



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร)

ปริญญา

วิศวกรรมอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเคลื่อนที่ของน้ำ
และน้ำมันระหว่างการทอดชิ้นมันฝรั่งแช่เยือกแข็งด้วยไมโครเวฟ

Optimization and Mathematical Modeling of Water Loss and Oil Uptake during
Microwave Frying of Frozen Potato Slices

นามผู้วิจัย นายวราชัย โพธิ์ปรีสุทธิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ศิริชัย ส่งเสริมพงษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะบุญย์ สัจจานันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเคลื่อนที่ของน้ำ
และน้ำมันระหว่างการทอดชิ้นมันฝรั่งแช่เยือกแข็งด้วยไมโครเวฟ

Optimization and Mathematical Modeling of Water Loss and Oil Uptake during
Microwave Frying of Frozen Potato Slices

โดย

นายวรราช โพธิ์ปรีสุทธิ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วราชัย โพธิ์ปรีสุทธิ์ 2554: การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเคลื่อนที่ของน้ำและน้ำมันระหว่างการทอดชิ้นมันฝรั่งแช่เยือกแข็งด้วยไมโครเวฟ ปรินซ์ญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร) สาขาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ศิริชัย ส่งเสริมพงษ์, Ph.D. 107 หน้า

การทอดอาหารด้วยวิธีน้ำมันท่วมเป็นกระบวนการเตรียมอาหารที่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีวิธีการที่ง่ายและสะดวก แต่มีข้อเสีย คือ มีการดูดซึมน้ำมันปริมาณสูง จึงมีการคิดค้นการทอดอาหารด้วยวิธีใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงข้อเสียดังกล่าว ในงานวิจัยนี้สนใจการทอดอาหารด้วยวิธีไมโครเวฟ โดยใช้ตัวอย่างเป็นมันฝรั่งแช่แข็ง วัตถุประสงค์ข้อแรกของงานวิจัย คือ ศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อคุณภาพด้านต่างๆ ของมันฝรั่งทอด (ปริมาณความชื้น, ปริมาณน้ำมัน, เนื้อสัมผัส และค่าสี) พบว่า ปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลง ปริมาณน้ำมัน ความแข็ง และค่าสี มีแนวโน้มที่สูงขึ้น เมื่อทอดด้วยกำลังไมโครเวฟสูงและเป็นเวลานาน วัตถุประสงค์ข้อที่สอง คือ ศึกษาสมการสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ของมันฝรั่งในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 85 425 และ 850 วัตต์ โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นเพียง 140 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิน้ำมัน 180 องศาเซลเซียส พบว่า สมการที่ดีที่สุดสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงการระเหยออกของน้ำ คือ สมการ Page's law ส่วนสมการที่ดีที่สุดสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงการดูดซึมเข้าของน้ำมัน คือ สมการ Fick's second law สำหรับสมการของ Pedreschi and Moyano (2005) ที่นำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสและสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 ที่นำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสีในงานวิจัยนี้ สามารถทำนายคุณภาพทั้งสองด้านได้เป็นอย่างดี ค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทดลอง เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ของการทอดทั้ง 2 วิธี พบว่า การทอดอาหารโดยใช้ไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ มีอัตราการระเหยออกของน้ำ (k_w) หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำ อัตราการอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อมันฝรั่ง (k_s) อัตราการเกิดเปลือก (k_p) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของสี (k_c) ในระหว่างการทอดที่มากกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม แต่มีอัตราการดูดซึมของน้ำมัน (k_o) หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำมันที่ต่ำกว่า ดังนั้นการทอดมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ จึงใช้ระยะเวลาการทอดที่เร็วกว่าการทอดมันฝรั่งด้วยวิธีน้ำมันท่วม และยังมีปริมาณน้ำมันที่น้อยกว่าอีกด้วย สำหรับวัตถุประสงค์ข้อสุดท้าย เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอดมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่า การทอดมันฝรั่งเพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วงน้อยกว่ามาตรฐานมันฝรั่งทอดของประเทศสหรัฐอเมริกา มีความแข็ง และมีสีเหลืองทอง ได้แก่ การทอดโดยใช้กำลังไมโครเวฟสูงเวลาสั้น (700 วัตต์ 130 วินาที) และกำลังไมโครเวฟต่ำเวลานาน (425 วัตต์ 200 วินาที) สภาวะทั้ง 2 สภาวะดังกล่าวมีคุณภาพของมันฝรั่งที่ดีกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมในช่วงเวลา 180-210 วินาที เนื่องจากมีปริมาณความชื้นและค่า ΔE ใกล้เคียงกัน แต่มีปริมาณน้ำมันที่ต่ำกว่าและมีเนื้อสัมผัสที่แข็งกว่า ดังนั้น การทอดมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟที่ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นเพียง 140 องศาเซลเซียส และนำไปทอดด้วยไมโครเวฟตามสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว จึงเป็นทางเลือกใหม่เพื่อทดแทนการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสได้

Warachai Poparisut 2011: Optimization and Mathematical Modeling of Water Loss and Oil Uptake during Microwave Frying of Frozen Potato Slices. Master of Science (Food Engineering), Major Field: Food Engineering, Department of Food Science and Technology.
Thesis Advisor: Mr. Sirichai Songsermpong, Ph.D. 107 pages.

Conventional deep fat frying is the well known food preparation method due to this method is simple and convenient but has disadvantage in respect of large oil uptake. In this research, microwave frying was considered as a new method for improving the quality of the fried food and frozen potato slices were used. The first objective of this investigation was to study the effect of microwave power level and frying time on the quality of fried potato slices (moisture content, oil content, texture and color). It was found that moisture content tends to decrease, for oil content, hardness and ΔE values tends to increase when fried with high microwave power level and frying time. The second objective of this investigation was to study the equations to describe the various quality changes of potato slices during microwave frying at power level of 85, 425 and 850 watt with initial oil temperature at 140°C in comparison with conventional deep fat frying with initial oil temperature at 180°C . It was found that the most appropriate model to describe water loss was Page's law and to describe oil uptake was Fick's second law model. For the equation to explain the change in texture and color during frying was Pedreschi and Moyano's model (2005) and first order kinetics model respectively. It was found that the equations can predict both qualities very well. The values of the predictions were in agreement with experiment values. When comparing the rate of change for various qualities of 2 methods, it was found that potato slices fried with microwave power level 850 watt had rate of water evaporation (k_m) and effective moisture diffusivity, rate for softening of the potato tissue (k_s), rate for crust hardening (k_h) and rate for color change (k_e) during frying higher than conventional deep fat frying but rate of oil uptake and effective oil diffusivity was lower than. Therefore, fried potato slices with microwave at 850 watt decreased frying time and oil uptake. The last objective of this investigation was to study the optimum condition of microwave frying of potato slices by response surface methodology. It was found that using high microwave power level for short time (700 watt 130 seconds) and low microwave power level for long time (425 watt 200 seconds) cause moisture content and oil content in the range lower than United States Standard for fried potatoes, the fried potato slices has high hardness and golden brown color. In addition, both conditions have qualities better than potato slices fried with conventional deep fat frying in the range of 180-210 seconds due to the moisture content and ΔE values are equal but have lower oil content and more hardness than conventional method. Therefore, the potato slices with initial oil temperature 140°C then fried by microwave at optimum conditions were the way to replace conventional deep fat frying at 180°C in order to reduce the oil absorption and better quality.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.ศิริชัย ส่งเสริมพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างสูง ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำที่ดีมาตลอดในการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบ และ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อย ขอกราบขอบ พระคุณ ผศ.ดร. วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และ ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. สวงนศรี เจริญเหรียญ ประธานการสอบ และ ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้วิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ จน วิทยานิพนธ์สำเร็จเรียบร้อย

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ ศึกษา ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์แห่งนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์ อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีการอาหารทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในสาขาวิศวกรรมอาหารทุกคนที่คอยให้กำลังใจ คำแนะ นำในยามที่ท้อ หรือมีอุปสรรค และให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจ อย่างเต็มที่ อีกทั้งยังมอบ มิตรภาพที่ดี จนข้าพเจ้ามีกำลังใจ ฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ จนสำเร็จเรียบร้อย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้ อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และคำปรึกษาที่ดี พี่และน้องที่คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจกันเสมอมา และครูอาจารย์ทุกท่านของข้าพเจ้า

วราชัย โพธิ์ปรีสุทธิ

กุมภาพันธ์ 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	37
สรุป	76
ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	78
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก อุณหภูมิของน้ำมันในระหว่างการทอด	86
ภาคผนวก ข ข้อมูลประกอบผลการทดลอง	88
ภาคผนวก ค ตารางวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	100
ประวัติการศึกษา การทำงาน	107

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบองค์ประกอบของน้ำมันฝรั่งผ่านบางที่ทอดในระบบสุญญากาศกับการทอดที่บรรยากาศปกติ	7
2	ตัวแปรต้นและระดับของตัวแปรต้นทั้ง 3 ระดับ ตามแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล	29
3	สิ่งทดลองที่ได้จากวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยออกแบบแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3^2	30
4	ค่า R^2 (coefficient of multiple determination) และสมการยกกำลังสองของปริมาณความชื้น (MC) ปริมาณน้ำมัน (OC) ค่าแรงเจาะสูงสุด (MF) และค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE) ของน้ำมันฝรั่งทอด	38
5	ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำ	45
6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบายการถ่ายเท มวลของน้ำ	47
7	ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำมัน	50
8	ผลของการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทมวลน้ำและน้ำมันในมันฝรั่งที่ทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิน้ำมัน 180 องศาเซลเซียส และวิธีการทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟต่างๆ ด้วยค่า k_m และค่า k_o จากสมการ First order kinetics	51
9	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำมัน	51
10	ผลของค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
11	ผลของค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสี	58
12	ค่า E_a และค่า k_0 ของการอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อภายในมันฝรั่งและการเกิดโครงสร้างเปลือกภายนอกในระหว่างการทอดสิ่งทดลองทั้งหมดที่ได้จาก	67
13	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองปฏิกิริยาและแบบจำลองทุติยภูมิที่ใช้สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของไขมัน	72
14	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองปฏิกิริยาและแบบจำลองทุติยภูมิที่ใช้สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำมัน	72
15	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองปฏิกิริยาและแบบจำลองทุติยภูมิที่ใช้สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส	73
16	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองปฏิกิริยาและแบบจำลองทุติยภูมิที่ใช้สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสี	73
ตารางผนวกที่		
ข1	ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการทอดต่อปริมาณไขมันของมันฝรั่ง	89
ข2	ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการทอดต่อปริมาณน้ำมันของมันฝรั่ง	90
ข3	ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการทอดต่อค่าแรงเฉือนสูงสุดของมันฝรั่ง	91
ข4	ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการทอดต่อค่า ΔE ของมันฝรั่ง	92
ข5	ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อปริมาณไขมันของมันฝรั่ง	93
ข6	ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อปริมาณน้ำมันของมันฝรั่ง	94
ข7	ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่าแรงเฉือนสูงสุดของมันฝรั่ง	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข8 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่า ΔE ของมันฝรั่ง	96
ข9 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่า L^* ของมันฝรั่ง	97
ข10 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่า a^* ของมันฝรั่ง	98
ข11 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่า b^* ของมันฝรั่ง	99
ค1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อปริมาณความชื้นของมันฝรั่ง	101
ค2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อปริมาณน้ำมันของมันฝรั่ง	101
ค3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อค่าแรงเจาะสูงสุดของมันฝรั่ง	102
ค4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อค่า ΔE ของมันฝรั่ง	102
ค5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นในมันฝรั่งตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3	103
ค6 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณความชื้นในมันฝรั่งทอดตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3	103
ค7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3	104
ค8 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งทอดตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค9	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงเฉาะสูงสุดในมันฝรั่งตามแผนการทดลองทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3	105
ค10	สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายของค่าแรงเฉาะสูงสุดในมันฝรั่งทอดตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3	105
ค11	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า ΔE ในมันฝรั่งตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3	106
ค12	สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายค่า ΔE ในมันฝรั่งทอดตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3	106

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ชนิดของกระบวนการทอด (a) การทอดแบบน้ำมันตื้น (b) การทอดแบบน้ำมันท่วม	6
2	(ซ้าย) ชิ้นอาหารที่อยู่ระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วม (ขวา) ส่วนบริเวณเปลือก (crust) ของมันฝรั่งทอดที่สแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	6
3	ส่วนประกอบและระบบต่างๆ ของเครื่องทอดสุญญากาศ	8
4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ระเหยออกกับปริมาณน้ำมันที่ดูดซึมเข้าไปในระหว่างการทอดมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส	11
5	การถ่ายเทน้ำมันและความชื้นของตัวอย่างที่มีการเคลือบและไม่เคลือบระหว่างการทอด	12
6	การเสื่อมสภาพของน้ำมันระหว่างการทอด	14
7	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดอาหารแบบน้ำมันท่วม โดย q = ความร้อน M = ความชื้น F = น้ำมัน	15
8	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา (A) ที่ปฏิกิริยาอันดับ 0; (B) ที่ปฏิกิริยาอันดับ 1; (C) ที่ปฏิกิริยาอันดับ 2	18
9	กราฟสองมิติ (บน) และสามมิติ (ล่าง) ของปริมาณความชื้นในมันฝรั่งที่ทอดด้วยไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ	39
10	กราฟสองมิติ (บน) และสามมิติ (ล่าง) ของปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งที่ทอดด้วยไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ	40
11	กราฟสองมิติ (บน) และสามมิติ (ล่าง) ของค่าแรงเฉื่อยสูงสุดในมันฝรั่งที่ทอดด้วยไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ	41
12	กราฟสองมิติ (บน) และสามมิติ (ล่าง) ของค่า ΔE ในมันฝรั่งที่ทอดด้วยไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	เนื้อหา	หน้า
13	ผลของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ต่อปริมาณความชื้น (กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง) ที่เวลาต่างๆ	44
14	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟที่ กำลังต่างๆ และการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	46
15	ผลเปรียบเทียบของปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ First order kinetics (.....) Page's law (—) และ Fick's second law with variable diffusivity (— —) ที่สภาวะต่างๆ : (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ และ (d) ทอดแบบ น้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	48
16	ผลของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ต่อปริมาณน้ำมัน (กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง) ที่เวลาต่างๆ	49
17	ผลเปรียบเทียบของปริมาณน้ำมันที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการ First order kinetics (.....) Moyano and Pedreschi's model (—) และ Fick's second law (— —) ที่สภาวะต่างๆ : (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลัง ไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ และ (d) ทอดแบบน้ำมันท่วมที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	52
18	ผลของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสต่อค่าแรงเจาะ สูงสุด (N) ที่เวลาต่างๆ	53
19	ผลเปรียบเทียบค่าแรงเจาะสูงสุดที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของการ ทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการ ทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ผลของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ต่อค่า ΔE ที่เวลาต่างๆ	56
21	ลักษณะของมันฝรั่งที่ทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟและการทอดด้วยน้ำมันท่วม (180 องศาเซลเซียส)	57
22	ผลเปรียบเทียบค่า ΔE ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	59
23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k_m$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius	60
24	ผลเปรียบเทียบของปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการปฐมภูมิ (page's law) และสมการทุติยภูมิ ที่สภาวะต่างๆ : (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์	62
25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln D_{eff,o}$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius	63
26	ผลเปรียบเทียบของปริมาณน้ำมันที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการปฐมภูมิ (Fick's second law) และสมการทุติยภูมิ ที่สภาวะต่างๆ: (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์	65
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k_s$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius	66
28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k_h$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius	66
29	ผลเปรียบเทียบของค่าแรงเจาะสูงสุดที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการปฐมภูมิ (สมการที่ (23)) และสมการทุติยภูมิ ที่สภาวะต่างๆ: (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์	68
30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k_E$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	ผลเปรียบเทียบของค่าสีที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการปฐมภูมิ (สมการที่ (25)) และสมการทุติยภูมิ ที่สภาวะต่างๆ: (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์	71
32	การซ้อนทับกันของกราฟค่าตอบสนองทั้ง 4 ค่า (ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน ค่าแรงเฉื่อยสูงสุด และค่า ΔE) เพื่อหาสภาวะการทอดด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด	75
ภาพผนวกที่		
ก1	อุณหภูมิของน้ำมันในระหว่างการทอดมันฝรั่งของวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส กับวิธีไมโครเวฟที่กำลังต่างๆ	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

b	คือ	dimensionless parameter
C	คือ	ปริมาณความเข้มข้นของสาร
D_0	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลน้ำที่เวลา 0
$D_{\text{eff},w}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำ (m^2/s)
$D_{\text{eff},o}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำมัน (m^2/s)
ΔE	คือ	ค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีจากมันฝรั่งเริ่มต้นก่อนการทอด
ΔE_0	คือ	ค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีที่เวลาเริ่มต้น (มีค่าเท่ากับ 0)
ΔE_{max}	คือ	ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีสูงสุดของแต่ละอุณหภูมิหรือกำลังไมโครเวฟที่ทอด
ΔE_t	คือ	ค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีที่เวลา t
E_a	คือ	ค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy, W/g)
k	คือ	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ
k_h	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับการเกิดโครงสร้างเปลือกในระหว่างการทอด (s^{-2})
k_E	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (s^{-1})
k_m	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับการถ่ายเทมวลความชื้น (s^{-1})
k_o	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับการถ่ายเทมวลน้ำมัน (s^{-1})
k_s	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับการอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อมันฝรั่งในระหว่างการทอด (s^{-1})
h	คือ	ครึ่งหนึ่งของความหนา (m)
m	คือ	น้ำหนักของชิ้นอาหาร (g) ในสมการ Arrhenius
m_0	คือ	ปริมาณความชื้นที่เวลาทอดเริ่มต้น (g/g drybasis)
m_t	คือ	ปริมาณความชื้นที่เวลาทอด t (g/g drybasis)
m_{eq}	คือ	ปริมาณความชื้นสมดุล (g/g drybasis)
MF	คือ	ค่าแรงเจาะสูงสุด (N)
MR	คือ	อัตราส่วนของปริมาณความชื้น
N	คือ	จำนวนข้อมูล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

n	คือ	อันดับปฏิกิริยาของจลนพลศาสตร์ สามารถมีค่าเท่ากับ 0, 1, 2, ... n ขึ้นกับชนิดของปฏิกิริยา
O	คือ	ปริมาณน้ำมัน (g/g drybasis)
O_0	คือ	ปริมาณน้ำมันที่เวลาทอดเริ่มต้น (g/g drybasis)
O_t	คือ	ปริมาณน้ำมันที่เวลาทอด t (g/g drybasis)
O_{eq}	คือ	ปริมาณน้ำมันสมดุล (g/g drybasis)
OR	คือ	อัตราส่วนของปริมาณน้ำมัน
O^*	คือ	ปริมาณน้ำมันที่ดูดซึมเข้ามาระหว่างที่เวลาใดๆ จนถึงที่ปริมาณน้ำมันสมดุล
P	คือ	กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)
RMS	คือ	Root mean square error
R^2	คือ	coefficient of determination
S	คือ	ค่า Springiness (N)
t	คือ	เวลาในการทอด (s)
V_{obs}	คือ	ค่าที่ได้จากการทดลอง
V_{pred}	คือ	ค่าที่ได้จากการทำนาย

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเคลื่อนที่ ของน้ำและน้ำมันระหว่างการทอดชิ้นมันฝรั่งแช่เยือกแข็งด้วยไมโครเวฟ

Optimization and Mathematical Modeling of Water Loss and Oil Uptake during Microwave Frying of Frozen Potato Slices

คำนำ

การทอดอาหารแบบน้ำมันท่วม (Deep fat frying) เป็นกระบวนการผลิตอาหารที่เป็นที่นิยมอย่างมาก ทำให้ได้นำผลิตภัณฑ์อาหารจุ่มลงไปน้ำมันที่มีความร้อนสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอดอยู่ในช่วง 150-180 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อาหารมีกลิ่นรสที่ได้จากปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่มีลักษณะเฉพาะ มีเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคชอบรับประทาน คือ มีลักษณะที่แห้ง มีความกรอบที่ด้านนอก และมีความนุ่มที่ด้านใน ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของอาหารที่ทอดด้วยวิธีนี้ (Moreira *et al.*, 1999) แต่อย่างไรก็ตามการทอดอาหารด้วยวิธีนี้มีการดูดซับน้ำมันที่สูงมากถึง 40% ซึ่งปริมาณน้ำมันที่สูงนี้ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เพราะก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ เช่น โรคอ้วน โรคหัวใจ โรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น และยังก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เกิดกลิ่นหืนได้ง่าย ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการเลือกวิธีการทอดผลิตภัณฑ์อาหารด้วยวิธีใหม่ๆ ทดแทนการทอดด้วยวิธีเดิมเพื่อปรับปรุงข้อเสียดังกล่าว และเพื่อพัฒนาให้คุณภาพของอาหารและคุณภาพของน้ำมันดีขึ้น

การใช้ไมโครเวฟมีหลักการที่แตกต่างจากการให้ความร้อนโดยใช้วิธีธรรมดาทั่วไปที่อาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญ คือ การนำความร้อนและการพาความร้อน ซึ่งการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ กระบวนการทำความร้อนที่ใช้พลังงานไมโครเวฟจึงเป็นกระบวนการที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (ผดุงศักดิ์, 2551) ปัจจุบันจึงมีความคิดที่จะประยุกต์ระบบไมโครเวฟเข้ากับกระบวนการอื่นๆ ในอุตสาหกรรม เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น รวดเร็วขึ้น และมีคุณภาพมากขึ้น

การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟสำหรับกระบวนการทอดนั้นเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถปรับปรุงคุณภาพของอาหารทอดให้ดีขึ้นได้ โดยสามารถลดเวลาที่ใช้ทอด ลดปริมาณน้ำมันตกค้างในอาหารทอดลงได้ (Oztop *et al.*, 2007a,b) นอกจากนี้ยังช่วยชะลอการเสื่อมเสียของน้ำมันได้อีกด้วย (Gharachorloo *et al.*, 2009) อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับรายละเอียดวิธีการทอดด้วยวิธีนี้มากเท่าที่ควร

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และศึกษาสมการคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพของมันฝรั่งในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟ เช่น การถ่ายเทมวลของน้ำและน้ำมันในระหว่างการทอดมันฝรั่ง การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และสีในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟ เพื่อทำนายปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน เนื้อสัมผัสและค่าสีของมันฝรั่งที่ผ่านการทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ สำหรับการออกแบบกระบวนการผลิต ออกแบบเครื่องทอด และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดให้มีคุณภาพที่ดี

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อคุณภาพด้านต่างๆ ของมันฝรั่งที่ทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟ
2. เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำและน้ำมันคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส และด้านสีในระหว่างการทอดมันฝรั่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ
3. เพื่อศึกษาสภาวะการทอดที่เหมาะสม (กำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอด) สำหรับการทอดมันฝรั่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การตรวจเอกสาร

1. การแปรรูปอาหารด้วยการทอด (Frying)

การทอดเป็นกรรมวิธีที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภคของอาหาร วัตถุประสงค์รองคือ การถนอมรักษาอาหาร โดยการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ เอนไซม์ และลดค่าออกซิเดชัน แอคติวิตีที่ผิวของอาหารหรือตลอดชิ้นอาหาร (วิไล, 2546) สามารถจำแนกวิธีการทอดโดยวิธีการถ่ายเทความร้อนได้เป็นการทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow frying) และการทอดแบบน้ำมันท่วม (deep fat frying) แสดงดังภาพที่ 1

1.1 การทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow frying)

เหมาะสำหรับอาหารที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอน ไข่ เบอร์เกอร์ และพายชนิดต่างๆ ความร้อนจากผิวของกระทะร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำมันบางๆ ไปยังอาหาร ความหนาของชั้นน้ำมันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของผิวหน้าอาหาร ถ้าชั้นน้ำมันบาง ฟองไอน้ำเดือดจะทำให้อาหารเคลื่อนที่ขึ้นลงบนผิวร้อนของกระทะ การกระจายความร้อนจึงไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผิวหน้าของอาหารที่ทอดแบบน้ำมันตื้นมีสีน้ำตาลไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามวิธีทอดแบบนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูง (200-450 วัตต์/เมตร² เคลวิน)

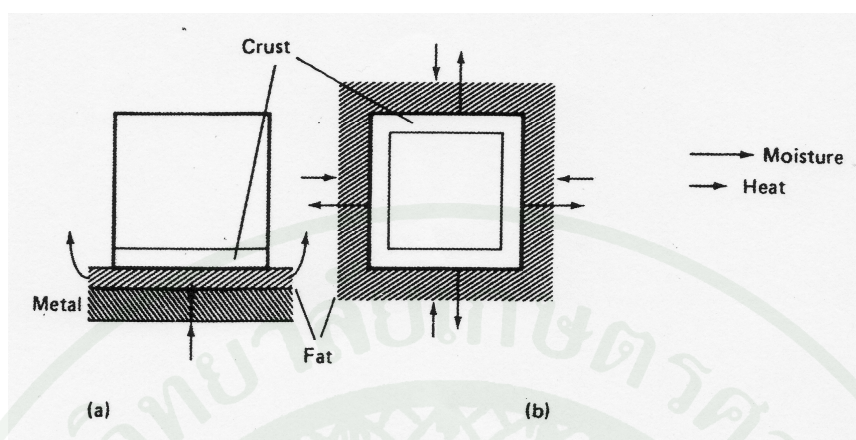
1.2 การทอดแบบน้ำมันท่วม (deep fat frying)

การทอดแบบน้ำมันท่วมจะใช้น้ำมันเป็นตัวกลางให้ความร้อนแก่อาหาร ทำให้อาหารสุก อาหารจะจมอยู่ในน้ำมันหรือลอยอยู่ที่ผิวหน้าของน้ำมัน น้ำมันมีอุณหภูมิสูง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวหน้าของอาหารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำที่ผิวหน้าเกิดการเดือดและระเหย ทำให้ผิวหน้าแห้ง เกิดลักษณะรูพรุน หยิบ เปราะ ส่วนน้ำภายในเนื้ออาหารจะเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวหน้า จากนั้นจะระเหยออกไป ดังภาพที่ 2 การทอดแบบน้ำมันท่วมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี เช่น การสุกของแป้งและโปรตีน การเกิดสีน้ำตาล การเปลี่ยนสถานะเป็นกลาส ทำให้คุณสมบัติทางด้านสี เนื้อสัมผัส กลิ่นรสมีการเปลี่ยนแปลง เกิดเป็นลักษณะเฉพาะของอาหารทอด (Mellema, 2003)

การถ่ายเทความร้อนในการทอดแบบนี้เป็นการพาความร้อนในน้ำมันร้อนและการนำความร้อนสู่ภายในอาหาร ผิวอาหารทั้งหมดจะได้รับความร้อนใกล้เคียงกัน การทอดแบบนี้เหมาะสมสำหรับอาหารทุกรูปทรง แต่อาหารที่มีรูปร่างไม่แน่นอนจะดูดซึมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีรูปร่างแน่นอน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก่อนเกิดการระเหยเท่ากับ 250-300 วัตต์/เมตร² เคลวิน และเพิ่มขึ้น 800-1000 วัตต์/เมตร² เคลวิน เนื่องจากเกิดการเดือดและการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่หนีออกจากอาหาร อย่างไรก็ตามถ้าอัตราการระเหยสูงเกินไปจะเกิดฟิล์มบางๆ ของไอน้ำอยู่บนผิวอาหารทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง (วิไล, 2546)

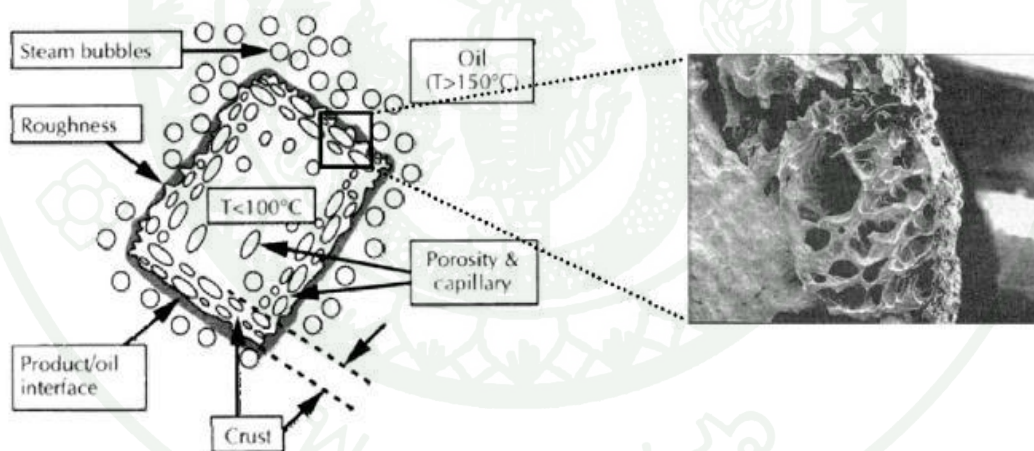
Moreira *et al.* (1999) รายงานว่า การทอดแบบน้ำมันท่วมสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วง คือ

