *correction vector* ที่ใช้สำหรับประมาณค่า b ซึ่งจะได้ *parameter vector* ของการประมาณค่า b ครั้งใหม่เป็น

$$b_{new} = b_{previous} + \Delta b \quad (ก.8)$$

วิธีของ Gauss-Newton method ใช้ได้ทั้งกับแบบจำลองที่มีตัวแปรอิสระ 1 ตัวหรือกรณีที่เป็น multiple regression ขั้นตอนของ Gauss-Newton method ประกอบด้วย

1. สมมุติค่าคาดเดาเริ่มต้นของพารามิเตอร์ b
2. ถ้าแบบจำลองอยู่ในรูปของสมการ differential ให้ใช้เวกเตอร์ b และสภาวะขอบเขตอินทิเกรตสมการเพื่อให้ได้โปรไฟล์ของ Y แต่ถ้า Y อยู่ในรูปของ algebraic equation ก็ให้ใส่ เวกเตอร์ b ไปในสมการของ Y ได้เลย
3. สร้าง Jacobian matrix A จากสมการของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองเป็น algebraic equation ค่าของ $\partial Y / \partial b$ หาได้ง่ายโดยการ differentiate แบบจำลอง แต่ถ้าแบบจำลองเป็น differential equation หาค่าของ $\partial Y / \partial b$ ได้จากการ take partial ของ differential equation เทียบกับพารามิเตอร์ b

$$\frac{\partial Y}{\partial b} \left(\frac{dY}{dx} \right) = \frac{\partial g}{\partial b} \quad (ก.9)$$

และจัดในรูปแบบใหม่เป็น

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial Y}{\partial b} \right) = \frac{\partial g}{\partial b} \quad (ก.10)$$

สมการ ค.10 เป็น ordinary differential equation เมื่อทำการอินทิเกรตจะได้ $\partial y / \partial b$ ที่ใช้ในการสร้าง Jacobian matrix A

4. ใช้สมการ ค.7 เพื่อหา correction vector (Δb)
5. ทราบค่า b_{new} จากสมการ ค.8
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 จนกระทั่ง (Δb) มีค่าน้อยมาก และ Φ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ๆ

วิธีของ Gauss-Newton method นี้จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อเราเลือกค่าเริ่มต้นอยู่ใกล้ค่า Φ และแบบจำลองไม่มีความเป็น nonlinear สูงมากนัก