- 1) ช่วงอาหารเริ่มร้อน ในช่วงนี้อาหารจะจุ่มลงในน้ำมันที่ร้อน และที่ผิวของอาหารได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (ประมาณ 103 องศาเซลเซียส) การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำมันและอาหารในระหว่างช่วงนี้จะเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาดำเนินไปเนื่องจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และในช่วงนี้จะไม่เกิดการระเหยของน้ำออกจากที่ผิวของอาหาร
- 2) ช่วงน้ำที่ผิวเกิดการเดือด การระเหยออกของน้ำที่ผิวของอาหารเป็นสัญญาณที่บ่งบอกว่าน้ำมันที่ผิวเกิดการเดือด การพาความร้อนจะเปลี่ยนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติเป็นการพาความร้อนแบบบังคับเนื่องจากสภาวะความปั่นป่วนของน้ำมันที่อยู่รอบๆ อาหาร ในช่วงนี้ที่พื้นผิวของอาหารจะมีโครงสร้างของเปลือกเกิดขึ้น
- 3) ช่วงอัตราการระเหยน้ำลดลง ในระหว่างช่วงนี้ ความชื้นภายในอาหารจำนวนมากจะเคลื่อนที่ออกจากอาหาร และอุณหภูมิภายในจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเดือด ในช่วงนี้จะคล้ายๆกับช่วง falling-rate ในกระบวนการผลิตอาหารที่มีการเอาน้ำออกทั่วไป เช่น การทำแห้ง เปลือกในช่วงนี้ จะมีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลให้การระเหยออกของไอน้ำที่ผิวอาหารลดลง
- 4) ช่วงไอน้ำระเหยออกจนหมด ในช่วงนี้อัตราการเคลื่อนที่ออกของความชื้นจะลดลง และจะไม่เห็นไอน้ำระเหยออกจากที่พื้นผิวของอาหารในลักษณะที่เป็นฟองอากาศ (Bubbles) แต่ในทางกลับกันน้ำมันจะถูกดูดซึมเข้าไปที่ผิวของอาหารแทน



ภาพที่ 1 ชนิดของกระบวนการทอด (a) การทอดแบบน้ำมันตื้น (b) การทอดแบบน้ำมันท่วม

ที่มา: Fellow (1990)



ภาพที่ 2 (ซ้าย) ชิ้นอาหารที่อยู่ระหว่างการทอดแบบท่วมน้ำมัน (ขวา) ส่วนบริเวณเปลือก (crust) ของมันฝรั่งทอดที่สแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ที่มา: Mellema (2003)

2. การทอดอาหารด้วยเทคนิคการทอดใหม่ๆ

ในปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการทอดด้วยเทคนิคใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดให้ดีขึ้น เช่น การลดการดูดซับน้ำมัน การควบคุมสีไม่ให้เข้มเกินไป ได้แก่

2.1 การทอดในระบบสุญญากาศ

การทอดในระบบสุญญากาศอาศัยหลักการที่ว่า จุดเดือดของน้ำมันจะลดลงที่ความดันต่ำ จุดเดือดของน้ำมันอาจลดลงจาก 180 องศาเซลเซียส เหลือเพียง 60-70 องศาเซลเซียส การทอดวิธีนี้จะช่วยรักษากลิ่นรสและสีของผักและผลไม้ให้เหมือนธรรมชาติได้ดีกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศ (วิไล, 2546) ความแตกต่างระหว่างการทอดในสภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบองค์ประกอบของมันฝรั่งผ่านบางที่ทอดในระบบสุญญากาศกับการทอดที่บรรยากาศปกติ

องค์ประกอบ	การทอดที่บรรยากาศปกติ (%)	การทอดในระบบสุญญากาศ (%)
ความชื้น	2.50%	2.00%
โปรตีน	4.70%	4.10%
ไขมัน	35.00%	14.80%
เส้นใย	1.80%	1.20%
เถ้า	3.40%	1.40%
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่เส้นใย	52.60%	76.50%
พลังงาน	555 kcal	461 kcal
เหล็ก	1.7 mg	2.14 mg
แคลเซียม	17 mg	11.7 mg
โซเดียม	400 mg	9.8 mg
โปแตสเซียม	1200 mg	575 mg

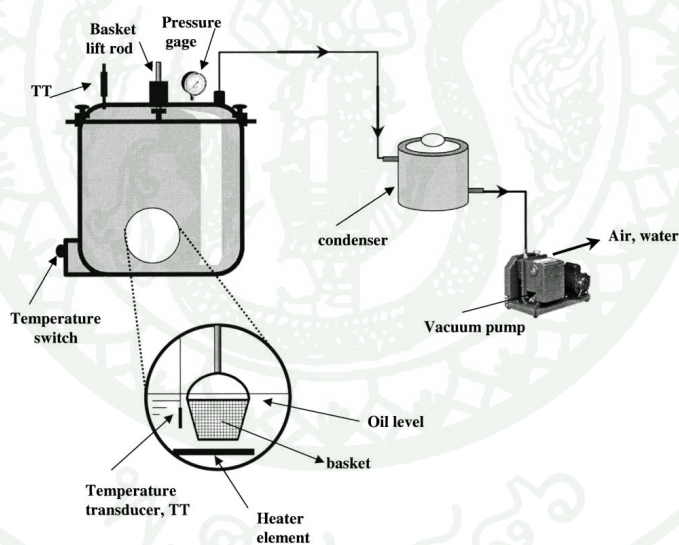
ที่มา: วิไล (2546)

เครื่องทอดสุญญากาศประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ หม้อทอดสุญญากาศ คอนเดนเซอร์ และปั๊มสุญญากาศ ดังภาพที่ 3 (Garayo and Moreira, 2002)

หม้อทอดสุญญากาศ ในส่วนนี้จะประกอบด้วยตะกร้าที่ใช้สำหรับใส่วัตถุดิบที่ต้องการจะทอด และภายในมีถังสำหรับเติมน้ำมันที่ใช้ทอด นอกจากนี้ก็จะมีเกจวัดความดันสำหรับอ่านค่าความดันภายในถังอีกด้วย

คอนเดนเซอร์มีหน้าที่ควบแน่นไอน้ำที่ได้จากการระเหยจากอาหารก่อนเข้าสู่ปั๊ม เพื่อป้องกันความเสียหายของปั๊ม

ปั๊มสุญญากาศเป็นตัวดึงหรือดูดอากาศจากภายในหม้อทอดสุญญากาศทำให้ความดันภายในลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบและระบบต่างๆของเครื่องทอดสุญญากาศ

ที่มา: Garayo and Moreira (2002)

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทอดในระบบสุญญากาศต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดไว้พอสมควร ดังนี้

วารุณี (2546) ได้ศึกษาการปรับปรุงกรรมวิธีการทอดพลาสติกเค็มทอดกรอบ โดยเปรียบเทียบการทอดในสภาวะบรรยากาศปกติ (760 mmHg) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที และที่สภาวะสุญญากาศ (150 mmHg) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที พบว่าพลาสติกมีปริมาณน้ำมันร้อยละ 33.05 และ 16.59 ตามลำดับ ดังนั้น การทอดในสภาวะสุญญากาศสามารถช่วยลดปริมาณน้ำมันในอาหารทอดได้

Garayo and Moreira (2002) ได้ศึกษาการทอดแผ่นมันฝรั่งในสภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 118 132 และ 144 องศาเซลเซียส ที่ความดันสุญญากาศ 16.661 9.888 และ 3.115 kPa พบว่า อุณหภูมิน้ำมันและสภาวะความดันสุญญากาศมีอิทธิพลต่ออัตราการสูญเสียน้ำและอัตราการดูดซึมน้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ การทอดที่อุณหภูมิน้ำมันสูงสุด (144 องศาเซลเซียส) และที่สภาวะความดันสุญญากาศต่ำสุด ($P_{vac} = 3.115$ kPa) มีอัตราการสูญเสียน้ำและการดูดซึมน้ำมันมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลในด้านปริมาตรการหดตัวและความแข็ง แต่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าสี และเมื่อนำสภาวะสุญญากาศที่สภาวะดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับ การทอดที่สภาวะบรรยากาศ (165 องศาเซลเซียส) พบว่า การทอดในสภาวะสุญญากาศมีปริมาณน้ำมันที่ต่ำ มีความอ่อนนุ่ม และมีสีที่อ่อนกว่าการทอดในสภาวะบรรยากาศ

2.2 การทอดด้วยไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นพลังงานรูปแบบใหม่ที่น่าสนใจไปประโยชน์ทั่วไปภายในครัวเรือนในรูปแบบของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้หุงต้มอาหารได้ ในปัจจุบันได้มีการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทำความร้อน (Heating) และกระบวนการอบแห้ง (Drying) ในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีหลักการให้ความร้อนที่แตกต่างจากวิธีธรรมดาทั่วไปที่อาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน และการพาความร้อน ซึ่งในการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟหรือการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานจลน์ของโมเลกุลภายในวัสดุ ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นภายในวัสดุก่อน ทำให้วัสดุแห้งมาจากภายใน กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงเป็นวิธีที่ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็วกว่าการประกอบอาหารด้วยระบบอื่นๆ

กัณณิกา และคณะ (2548) ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวเกรียบที่ทอดด้วยไมโครเวฟทั้ง 2 วิธี คือ การทอดด้วยไมโครเวฟร่วมกับการใช้น้ำมันและไมโครเวฟนาน 45 50 และ 60 วินาที กับการทอดด้วยวิธีดั้งเดิม (ทอดในน้ำมันท่วม) ที่อุณหภูมิน้ำมัน 170-180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วินาที นำไปตรวจคุณภาพภายหลังการทอดทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น การขยายตัว สี และเนื้อสัมผัส วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้นกับปริมาณน้ำมัน และประเมินผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสอีกด้วย พบว่า ข้าวเกรียบที่ทอดด้วยวิธีดั้งเดิมมีความหนาแน่น (0.025 กรัม/มิลลิเมตร) กับความแข็งที่น้อยกว่า (6.56 นิวตัน) ส่วนค่าการขยายตัว (93.431 %) มีค่าที่มากกว่าการทอดด้วยไมโครเวฟทุกเวลาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.049-0.059 กรัม/มล. ค่าความแข็ง 9.73-12.26 นิวตัน และค่าการขยายตัว 63.613-87.591 %) การทอดด้วยวิธีดั้งเดิมมีค่า L^* ไม่แตกต่าง ส่วนค่า a^* มีความเป็นสีเหลืองมากกว่า และค่า b^* ก็มีค่าความเป็นสีแดงที่มากกว่าเช่นเดียวกัน ในขณะที่ปริมาณไขมันของข้าวเกรียบที่ทอดด้วยวิธีดั้งเดิมมี 27.90 % ส่วนข้าวเกรียบที่ทอดด้วยไมโครเวฟร่วมกับการใช้น้ำมันเป็นเวลา 60 วินาที มีปริมาณไขมันสูงสุดเพียง 9.56 % เมื่อนำข้าวเกรียบที่ทอดด้วยวิธีดั้งเดิมกับข้าวเกรียบที่ทอดด้วยไมโครเวฟร่วมกับการใช้น้ำมันเป็นเวลา 60 วินาที ไปทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนค่าสี กลิ่นรส รสชาติ และการยอมรับรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ข้าวเกรียบที่ทอดด้วยวิธีแบบดั้งเดิมได้รับคะแนนด้านเนื้อสัมผัสสูงกว่าข้าวเกรียบที่ทอดด้วยไมโครเวฟอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Oztop *et al.* (2007a) ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทอดมันฝรั่งโดยวางแผนการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง ปัจจัยที่ใช้ศึกษามี 3 ปัจจัยได้แก่ กำลังไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 400 550 และ 700 วัตต์ เวลาที่ใช้ทอด 3 ระดับคือ 1.5 2.0 และ 2.5 นาที และเวลาที่ใช้ในการทำแห้งด้วยวิธีอบสโตนิก 3 ระดับคือ 15 30 และ 45 นาที โดยตัวแปรตามที่ใช้วัด คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน เนื้อสัมผัส และสีของมันฝรั่งภายหลังการทอด พบว่า ปริมาณความชื้นของมันฝรั่งภายหลังการทอดลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำมัน ความแข็ง และค่าการเปลี่ยนแปลงของสี เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทอดและกำลังไมโครเวฟ ส่วนการเพิ่มเวลาการทำแห้งแบบอบสโตนิกช่วยลดปริมาณความชื้น ลดปริมาณน้ำมัน และเพิ่มความแข็งของมันฝรั่งภายหลังการทอด สภาวะที่เหมาะสมคือ กำลังไมโครเวฟ 400 วัตต์ เป็นเวลา 1.5 นาที หลังจากที่มีการทำแห้งด้วยวิธีอบสโตนิกเป็นเวลา 39 นาที

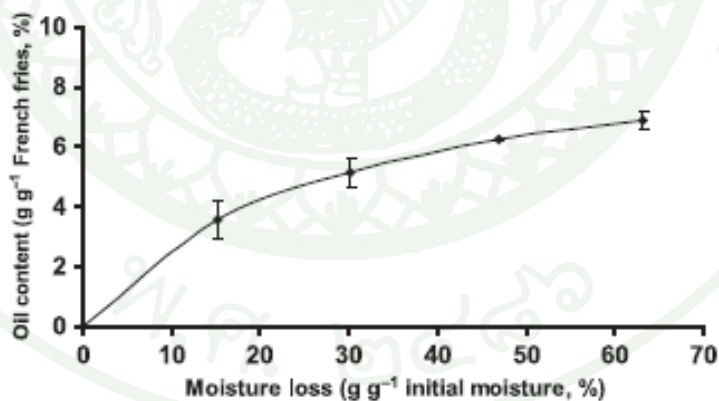
3. กลไกการดูดซึมน้ำมัน

กลไกการดูดซึมน้ำมัน มี 3 กลไกหลักๆ คือ

3.1 การแทนที่น้ำ (Water replacement)

เป็นกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอด น้ำในอาหารระเหยกลายเป็นไอน้ำและพยายามเคลื่อนที่ออกจากชิ้นอาหาร ส่งผลให้เกิดแรงดันทำให้เกิดเป็นช่องว่างภายในโครงสร้างอาหาร เมื่อการทอดดำเนินไปเรื่อยๆ น้ำมันจะเคลื่อนที่เข้าไปในอาหารแทนที่น้ำที่ระเหยออกไปในช่วงแรก การที่น้ำมันเข้าไปในช่องว่างที่เกิดจากการระเหยออกของน้ำนี้จะช่วยให้โครงสร้างของอาหารไม่เกิดการหดตัวหรือยุบตัว (Dana and Saguy, 2006)

นอกจากนี้ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกกับปริมาณน้ำมันที่ดูดซึมเข้ามีความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 4 ซึ่งเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากอาหารมาก ส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำมันที่เพิ่มขึ้น (Rossell, 2001; Ziaifar *et al.*, 2008)

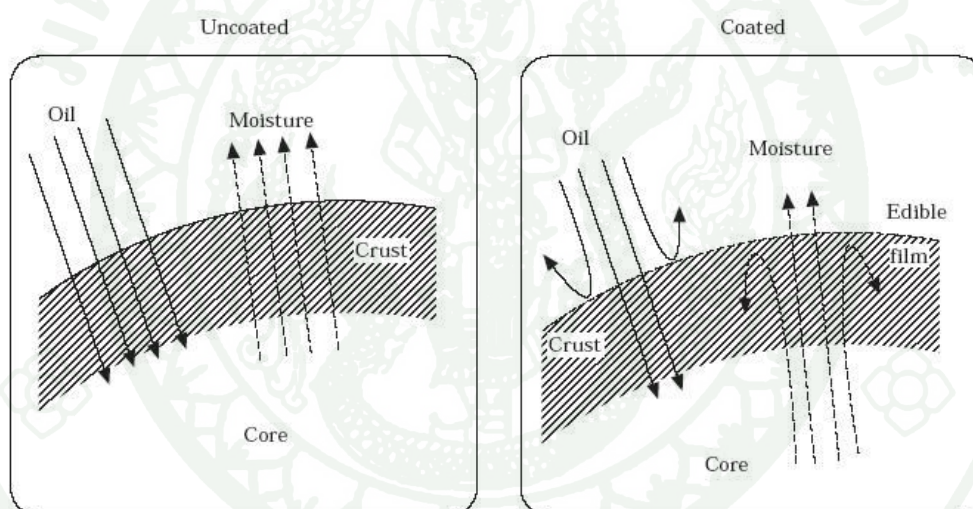


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ระเหยออกกับปริมาณน้ำมันที่ดูดซึมเข้าไปในระหว่างการทอดมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส

ที่มา: Ziaifar *et al.* (2008)

ดังนั้น ปริมาณความชื้นเริ่มต้นจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดูดซึมน้ำมัน ในปัจจุบันจึงมีวิธีปฏิบัติก่อนการทอดเพื่อลดการดูดซึมน้ำมันด้วยกลไกดังกล่าว Saguy and Pinthus (1995) กล่าวว่า การเตรียมวัตถุดิบก่อนการทอดที่ต่างกันจะมีความสามารถในการลดปริมาณน้ำมันที่แตกต่างกันไปด้วย การลวกหรือการทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นลดลงก่อนที่จะนำไปทอดพบว่า มีผลทำให้ปริมาณของน้ำมันหลังทอดลดลง

วิธีการใช้สารเคลือบยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเตรียมก่อนทอด โดยมักจะใช้สารเคลือบในกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ด้วยวิธีการผสมในแป้งที่มีเกล็ดขนมปังหรือการเคลือบผิวโดยตรง ซึ่งจะช่วยให้ตัวขวางกั้นการดูดซึมน้ำมันในผลิตภัณฑ์ได้ (Fan and Arce, 1986) มีผลทำให้มีการสูญเสียความชื้นน้อยลง และมีปริมาณน้ำมันที่ดูดซับไว้น้อยลงด้วย ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การถ่ายเทน้ำมันและความชื้นของตัวอย่างที่มีการเคลือบและไม่เคลือบระหว่างการทอด

ที่มา: Mallikarjunan *et al.* (1997)

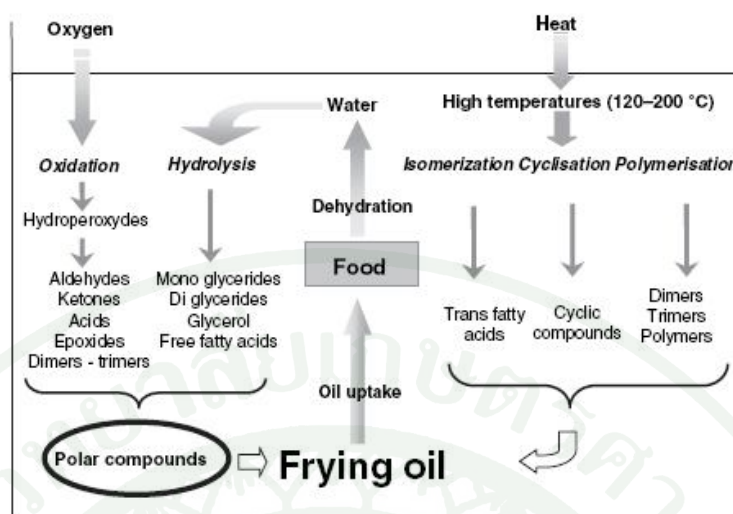
3.2 การทำให้เย็นภายหลังการทอด (Cooling – phase effect)

Gamble *et al.* (1987) กล่าวว่า น้ำมันส่วนใหญ่เข้าสู่อาหารระหว่างการทำให้เย็น เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำทำให้เกิดสถานะสุญญากาศ ส่งผลให้น้ำมันซึ่งเกาะอยู่ที่ผิวซึมเข้าสู่อาหาร นอกจากนี้ Moreira (1996) ได้ศึกษาการกระจายของน้ำมันของผลิตภัณฑ์แผ่นแป้งข้าวโพดทอด พบว่า มีปริมาณน้ำมันภายในเพียง 20% และอีก 80% อยู่ที่ผิวหนังของอาหาร หลังจากทิ้งไว้ให้น้ำมันที่อยู่บริเวณผิวหนังของผลิตภัณฑ์จะดูดซึมเข้าไปข้างใน 64% ส่วนอีก 36% ยังคงอยู่ที่เดิม

ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่า หลังจากกระบวนการทอดเสร็จสิ้น จะย้ายอาหารออกมาจากน้ำมัน อุณหภูมิภายในของผลิตภัณฑ์จะเริ่มลดลง ส่งผลให้ไอน้ำที่มีภายในเกิดการกลั่นตัว และความดันภายในลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอก ทำให้น้ำมันที่อยู่บริเวณผิวหนังสามารถซึมผ่านเข้าไปภายในได้ (Ziaiiifar *et al.*, 2008) การดูดซึมน้ำมันด้วยกลไกนี้จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากสำหรับกระบวนการทอดที่ใช้เวลาสั้นและอาหารที่มีขนาดใหญ่ เพราะการทอดในสภาวะดังกล่าว ที่ผิวหนังของอาหารหลังการทอดจะไม่แห้งสมบูรณ์ ทำให้ยังมีไอน้ำเหลืออยู่ในชิ้นอาหาร (Mellema, 2003) สำหรับวิธีที่ช่วยลดการดูดซึมน้ำมันหลังจากกระบวนการทอดนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีแรกใช้ลมร้อนหรือไอน้ำที่มีความอึดตัวเป่าที่ชิ้นอาหารเพื่อควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิดการเย็นตัว และวิธีที่สองใช้กระดาษซับน้ำมันที่บริเวณผิวหนังของอาหาร ซึ่งทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปทางอุตสาหกรรม (Dana and Saguy, 2006)

3.3 สารลดแรงตึงผิว (Surface active agent)

ในระหว่างการทอด น้ำมันที่ใช้จะเกิดการเสื่อมสภาพลงเนื่องจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง และความชื้นกับออกซิเจนจากอาหาร เป็นสาเหตุทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งทำให้โมเลกุลของน้ำมันเกิดการแตกตัวเป็นองค์ประกอบต่างๆ เช่น โมโนกลีเซอไรด์ (Mono-glycerides), ไดกลีเซอไรด์ (Diglycerides), กลีเซอรอล (Glycerol) และกรดไขมันอิสระ ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยเฉพาะ 2 ชนิดแรกจะทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว โดยจะไปลดแรงตึงผิว (interfacial tension) ระหว่างน้ำมันกับอาหาร ซึ่งจะทำให้อาหารสัมผัสกับน้ำมันได้มากขึ้น ส่งผลให้อาหารมีการดูดซึมน้ำมันที่มากขึ้น (Dana and Saguy, 2006)



ภาพที่ 6 การเสื่อมสภาพของน้ำมันระหว่างการทอด

ที่มา: Ziiaifar *et al.* (2008)

ไขมันและน้ำมันสามารถเกิดพันธะใหม่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอนในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนได้ซึ่งถ้าเกิดพันธะใหม่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอนภายในโมเลกุลของกรดไขมันเดียวกันจะทำให้เกิดวงแหวน (cyclic fatty acid) ถ้าเกิดพันธะใหม่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอนจากกรดไขมันต่างโมเลกุลกันจะทำให้เกิดไดเมอร์ หรืออาจเกิดขึ้นได้ระหว่างกรดไขมันที่อยู่ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เดียวกันหรือต่างโมเลกุลกันก็ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้น้ำมันมีสีคล้ำมากขึ้น มีความหนืดเพิ่มขึ้น จุดเกิดควันลดลง และเกิดฟองมากขึ้น (นิธิยา, 2548) นอกจากนี้พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลสูงยังไปลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวระหว่างการทอดและทำให้อาหารดูดซับน้ำมันมากขึ้นอีกด้วย (Hallstrom, 1980)

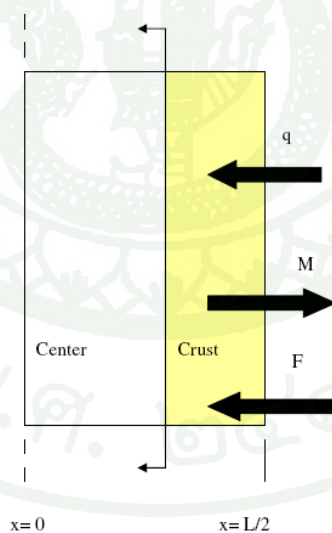
ในการทอดอาหารไขมันหรือน้ำมันจะเป็นตัวนำความร้อนทำให้อาหารสุก ช่วยหล่อลื่นไม่ให้อาหารติดกับภาชนะขณะทอด ทำให้อาหารมีสีและเพิ่มรสชาติ สมบัติของไขมันหรือน้ำมันทอดอาหารที่ดีต้องมีความคงตัว มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทนทานต่อความร้อนได้ถึงอุณหภูมิประมาณ 325-375 องศาฟาเรนไฮต์ และต้องมีสมบัติสัมพันธ์กับอาหารที่ใช้ทอด เพราะกลิ่นและรสชาติของไขมันหรือน้ำมันจะติดไปกับอาหารที่ทอดแล้วด้วย

น้ำมันพืชส่วนใหญ่จะมีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมาก ซึ่งจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หากไม่มีการเติมสารต้านออกซิเดชันลงไป น้ำมันนั้นๆ อย่งไรก็ตามในน้ำมันพืชตามธรรมชาติจะมีสารต้านออกซิเดชันธรรมชาติ เช่น วิตามินอี หรือโทโคฟีรอล (Tocopherols) และโทโคไตรอีนอล (Tocotrienols) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันให้แก่กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวได้ (นิธิยา, 2548) ในอุตสาหกรรมการทอดน้ำมันที่นิยมใช้ คือ น้ำมันปาล์ม เพราะน้ำมันปาล์มมีค่าไอโอดีน และกรดไขมันไม่อิ่มตัวปริมาณต่ำ ซึ่งกรดไขมันชนิดนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและกลิ่นเหม็นหืนในอาหาร

4. แบบจำลองปฐภูมิที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทอด

4.1 การถ่ายเทมวล

ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลในระหว่างการทอดเกิดขึ้น 2 ปรากฏการณ์ คือ การระเหยออกของน้ำจากภายในอาหารสู่ภายนอก และการดูดซึมเข้ามาในอาหารของน้ำมันดังแสดงในภาพที่ 7 มีสมการทางคณิตศาสตร์มากมายที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทมวลของความชื้นและน้ำมัน ได้แก่



ภาพที่ 7 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดอาหารแบบน้ำมันท่วม

โดย q = ความร้อน M = ความชื้น F = น้ำมัน

ที่มา: Alvis *et al.* (2009)

4.1.1 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ (Kinetics model) (Heldman *et al.*, 2009)

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งคือ ปริมาณสารตั้งต้นที่ลดลงต่อเวลา หรือปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลา ในปฏิกิริยาหนึ่งๆ โดยที่สารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์นี้สามารถเป็นคุณภาพทางเคมี จุลินทรีย์ หรือทางกายภาพใดๆ ที่สามารถวัดเป็นปริมาณได้ สมการจลนพลศาสตร์มีสมการเริ่มต้น ดังนี้

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n \quad (1)$$

ชนิดจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีกำหนดโดยค่าอันดับปฏิกิริยา (n) ที่พบโดยส่วนใหญ่ในอาหารมักเป็นชนิดอันดับที่ 0 ถึง 2 แต่มักเป็นชนิดอันดับ 1 มากที่สุด รองลงมาคืออันดับที่ 0 โดยเมื่อแทนค่า n เป็นค่า 0 1 และ 2 ในสมการที่ (1) จะได้รูปแบบสมการ ดังนี้

สำหรับปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ($n = 0$)

เมื่อแทนค่า $n = 0$ ในสมการที่ (1) แล้วทำการอินทิเกรต จะได้

$$C = C_0 - kt \quad (2)$$

จากสมการ (2) เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ t จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยที่จุดตัดแกน y คือค่า C_0 (ปริมาณความเข้มข้นของสารเริ่มต้น) และความชันคือค่า k มีหน่วยคือ ความเข้มข้นต่อเวลา ($[]/\text{time}$)

สำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ($n = 1$)

เมื่อแทนค่า $n = 1$ ในสมการที่ (1) แล้วทำการอินทิเกรต จะได้

$$-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = kt \quad (3)$$

จากสมการ (3) เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$ กับ t จะได้

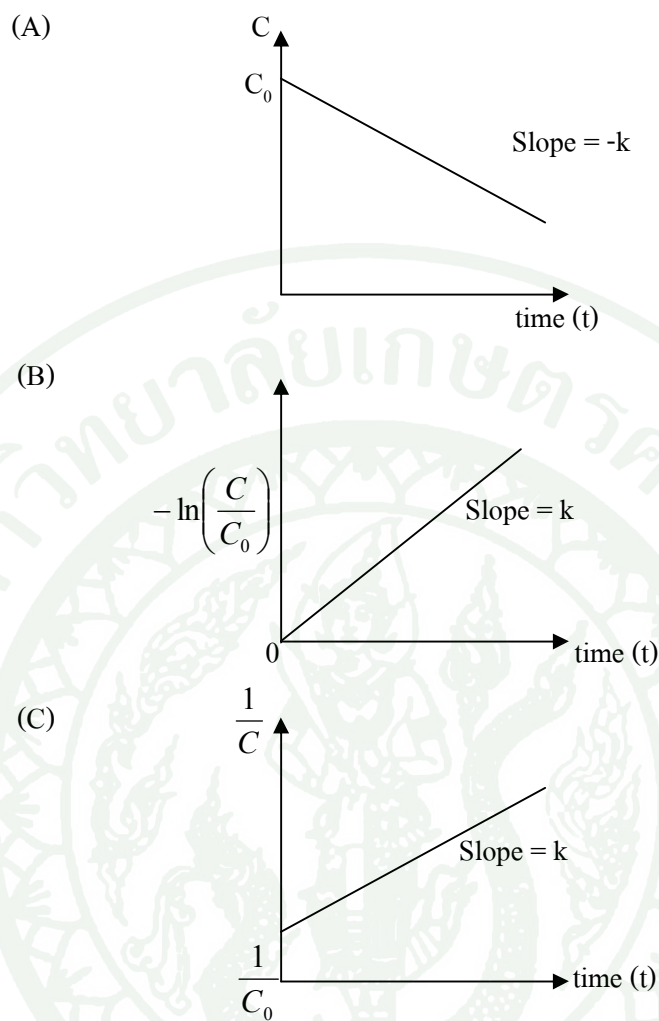
ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยที่ความชันคือค่า k มีหน่วยคือ ส่วนกลับของเวลา (1/time)

สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง ($n = 2$) ;

เมื่อแทนค่า $n = 2$ ในสมการที่ (1) แล้วทำการอินทิเกรต จะได้

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt \quad (4)$$

จากสมการ (4) เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{C}$ กับ t จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยที่จุดตัดแกน y คือค่า $\frac{1}{C_0}$ และความชันคือค่า k มีหน่วยคือ ส่วนกลับของความเข้มข้นเวลา (1/[].time) ซึ่งความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นในอันดับต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา (A) ที่ปฏิกิริยาอันดับ 0; (B) ที่ปฏิกิริยาอันดับ 1; (C) ที่ปฏิกิริยาอันดับ 2

ที่มา: Heldman *et al.* (2009)

สำหรับสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทมวลในระหว่างการทอดอาหารแบบน้ำมันท่วมเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 โดยแบบจำลองของ Krokida *et al.* (2001) กำหนดให้ปริมาณความชื้นเป็นสารตั้งต้นและปริมาณน้ำมันเป็นสารผลิตภัณฑ์ มีรูปแบบสมการดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$\frac{dm}{dt} = k_m (m_t - m_{eq}) \quad (5)$$

$$\frac{do}{dt} = k_o (o_t - o_{eq}) \quad (6)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (5) และ (6) ได้

$$\ln \left(\frac{m_t - m_{eq}}{m_0 - m_{eq}} \right) = \ln(MR) = k_m t \quad (7)$$

$$\ln \left(\frac{o_t - o_{eq}}{o_0 - o_{eq}} \right) = \ln(OR) = k_o t \quad (8)$$

Debnath *et al.* (2003) ศึกษาการใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 ในการทำนายปริมาณความชื้นกับน้ำมันในระหว่างการทอดขนมขบเคี้ยวชนิดหนึ่งที่ทำมาจากแป้งถั่วเขียว ผสมแป้งคัดแปรสตราซ์ในน้ำมันทานตะวันที่อุณหภูมิ 150 175 และ 200 องศาเซลเซียส (สมการที่ 7 กับ 8) พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 150 ไปยัง 200 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.045 ไปยัง 0.096 s⁻¹ ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำมันก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันจาก 0.056 ไปยัง 0.082 s⁻¹

Debnath *et al.* (2009) ศึกษาการใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 (สมการที่ 8) ในการอธิบายการป้องกันไม่ให้น้ำมันที่ผิว (Surface oil) ซึมผ่านเข้าไปภายในอาหาร (Structure oil) ภายหลังการทอดได้โดยใช้วิธีการอบภายหลังการทอดด้วยน้ำมันฝรั่งทอดที่อุณหภูมิห้อง 100 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อมีการอบภายหลังการทอดที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก อุณหภูมิห้องไปยัง 180 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำมันลดลงจาก 0.015 ไป

ยัง 0.009 s^{-1} แสดงให้เห็นว่าการอบภายหลังการทอดที่อุณหภูมิสูงสามารถช่วยป้องกันไม่ให้น้ำมันที่ผิวซึมผ่านเข้าไปในอาหารในช่วงภายหลังการทอดได้

4.1.2 สมการ Page's law

สมการสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เรียกอีกอย่างว่า สมการ Lewis's model ในปัจจุบันมีสมการที่ดัดแปลงเพิ่มขึ้นจาก Lewis's model โดยเติมเลขไร้มิติ n เพิ่มขึ้นมาเพื่อให้ได้ความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น เรียกสมการนี้ว่า Page's law ดังแสดงในสมการที่ (9)

$$\ln(MR) = \exp(-k_m t^n) \quad (9)$$

สมการที่ (9) นี้นิยมใช้ในการอธิบายการระเหยออกของน้ำในกระบวนการอบแห้งได้แก่ การอบแห้งหัวหอมใหญ่ (Sharma *et al.*, 2005) ผักขม (Ozkan *et al.*, 2007) พักทอง (Alibas, 2007) และใบมินท์ (Therdthai and Zhou, 2009) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สมการ Page's law สามารถอธิบายการระเหยออกของน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสมการอื่นๆ

4.1.3 แบบจำลองของ Moyano and Pedreschi

Moyano and Pedreschi (2006) ได้เสนอสมการที่ได้จากการทดลองเพื่ออธิบายการดูดซึมน้ำมันในระหว่างการทอดมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 120 150 และ 180 องศาเซลเซียส 2 สมการคือ สมการของ Moyano and Pedreschi (สมการที่ 12) กับ สมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 (สมการที่ 13) ดังนี้

สมมติให้ปริมาณน้ำมันที่เวลาใดๆ มีค่า

$$O = O_{eq} - O^* \quad (10)$$

สมมติให้ O^*/O เป็นสัดส่วนกับเวลา จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (10)

$$\frac{o^*}{o} = (k_o t)^{-1} \quad (11)$$

เมื่อนำสมการ (11) มาแทนสมการ (10) จะได้สมการของ Moyano and Pedreschi ดังสมการที่ (12)

$$o = \frac{o_{eq} k_o t}{1 + k_o t} \quad (12)$$

และอีกสมการคือสมการที่ (8) แต่สมมติให้ O_0 มีค่าเท่ากับ 0 จะได้

$$o = o_{eq} (1 - \exp(-k_o t)) \quad (13)$$

เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดเพิ่มมากขึ้น ค่า k_o ของทั้ง 2 สมการมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเหมือนกัน และเมื่อเปรียบเทียบ 2 สมการ (สมการที่ 12 กับ 13) พบว่า ทั้ง 2 สมการมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9786 กับ 0.9793 ตามลำดับ ดังนั้นทั้ง 2 สมการจึงสามารถนำมาใช้อธิบายการดูดซึมน้ำมันในระหว่างการทอดอาหารได้

Troncoso and Pedreschi (2009) ใช้สมการที่ 12 ในการอธิบายการดูดซึมน้ำมันในระหว่างการทอดที่สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 120 กับ 140 องศาเซลเซียส และที่สภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิที่ทอดสูงขึ้นจาก 120 ไปยัง 180 องศาเซลเซียส ค่า k_o มีค่าที่สูงขึ้นจาก 0.0084 ไปยัง 0.0433 s^{-1}

4.1.4 แบบจำลองกฎข้อสองของ Fick

Budzaki and Seruga (2005) ศึกษาปรากฏการณ์การดูดซึมน้ำมันและการสูญเสียความชื้นระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วมของตัวอย่างโค Krostula ที่อุณหภูมิ 160 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส โดยใช้สมการ Fick's second law model ในการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว

สมมติให้ตัวอย่างมีรูปร่างที่เป็นแผ่นบาง (slab) สมการที่ใช้คำนวณ คือ

$$\frac{m_t - m_{eq}}{m_0 - m_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{(2n+1)^2 D_{eff,w} \pi^2 t}{4h^2}\right) \right] \quad (14)$$

$$\frac{o_t - o_{eq}}{o_0 - o_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 D_{eff,o} t}{4h^2}\right) \right] \quad (15)$$

จากสมการที่ (14) และ (15) จะเห็นได้ว่าแต่ละสมการประกอบด้วยจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด ซึ่งเทอมท้ายๆ จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นสามารถตัดเทอมท้ายๆ ออกไปได้ นอกจากนี้ยังสมมติฐานให้ m_{eq} และ O_{eq} มีค่าเป็น 0 จะได้สมการ

$$\frac{m_t}{m_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff,w} t}{4h^2}\right) \quad (16)$$

$$\frac{o_t}{o_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff,o} t}{4h^2}\right) \quad (17)$$

จากสมการที่ (16) และ (17) เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$-\ln\left(\frac{\pi^2 m_t}{8 m_0}\right) = \frac{\pi^2 D_{eff,w} t}{4h^2} \quad (18)$$

$$-\ln\left(\frac{\pi^2 o_t}{8 o_0}\right) = \frac{\pi^2 D_{eff,o} t}{4h^2} \quad (19)$$

โดยสมการที่ (18) ใช้สำหรับอธิบายการระเหยของความชื้น และสมการที่ (19) ใช้อธิบายการดูดซึมเข้ามาภายในชั้นอาหารของน้ำมัน จากการศึกษพบว่า การทอดในช่วงเวลา 60 วินาทีแรกมีค่าสัมประสิทธิ์การระเหยออกของน้ำมันมีค่า 5.837×10^{-9} 6.607×10^{-9} 8.472×10^{-9} และ 9.728×10^{-9} m^2/s และในช่วง 60-210 วินาที มีค่า 1.216×10^{-9} 1.013×10^{-9} 1.621×10^{-9} และ 2.148×10^{-9} m^2/s ที่อุณหภูมิน้ำมัน 160 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การ

ระเหยออกของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอดสูงขึ้น สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายมีความสัมพันธ์ของค่า $R^2=0.99$

สำหรับปริมาณน้ำมัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำมันมีค่าที่แปรผันตรงตามอุณหภูมิของน้ำมันเช่นเดียวกันกับความชื้น โดยมีค่า 0.932×10^{-9} 1.135×10^{-9} 1.094×10^{-9} และ 1.054×10^{-9} ที่อุณหภูมิน้ำมัน 160 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายมีความสัมพันธ์ของค่า $R^2=0.99$ เช่นเดียวกัน ดังนั้นสมการ Fick's second law model จึงสามารถนำมาใช้อธิบายการดูดซึมน้ำมันในระหว่างการทอดอาหารได้

Pedreschi *et al.*, (2005) กล่าวว่าสมการ Fick's second law model ได้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการอธิบายปรากฏการณ์การระเหยออกของน้ำในระหว่างการทอด แต่อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวไม่ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงอาหารในระหว่างการทอดซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การระเหยออกของน้ำทำให้มีข้อบกพร่องในการใช้สมการ จึงได้เสนอสมการ Fick's second law model รูปแบบใหม่สำหรับการอธิบายปรากฏการณ์การระเหยออกของน้ำในระหว่างการทอดเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวได้ดังนี้

$$\frac{m_t - m_{eq}}{m_0 - m_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\exp \left(- \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4(1+b)} \left[\left(1 + \frac{D_0 t}{h^2} \right)^{1+b} \right] \right) \right] \quad (20)$$

$$\text{โดยที่} \quad D_{eff,w} = D_0 \left(1 + \frac{D_0 t}{h^2} \right)^b \quad (21)$$

สมการ (20) เรียกว่า Fick's second law with variable model เนื่องจากค่า $D_{eff,w}$ มีหลายค่าแปรผันไปตามเวลา สามารถหาค่าดังกล่าวได้โดยการหาค่า D_0 และ b จากสมการที่ (20) และนำ 2 ค่าดังกล่าวไปแทนในสมการที่ (21) เพื่อหาค่า $D_{eff,w}$ ที่เวลาต่างๆ

เมื่อนำสมการที่ (20) มาเปรียบเทียบกับสมการ Fick's second law model รูปแบบเดิม (สมการที่ 14) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลน้ำของทั้ง 2 สมการมีทิศทางเดียวกัน คือ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดมันฝรั่งมีค่าสูงขึ้นจาก 120 ไปยัง 180 องศาเซลเซียส แต่สมการรูปแบบใหม่สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าโดยมีค่าความผิดพลาด (%RMS) อยู่

ในช่วง 3.07-4.51% ในขณะที่สมการรูปแบบเก่ามีความผิดพลาด (%RMS) มากกว่า โดยมีค่าถึง 34.82-46.07%

4.2 การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส

Pedreschi *et al.* (2001) ได้เสนอสมการที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของแท่งมันฝรั่งในระหว่างการทอดที่อุณหภูมิ 160 175 และ 190 องศาเซลเซียส โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$S = \exp^{-k_s t} + k_h t^2 \quad (22)$$

จากสมการเห็นได้ว่ามี 2 ช่วง สมการในช่วงแรกแสดงถึงการอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อในมันฝรั่ง ส่วนช่วงที่สองแสดงถึงการเกิดเปลือกที่แข็งจากด้านนอก โดยทั้ง 2 ช่วงมีค่าคงที่ k_s และค่า k_h แสดงถึง อัตราการเกิดทั้ง 2 ช่วง ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า ค่าคงที่ทั้งสองค่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อทอดที่อุณหภูมิสูงขึ้น (มีค่า k_s 0.378 ไปยัง 0.6684 min^{-1} กับ ค่า k_h 0.020 ไปยัง 0.047 min^{-1}) ดังนั้น การทอดที่อุณหภูมิสูงจึงส่งผลให้เนื้อสัมผัสของมันฝรั่งมีลักษณะที่กรอบนอกและนุ่มข้างใน

Pedreschi and Moyano (2005) ได้ดัดแปลงสมการที่ (22) โดยเปลี่ยนจากค่า Springiness มาเป็นค่าแรงเจาะสูงสุด (maximum force, MF) เพื่อสำหรับอธิบายการเปรียบเทียบผลของการปฏิบัติก่อนการทอดระหว่างการลวกเพียงอย่างเดียวกับทั้งลวกและอบแห้งมันฝรั่งก่อนการทอดต่อเนื้อสัมผัสสุดท้าย โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$MF = \exp^{-k_s t} + k_h t^2 \quad (23)$$

จากการศึกษา พบว่า สมการที่ (23) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสในระหว่างการทอดได้เป็นอย่างดี

4.3 การเปลี่ยนแปลงของสี

Arteba and Mittal (1994) ได้ใช้สมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงสีของลูกชิ้นเนื้อในระหว่างการทอดแบบวิธีน้ำมันท่วม โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{d\Delta E}{dt} = k_E (\Delta E_{\max} - \Delta E) \quad (24)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (24) ได้

$$\ln \frac{(\Delta E_{\max} - \Delta E_t)}{(\Delta E_{\max} - \Delta E_0)} = -k_E t \quad (25)$$

Kumar *et al.* (2006) ได้ใช้สมการที่ (25) ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงสีของ Gulabjamun ซึ่งเป็นขนมหวานชนิดหนึ่งของประเทศอินเดีย ทำมาจากแป้งสาลี นำมาทอดแล้วเคลือบด้วยน้ำตาลเชื่อม ในขณะทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส พบว่า สมการที่ (25) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสีได้เป็นอย่างดีโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และมีค่า % RMS เท่ากับ 1.62 %

5. สมการ Arrhenius สำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับกำลังไมโครเวฟ

สมการ Arrhenius ทั่วไป เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิ แต่สำหรับกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ อุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนที่กำลังไมโครเวฟหนึ่งๆ มีค่าไม่คงที่ ดังนั้น Dadali *et al.* (2007) จึงคิดสมการ Arrhenius เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการระเหยน้ำ (k_m) กับกำลังไมโครเวฟในการอบแห้งกระเจี๊ยบ โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_a m}{P}\right) \quad (26)$$

จากสมการที่ (26) เมื่อทำเป็นสมการเส้นตรงได้

$$\ln k = \ln k_0 - E_a \frac{m}{p} \quad (27)$$

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้สมการดังกล่าวในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตรากระเหยน้ำ/สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำกับกำลังไมโครเวฟ เช่น การอบแห้งใบมินท์ (Ozbek and Dadali, 2007) และการอบแห้งผักเบี้ยใหญ่ (Demirhan and Ozbek, 2010)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

- 1.1 มันฝรั่งแช่เยือกแข็งสำเร็จรูป (Lamb Weston, USA) รูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด $0.5 \times 0.5 \times 7$ เซนติเมตร³ น้ำหนักชิ้นละ 4 ± 0.5 กรัม
- 1.2 น้ำมันปาล์ม (มรกต, ประเทศไทย)
- 1.3 กระดาษซับน้ำมัน
- 1.4 กระดาษกรองเบอร์ 4 (Whatman, England)
- 1.5 ภาชนะกระเบื้องสำหรับบรรจุน้ำมัน
- 1.6 ถูชิปลือค
- 1.7 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether, Analytical grade, J.T. Baker, USA)

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1 เตาอบไมโครเวฟ (R-892P, SHARP, Thailand)
- 2.2 หม้อทอดแบบน้ำมันท่วม (Princess, Netherland)
- 2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (Sartorius GM 1502, Germany)
- 2.4 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) (FED53, Binder, Germany)
- 2.5 เดซิกเคเตอร์ (Desiccator)
- 2.6 ภาชนะสำหรับหาความชื้น (moisture can)
- 2.7 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Tecator, Soxtec system HT)
- 2.8 เครื่องวัดสี (Miniscan XE, Hunter Lab Reston, Virginia, USA)
- 2.9 เครื่องวัดความแน่นเนื้อ (Texture analyzer) (TA.XT.Plus model, Stable Micro Systems Ltd, Godalming, UK)
- 2.10 เครื่องปั่นผสมอาหาร (AY4671, Moulinex, China)
- 2.11 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. เครื่องมือที่ใช้คำนวณและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.1 คอมพิวเตอร์

3.2 โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น โปรแกรม Minitab รุ่น 14 โปรแกรม Statistica รุ่น 5.5 และโปรแกรม SPSS รุ่น 17

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่าง

นำน้ำมันปาล์มเทใส่ในภาชนะกระเบื้องปริมาณ 400 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนในเตาไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟสูงสุด (850 วัตต์) เป็นเวลา 3 นาที 30 วินาที จากนั้นน้ำมันฝรั่งแช่เยือกแข็งขนาดประมาณ $0.5 \times 0.5 \times 7$ เซนติเมตร จำนวน 10 ชิ้น จุ่มลงในน้ำมันที่ร้อนแล้วทอดที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ 3 ระดับ ได้แก่ 85 425 และ 850 วัตต์ โดยทอดที่เวลาต่างๆ ตามสิ่งทดลองที่กำหนดไว้ในแต่ละหัวข้อของการทดลอง หลังจากทอดเสร็จทำการสะเด็ดน้ำมันและนำตัวอย่างมาซับน้ำมันด้วยกระดาษทิชชู ทิ้งไว้ให้เย็น 2 นาที และนำบรรจุใส่ถุงซิปล็อค

2. การศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาต่อคุณภาพด้านต่างๆ ของมันฝรั่งทอดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3×3

2.1 กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง กำหนดตัวแปรหรือปัจจัยในการทดลอง เป็นการระบุว่าตัวแปรใดที่เกี่ยวข้องกับการทอดมันฝรั่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1.1 ตัวแปรต้น (independent variable) หมายถึง ตัวแปรที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามตัวแปรอื่นๆ เป็นตัวที่เราทราบหรือกำหนดค่าขึ้นมาเองเพื่อใช้ในการพยากรณ์ตัวแปรตาม ในการทดลองนี้ได้กำหนดตัวแปรต้น 2 ตัวคือ กำลังไมโครเวฟที่ใช้ทอด (วัตต์) และเวลาที่ใช้ทอด (วินาที)

2.1.2 ตัวแปรตาม (dependent variation) หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของตัวแปรอื่นๆ เมื่อค่าของตัวแปรต้นตัวใดตัวหนึ่งมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวแปรตามในการทดลองนี้ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน ค่าแรงเจาะสูงสุด และค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE) โดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ในหัวข้อที่ 6

วางแผนการทดลองด้วยวิธีแบบแฟกทอเรียล 3 x 3 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรต้นและระดับของตัวแปรต้นทั้ง 3 ระดับ ตามแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล

ตัวแปรต้น	สัญลักษณ์	รหัส (code factor level)		
		-1	0	1
เวลาที่ใช้ทอด (วินาที)	X_1	0	120	210
กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	X_2	85	425	850

หมายเหตุ X_1 แทน เวลาที่ใช้ทอด (วินาที)

X_2 แทน กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)

2.2 การทอดมันฝรั่งตามสภาวะที่กำหนดไว้ในแผนการทดลองที่ 2.1

ทอดมันฝรั่งตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1 โดยกำหนดสภาวะในการทอดตามแผนการทดลองในตารางที่ 2 ซึ่งมีจำนวนสิ่งทดลองทั้งหมด 11 สิ่งทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3 แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมได้มาวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ตามตัวแปรตามที่ได้ระบุเอาไว้ข้างต้น

ตารางที่ 3 สิ่งทดลองที่ได้จากวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยออกแบบแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล
3 x 3

สิ่งทดลองที่ (Treatment)	X_1	X_2
1	-1	-1
2	0	-1
3	1	-1
4	-1	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	1	0
9	-1	1
10	0	1
11	1	1

จากตารางที่ 3 รหัส -1 0 และ 1 คือ รหัสระดับของแต่ละปัจจัย (code factor level) ที่แสดงเอาไว้ในตารางที่ 2

2.3 สร้างกราฟ contour plot และกราฟ response surface plot จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Statistica และ SPSS ของแต่ละค่าตัวแปรตาม (ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน ค่าแรงเจาะสูงสุด และค่า ΔE)

3. การศึกษาสมการที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทมวลและคุณภาพด้านต่างๆ ในระหว่างการทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟและการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

เตรียมตัวอย่างตามวิธีในหัวข้อที่ 1 ในแต่ละกำลังไมโครเวฟทอดที่เวลา 0 60 90 120 150 180 และ 210 วินาที นำไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน ค่าแรงเจาะสูงสุด และค่า ΔE

เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมธรรมดาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ควบคุมระดับเวลาการทอดและอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำมันฝรั่งกับปริมาตรของน้ำมัน เหมือนกับการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟ นำข้อมูลแต่ละด้านไปสร้างความสัมพันธ์ของแต่ละสมการ ด้านต่างๆ ดังนี้

3.1 สมการที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทมวลในระหว่างการทอด

การถ่ายเทมวลในระหว่างการทอดมี 2 ทิศทางคือ การระเหยออกของน้ำ และการดูดซึมน้ำมันเข้ามาภายในอาหาร สมการที่ใช้สำหรับอธิบายการระเหยออกของน้ำมี 3 สมการ ได้แก่ สมการ First order kinetics (สมการที่ 7) สมการ Page's law (สมการที่ 9) และ สมการ Fick's second law with variable diffusivity (สมการที่ 20) ส่วนสมการที่ใช้สำหรับอธิบายการดูดซึมเข้ามาของน้ำมันมี 3 สมการเช่นเดียวกัน ได้แก่ สมการ First order kinetics สมการที่ 8 สมการของ Moyano and Pedreschi (สมการที่ 12) และสมการ Fick's second law (สมการที่ 15) นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาแทนค่าในสมการเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ ได้แก่ค่า k_m k_o n $D_{eff,w}$ และ b ที่อยู่ในสมการ ด้วยวิธีการประมาณแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear estimation)

3.2 สมการที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสในระหว่างการทอด

การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสใช้สมการที่ 23 ในการอธิบายตามวิธีของ Pedreschi and Moyano (2005)

3.3 สมการที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสีในระหว่างการทอด

การเปลี่ยนแปลงของสีใช้สมการที่ 25 ในการอธิบายตามวิธีของ Arteba and Mittal (1994)

3.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

เปรียบเทียบความถูกต้องในการทำนายและความสามารถในการใช้งานของแบบจำลองที่นำมาใช้ในการทำนายปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมัน (ในหัวข้อที่ 3.1) ของมันฝรั่งภายหลังการทอดด้วยไมโครเวฟโดยใช้ค่าสถิติในการช่วยการตัดสินใจซึ่งค่าที่ช่วยในการตัดสินใจ คือ

ค่า Root Mean Square Error (%RMS) ที่บอกความผิดพลาดระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าที่ได้จากการทดลอง

$$\%RMS = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^n (V_{obs} - V_{pred})^2}$$

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (V_{obs} - V_{pred})^2}{\sum_i^n (V_{obs} - \bar{V}_{obs})^2}$$

การพิจารณาว่า แบบจำลองใดสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นกับปริมาณน้ำมันได้ดี พิจารณาได้จากค่าทางสถิติทั้งสองโดยต้องมีค่า R^2 มาก (ใกล้เคียงกับ 1) ส่วนค่า RMS มีค่าน้อย (ใกล้เคียงกับ 0)

4. การสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ต่างๆ กับกำลังไมโครเวฟด้วยแบบจำลอง ทฤษฎี

นำค่าคงที่ ได้แก่ ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ (ค่า k) หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายมวล (D_{eff}) ของสมการที่สามารถอธิบายการถ่ายเทมวลได้ดีที่สุดของน้ำกับน้ำมันในหัวข้อที่ 3.1 สมการ การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสในหัวข้อที่ 3.2 และสมการการเปลี่ยนแปลงของสีในหัวข้อที่ 3.3 มา สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการ Arrhenius (สมการที่ (27)) และคำนวณค่าพลังงาน กระตุ้น (E_a) และค่า k_0 (น้ำหนักของน้ำมันฝรั่งที่แทนด้วยตัวแปร m ในสมการที่ 27 มีค่าเท่ากับ 4 กรัม)

สำหรับค่าคงที่อื่นๆ ที่มีอยู่ในสมการนอกเหนือจากค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายมวล สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ดังกล่าวได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (method of least square)

นำค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณมาแทนค่ากลับ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการ ทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองปฐภูมิในหัวข้อที่ 3 โดยใช้ค่าสถิติในหัวข้อที่ 3.4 ในการช่วย การตัดสินใจ

5. การหาสถานะที่เหมาะสมของการทอดมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟ

นำกราฟของแต่ละตัวแปรตามที่ได้ในหัวข้อ 2.3 มาซ้อนทับกันเพื่อหาพื้นที่ที่เหมาะสมโดย ใช้โปรแกรม Minitab กำหนดให้คุณภาพด้านต่างๆ ของการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมในช่วงเวลา 180- 210 วินาที เป็นเป้าหมายเพื่อต้องการหาสถานะการทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟให้มีคุณภาพด้านต่างๆ เหมือนกับเป้าหมายตามที่กำหนดไว้

6. การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพ

6.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

นำถั่วยอดมูมิเนียมและฝาล้างอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นนำไปใส่ในเครื่องเคเตอร์จนเย็น ชั่งน้ำหนัก แล้วนำเข้าอบอีก 30 นาที ทำซ้ำเหมือนเดิม ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ถ้าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปจากครั้งแรกน้อยกว่า 0.003 กรัมให้ถือว่าน้ำหนักคงที่ ถ้าน้ำหนักยังไม่คงที่ให้นำเข้าอบซ้ำ จนน้ำหนักคงที่ บันทึกน้ำหนักของถั่วยอดมูมิเนียมและฝาล้างเป็นกรัม (A)

ชั่งตัวอย่างจำนวนประมาณ 2-3 กรัม (B) เกลี่ยให้ตัวอย่างแผ่กระจายด้วยความหนาสม่ำเสมอ นำตัวอย่างเข้าอบในตู้อบ โดยเปิดฝาล้างถั่วยอดมูมิเนียม อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิดฝาล้างออกจากตู้อบ แล้วนำไปใส่ในเครื่องเคเตอร์จนเย็น นำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักพร้อมฝาล้าง แล้วนำตัวอย่างเข้าอบอีกประมาณ 30 นาที แล้วนำไปทำให้เย็น จนน้ำหนักคงที่ บันทึกน้ำหนักเป็นกรัม (C) (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

คำนวณหาปริมาณความชื้นจากน้ำหนักที่หายไป ได้จากสูตร

$$\text{Moiture (g/g dry basis)} = \frac{B - (C - A)}{(C - A)}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของถั่วยอดมูมิเนียมและฝาล้างก่อนใส่ตัวอย่าง (กรัม)
 B = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)
 C = น้ำหนักตัวอย่างพร้อมถั่วยอดมูมิเนียมและฝาล้างอบ (กรัม)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของมันฝรั่งนี้ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และวัดค่าซ้ำละ

3 ครั้ง

6.2 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 2000)

นำ extraction cups เข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นานประมาณ 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักแล้วนำเข้าปอบอีกจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) (B) ชั่งตัวอย่างอาหารจำนวนประมาณ 2-3 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) (A) บนกระดาษกรองเบอร์ 1 และห่อให้มิดชิดนำมาใส่ลงใน thimbles นำ thimbles ใส่ใน extraction unit เติมนิโตรเจนอีเทอร์ลงใน extraction cups จำนวน 50 มิลลิลิตร นำ extraction cups ใส่เข้าไปในเครื่อง extraction unit สกัดเป็นเวลา 15 นาที และทำการชะล้างเป็นเวลา 45 นาที ระเหยตัวทำละลาย นำ extraction cups เข้าอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) (C)

คำนวณปริมาณไขมันได้ตามสูตร

$$\text{Fat (g/g dry basis)} = \frac{C-B}{A}$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)
 B = น้ำหนัก extraction cups (กรัม)
 C = น้ำหนัก extraction cups + น้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันของมันฝรั่งนี้ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และวัดค่าซ้ำละ 3

ครั้ง

6.3 การวิเคราะห์สมบัติด้านเนื้อสัมผัส (ดัดแปลงจาก Pedreschi and Moyano, 2005)

โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA.XT.Plus model, Stable Micro Systems Ltd, Godalming, UK) วัดแบบเจาะทะลุ โดยใช้หัวกดแบบเข็ม เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร โดยกดลงไปบนชิ้นตัวอย่างในระดับความลึกจากผิวหน้า 50 % ของความสูงของชิ้นตัวอย่าง โดยกำหนด pre-test test และ post-test speeds เป็น 1.5 1 และ 10 mm/s ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ค่าแรงเจาะสูงสุด (Maximum force) ใช้หน่วยเป็นนิวตัน ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 10 ชิ้นต่อสิ่งทดลอง แต่ละชิ้นวัด 3 ตำแหน่งได้แก่ตำแหน่ง หัว กลาง และท้ายของชิ้นมันฝรั่ง หาค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ทั้งหมด

6.4 การวิเคราะห์สมบัติด้านสี

วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Miniscan XE) ในระบบ CIELAB ของมันฝรั่งในแต่ละสิ่งทดลอง โดยนำมันฝรั่งจำนวน 10 ชิ้นมาบดให้ละเอียด แล้วนำไปใส่ plate วัดค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*) และความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) นำมาคำนวณหาค่า ΔE ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และวัดค่าซ้ำละ 3 ครั้ง

$$\Delta E = \sqrt{[(L^* - L_0^*) + (a^* - a_0^*) + (b^* - b_0^*)]}$$

โดยค่า L_0^* , a_0^* และ b_0^* เป็นค่าสีของมันฝรั่งที่ไม่ได้ผ่านการทอด (มันฝรั่งเริ่มต้น)

7. สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

8. ระยะเวลาทำการวิจัย

การทดลองครั้งนี้เริ่มตั้งแต่เดือน มิถุนายน 2552 ถึง มิถุนายน 2553

ผลและวิจารณ์

1. ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาต่อคุณภาพของมันฝรั่งทอด

ภาพสองมิติและสามมิติของปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันที่ทอดด้วยกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ แสดงดังภาพที่ 9 และ 10 ตามลำดับ พบว่า ปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อทอดที่กำลังไมโครเวฟสูงขึ้นและเวลานานขึ้น ส่วนปริมาณน้ำมันมีแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า การทอดที่กำลังไมโครเวฟสูง ส่งผลให้น้ำมันที่ใช้ทอดมีอุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลต่อโมเลกุลน้ำหรือเกลือที่มีสมบัติไดอิเล็กทริกสูงในมันฝรั่งเกิดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ทำให้เกิดพลังงานความร้อนภายในที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน (Oztop *et al.*, 2007a,b) จึงทำให้น้ำมันฝรั่งระเหยออกไปได้มาก น้ำที่ออกจากมันฝรั่งออกไปในรูปแบบของไอน้ำ ส่งผลให้เกิดแรงดันทำให้โครงสร้างภายในอาหารเกิดเป็นช่องว่าง เมื่อการทอดดำเนินไปเรื่อยๆ น้ำมันที่อยู่ภายนอกอาหารเกิดการเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่น้ำที่ระเหยออกไปในช่วงแรกตามกลไกการดูดซึมน้ำมันแบบการแทนที่น้ำ (Moreira *et al.*, 1999; Dana and Saguy, 2006; Ziaififar *et al.*, 2008) ดังนั้น มันฝรั่งที่มีการสูญเสียไอน้ำมาก จึงมีปริมาณน้ำมันเข้าไปแทนที่สูง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับปริมาณน้ำมันดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของนิลบล, 2549; Shyu *et al.*, 2001; Mariscal and Bouchon, 2008; Dueik *et al.*, 2010

ค่าแรงเฉยสูงสุดของมันฝรั่งทอดที่สภาวะต่างๆ แสดงดังภาพที่ 11 พบว่า ค่าแรงเฉยสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทอดด้วยกำลังไมโครเวฟและเวลาสูงขึ้น โดยแนวโน้มของค่าแรงเฉยสูงสุดสัมพันธ์กับปริมาณความชื้น เมื่อความชื้นระเหยออกจากชิ้นอาหารในระหว่างการทอดปริมาณสูง ส่งผลให้อาหารทอดมีความแข็งเพิ่มขึ้น (Garayo and Moreira, 2002; Oztop *et al.*, 2007)

มันฝรั่งแช่แข็งก่อนการทอดมีลักษณะสีขาว เมื่อผ่านการทอดที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ สีของมันฝรั่งมีแนวโน้มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาล และมีความเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตามกำลังไมโครเวฟและเวลาที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 21 ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของมันฝรั่งมีแนวโน้มที่สูงขึ้น (ภาพที่ 12) การเกิดสีน้ำตาลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า กระบวนการทอดทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymic browning) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนของโปรตีนกับน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำตาลเกิดขึ้น

ในผลิตภัณฑ์ (Leszkowiat *et al.*, 1990; Hutchings, 1999; Garayo and Moreira, 2002) นอกจากนี้ น้ำมันเมื่อผ่านการทอดที่อุณหภูมิสูงและเป็นเวลานานทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้น้ำมันมีสีที่คล้ำขึ้น (Paul and Mittal, 1996; Fellow, 1990) สีของอาหารทอดนั้นแปรผันตรงกับปริมาณน้ำมันที่ดูดซึมเข้ามาในอาหาร (Baixauli *et al.*, 2002) ดังนั้น มันฝรั่งที่ทอดด้วยกำลังไมโครเวฟสูงเป็นเวลานาน มีปริมาณน้ำมันสูง ส่งผลให้มันฝรั่งมีสีเข้ม (ΔE มีค่าสูง) งานวิจัยที่สอดคล้องกับผลดังกล่าวได้แก่ การทอดกระเทียมเจียวในสภาวะสุญญากาศ (นิลบล, 2549)

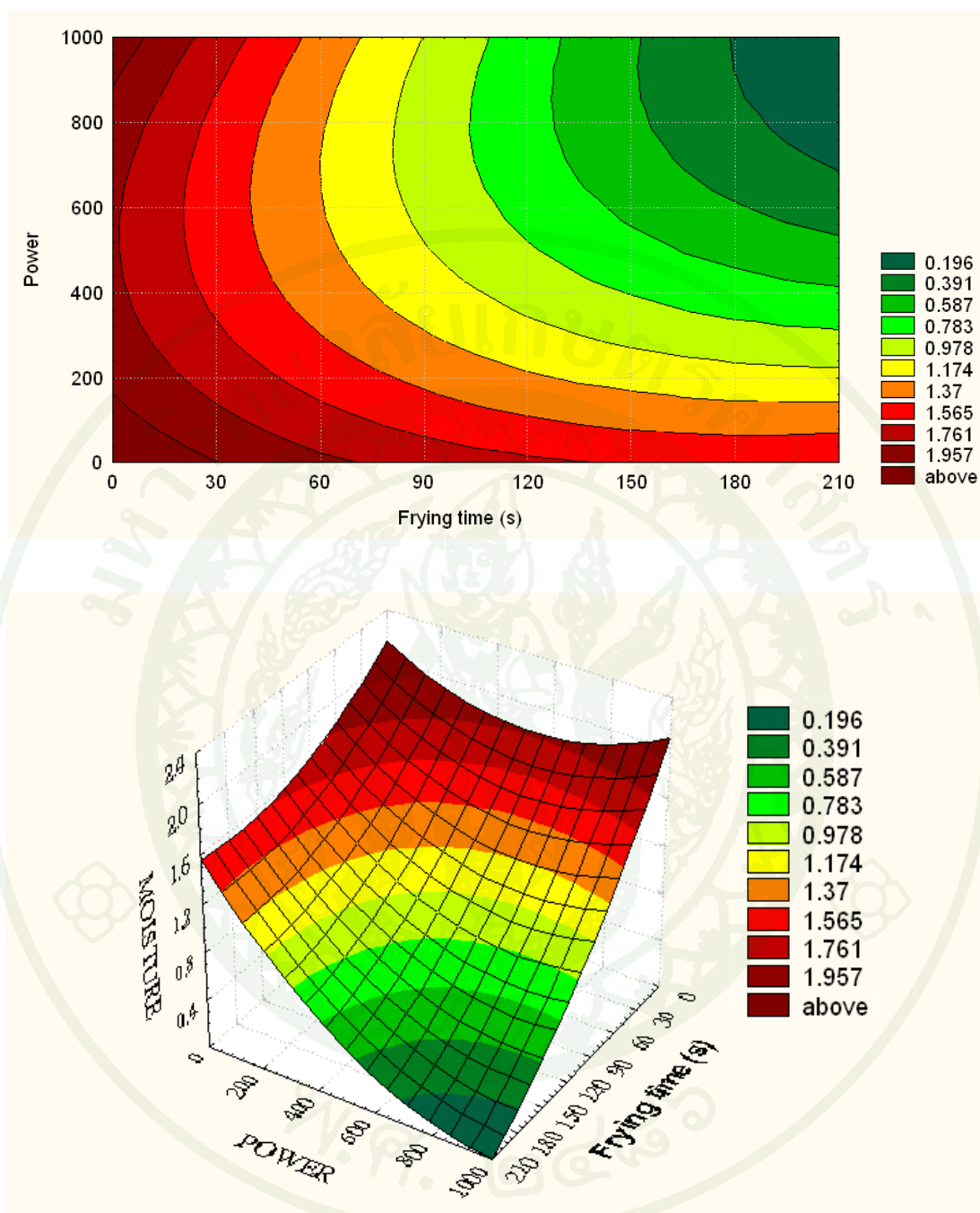
ตารางที่ 4 ค่า R^2 (coefficient of multiple determination) และสมการยกกำลังสองของปริมาณขึ้น (MC) ปริมาณน้ำมัน (OC) ค่าแรงเจาะสูงสุด (MF) และค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE) ของมันฝรั่งทอด

R^2	สมการ
0.980	MC = $2.152 - 0.007X_1 - 0.001X_2 + (1.992E-5)X_1^2 + (1.353E-6)X_2^2 - (7.157E-6)X_1X_2$
0.993	OC = $-0.026 + 0.003 X_1 + (1.735E-4) X_2 - (7.845E-6) X_1^2 - (1.731E-7) X_2^2 + (7.288E-7) X_1X_2$
0.897	MF = $1.354 - 0.026 X_1 - 0.006 X_2 + (1.099E-4) X_1^2 + (4.003E-6) X_2^2 + (6.615E-5) X_1X_2$
0.953	$\Delta E = 0.116 + 0.1 X_1 + 0.002 X_2 - (2.774E-4) X_1^2 - (3.613E-6) X_2^2 + (4.826E-5) X_1X_2$

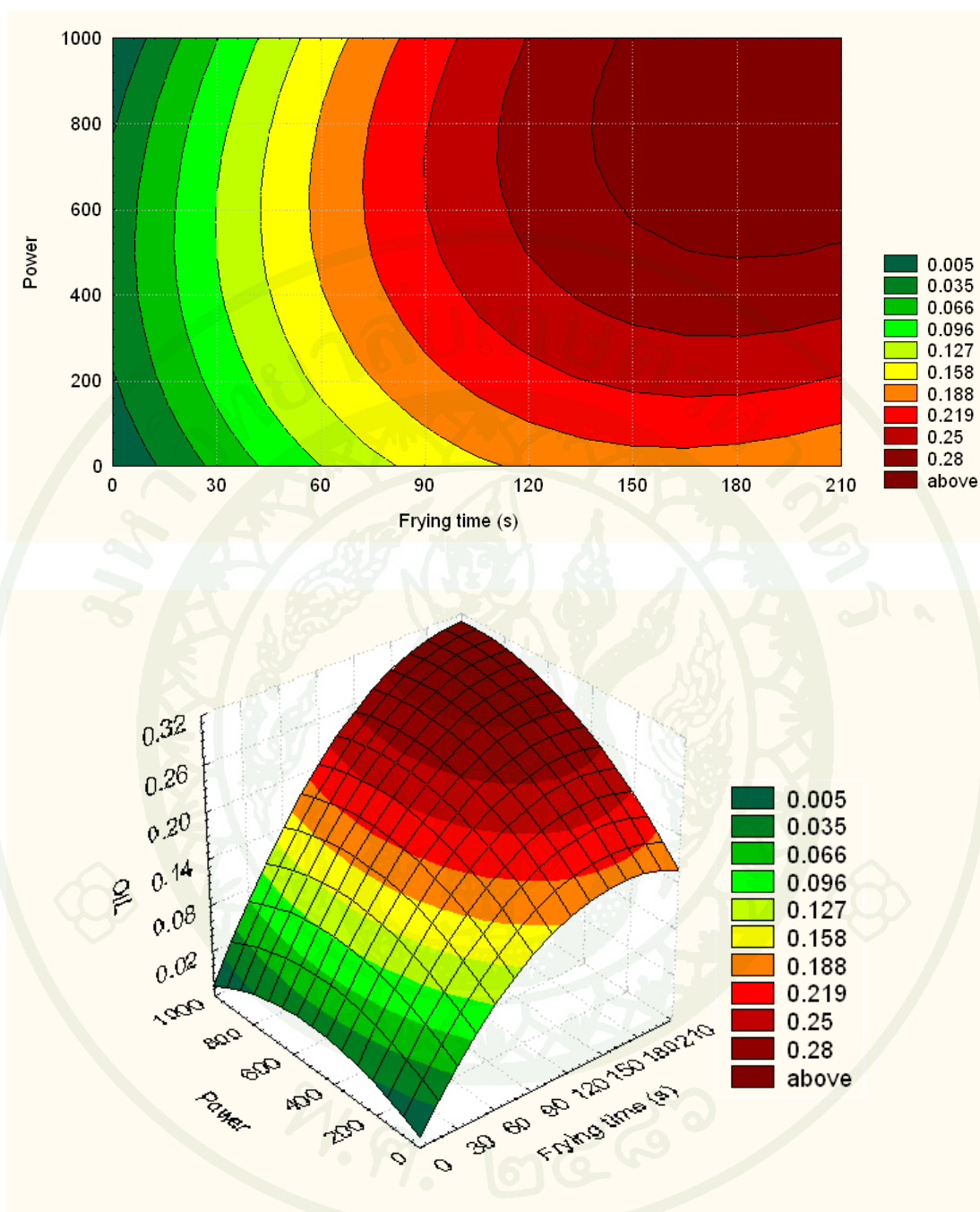
หมายเหตุ X_1 คือ เวลาที่ทอด (0-210 วินาที)

X_2 คือ กำลังไมโครเวฟที่ใช้ทอด (85-850 วัตต์)

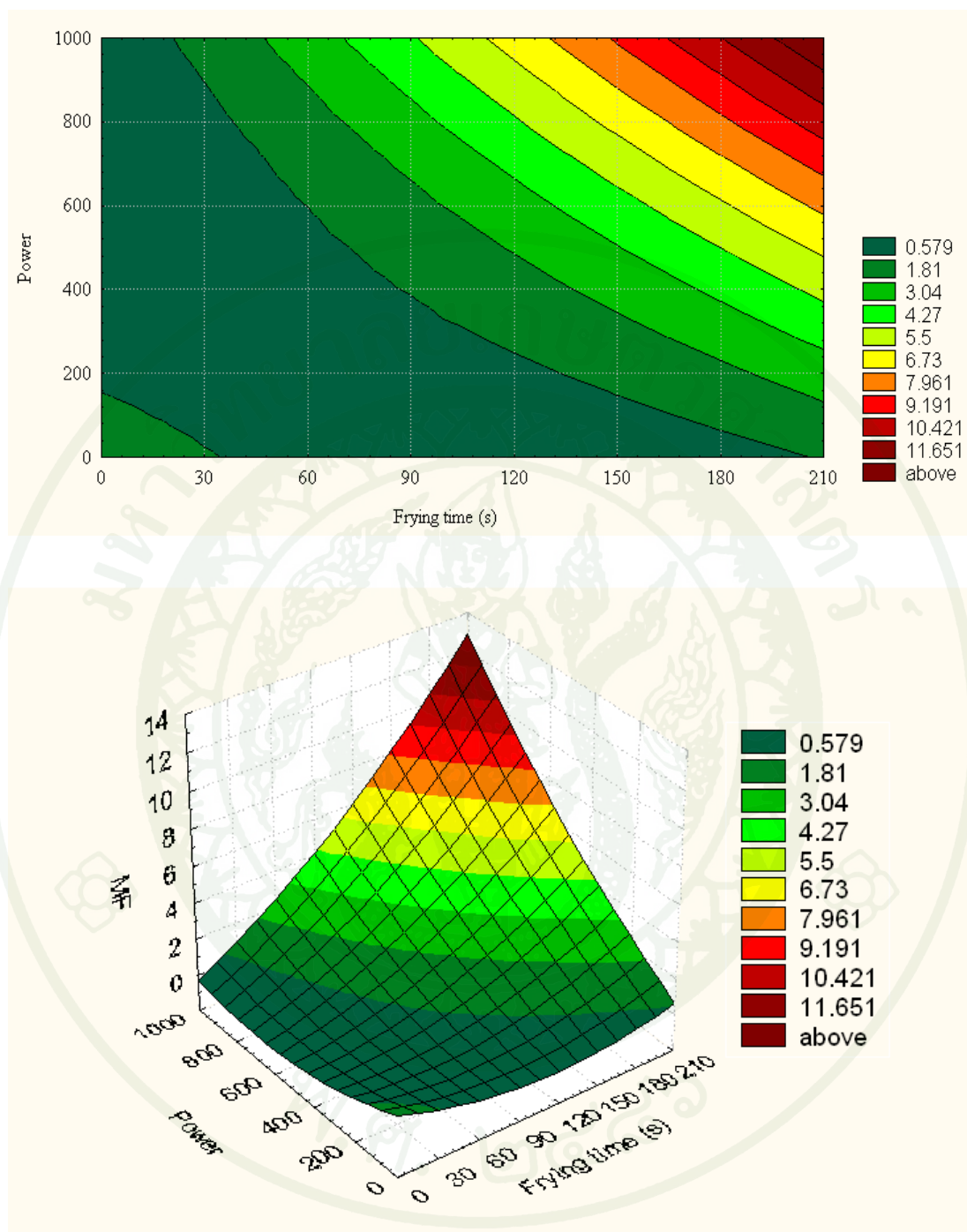
สมการที่ได้จากการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง ในแต่ละด้านแสดงในตารางที่ 4 พบว่า สมการทำนายปริมาณน้ำมันมีความแม่นยำสูงที่สุด ตามมาด้วยสมการทำนายปริมาณความชื้น ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี และค่าแรงเจาะสูงสุด โดยมีค่า $R^2 = 0.993$ 0.980 0.953 และ 0.897 ตามลำดับ จากสมการ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรของปัจจัยในด้านเวลาการทอด (X_1) มีค่ามากกว่าปัจจัยด้านกำลังไมโครเวฟ (X_2) ในทุกด้านของปัจจัยคำตอบ ดังนั้น การทอดมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟ ปัจจัยด้านเวลาการทอดจึงมีผลต่อคุณภาพในทุกๆ ด้านมากกว่าปัจจัยด้านกำลังไมโครเวฟ



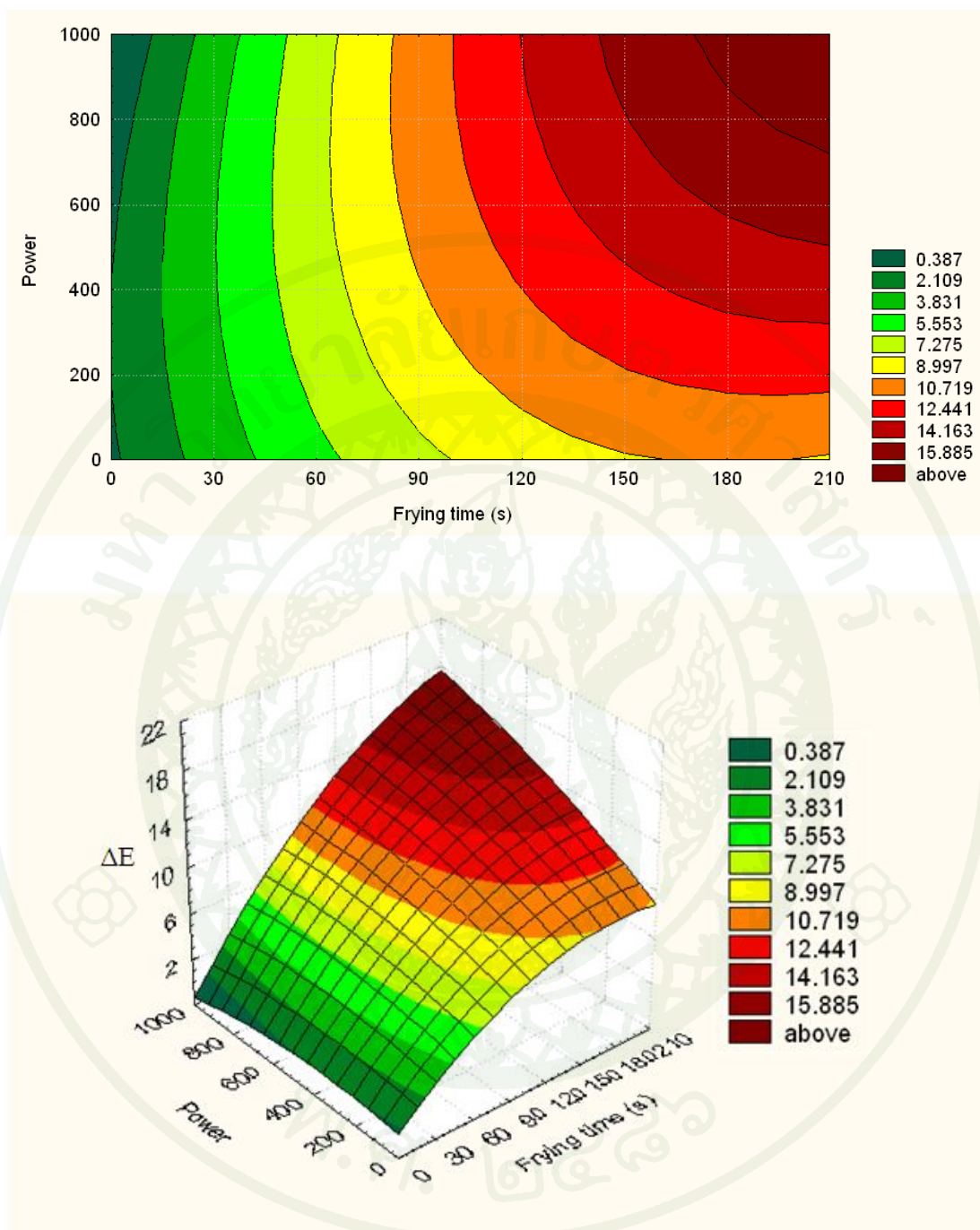
ภาพที่ 9 กราฟสองมิติ (บน) และสามมิติ (ล่าง) ของปริมาณความชื้นในมันฝรั่งที่ทอดด้วย ไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ



ภาพที่ 10 กราฟสองมิติ (บน) และสามมิติ (ล่าง) ของปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งที่ทอดด้วยไมโครเวฟ ที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ



ภาพที่ 11 กราฟสองมิติ (บน) และสามมิติ (ล่าง) ของค่าแรงเจาะสูงสุดน้ำมันที่ทอดด้วยไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ



ภาพที่ 12 กราฟสองมิติ (บน) และสามมิติ (ล่าง) ของค่าการเปลี่ยนแปลงของสีในมันฝรั่งที่ทอดด้วยไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟและที่เวลาต่างๆ

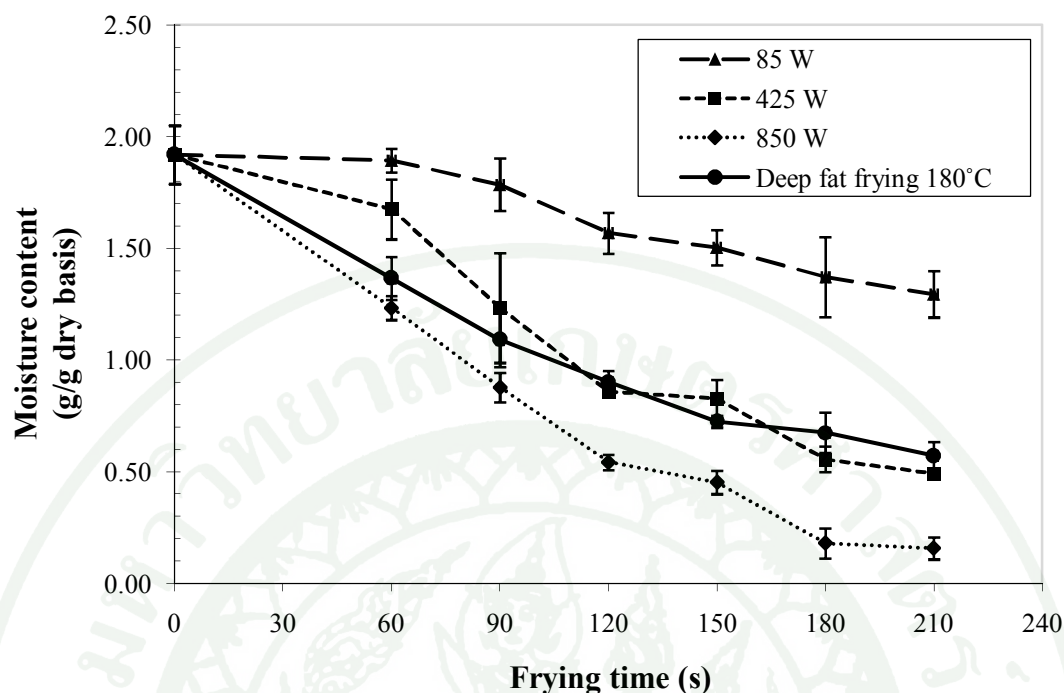
2. ผลการศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบการทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟและการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

การทอดอาหารด้วยวิธีไมโครเวฟนั้น ทำได้โดยนำมันฝรั่งจุ่มลงไปนํ้ามันที่ร้อนหลังจากขั้นตอนการให้ความร้อนขึ้นต้น โดยอุณหภูมิน้ำมันที่ผ่านขั้นตอนดังกล่าวมีอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส แล้วนำไปทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลังต่างๆ ซึ่งทั้งมันฝรั่งและน้ำมันปาล์มที่ใช้ทอดสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ทั้งคู่ แต่จะสามารถดูดกลืนได้เล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก โดยปกติแล้วน้ำมันจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีโมเลกุลที่มีขั้วน้อย ส่วนมันฝรั่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงกว่า โดยมีค่าประมาณ 65 แหล่งพลังงานความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟจึงเกิดขึ้นที่ภายในมันฝรั่งมากกว่าเกิดที่น้ำมัน นอกจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในมันฝรั่งด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้ว น้ำมันก็มีการถ่ายเทความร้อนไปสู่ผิวมันฝรั่งด้วย ดังนั้น มันฝรั่งที่ทอดด้วยวิธีไมโครเวฟจึงมีแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนที่มากกว่าการทอดมันฝรั่งด้วยวิธีน้ำมันท่วม ซึ่งด้วยความแตกต่างดังกล่าว ส่งผลให้คุณภาพด้าน การถ่ายเทมวล (ปริมาณความชื้นกับปริมาณน้ำมัน) เนื้อสัมผัส และสีของมันฝรั่งที่ผ่านการทอดทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกัน ดังนี้

2.1 การถ่ายเทมวล

2.1.1 การถ่ายเทมวลของน้ำ

ปริมาณความชื้นของมันฝรั่งที่ทอดในสถานะต่างๆ แสดงในภาพที่ 13 จากภาพพบว่า เมื่อทอดมันฝรั่งที่ระดับกำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้นและเวลานานขึ้น ปริมาณความชื้นมีแนวโน้มที่ลดลงและคงที่ในช่วงเวลา 180-210 วินาที ปริมาณความชื้นที่คงที่นี้เรียกว่า “the equilibrium moisture content” ซึ่งค่านี้มีความแตกต่างกันตามระดับกำลังไมโครเวฟ โดยมีค่า 1.2370 0.4344 และ 0.1297 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 85 425 และ 850 วัตต์ ตามลำดับ



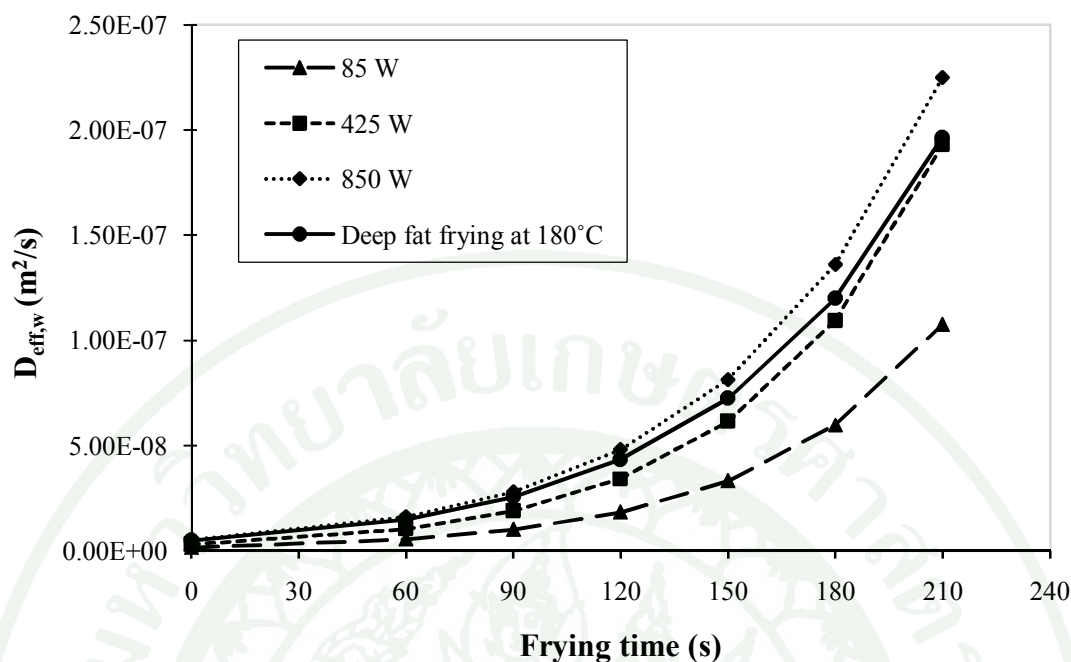
ภาพที่ 13 ผลของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ต่อปริมาณความชื้น (กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง) ที่เวลาต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่า k_m จาก First order kinetics และ Page's law ในตารางที่ 5 พบว่า เมื่อเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟจาก 85 วัตต์ ไปยัง 850 วัตต์ ค่า k_m ที่หาได้จากทั้ง 2 สมการมีค่าที่สูงขึ้นจาก $0.0085 - 0.0164 \text{ s}^{-1}$ และ $0.0002 - 0.0009 \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ ผลของระดับกำลังไมโครเวฟต่อค่า k_m นี้ให้ผลที่คล้ายกับกระบวนการอบแห้งใบมินท์ (Therdthai and Zhou, 2009) ส่วนค่า k_m ของการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นั้นมีค่า 0.0140 และ 0.0008 s^{-1} จากสมการ First order kinetics และ Page's law ตามลำดับ ค่า k_m แสดงถึงอัตราการสูญเสียความชื้นไปในระหว่างการทอด ค่า k_m ที่มีค่ามาก หมายถึง กระบวนการนั้นมีอัตราการสูญเสียความชื้นที่เร็ว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า k_m ของวิธีการทอดทั้ง 2 วิธีจากทั้ง 2 สมการ พบว่า การทอดมันฝรั่งด้วยวิธีไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ มีค่า k_m ที่สูงกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม ในขณะที่กำลังไมโครเวฟที่เหลือ 2 ระดับ มีค่า k_m ที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากการคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำ

Conditions	First order kinetics	Page 's law		Fick's second law with variable diffusivity	
	$k_m (s^{-1})$	$k_m (s^{-1})$	n	$D_0 \times 10^{-9} (m^2/s)$	b
Microwave frying 85 W	0.0085	0.0002	1.6717	1.6276	78.7199
Microwave frying 425 W	0.0123	0.0004	1.6495	3.0641	42.2779
Microwave frying 850 W	0.0164	0.0009	1.5329	5.1848	23.4799
Deep fat frying at 180 °C	0.0140	0.0008	1.5524	4.9397	23.9850

สำหรับสมการ Fick 's second law with variable diffusivity ค่า D_0 กับค่า b คำนวณได้จากสมการที่ (20) แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งนำค่าเหล่านี้ไปแทนหาค่า $D_{eff,w}$ ที่เวลาต่างๆ ของแต่ละสภาวะการทอดจากสมการที่ (21) แสดงไว้ในภาพที่ 14 พบว่า ค่า $D_{eff,w}$ มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟที่ใช้ทอดในทุกๆ เวลา เป็นเพราะว่า อุณหภูมิในน้ำมันฝรังมีค่าที่สูงขึ้นทุกๆ ระดับกำลังไมโครเวฟซึ่งมีอิทธิพลมากกว่าการเกิดเปลือกที่ข้างนอกของมันฝรั่ง ส่งผลให้ค่า $D_{eff,w}$ มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการทอดผ่านไปนานขึ้น (Pedreschi *et al.*, 2005) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทอดทั้ง 2 วิธี พบว่า การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมมีค่า $D_{eff,w}$ ที่น้อยกว่าการทอดด้วยไมโครเวฟที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ แต่มีค่าที่มากกว่าที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 85 และ 425 วัตต์ ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกับค่า k_m ของสมการก่อนหน้านี้ ดังนั้น การทอดมันฝรั่งด้วยวิธีไมโครเวฟที่ กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ จึงมีอัตราการระเหยออกของน้ำ และการแพร่ออกของน้ำที่เร็วกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส



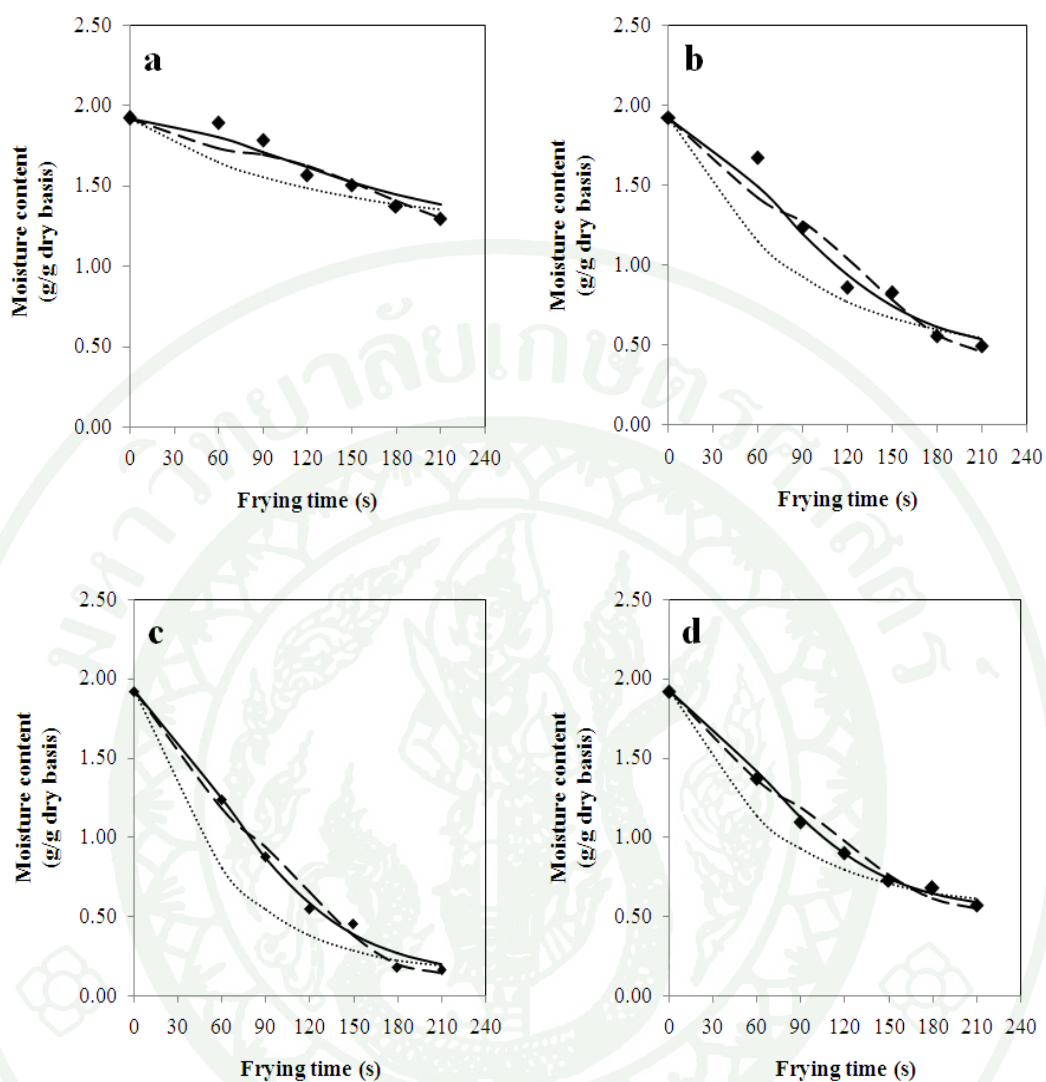
ภาพที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟ ที่กำลังต่างๆและการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

กระบวนการทอดด้วยน้ำมันท่วมเมื่ออยู่ในระหว่างการทอด น้ำมันที่ร้อนมีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันสู่ผิวของอาหารโดยการพาความร้อน จากนั้นผิวอาหารที่ร้อนก็มีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนสู่ใจกลางอาหาร ส่งผลให้น้ำภายในอาหารเกิดการเดือดและมีการถ่ายเทมวลของน้ำไปยังภายนอกของอาหาร (Debnath *et al.*, 2003; Moreira *et al.*, 1999; Budzaki and Seruga., 2005) เมื่อมีการใช้ไมโครเวฟเข้าร่วมด้วย การถ่ายเทมวลของน้ำออกจากอาหารเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เพราะความร้อนเกิดขึ้นภายในตามกลไกการเกิดความร้อนของไมโครเวฟ ส่งผลให้เกิดความดันที่สูงภายในของอาหาร (Lin *et al.*, 1998) ด้วยเหตุนี้มันฝรั่งที่ทอดด้วยวิธีไมโครเวฟจึงมีอัตราการระเหยออกของน้ำที่สูงกว่ามันฝรั่งที่ทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม งานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งการระเหยออกของน้ำได้ในกระบวนการ Dehydration เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นเรื่องกระบวนการอบแห้งได้แก่ การอบแห้งกล้วย (Maskan, 2000) การอบแห้งผักขม (Ozkan *et al.*, 2007) และการอบแห้งใบมินท์ (Therdthai and Zhou, 2009) เป็นต้น

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำ

Conditions	First order kinetics		Page 's law		Fick's second law with variable diffusivity	
	R^2	$\pm$ RMS	R^2	$\pm$ RMS	R^2	$\pm$ RMS
Microwave frying 85 W	0.6519	13.6372	0.9196	6.5530	0.8980	7.3821
Microwave frying 425 W	0.7720	24.2956	0.9699	8.8230	0.9426	12.1877
Microwave frying 850 W	0.8501	22.7691	0.9938	4.6272	0.9895	6.0236
Deep fat frying at 180 °C	0.9294	11.6756	0.9970	2.4038	0.9856	5.2747
Average	0.8008	18.0944	0.9701	5.6017	0.9539	7.7170

สำหรับภาพแสดงปริมาณความชื้นของค่าที่ทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ First order kinetics, Page's law และ Fick 's second law with variable diffusivity ที่การทอดสภาวะต่างๆ แสดงดังภาพที่ 15 ข้อมูลที่ได้จากการทำนายของ Page's law มีค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่สุด ซึ่งค่าประสิทธิภาพของทั้ง 3 สมการแสดงเอาไว้ในตารางที่ 6 ค่า R^2 เฉลี่ยสำหรับ Page's law มีค่าสูงที่สุดคือ 0.9701 และมีค่า % RMS เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 5.6017% จึงมีความเหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยหลายงานที่ใช้สมการ Page's law ในการอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำในกระบวนการอบแห้งได้เป็นอย่างดี เช่น งานวิจัยการอบแห้งของผักขม (Ozkan *et al.*, 2007) ฟักทอง (Alibas, 2007) และใบมินท์ (Therdthai and Zhou, 2009) สมการที่มีความเหมาะสมรองลงมาคือ Fick 's second law with variable diffusivity โดยมีค่า $R^2 = 0.9539$ และ % RMS = 7.7170% ส่วนสมการที่มีความเหมาะสมน้อยที่สุดคือ First order kinetics โดยมีค่า R^2 ต่ำที่สุดคือ 0.8008 และ % RMS มากที่สุดคือ 18.0944 %

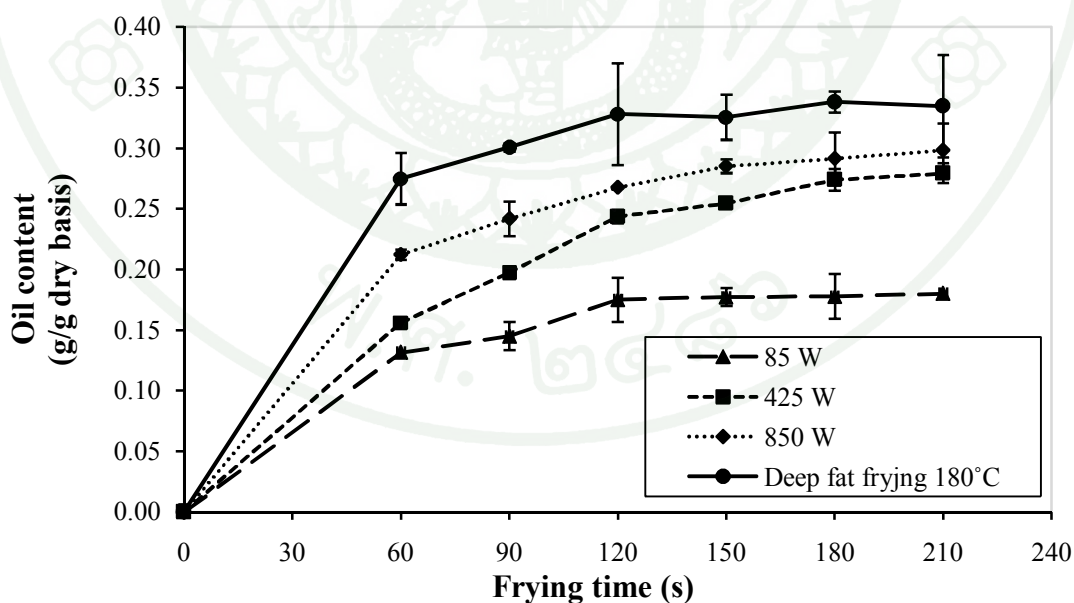


ภาพที่ 15 ผลเปรียบเทียบของปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ First order kinetics (.....) Page's law (—) และ Fick's second law with variable diffusivity (---) ที่สภาวะต่างๆ: (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ และ (d) ทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

2.1.2 การถ่ายเทมวลของน้ำมัน

ปริมาณน้ำมันของมันฝรั่งที่ทอดในสภาวะต่างๆ แสดงในภาพที่ 16 เมื่อทอดมันฝรั่งที่ระดับกำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้นและเวลานานขึ้น ปริมาณน้ำมันมีแนวโน้มที่สูงขึ้นและคงที่ในช่วง 180-210 วินาที ปริมาณความชื้นที่คงที่นี้เรียกว่า “the equilibrium oil content” ซึ่งค่านี้มีค่าแตกต่างกันตามระดับกำลังไมโครเวฟ โดยมีค่า 0.2418 0.3079 และ 0.3284 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 85 425 และ 850 วัตต์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับ การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณน้ำมันของการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟทุก ระดับกำลังไมโครเวฟมีปริมาณน้ำมันที่ต่ำกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม

เมื่อพิจารณาค่า k_0 จากสมการ First order kinetics กับ Moyano and Pedreschi model และค่า $D_{\text{eff},o}$ จากสมการ Fick's second law ในตารางที่ 7 พบว่า ค่า k_0 และค่า $D_{\text{eff},o}$ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟจาก 85 ไปยัง 850 วัตต์ ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกับการถ่ายเทมวลของน้ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับ การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมมีค่า k_0 และค่า $D_{\text{eff},o}$ มีค่าที่มากกว่าการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟทุกระดับกำลังไมโครเวฟ



ภาพที่ 16 ผลของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ต่อปริมาณน้ำมัน (กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง) ที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 7 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากการคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำมัน

Conditions	First order	Moyano and	Fick's second law
	kinetics	Pedreschi model	
	k_0 (s ⁻¹)	k_0 (s ⁻¹)	$D_{eff,o} \times 10^{-8}$ (m ² /s)
Microwave frying 85 W	0.0080	0.0185	1.6988
Microwave frying 425 W	0.0118	0.0208	2.6624
Microwave frying 850 W	0.0126	0.0330	2.8652
Deep fat frying at 180 °C	0.0191	0.0773	4.5134

ตารางที่ 8 แสดงลักษณะการถ่ายเทมวลของการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟและวิธีน้ำมันท่วมด้วยค่า k_m และค่า k_0 ด้วยสมการ First order kinetics จากตาราง พบว่า การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟทุกระดับกำลังไมโครเวฟมีค่า k_m มากกว่าค่า k_0 ส่วนการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมมีลักษณะที่ตรงกันข้าม ดังนั้นการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟจึงมีลักษณะการถ่ายเทมวลแบบการระเหยออกของน้ำมากกว่าการดูดซึมเข้าของน้ำมัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า อาหารที่ทอดด้วยวิธีไมโครเวฟเกิดความดันที่สูงจากภายใน จึงไปเร่งการระเหยออกของน้ำ ในขณะที่ความดันที่สูงนี้ก็ยังคงต่อต้านการดูดซึมเข้ามาของน้ำมันเช่นกัน Oztop *et al.* (2007a,b) กล่าวว่า การทอดมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟมีปริมาณน้ำมันที่ต่ำกว่าการทอดด้วยวิธีดั้งเดิม เนื่องจาก การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟมีการระเหยออกของน้ำที่สูงกว่าการดูดซึมเข้ามาของน้ำมัน จึงส่งผลให้เวลาที่ใช้ทอดสั้นลงกว่าการทอดโดยวิธีน้ำมันท่วม

สำหรับภาพแสดงปริมาณน้ำมันของค่าที่ทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ First order kinetics, Moyano and Pedreschi model และ Fick's second law ที่การทอดสภาวะต่างๆ แสดงดังภาพที่ 17 ข้อมูลที่ได้จากการทำนายของ Fick's second law มีค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่สุด ซึ่งค่าประสิทธิภาพของทั้ง 3 สมการแสดงเอาไว้ในตารางที่ 9 ค่า R^2 เฉลี่ยสำหรับ Fick's second law มีค่าสูงที่สุดคือ 0.9802 และมีค่า % RMS เฉลี่ยต่ำคือ 1.0851 % จึงมีความเหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำมันมากที่สุด สมการที่มีความเหมาะสมรองลงมาคือ Moyano and Pedreschi model โดยมีค่า $R^2 = 0.9803$ และ % RMS = 1.1302 % ส่วน

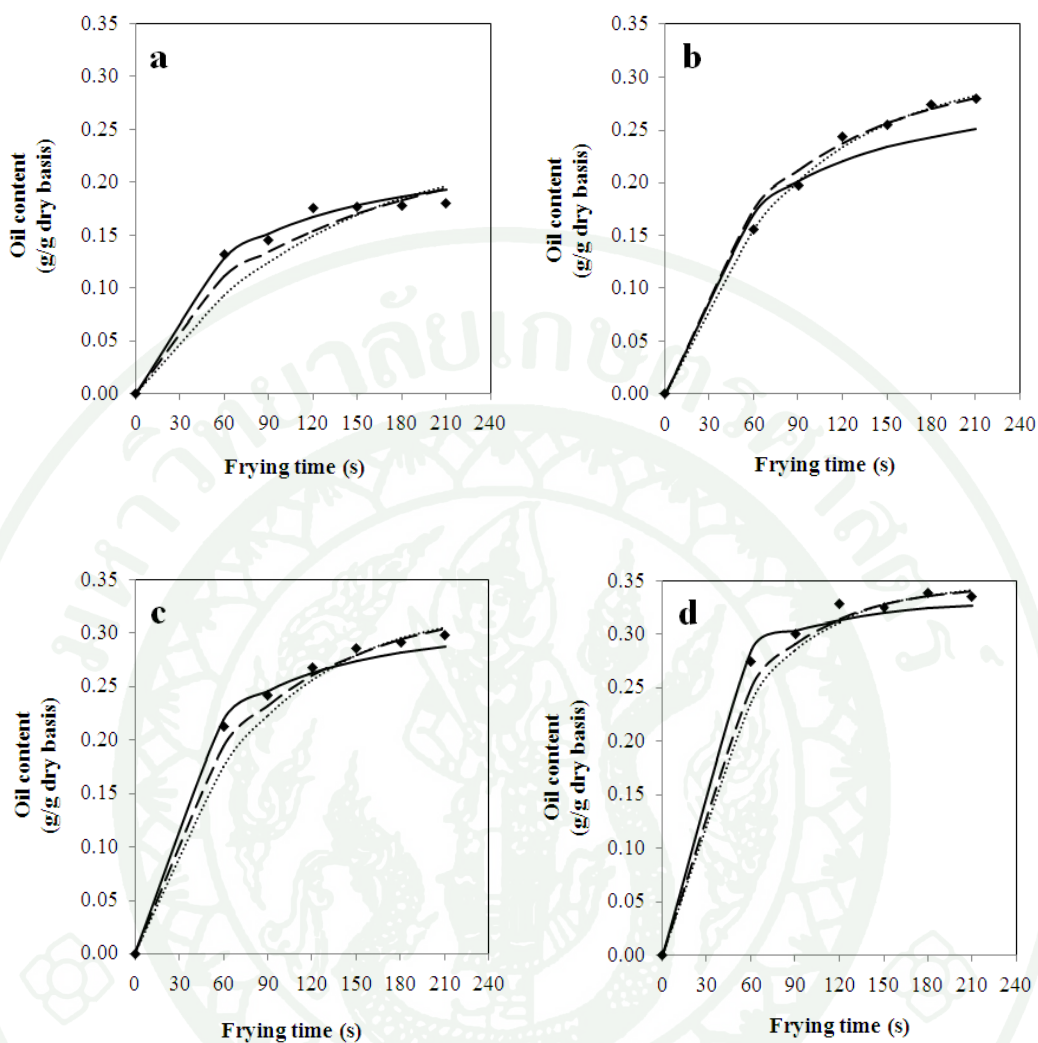
สมการที่มีความเหมาะสมน้อยที่สุดคือ First order kinetics โดยมีค่า R^2 ต่ำที่สุดคือ 0.9563 และ % RMS มากที่สุดคือ 1.4785 %

ตารางที่ 8 ผลของการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทมวลน้ำและน้ำมันในมันฝรั่งที่ทอดด้วย วิธี น้ำมันท่วมที่อุณหภูมิน้ำมัน 180 องศาเซลเซียส และวิธีการทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง ไมโครเวฟต่างๆ ด้วยค่า k_m และค่า k_o จากสมการ First order kinetics

Condition	k_m (s ⁻¹)	k_o (s ⁻¹)
Microwave frying 85 W	0.0085	0.0080
Microwave frying 425 W	0.0123	0.0118
Microwave frying 850 W	0.0164	0.0126
Deep fat frying at 180 °C	0.0140	0.0191

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบายการถ่ายเท มวลของน้ำมัน

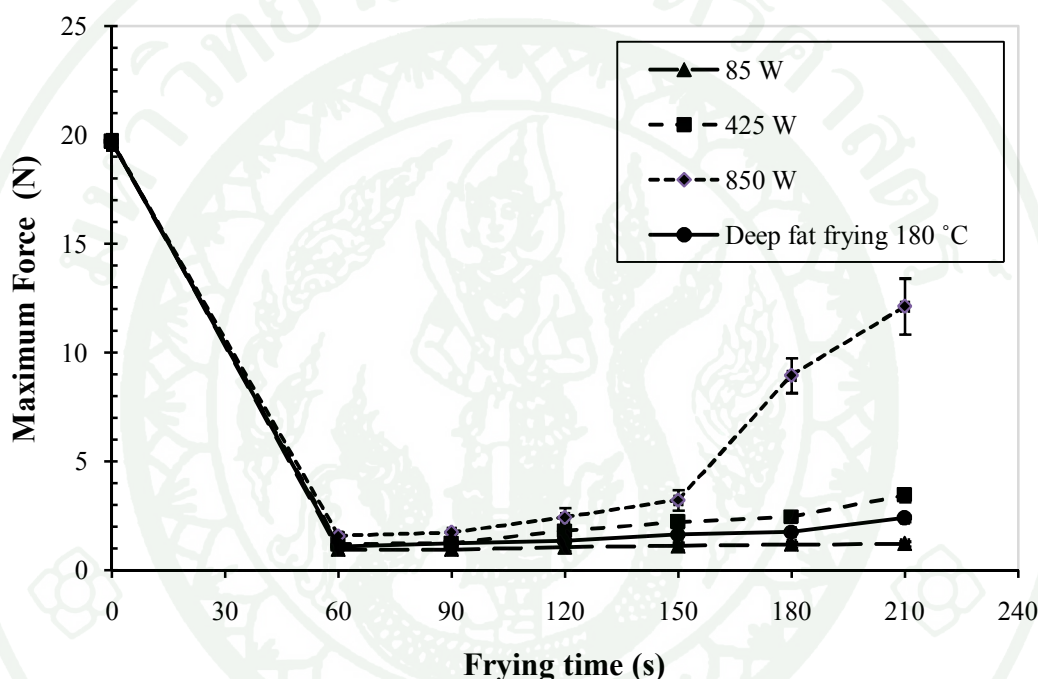
Conditions	First order kinetics		Moyano and Pedreschi model		Fick's second law	
	R^2	± RMS	R^2	± RMS	R^2	± RMS
Microwave frying 85 W	0.8806	2.0777	0.9862	0.7051	0.9506	1.3370
Microwave frying 425 W	0.9976	0.4476	0.9490	2.0646	0.9897	0.9278
Microwave frying 850 W	0.9695	1.6975	0.9932	0.7999	0.9913	0.9076
Deep fat frying at 180 °C	0.9775	1.6911	0.9929	0.9513	0.9893	1.1680
Average	0.9563	1.4785	0.9803	1.1302	0.9802	1.0851



ภาพที่ 17 ผลเปรียบเทียบของปริมาณน้ำมันที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ First order kinetics (.....) Moyano and Pedreschi's model (—) และ Fick's second law (— —) ที่สภาวะต่างๆ : (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ และ (d) ทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

2.2 การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส

เนื้อสัมผัสของมันฝรั่งที่ทอดในสภาวะต่างๆ โดยวัดเป็นค่าแรงเจาะสูงสุดแสดงในภาพที่ 18 พบว่า ค่าแรงเจาะสูงสุดของการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟที่กำลัง 425 และ 850 วัตต์ มีค่าแรงเจาะสูงสุดมากกว่าวิธีการทอดแบบวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในขณะที่กำลังไมโครเวฟที่ 85 วัตต์ มีค่าแรงเจาะต่ำที่สุด



ภาพที่ 18 ผลของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ต่อค่าแรงเจาะสูงสุด (นิวตัน) ที่เวลาต่างๆ

จากภาพที่ 18 ค่าแรงเจาะสูงสุดของแต่ละสภาวะจะมี 2 ช่วง คือ ช่วง 0-60 วินาทีแรก เป็นช่วงที่ค่าแรงเจาะสูงสุดมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นสาเหตุเกิดจากการอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อมันฝรั่ง เนื่องจากสสารในมันฝรั่งเกิดเจลลิตีในเซชั่น (Andersson *et al.*, 1994) หลังจากนั้นค่าแรงเจาะสูงสุดมีค่าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก การเกิดโครงสร้างเปลือกแข็งจากด้านนอก และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาทอดที่นานขึ้น (Pedreschi *et al.*, 2001)

การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (23) เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาแทนค่าเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ ได้แก่ ค่า k_s ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับการอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อภายในมันฝรั่งในระหว่างการทอด และ ค่า k_h ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับการเกิดโครงสร้างเปลือกภายนอกในระหว่างการทอด ค่าทั้งสองค่าของแต่ละสภาวะการทอดแสดงในตารางที่ 10 พบว่า การทอดด้วยไมโครเวฟเมื่อเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟค่า k_s กับค่า k_h มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pedreschi *et al.* (2001) และ Pedreschi and Moyano (2005) ที่ว่าค่า k_s กับค่า k_h มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอด

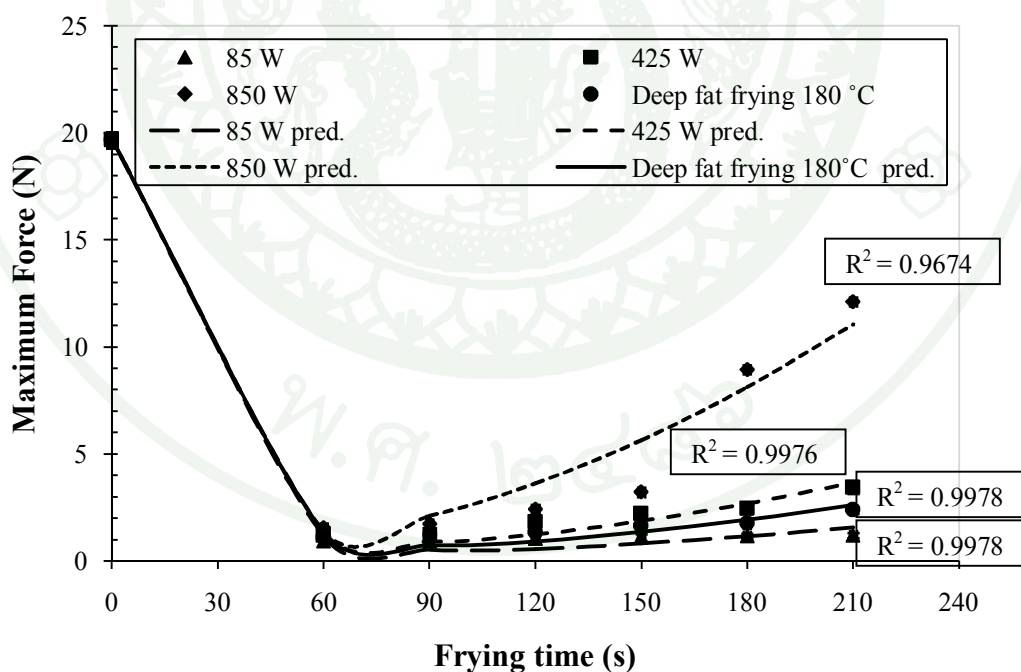
เมื่อเปรียบเทียบวิธีการทอดระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟและวิธีน้ำมันท่วม พบว่า การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีค่า k_s ไม่แตกต่างจากการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 85 และ 425 วัตต์ แต่มีค่าน้อยกว่าการทอดที่กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ ในขณะที่ค่า k_h มีค่าน้อยกว่าการทอดที่กำลังไมโครเวฟ 425 และ 850 วัตต์ แต่มีค่ามากกว่าการทอดที่กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ ดังนั้น ที่เวลาการทอดเท่ากัน การทอดที่กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ จึงมีลักษณะเนื้อสัมผัสภายในอ่อนนุ่ม และมีเปลือกนอกแข็งกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม

การเกิดโครงสร้างเปลือกมีความสัมพันธ์ที่แปรผันตรงกับการระเหยออกของน้ำ เมื่อน้ำในชิ้นมันฝรั่งมีการระเหยออกของน้ำ ส่งผลให้ผิวหน้าของชิ้นมันฝรั่งแห้ง และเกิดโครงสร้างเปลือก (Mellela, 2003) ดังนั้น ชิ้นมันฝรั่งที่มีการระเหยออกของน้ำที่สูง โครงสร้างเปลือกจึงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้การทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ จึงมีการเกิดเปลือกที่เร็วกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม เนื่องจากการทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลังดังกล่าวมีอัตราการระเหยออกของน้ำที่เร็วกว่า

ตารางที่ 10 ผลของค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากการสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส

Conditions	k_s (s ⁻¹)	k_h (s ⁻²)
Microwave frying 85 W	0.0494	1.8290×10^{-6}
Microwave frying 425 W	0.0486	4.2233×10^{-6}
Microwave frying 850 W	0.0612	1.2742×10^{-5}
Deep fat frying at 180 °C	0.0479	3.0250×10^{-6}

เมื่อนำค่าคงที่จากตารางที่ 10 มาแทนค่าในสมการเพื่อคำนวณกลับ พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทดลองดังแสดงในภาพที่ 19 ซึ่งค่า R^2 ของทุกๆ สภาวะการทอดมีค่ามากกว่า 0.96

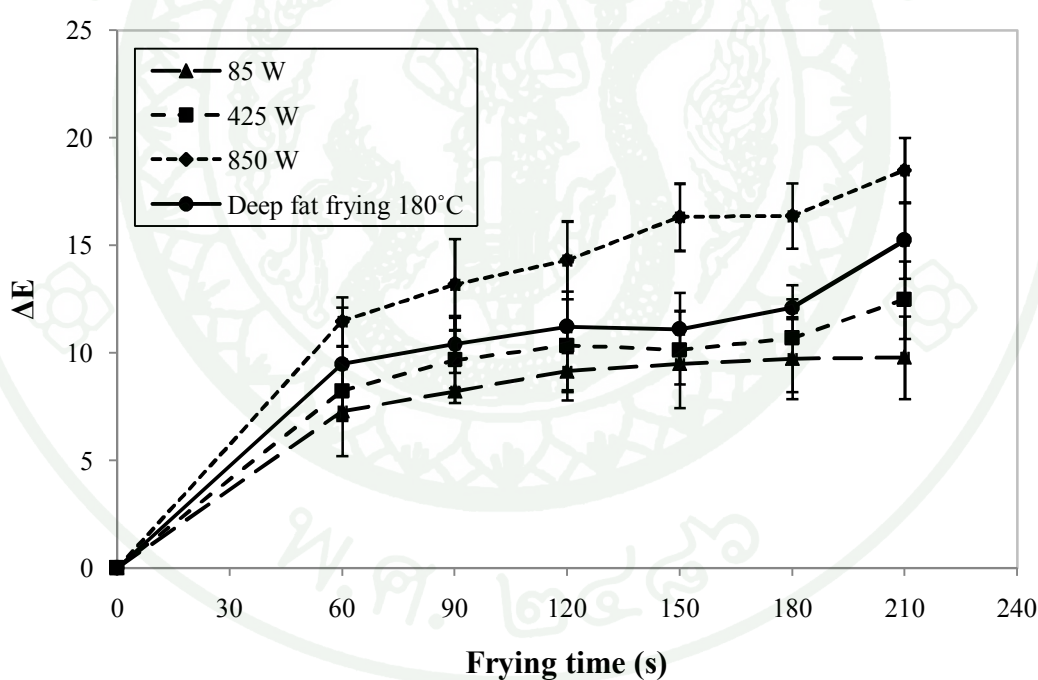


ภาพที่ 19 ผลเปรียบเทียบค่าแรงเจาะสูงสุดที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

2.3 การเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE)

สีของมันฝรั่งทอดเมื่อทอดที่เวลานานขึ้นในแต่ละสภาวะการทอดมีแนวโน้มเปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาล (แดง-เหลือง) เมื่อนำมันฝรั่งที่ทอดในแต่ละสภาวะไปวัดค่า L^* a^* และ b^* (แสดงในภาคผนวกที่ ข 9-11) พบว่า ค่า L^* มีแนวโน้มที่ลดลง ค่า a^* กับ b^* มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสัมพันธ์กับภาพที่ 21

เมื่อนำค่า L^* a^* และ b^* มาคำนวณเป็นค่า ΔE ที่ใช้สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสีในแต่ละสภาวะ พบว่า การทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ มีการเปลี่ยนแปลงของสีที่สูงกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 20) ในขณะที่กำลังไมโครเวฟที่เหลือ (85 กับ 425 วัตต์) มีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 20 ผลของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ต่อค่า ΔE ที่เวลาต่างๆ



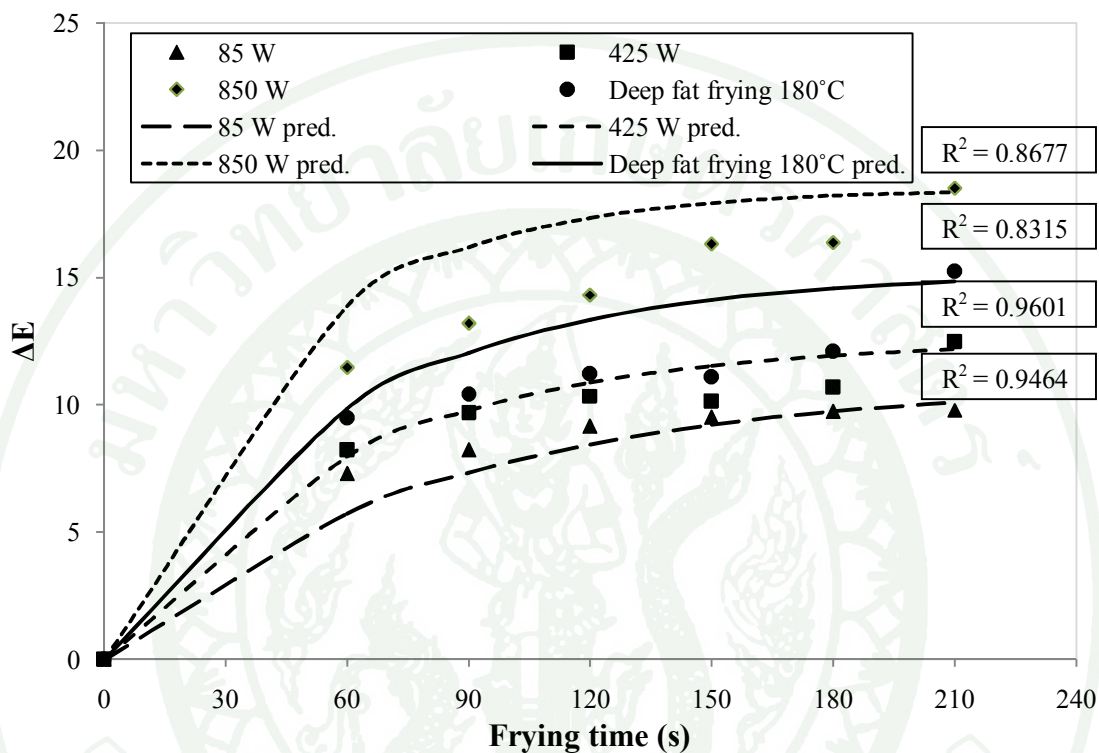
ภาพที่ 21 ลักษณะของมันฝรั่งที่ทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟและการทอดด้วยน้ำมันท่วม (180 องศาเซลเซียส)

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณหาค่า k_E ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงของสีตามสมการที่ (25) ดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่า ค่า k_E สำหรับการทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์มีค่าสูงที่สุด และมีค่าที่สูงกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในขณะที่การทอดด้วยกำลังไมโครเวฟที่ 85 กับ 425 วัตต์ มีค่า k_E ที่ต่ำกว่า ดังนั้น การทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ จึงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของสีที่เร็วกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เนื่องจาก การทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำมันที่สูงกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม ดังนั้นการพาความร้อนแบบบังคับจากน้ำมันไปสู่ผิวของมันฝรั่งจึงสูงกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม (ดังแสดงในภาคผนวก ก) สีของมันฝรั่งจึงมีการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่า

ตารางที่ 11 ผลของค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสี

Conditions	K_E (s^{-1})
Microwave frying 85 W	0.0124
Microwave frying 425 W	0.0168
Microwave frying 850 W	0.0231
Deep fat frying at 180 °C	0.0173

เมื่อนำค่าคงที่จากตารางที่ 11 มาแทนค่าในสมการเพื่อคำนวณกลับ พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทดลองดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งค่า R^2 ของทุกๆ สถานะการทอดมีค่ามากกว่า 0.80



ภาพที่ 22 ผลเปรียบเทียบค่า ΔE ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของการทอดในไมโครเวฟที่สภาวะกำลังไมโครเวฟต่างๆ (85 425 และ 850 วัตต์) และการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

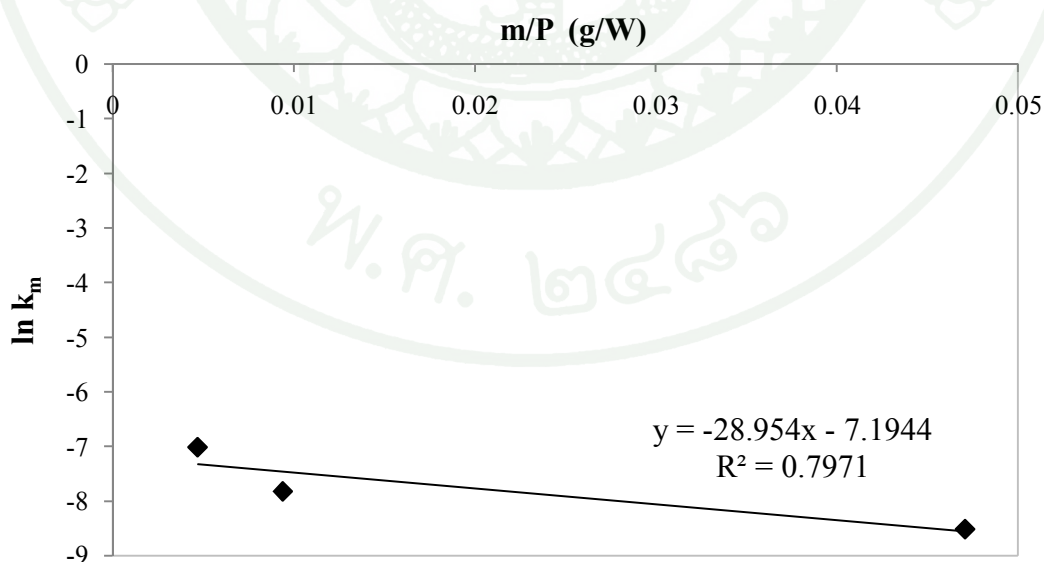
ในหัวข้อนี้เห็นได้ว่าการทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ ช่วยเร่งอัตราการระเหยน้ำ การเกิดโครงสร้างเปลือก และการเปลี่ยนแปลงสีที่เร็ว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการทอดด้วยวิธีดังกล่าวใช้เวลาการทอดที่สั้นกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม และยังมีอัตราการดูดซึมน้ำมันที่ต่ำกว่าด้วย

3. การสร้างแบบจำลองพหุคูณสำหรับการทำนายคุณภาพด้านต่างๆ ในระหว่างการทอดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

สมการที่ศึกษาในหัวข้อที่ 2 เป็นแบบจำลองปฐมภูมิ (primary model) ซึ่งสามารถทำนายคุณภาพด้านต่างๆ ได้เฉพาะกำลังไมโครเวฟที่ศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถทำนายคุณภาพด้านต่างๆ ที่ทอดด้วยกำลังไมโครเวฟอื่นๆ ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงศึกษาการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) หรือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{eff}) กับกำลังไมโครเวฟ โดยใช้แบบจำลองพหุคูณ (secondary model) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สมการ Arrhenius ที่มีตัวแปรภายในสมการแปรผันตามกำลังไมโครเวฟ รวมถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ต่างๆ กับกำลังไมโครเวฟด้วย

3.1 สมการสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของชิ้นมันฝรั่งในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟ

สมการที่ดีที่สุดสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในหัวข้อที่ 2.1.1 คือ สมการ Page's law ซึ่งสมการดังกล่าวมีค่าคงที่ k_m ที่ใช้อธิบายอัตราการระเหยออกของน้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_m กับกำลังไมโครเวฟ แสดงดังภาพที่ 23 โดยให้แกน x เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของชิ้นมันฝรั่งต่อกำลังไมโครเวฟ (m/P) ส่วนแกน y เป็นค่า $\ln k_m$ ตามสมการที่ (27)



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k_m$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius

จากภาพเมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln k_m$ กับ m/P สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น E_a ได้จาก ความชันของกราฟมีค่า 28.95 W/g และมีค่า k_0 เท่ากับ $7.5108 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (ค่า k_0 หาได้จากการใส่ exponential ของค่าจุดตัดแกน x) เมื่อนำค่าคงที่ทั้ง 2 ค่าดังกล่าวมาแทนในสมการที่ (26) ได้

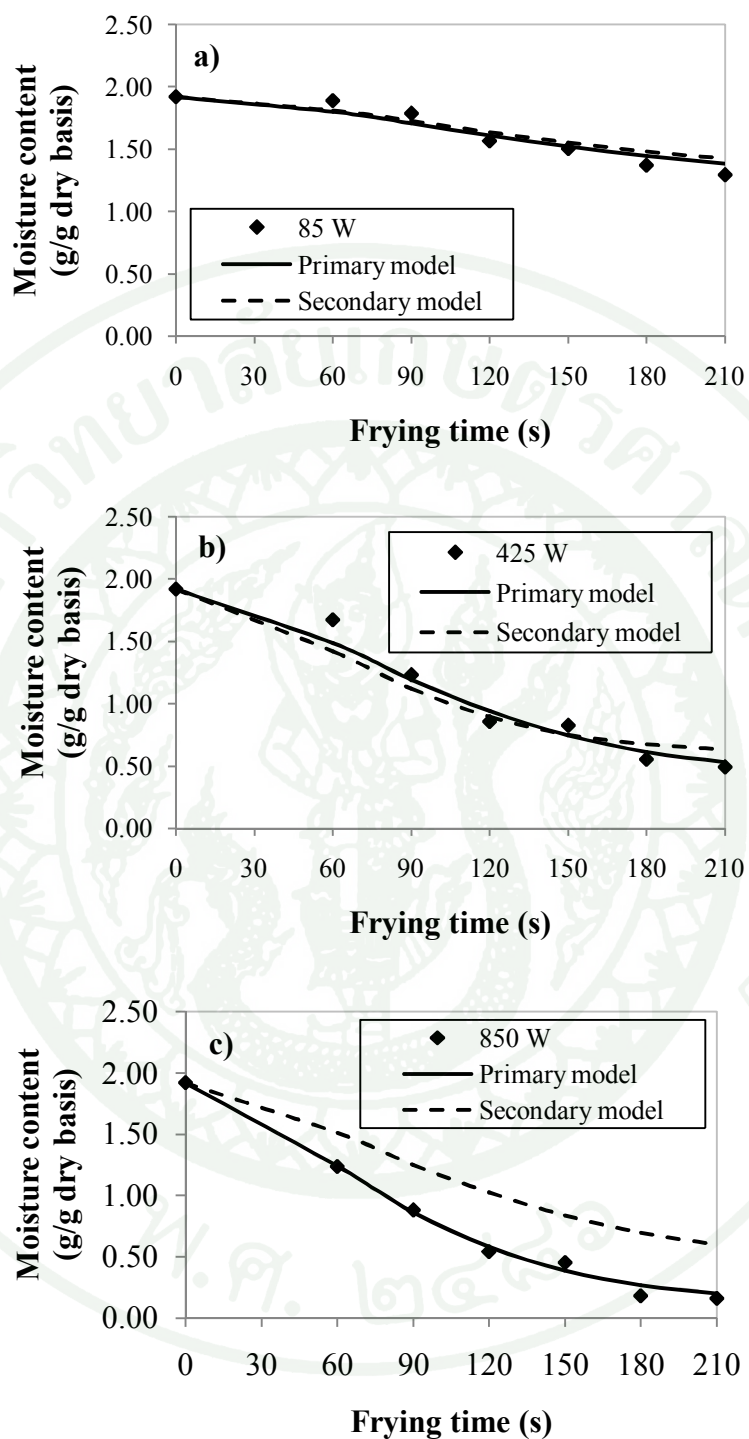
$$k_m = 7.5108 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{-28.95m}{P}\right) \quad (28)$$

ค่าคงที่ในสมการ Page's law มีค่าอื่นๆ นอกจากค่า k_m ได้แก่ค่า n กับ M_{eq} ซึ่งสามารถ หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ดังกล่าวกับกำลังไมโครเวฟด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ได้แสดงใน สมการที่ (29) และ (30) ตามลำดับ (ค่า R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ n กับ M_{eq} กับกำลัง ไมโครเวฟมีค่าเท่ากับ 1.000)

$$n = (-3 \times 10^{-7})P^2 + (7 \times 10^{-5})P + 1.667 \quad (29)$$

$$M_{eq} = (2 \times 10^{-6})P^2 - (0.003)P + 1.515 \quad (30)$$

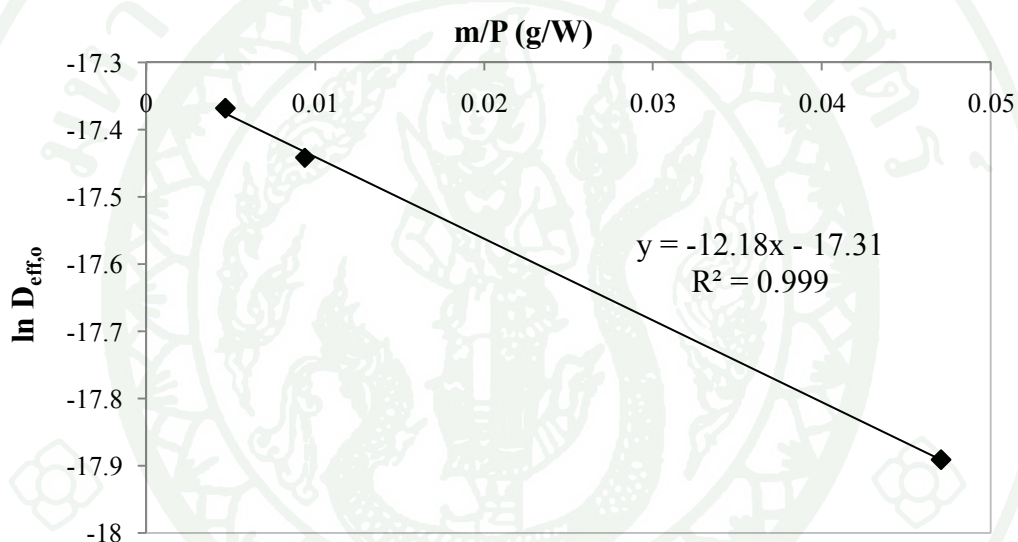
เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับกำลังไมโครเวฟทุกค่าในสมการ Page's law (ตามสมการที่ (28)-(30)) แล้วนำมาคำนวณกลับ เปรียบเทียบกับค่าที่ทดลองและค่าที่ได้จากการ ทำนายด้วยแบบจำลองปฐภูมิ แสดงดังภาพที่ 24 และประสิทธิภาพของสมการแสดงดังตารางที่ 13 พบว่า แบบจำลองทุติยภูมิมีประสิทธิภาพการทำนายลดลงจากแบบจำลองปฐมภูมิ สังเกตได้จาก ค่าเฉลี่ยของ R^2 ที่ลดลง และค่าเฉลี่ยของ %RMS ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 24 ผลเปรียบเทียบของปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการปฐมภูมิ (page's law) และสมการทุติยภูมิ ที่สภาวะต่างๆ : (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์

3.2 สมการสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันของชิ้นมันฝรั่งในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟ

สมการที่ดีที่สุดสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในหัวข้อที่ 2.1.2 คือ สมการ Fick's second law ซึ่งสมการดังกล่าวมีค่าคงที่ $D_{eff,o}$ ที่ใช้อธิบายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำมัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $D_{eff,o}$ กับกำลังไมโครเวฟแสดงดังภาพที่ 25 โดยให้แกน x เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของชิ้นมันฝรั่งต่อกำลังไมโครเวฟ ส่วนแกน y เป็นค่า $\ln D_{eff,o}$ ตามสมการที่ (27)



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln D_{eff,o}$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius

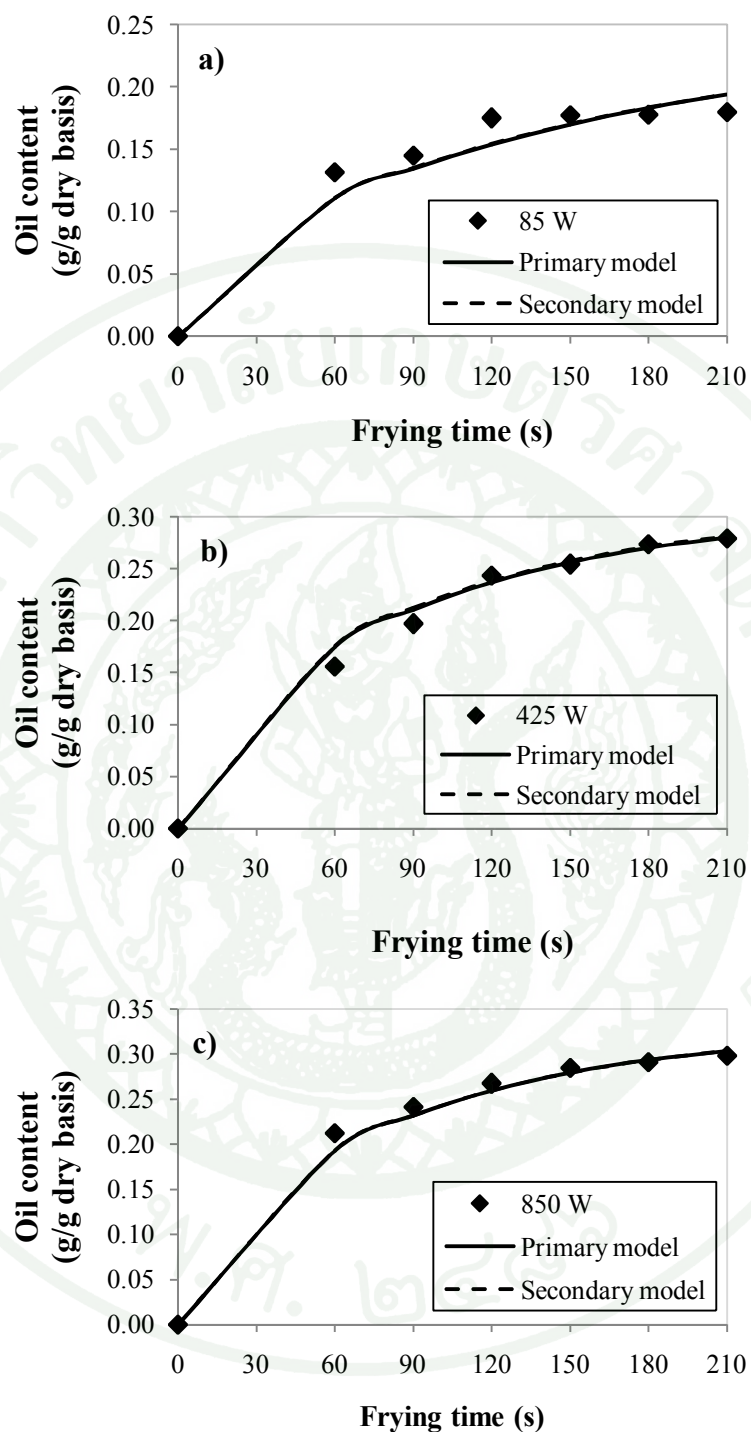
จากภาพเมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln D_{eff,o}$ กับ m/P สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น E_a ได้ จากความชันของกราฟมีค่า 12.18 W/g และมีค่า D_0 เท่ากับ $3.0364 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (ค่า D_0 หาได้จากการใส่ exponential ของค่าจุดตัดแกน x) เมื่อนำค่าคงที่ทั้ง 2 ค่าดังกล่าวมาแทนในสมการที่ (26) ได้

$$D_{eff,o} = 3.0364 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{-12.18m}{P}\right) \quad (31)$$

ค่าคงที่ในสมการ Fick's second law มีค่าอื่นๆ นอกจากค่า $D_{\text{eff},o}$ ได้แก่ค่า O_{eq} ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ดังกล่าวกับกำลังไมโครเวฟด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ได้แสดงในสมการที่ (32) (ค่า R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ O_{eq} กับกำลังไมโครเวฟเท่ากับ 1.000)

$$O_{\text{eq}} = (-2 \times 10^{-7})P^2 + 0.0003P + 0.2184 \quad (32)$$

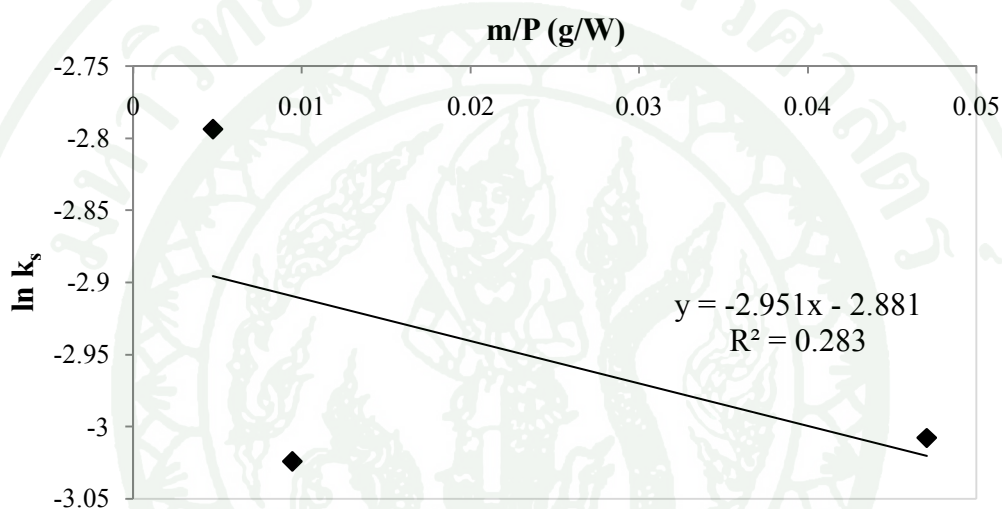
เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับกำลังไมโครเวฟทุกค่าในสมการ Fick's second law (ตามสมการที่ (31)-(32)) แล้วนำมาคำนวณกลับ เปรียบเทียบกับค่าที่ทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองปฐภูมิ แสดงดังภาพที่ 26 และประสิทธิภาพของสมการแสดงดังตารางที่ 14 พบว่า แบบจำลองที่ได้จากทั้ง 2 สมการมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน (มีค่า R^2 เกือบเท่ากันและมีค่า % RMS เกือบไม่แตกต่างกันมากนัก) สามารถใช้อธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำมันได้เป็นอย่างดีทั้งคู่ เนื่องจากค่า R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า $D_{\text{eff},o}$ กับกำลังไมโครเวฟ และความสัมพันธ์ของค่าคงที่ O_{eq} กับกำลังไมโครเวฟ มีค่าสูง คือ 0.999 และ 1.000 ตามลำดับ



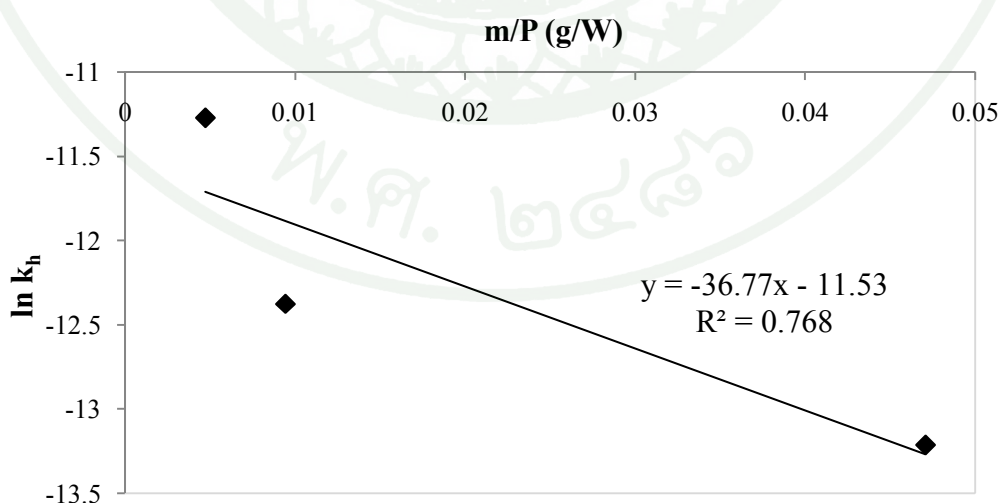
ภาพที่ 26 ผลเปรียบเทียบของปริมาณน้ำมันที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการฟิค (Fick's second law) และสมการทุติยภูมิ ที่สภาวะต่างๆ (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์

3.3 สมการสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของชั้นมันฝรั่งในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟ

สมการที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสในหัวข้อที่ 2.2 คือ สมการที่ (23) สมการดังกล่าวมีค่าคงที่ 2 ค่า คือ ค่า k_s กับค่า k_h ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_s และค่า k_h กับกำลังไมโครเวฟแสดงดังภาพที่ 27 และ 28 ตามลำดับ โดยให้แกน x เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของชั้นมันฝรั่งต่อกำลังไมโครเวฟ ส่วนแกน y เป็นค่า $\ln k_s$ กับค่า $\ln k_h$ ตามสมการที่ (27)



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k_s$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k_h$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius

จากภาพเมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln k_s$ หรือ $\ln k_h$ กับ m/P สามารถหาค่า E_a และค่า k_0 ของการอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อภายในมันฝรั่ง และการเกิดโครงสร้างเปลือกภายนอกในระหว่างการทอดได้ โดยค่าดังกล่าวแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่า E_a และค่า k_0 ของการอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อภายในมันฝรั่งและการเกิดโครงสร้างเปลือกภายนอกในระหว่างการทอด

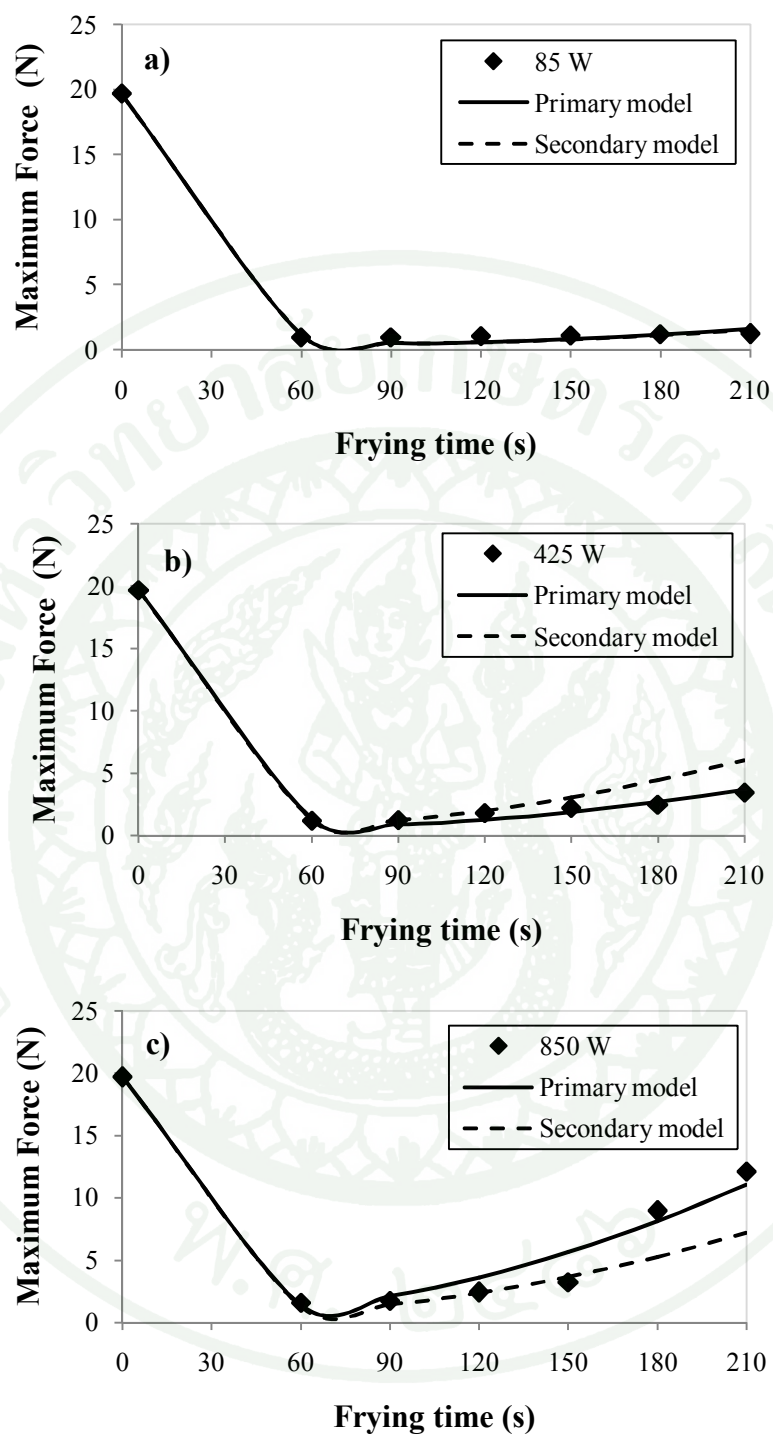
ช่วงของการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส ในระหว่างการทอด	ค่าพลังงานกระตุ้น E_a (W/g)	ค่า k_0
การอ่อนตัวลงของเนื้อเยื่อภายในมันฝรั่ง	2.951	0.0561 s^{-1}
การเกิดโครงสร้างเปลือกภายนอกมันฝรั่ง	36.77	$9.8307 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$

เมื่อนำค่าคงที่ทั้งหมดดังกล่าวมาแทนในสมการที่ (26) ได้

$$k_s = 0.0561 \exp\left(\frac{-2.951m}{P}\right) \quad (33)$$

$$k_h = 9.8307 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-36.77m}{P}\right) \quad (34)$$

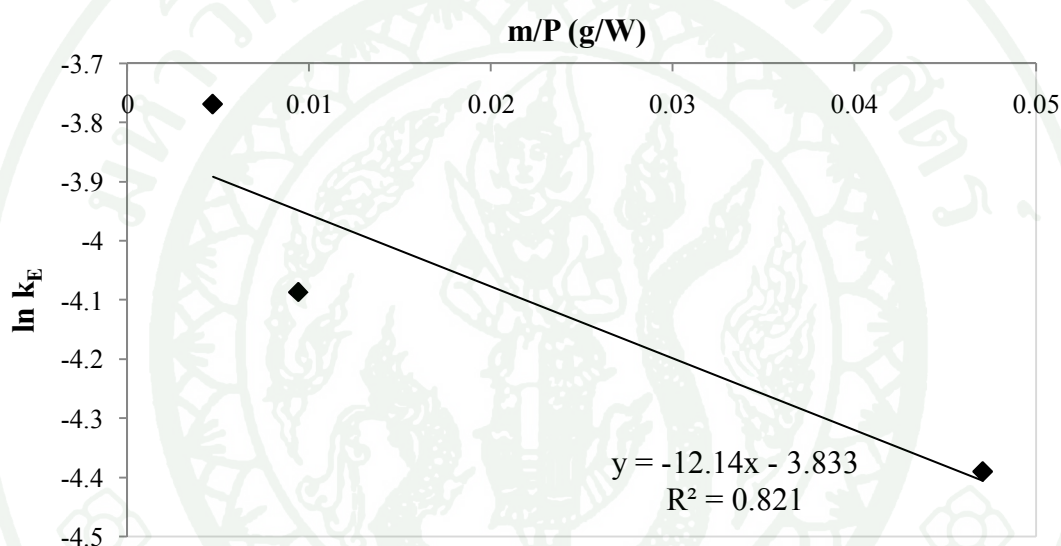
เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับกำลังไมโครเวฟทุกค่าในสมการที่ (23) (ตามสมการที่ (33)-(34)) แล้วนำมาคำนวณกลับ เปรียบเทียบกับค่าที่ทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองปฐมภูมิ แสดงดังภาพที่ 29 และประสิทธิภาพของสมการแสดงดังตารางที่ 15 พบว่าแบบจำลองหุติภูมิมีประสิทธิภาพการทำนายลดลงจากแบบจำลองปฐมภูมิ ดังเหตุได้จากค่าเฉลี่ยของ R^2 ที่ลดลง และค่าเฉลี่ยของ %RMS ที่เพิ่มขึ้น แต่ก็ยังสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสได้ในระดับที่ดี เพราะค่า R^2 เฉลี่ยมีค่ามากกว่า 0.90



ภาพที่ 29 ผลเปรียบเทียบของค่าแรงเจาะสูงสุดที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการปฐมภูมิ (สมการที่ (23)) และสมการทุติยภูมิ ที่สภาวะต่างๆ (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์

3.4 สมการสำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงสีของขึ้นมันฝรั่งในระหว่างการทอดด้วยไมโครเวฟ

สมการที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสในหัวข้อที่ 2.3 คือ สมการที่ (25) สมการดังกล่าวมีค่าคงที่ คือ ค่า k_E ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_E กับกำลังไมโครเวฟแสดงดังภาพที่ 30 ตามลำดับ โดยให้แกน x เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของขึ้นมันฝรั่งต่อกำลังไมโครเวฟ ส่วนแกน y เป็นค่า $\ln k_E$ ตามสมการที่ (27)



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k_E$ กับ m/P ตามสมการ Arrhenius

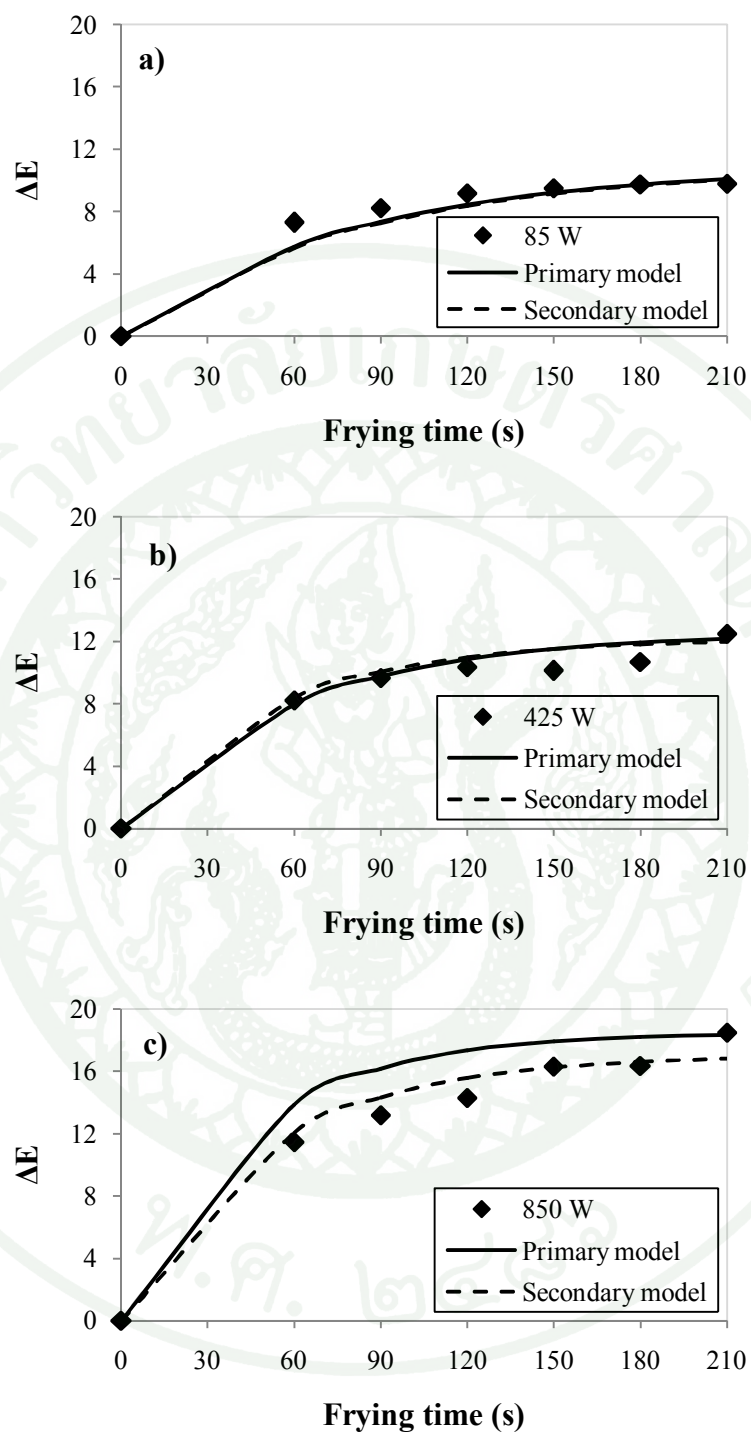
จากภาพเมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln k_E$ กับ m/P สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น E_a ได้จากความชันของกราฟมีค่า 12.14 W/g และมีค่า k_0 เท่ากับ $2.1645 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ค่า k_0 หาได้จากการใส่ exponential ของค่าจุดตัดแกน x) เมื่อนำค่าคงที่ทั้ง 2 ค่าดังกล่าวมาแทนในสมการที่ (26) ได้

$$k_E = 2.1645 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{12.14m}{P}\right) \quad (35)$$

ค่าคงที่ในสมการ (25) มีค่าอื่นๆ นอกจากค่า k_E ได้แก่ค่า $\Delta E_{\max}$ ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ดังกล่าวกับกำลังไมโครเวฟด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ได้แสดงในสมการที่ (36) (ค่า R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Delta E_{\max}$ กับกำลังไมโครเวฟมีค่าเท่ากับ 1.000)

$$\Delta E_{\max} = (10^{-5})P^2 - 0.0013P + 10.9315 \quad (36)$$

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับกำลังไมโครเวฟทุกค่าในสมการที่ (23) (ตามสมการที่ (35)-(36)) แล้วนำมาคำนวณกลับ เปรียบเทียบกับค่าที่ทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองปฐภูมิ แสดงดังภาพที่ 31 และประสิทธิภาพของสมการแสดงดังตารางที่ 16 พบว่าแบบจำลองทุติยภูมิสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสีได้ดีกว่าแบบจำลองปฐภูมิ โดยเฉพาะภาพที่ 30c เส้นกราฟที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทุติยภูมิใกล้เคียงกับค่าที่ทดลองมากกว่าเส้นกราฟที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองปฐภูมิ และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ R^2 และค่าเฉลี่ยของ RMS เห็นได้ว่าค่าทั้งคู่มีค่าที่เพิ่มขึ้นกับลดลง ตามลำดับ



ภาพที่ 31 ผลเปรียบเทียบของค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการปฐมภูมิ (สมการที่ (25)) และสมการทุติยภูมิ ที่สภาวะต่างๆ: (a) กำลังไมโครเวฟ 85 วัตต์ (b) กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ (c) กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองปฐมภูมิและแบบจำลองทุติยภูมิที่ใช้สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของไขมัน

Conditions	Primary model		Secondary model	
	R^2	% RMS	R^2	% RMS
Microwave frying 85 W	0.9196	6.5530	0.8767	8.1175
Microwave frying 425 W	0.9699	8.8230	0.9352	12.9552
Microwave frying 850 W	0.9938	4.6272	0.5677	38.6656
Average	0.9611	6.6677	0.7932	19.9128

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองปฐมภูมิและแบบจำลองทุติยภูมิที่ใช้สำหรับอธิบายการถ่ายเทมวลของน้ำมัน

Conditions	Primary model		Secondary model	
	R^2	% RMS	R^2	% RMS
Microwave frying 85 W	0.9506	1.3370	0.9520	1.3179
Microwave frying 425 W	0.9897	0.9278	0.9882	0.9924
Microwave frying 850 W	0.9913	0.9076	0.9913	0.9038
Average	0.9772	1.0575	0.9772	1.0714

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองปฐมภูมิและแบบจำลองทุติยภูมิที่ใช้สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส

Conditions	Primary model		Secondary model	
	R ²	% RMS	R ²	% RMS
Microwave frying 85 W	0.9978	0.3079	0.9978	0.3105
Microwave frying 425 W	0.9976	0.3048	0.9577	1.2768
Microwave frying 850 W	0.9674	1.1489	0.8644	2.3419
Average	0.9876	0.5872	0.9400	1.3097

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองปฐมภูมิและแบบจำลองทุติยภูมิที่ใช้สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสี

Conditions	Primary model		Secondary model	
	R ²	% RMS	R ²	% RMS
Microwave frying 85 W	0.9464	0.7505	0.9406	0.7903
Microwave frying 425 W	0.9600	0.7544	0.9602	0.7534
Microwave frying 850 W	0.8677	2.0655	0.9728	0.9369
Average	0.9247	1.1901	0.9579	0.8269

4. การหาสภาวะที่เหมาะสมของการทอดมันฝรั่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

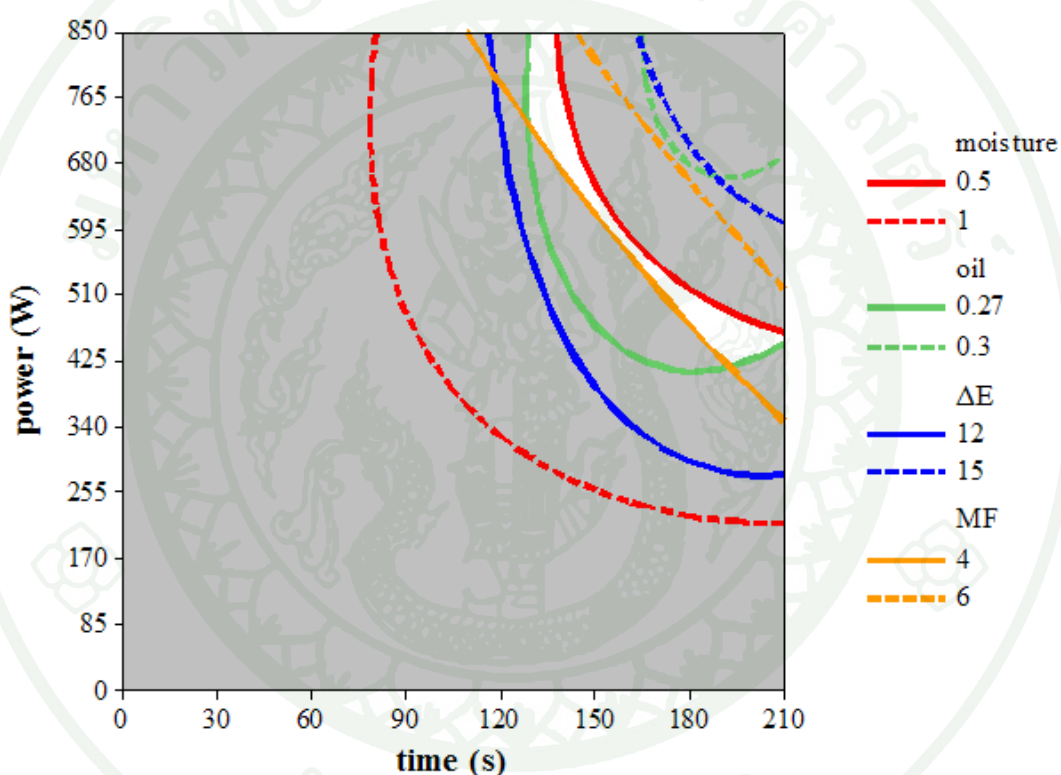
การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอดมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟมีเป้าหมายเพื่อให้มันฝรั่งทอดนั้นมีปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันให้ต่ำที่สุด มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีต่ำ และมีเนื้อสัมผัสที่กรอบ ซึ่งค่าปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันของมันฝรั่งทอดนั้นมีค่ามาตรฐานเท่ากับ 1.05 และ 0.30 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง (Talburt, 1987) ดังนั้นในที่นี้สภาวะที่เหมาะสมจึงกำหนดค่าปริมาณความชื้น 0.5 - 1 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ปริมาณน้ำมันของมันฝรั่งในช่วง 0.27 - 0.30 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง เพื่อต้องการให้มันฝรั่งที่ทอดมีปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

ส่วนด้านเนื้อสัมผัส Pedreschi and Moyano (2005) รายงานว่า มันฝรั่งทอดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีความกรอบในช่วงที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 10 กรัม/100 กรัม (น้ำหนักเปียก) เมื่อวัดค่า แรงเจาะสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 4-6 นิวตัน จึงเลือกช่วงค่าแรงเจาะสูงสุดดังกล่าวเป็นช่วงสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสม

ในขณะที่ด้านสีนั้นรายงานเป็นค่า ΔE ซึ่งในที่นี้ต้องการให้มันฝรั่งที่ทอดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ไม่มาก คือ มีสีเหลืองน้ำตาล ดังแสดงในภาพที่ 21 ซึ่งค่า ΔE ของมันฝรั่งที่มีสีตามที่ต้องการมีค่าอยู่ในช่วง 12-15

ช่วงต่างๆ ที่ได้เลือกมาเป็นเกณฑ์นั้นเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับคุณภาพของมันฝรั่งที่ทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 180-210 วินาที (ปริมาณความชื้น 0.5-0.7 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ปริมาณน้ำมัน 0.33-0.34 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ค่าแรงเจาะสูงสุด 1.5-2.5 นิวตัน และมีค่า ΔE 12-16) แต่ช่วงที่เลือกมานั้นมีคุณภาพด้านปริมาณน้ำมันที่ต่ำกว่า และมีค่าแรงเจาะสูงสุดที่สูงกว่า ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อนี้จะมีคุณภาพของมันฝรั่งที่ดีกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 180-210 วินาที

เมื่อกำหนดช่วงที่เหมาะสมของทั้ง 4 ค่าในแต่ละตัวแปรแล้วนำข้อมูลดังกล่าวไปหาพื้นที่ซ้อนทับกัน จะได้สภาวะที่เหมาะสมที่มีคุณภาพของมันฝรั่งทอดด้านต่างๆ ในช่วงที่กำหนดไว้อยู่ในพื้นที่สีขาว ดังแสดงในภาพที่ 32 พบว่า มันฝรั่งที่ทอดด้วยไมโครเวฟแล้วได้คุณภาพด้านต่างๆ ตามที่ต้องการมีหลายสภาวะ แต่เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยด้านพลังงานและระยะเวลาในการทอดแล้วสามารถพิจารณาได้ 2 แบบ คือ ทอดโดยใช้กำลังไมโครเวฟต่ำเป็นเวลานาน หรือทอดด้วยกำลังไมโครเวฟสูงเป็นเวลาสั้น สภาวะแบบแรก คือ การทอดด้วยกำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ เป็นเวลา 130 วินาที ส่วนสภาวะหลังคือการทอดด้วยกำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ เป็นเวลา 200 วินาที



ภาพที่ 32 การซ้อนทับกันของกราฟค่าตอบสนองทั้ง 4 ค่า (ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน ค่าแรงเจาะสูงสุด และค่า ΔE) เพื่อหาสภาวะการทอดด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

สรุป

จากการศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อคุณภาพของมันฝรั่งที่ทอดด้วยไมโครเวฟ พบว่า เมื่อทอดด้วยกำลังไมโครเวฟในระดับสูงและเวลานาน ส่งผลให้เกิดการระเหยออกของน้ำและการดูดซึมเข้าของน้ำมันมาก มีเนื้อสัมผัสกรอบ และเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีมาก

เมื่อเปรียบเทียบกับทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟที่ กำลัง 850 วัตต์ มีอัตราการระเหยออกของน้ำ อัตราการเกิดโครงสร้างเปลือก และอัตราการเปลี่ยนแปลงของสีเร็วกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม แต่อัตราการดูดซึมน้ำมันเข้ามาภายในมันฝรั่งน้อยกว่า ดังนั้น การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟที่ กำลัง 850 วัตต์ จึงใช้เวลาในการทอดสั้นกว่าและมีคุณภาพของมันฝรั่งภายหลังการทอดที่ดีกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม

สมการที่มีความเหมาะสมสำหรับการอธิบายการถ่ายเทมวลการระเหยออกของน้ำในระหว่างการทอดมันฝรั่ง คือ สมการ Page's law ส่วนสมการที่สามารถอธิบายการดูดซึมของน้ำมัน คือ สมการ Fick's second law เนื่องจากทั้ง 2 สมการมีค่า R^2 สูงที่สุดและ มีค่า % RMS ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสมการอื่นๆ สำหรับสมการของ Pedreschi and Moyano (2005) ที่นำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส และสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 ที่นำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสีในงานวิจัยนี้ สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทั้ง 2 ด้าน ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสมการทั้งสองสมการมีค่า R^2 มากกว่า 0.96 และ 0.80 ตามลำดับ

สถานะที่เหมาะสมสำหรับการทอดมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟ สามารถพิจารณาได้ 2 แบบ คือ การทอดแบบใช้กำลังไมโครเวฟต่ำเป็นเวลานาน คือ ที่กำลังไมโครเวฟ 425 วัตต์ เป็นเวลา 200 วินาที กับการทอดแบบใช้กำลังไมโครเวฟสูงเป็นเวลาสั้น คือ ที่กำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ เป็นเวลา 130 วินาที ซึ่งสถานื่อดังกล่าวเป็นสถานะที่ทำให้มันฝรั่งมีคุณภาพภายหลังการทอดเทียบเท่าหรือดีกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมในช่วงเวลา 180-210 วินาที

ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้อุณหภูมิเริ่มต้นของการทอดด้วยไมโครเวฟใช้อุณหภูมิเพียงประมาณ 140 องศาเซลเซียส แล้วทำให้ระยะเวลาการทอดด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ น้อยกว่าการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าต้องการให้ระยะเวลาที่ใช้ทอดสั้นลงหรือใช้กำลังไมโครเวฟที่ต่ำกว่านี้ ควรใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงกว่า 140 องศาเซลเซียส

2. สมการที่ใช้สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพมันฝรั่งในแต่ละด้านในงานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่าชั้นมันฝรั่งจมอยู่ในน้ำมันที่ใช้ทอดตลอดเวลาเนื่องจาก มันฝรั่งที่ลอยขึ้นมาในระหว่างการทอด ด้านที่มันฝรั่งลอยนั้นอาจจะได้รับความร้อนที่ไม่เท่ากับด้านที่จมอยู่ในน้ำมัน ซึ่งมีผลต่อการคำนวณค่า k หรือค่า D_{eff} ดังนั้น นักวิจัยท่านอื่นๆ ที่สนใจในการหาค่า k หรือค่า D_{eff} ให้มีความลึกซึ้งและถูกต้องมากขึ้น อาจจะต้องพิจารณาถึงการจมหรือลอยของชั้นมันฝรั่งในระหว่างการทอดด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กัณณิกา บุญศิริพัฒน์, นิลุบล สัพโส, ศุภศิริ ศิลาน้อย, โสภิตา สืบวงษาและ สงวนศรี เจริญ
เหรียญ. 2548. ผลของการทอดข้าวเกรียบกุ้งโดยใช้ไมโครเวฟ. *อาหาร*. 35(2): 136-142.
- นิธิยา รัตนพานนท์. 2548. วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 1.
สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- นิลุบล สัพโส. 2549. อิทธิพลของสภาวะการทอดต่อคุณภาพกระเทียมเจียว. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วารุณี สุวรรณจงสถิต. 2546. การปรับปรุงกรรมวิธีการทอดและอายุการเก็บรักษาของปลาสด
เค็มทอด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิไล รังสาดทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล
พับลิเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- A.O.A.C. 2000. **Official Method of Analysis**. 17th ed. The Association of Official Analytical
Chemists, Gaithersburg, Maryland.
- Alibas, I. 2007. Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin
slices. **LWT- Food Science and Technology**. 40: 1445-1451.
- Alvis, A., C. Velez, M.R. Mendoza, M. Villamiel and H.S. Villada. 2009. Heat transfer
coefficient during deep fat frying. **Food Control**. 20: 321-325.

- Andersson, A., A. Gekas, I. Lind, F. Oliveira and R. Oste. 1994. Effect of preheating on potato texture. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 34(3): 229-251.
- Arteba, P. and G.S. Mittal. 1994. Dynamics of crust formation and kinetics of quality changes during frying of meatballs. **Journal of Food Science**. 59: 1275–1278.
- Baixauli, R., A. Salvador, S. M. Fisman and C. Calvo. 2002. Effect of addition of corn flour and colorants on the color of fried, battered squid rings. **European Food Research and Technology**. 215: 457-461.
- Budzaki, S. and B. Seruga. 2005. Moisture loss and oil uptake during deep fat frying of Krostula dough. **European Food Research and Technology**. 220: 90-95.
- Dadali, G., D.K. Apar and B. Ozbek. 2007. Microwave Drying Kinetics of Okra. **Drying Technology**. 25(5): 917-924.
- Dana, D., and I.S. Saguy. 2006. Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth. **Advances in Colloid and Interface Science**. 128-130: 267-272.
- Debnath, S., K.K. Bhat and N.K. Rastogi. 2003. Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food. **LWT- Food Science and Technology**. 36: 91-98.
- _____, N.K. Rastogi, A.G. Gopala Krishna and B.R. Lokesh. 2009. Oil partitioning between surface and structure of deep-fat fried potato slices: A kinetic study. **LWT- Food Science and Technology**. 1-5.

- Demirhan, E., and B. Ozbek. 2010. Drying kinetics and effective moisture diffusivity of purslane undergoing microwave heat treatment. **Korean Journal of Chemical Engineering**. 27: 1377-1383.
- Duiek, V., P. Robert and P. Bouchon. 2010. Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. **Food Chemistry**. 119: 1143-1149.
- Fan, L.L. and J.A. Arce. 1986. **Preparation of fried food products with oil containing emulsifiers**. U.S. patent 4, 608, 264.
- Fellow, P.J. 1990. **Food Processing Technology Principle and Practice**. Ellis Horwood Limited.
- Gramble, M.H., P. Rice and J.D. Selman. 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 of Technology**. 2: 233-241.
- Garayo, J. and R.G. Moreira. 2002. Vacuum frying of potato chips. **Journal of Food Engineering**. 55: 181-191.
- Gharachorloo, M., M. Ghavami, M. Mahdiani and R. Azizinezhad. 2009. The effects of microwave frying on physicochemical properties of frying and sunflower oils. **Journal of the American Oil Chemists Society**. 87(4): 355-360.
- Hallstrom, B. 1980. Heat and mass transfer in industrial cooking. In : P. Linko, Y. Malkk, J. Olkku and J. Larinkari (eds.). **Food Process Engineering Vol. 1**. Food Processing Systems. Applied Science, London.

Heldman, D.R. , D.B. Lund, R. Villota and J.G. Hawkes. 2007. **Handbook of food engineering**. CRC Press, New York.

Hutchings, J. B. 1999. **Food color and appearance** (2nd Edition.). MD: Aspen Publishers Inc, Gaithersburg.

Krokida, M.K., V. Oreopoulou, and Z. B. Maroulis. 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. **Journal of Food Engineering**. 44: 39 – 46.

_____, _____, _____ and D. Marinos – Kouris. 2001. Effect of pre-drying on quality of French fries. **Journal of Food Engineering**. 49: 347-354.

Kumar, A.J., R.R.B. Singh, A.A. Patel and G.R. Patil. 2006. Kinetics of colour and texture changes in Gulabjamun balls during deep-fat frying. **LWT- Food Science and Technology**. 39: 827-833.

Leszkowiat, M.J., V. Barichello, R.Y. Yada, R.H. Coffin, E.C. Loughheed and D.W. Stanley. 1990. Contribution of sucrose to nonenzymatic browning in potato chips. **Journal of Food Science**. 55: 281-282.

Lin, T. M., T. D. Durance, and C. H. Scaman. 1998. Characterization of vacuum microwave air and freeze dried carrot slices. **Food Research International**. 4: 111–117.

Mallikarjunan, P., M.S. Chinnan, V.M. Balasubramaniam and R.D. Phillips. 1997. Edible coating for deep fat frying of starchy products. **LWT- Food Science and Technology**. 30: 709-714.

Mariscal, M. and P. Bouchon. 2008. Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices. **Food Chemistry**. 107: 1561-1569.

- Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering**. 44: 71-78.
- Mellema, M. 2003. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. **Trends in Food Science and Technology**. 14: 364-373.
- Moreira, RG., X. Sun and Y. Chen. 1996. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep – fat frying. **Journal of Food Engineering**. 31: 485-498.
- _____, M.E. Castell-Perez and M.A. Barrufet. 1999. **Deep fat frying fundamentals and applications**. Aspen Publication Inc. Gaithersburg.
- Moyano, P.C. and F. Pedreschi. 2006. Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. **LWT- Food Science and Technology**. 39: 285-291.
- Ozbek, B. and G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. **Journal of Food Engineering**. 83: 541-549.
- Ozkan, I.A., B. Akbudak and N. Akbudak. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. **Journal of Food Engineering**. 78: 577-583.
- Oztop, M.H., S. Sahin and G. Sumnu. 2007a. Optimization of microwave of osmotically dehydrated potato slices by using response surface methodology. **European Food Research and Technology**. 224: 707-713.
- _____, _____ and _____. 2007b. Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. **Journal of Food Engineering**. 79: 83-91.

- Paul, S. and G.S. Mittal. 1996. Dynamics of Fat/Oil Degradation during Frying Based on Optical Properties. **Journal of Food Engineering**. 30: 389-403.
- Pedreschi, F., J.M. Aguilera and L. Pyle. 2001. Textural characterization and kinetics of potato strips during frying. **Journal of Food Science**. 66(2): 314-318.
- _____ and P. Moyano. 2005. Effect of pre-drying on texture and oil uptake of potato chips. **LWT- Food Science and Technology**. 38: 599-604.
- _____, P. Hernandez and C. Figueroa. 2005. Modelling water loss during frying of potato slices. **International Journal of Food Properties**. 8: 289-299.
- Rossell, J.B. 2001. **Frying improving quality**. Woodhead publishing limited Cambridge England. 369 p.
- Saguy, S.I. and J.E. Pinthus. 1995. Oil uptake during deep fat frying: factors and mechanisms. **Food Technology**. 49 (4): 142-145.
- Sharma, G.P., R.C. Verma and P. Pathare. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. **Journal of Food Engineering**. 71: 282-286.
- Talburt, W.F. 1987. **Frozen French fried and other frozen products**. Westport: AVI. 588p.
- Therdthai, N. and W. Zhou. 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). **Journal of Food Engineering**. 91: 482-489.
- Troncoso, E. and F. Pedreschi. 2009. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. **LWT- Food Science and Technology**. 42: 1164-1173.

Ziaiiifar, A.M., N. Achir, F. Courtois, I. Trezzani and G. Trystram. 2008. Review of mechanisms, conditions and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep –fat frying process. **International Journal of Food Science and Technology**. 43: 1410-1423.



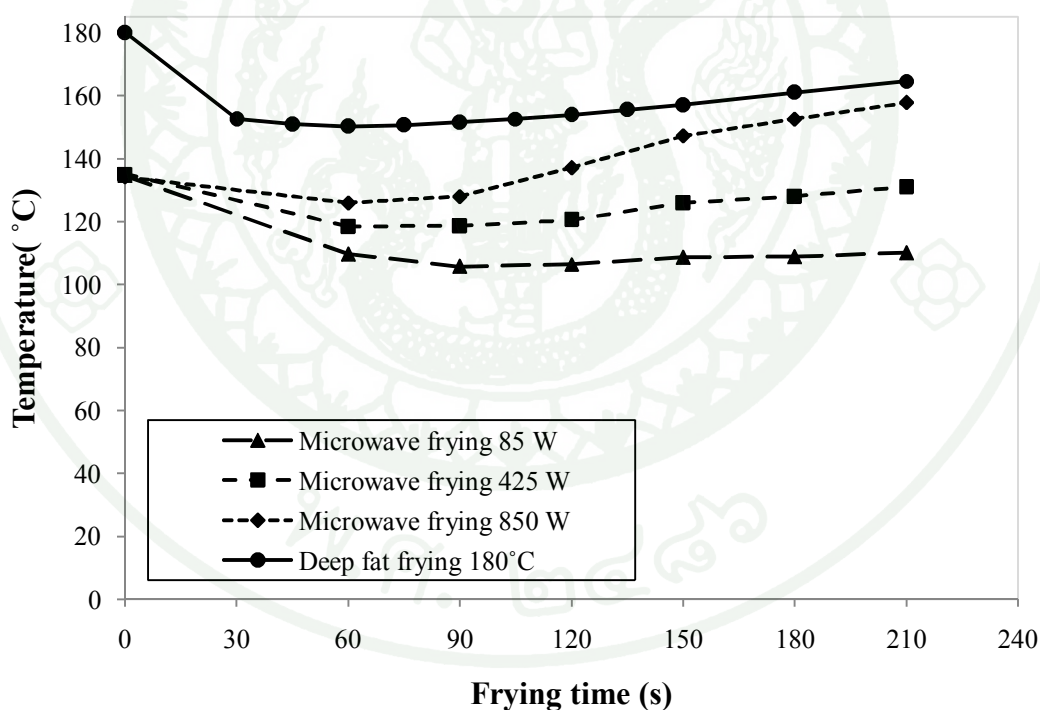




วิธีการวัดอุณหภูมิน้ำมัน

การวัดอุณหภูมิของน้ำมันขณะทอดมันฝรั่งในเตาไมโครเวฟทำได้โดยนำสายเทอร์โมคัปเปิล Type T ที่หุ้มอลูมิเนียมฟอยล์ไว้ที่ปลายสายเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟในขณะก็นำเข้าเตาไมโครเวฟ สอดสายเทอร์โมคัปเปิลดังกล่าวกว่าที่ฝาปิดด้านข้างของเตาไมโครเวฟ และนำสายจุ่มลงในน้ำมัน ปิดฝาเตาไมโครเวฟ และทอดมันฝรั่งที่กำลังไมโครเวฟต่างๆ บันทึกอุณหภูมิทุกๆ 30 วินาที

ส่วนการวัดอุณหภูมิน้ำมันของการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมทำได้โดยการนำสายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเดียวกันจุ่มลงไปนน้ำมัน แล้วบันทึกอุณหภูมิน้ำมันทุกๆ 30 วินาทีเช่นเดียวกัน อุณหภูมิของการทอดทั้ง 2 วิธีที่เวลาต่างๆ แสดงดังภาพผนวกที่ ก1



ภาพผนวกที่ ก1 อุณหภูมิของน้ำมันในระหว่างการทอดมันฝรั่งของวิธีน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส กับวิธีไมโครเวฟที่กำลังต่างๆ



ตารางผนวกที่ ข1 ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการทอดต่อปริมาณความชื้นของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	กำลังไมโครเวฟ			ปัจจัยด้านเวลา
	85 W	425 W	850 W	
0	1.92±0.13 ^h	1.92±0.13 ^h	1.92±0.13 ^h	1.92±0.13 ^E
60	1.89±0.53 ^h	1.67±0.13 ^{fg}	1.23±0.05 ^d	1.60±0.30 ^D
90	1.78±0.11 ^{gh}	1.23±0.25 ^d	0.88±0.07 ^c	1.30±0.42 ^C
120	1.57±0.92 ^f	0.86±0.02 ^c	0.54±0.03 ^b	0.99±0.46 ^B
150	1.50±0.78 ^{ef}	0.83±0.09 ^c	0.45±0.05 ^b	0.93±0.47 ^B
180	1.37±0.18 ^{de}	0.56±0.06 ^b	0.18±0.07 ^a	0.70±0.54 ^A
210	1.30±0.10 ^d	0.49±0.02 ^b	0.16±0.05 ^a	0.65±0.51 ^A
ปัจจัยด้านกำลัง ไมโครเวฟ	1.62±0.25 ^C	1.08±0.53 ^B	0.77±0.61 ^A	

หมายเหตุ ^{A-E} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแนวนอนแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-h} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข2 ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการทอดต่อปริมาณน้ำมันของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	กำลังไมโครเวฟ			ปัจจัยด้านเวลา
	85 W	425 W	850 W	
0	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^A
60	0.13±0.01 ^b	0.16±0.00 ^{cd}	0.21±0.00 ^g	0.17±0.04 ^B
90	0.14±0.00 ^{bc}	0.20±0.00 ^{fg}	0.24±0.01 ^h	0.21±0.04 ^C
120	0.17±0.01 ^{de}	0.24±0.01 ^h	0.27±0.00 ^{ij}	0.23±0.04 ^D
150	0.18±0.02 ^{ef}	0.25±0.00 ^{hi}	0.29±0.01 ^{kl}	0.24±0.05 ^D
180	0.18±0.01 ^{ef}	0.27±0.01 ^{ijk}	0.29±0.02 ^{kl}	0.26±0.05 ^E
210	0.18±0.02 ^{ef}	0.28±0.01 ^{kl}	0.30±0.02 ^l	0.26±0.06 ^E
ปัจจัยด้านกำลัง ไมโครเวฟ	0.14±0.07 ^A	0.20±0.10 ^B	0.23±0.10 ^C	

หมายเหตุ ^{A-E} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแนวดิ่งและแนวนอนแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-l} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข3 ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการทอดต่อค่าแรงเจาะสูงสุดของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	กำลังไมโครเวฟ			ปัจจัยด้านเวลา
	85 W	425 W	850 W	
0	19.68±0.37 ^h	19.68±0.37 ^h	19.68±0.37 ^h	19.68±0.32 ^F
60	0.95±0.22 ^a	1.19±0.04 ^{ab}	1.57±0.19 ^{abc}	1.24±0.31 ^A
90	0.94±0.17 ^a	1.22±0.03 ^{ab}	1.74±0.05 ^{bcd}	1.30±0.36 ^A
120	1.05±0.14 ^{ab}	1.82±0.20 ^{bcd}	2.43±0.46 ^d	1.77±0.65 ^B
150	1.11±0.16 ^{ab}	2.21±0.25 ^{cd}	3.23±0.48 ^e	2.18±0.96 ^C
180	1.18±0.13 ^{ab}	2.46±0.06 ^d	8.96±0.80 ^f	4.20±3.63 ^D
210	1.22±0.11 ^{ab}	3.44±0.29 ^e	12.13±1.29 ^g	5.60±5.04 ^E
ปัจจัยด้านกำลัง ไมโครเวฟ	3.73±6.68 ^A	4.58±6.37 ^B	7.11±6.54 ^C	

หมายเหตุ ^{A-F} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแนวดิ่งและแนวนอนแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-g} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ๔4 ผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาในการทอดต่อค่า ΔE ของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	กำลังไมโครเวฟ			ปัจจัยด้านเวลา
	85 W	425 W	850 W	
0	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^A
60	7.30±2.08 ^b	8.23±1.29 ^{bc}	11.47±1.14 ^{defg}	9.00±2.33 ^B
90	8.22±0.17 ^{bc}	9.68±1.99 ^{bcd}	13.19±2.12 ^{fg}	10.36±2.65 ^{BC}
120	9.15±0.88 ^{bcd}	10.35±2.53 ^{bcd}	14.32±1.81 ^{gh}	11.27±2.85 ^{CD}
150	9.50±0.94 ^{bcd}	10.14±2.68 ^{bcd}	16.32±1.56 ^{hi}	11.99±3.64 ^{CDE}
180	9.74±1.86 ^{bcd}	10.68±2.49 ^{cd}	16.38±1.52 ^{hi}	12.27±3.56 ^{DE}
210	9.79±1.91 ^{bcd}	12.48±1.80 ^{efg}	18.50±1.51 ⁱ	13.59±4.15 ^E
ปัจจัยด้านกำลัง ไมโครเวฟ	7.67±3.51 ^A	8.79±4.22 ^B	12.88±5.96 ^C	

หมายเหตุ ^{A-E} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถวและแนวนอนแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-i} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข5 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อปริมาณความชื้นของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟ			การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม
	85 W	425 W	850 W	
0	1.92±0.13 ^l	1.92±0.13 ^l	1.92±0.13 ^l	1.92±0.13 ^l
60	1.89±0.53 ^l	1.67±0.13 ^{jk}	1.23±0.05 ^{gh}	1.37±0.10 ^{hi}
90	1.78±0.11 ^{kl}	1.23±0.25 ^{gh}	0.88±0.07 ^f	1.09±0.12 ^g
120	1.57±0.92 ^j	0.86±0.02 ^f	0.54±0.03 ^{bcd}	0.90±0.05 ^f
150	1.50±0.78 ^{ij}	0.83±0.09 ^{ef}	0.45±0.05 ^b	0.73±0.03 ^{def}
180	1.37±0.18 ^{hi}	0.56±0.06 ^{bcd}	0.18±0.07 ^a	0.68±0.09 ^{cde}
210	1.30±0.10 ^h	0.49±0.02 ^{bc}	0.16±0.05 ^a	0.57±0.06 ^{bcd}

หมายเหตุ ^{a-l} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ๖ ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อปริมาณน้ำมันของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟ			การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม
	85 W	425 W	850 W	
0	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a
60	0.13±0.01 ^b	0.16±0.00 ^{bc}	0.21±0.00 ^c	0.27±0.02 ^{ghi}
90	0.14±0.00 ^b	0.20±0.00 ^{de}	0.24±0.01 ^f	0.30±0.03 ^{ij}
120	0.17±0.01 ^{cd}	0.24±0.01 ^f	0.27±0.00 ^{gh}	0.33±0.02 ^k
150	0.18±0.02 ^{cd}	0.25±0.00 ^{fg}	0.29±0.01 ^{hi}	0.33±0.02 ^{jk}
180	0.18±0.01 ^{cd}	0.27±0.01 ^{ghi}	0.29±0.02 ^{hi}	0.34±0.01 ^k
210	0.18±0.02 ^{cd}	0.28±0.01 ^{ghi}	0.30±0.02 ⁱ	0.33±0.04 ^k

หมายเหตุ ^{a-k} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข7 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่าแรงเฉาะสูงสุดของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟ			การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม
	85 W	425 W	850 W	
0	19.68±0.37 ^j	19.68±0.37 ^j	19.68±0.37 ^j	19.68±0.37 ^j
60	0.95±0.22 ^a	1.19±0.04 ^{abc}	1.57±0.19 ^{abcd}	1.10±0.08 ^{ab}
90	0.94±0.17 ^a	1.22±0.03 ^{abc}	1.74±0.05 ^{bcde}	1.23±0.04 ^{abc}
120	1.05±0.14 ^{ab}	1.82±0.20 ^{cdef}	2.43±0.46 ^f	1.34±0.08 ^{abc}
150	1.11±0.16 ^{ab}	2.21±0.25 ^{def}	3.23±0.48 ^g	1.64±0.06 ^{abcd}
180	1.18±0.13 ^{abc}	2.46±0.06 ^f	8.96±0.80 ^h	1.76±0.04 ^{bcde}
210	1.22±0.11 ^{abc}	3.44±0.29 ^g	12.13±1.29 ⁱ	2.40±0.16 ^{ef}

หมายเหตุ ^{a-j} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข8 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่า ΔE ของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟ			การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม
	85 W	425 W	850 W	
0	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a
60	7.30±2.08 ^b	8.23±1.29 ^{bc}	11.47±1.14 ^{cdefg}	9.48±2.64 ^{bcde}
90	8.22±0.17 ^{bc}	9.68±1.99 ^{bcde}	13.19±2.12 ^{fgh}	10.41±1.32 ^{bcdef}
120	9.15±0.88 ^{bcd}	10.35±2.53 ^{bcdef}	14.32±1.81 ^{fgi}	11.22±3.03 ^{cdef}
150	9.50±0.94 ^{bcde}	10.14±2.68 ^{bcdef}	16.32±1.56 ^{ij}	11.10±0.87 ^{cdef}
180	9.74±1.86 ^{bcde}	10.68±2.49 ^{cdef}	16.38±1.52 ^{ij}	12.10±0.41 ^{defg}
210	9.79±1.91 ^{bcde}	12.48±1.80 ^{efgh}	18.50±1.51 ^j	15.23±1.76 ^{hi}

หมายเหตุ ^{a-j} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข9 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่า L* ของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟ			การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม
	85 W	425 W	850 W	
0	65.97±1.80 ^f	65.97±1.80 ^f	65.97±1.80 ^f	65.97±1.80 ^f
60	59.28±2.24 ^e	58.40±2.53 ^{cde}	55.24±0.46 ^{abcde}	58.21±2.44 ^{cde}
90	58.47±1.92 ^{cde}	57.16±2.80 ^{cde}	54.08±1.11 ^{abc}	58.18±0.18 ^{cde}
120	57.72±1.56 ^{cde}	57.00±4.08 ^{cde}	53.67±1.50 ^{abcd}	58.25±3.31 ^{cde}
150	57.43±1.44 ^{cde}	58.99±4.63 ^{de}	51.83±0.36 ^{ab}	58.73±1.16 ^{cde}
180	57.05±1.85 ^{cde}	57.97±4.01 ^{cde}	52.05±1.00 ^{ab}	58.43±0.25 ^{cde}
210	57.29±2.13 ^{cde}	57.45±4.83 ^{cde}	50.90±2.19 ^a	55.46±0.33 ^{bcd}

หมายเหตุ ^{a-f} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข10 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่า a^* ของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟ			การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม
	85 W	425 W	850 W	
0	-1.30 ± 0.12^{abcd}	-1.30 ± 0.12^{abcd}	-1.30 ± 0.12^{abcd}	-1.30 ± 0.12^{abcd}
60	-1.79 ± 0.23^a	-1.53 ± 0.48^{abcd}	-1.01 ± 0.09^{abcde}	-1.10 ± 0.75^{abcd}
90	-1.76 ± 0.29^{ab}	-1.37 ± 0.39^{abcd}	-0.20 ± 0.27^{efg}	-1.07 ± 0.02^{abcd}
120	-1.68 ± 0.53^{abc}	-1.01 ± 0.43^{abcde}	0.89 ± 0.34^h	-0.79 ± 0.51^{cdef}
150	-1.66 ± 0.25^{abc}	-1.08 ± 0.56^{abcd}	1.27 ± 0.37^h	-0.76 ± 0.26^{def}
180	-1.38 ± 0.05^{abcd}	-0.89 ± 0.68^{bcdef}	1.59 ± 0.60^h	0.11 ± 0.16^g
210	-1.34 ± 0.37^{abcd}	-0.14 ± 0.76^{fg}	2.68 ± 1.19^i	2.71 ± 0.25^i

หมายเหตุ ^{a-i} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข11 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทอดด้วยวิธีไมโครเวฟกับการทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วมต่อค่า b* ของมันฝรั่ง

เวลาที่ใช้ทอด	การทอดด้วยวิธีไมโครเวฟ			การทอดด้วยวิธีน้ำมันท่วม
	85 W	425 W	850 W	
0	12.64±0.50 ^a	12.64±0.50 ^a	12.64±0.50 ^a	12.64±0.50 ^a
60	15.48±0.09 ^b	15.72±0.90 ^b	16.58±0.23 ^{bcd}	17.69±1.66 ^d
90	15.90±0.24 ^{bc}	16.59±0.20 ^{bcd}	17.94±0.65 ^d	19.41±0.29 ^e
120	16.53±0.27 ^{bcd}	17.42±1.03 ^{cd}	19.59±1.05 ^e	20.30±0.90 ^{ef}
150	16.63±0.93 ^{bcd}	19.56±1.33 ^e	20.36±0.75 ^{ef}	20.98±0.78 ^{ef}
180	16.51±0.66 ^{bcd}	19.50±0.20 ^e	20.71±0.95 ^{ef}	21.88±0.67 ^{fg}
210	17.04±1.38 ^{bcd}	20.91±2.21 ^{ef}	22.53±0.49 ^g	25.37±0.93 ^h

หมายเหตุ ^{a-h} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ตารางผนวกที่ ค1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อปริมาณความชื้นของมันฝรั่ง

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Microwave power level (MW)	2	7.802	3.901	352.601*	0.000
Frying time (FT)	6	12.070	2.012	181.839*	0.000
MW*FT	12	1.744	0.145	13.139*	0.000
Error	42	0.465	0.011		
Total	62	22.080			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อปริมาณน้ำมันของมันฝรั่ง

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Microwave power level (MW)	2	0.066	0.033	274.793*	0.000
Frying time (FT)	6	0.411	0.069	567.217*	0.000
MW*FT	12	0.018	0.002	12.418*	0.000
Error	42	0.004	0.000		
Total	62	0.520			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อค่าแรง
เจาะสูงสุดของน้ำมันฝรั่ง

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Microwave power level (MW)	2	129.476	64.738	382.976*	0.000
Frying time (FT)	6	2364.360	394.060	2331.173*	0.000
MW*FT	12	185.349	15.446	91.374*	0.000
Error	42	7.100	0.169		
Total	62	2686.285			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ทอดต่อ
ค่า ΔE ของน้ำมันฝรั่ง

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Microwave power level (MW)	2	316.062	158.031	57.339*	0.00
Frying time (FT)	6	1119.627	186.605	67.706*	0.00
MW*FT	12	77.755	6.480	2.351*	0.02
Error	42	115.756	2.756		
Total	62	1629.200			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นในมันฝรั่งตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Regression	5	3.922	0.784	47.853*	0.000
Residual	5	0.082	0.016		
Total	10	4.004			

ตารางผนวกที่ ค6 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณความชื้นในมันฝรั่งทอดตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3

Source	Regression coefficient	t-value	Sig.
Constant	2.152	14.979*	0.000
Frying time (FT)	-0.007	-3.979*	0.011
Microwave power level (MW)	-0.001	-2.467	0.057
(FT) ²	1.992E-05	2.663*	0.045
(MW) ²	1.353E-06	2.424	0.060
FT* MW	-7.157E-06	-4.515*	0.006

ตารางผนวกที่ ค7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Regression	5	0.140	0.028	139.976*	0.000
Residual	5	0.001	0.000		
Total	10	0.141			

ตารางผนวกที่ ค8 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งทอดตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3

Source	Regression coefficient	t-value	Sig.
Constant	-0.026	-1.649	0.160
Frying time (FT)	0.003	13.008*	0.000
Microwave power level (MW)	1.735E-04	2.734*	0.041
(FT) ²	-7.845E-06	-9.510*	0.000
(MW) ²	-1.732E-07	-2.813*	0.037
FT* MW	7.286E-07	4.167*	0.009

ตารางผนวกที่ ๙ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงเจาะสูงสุดในน้ำมันฝรั่งตามแผนการทดลองทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Regression	5	105.131	21.026	8.676	0.017
Residual	5	12.118	2.424		
Total	10	117.249			

ตารางผนวกที่ ๑๐ สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายของค่าแรงเจาะสูงสุดในน้ำมันฝรั่ง ทดตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3

Source	Regression coefficient	t-value	Sig.
Constant	1.354	0.775	0.474
Frying time (X_1)	-0.026	-1.238	0.271
Microwave power level (X_2)	-0.006	-0.809	0.455
(X_1) ²	1.099E-04	1.208	0.281
(X_2) ²	4.003E-06	0.590	0.581
$X_1 * X_2$	6.615E-05	3.432	0.019

ตารางผนวกที่ ค11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า ΔE ในมันฝรั่งตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Regression	5	342.880	68.576	20.184*	0.002
Residual	5	16.988	3.398		
Total	10	359.868			

ตารางผนวกที่ ค12 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายค่า ΔE ในมันฝรั่งทอดตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 x 3

Source	Regression coefficient	t-value	Sig.
Constant	0.116	0.056	0.957
Frying time (FT)	0.100	3.949*	0.011
Microwave power level (MW)	0.002	0.261	0.805
(FT) ²	-2.774E-04	-2.576	0.050
(MW) ²	-3.613E-06	-0.450	0.672
FT* MW	4.862E-05	2.130	0.086

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายวราชัย โพธิ์ปรีสุทธิ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 พฤศจิกายน 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	1. Poparisut, W. and S. Songsermpong. 2010. Modeling of Mass Transfer of Water and Oil during Microwave Frying of Frozen Potato Chips. The 6 th Thailand-Taiwan Conference on Food and Agricultural Innovation: Going Global', November, 15, 2010, Bangkok, Thailand. (Oral presentation) 2. วราชัย โพธิ์ปรีสุทธิ์ และ สิริชัย ส่งเสริมพงษ์. 2553. แนวทางการลดน้ำมันในบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปชนิดทอด. สัมมนา U-IRC Research ในโครงการสร้างขีดความสามารถด้านการวิจัยและพัฒนาและการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรม โดยกลไกความร่วมมือระหว่างภาครัฐ เอกชน และมหาวิทยาลัย, 18 มิถุนายน 2553. ปทุมธานี (ภาคบรรยาย)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการสร้างขีดความสามารถด้านการวิจัยและพัฒนา และการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรม โดยกลไกความร่วมมือระหว่างภาครัฐ เอกชน และมหาวิทยาลัย (U-IRC)