

ผลของความชื้น ทรีฮาโลสและพอลิเมอร์ชีวภาพต่อการดูดกลืนน้ำมันในแบบจำลอง



นางสาว ปรียา ถนัดอักษร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0186-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF MOISTURE, TREHALOSE AND BIOPOLYMER ON OIL ABSORPTION IN MODELS



Miss Pariya Thanatuksorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Food Technology
Department of Food Technology

Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2001
ISBN 974-17-0186-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของความชื้น ทรีฮาโลสและพอลิเมอร์ชีวภาพต่อการดูดกลืนน้ำมึนในแบบจำลอง
โดย	นางสาวปรีชา ถนัดอักษร
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. พันธิพา จันทวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ

คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... รองคณบดีฝ่ายบริหาร
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ การเที่ยง) รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. รมนี สงวนดีกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. พันธิพา จันทวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. นินนาท ชินประห์ขันธ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริยา ณ์ดักัษร : ผลของควมซึ้น ทรีฮาโลส และพอลลิเมอร์ชีวภาพต่อการดูดกลืนน้ำมันในแบบจำลอง (EFFECTS OF MOISTURE, TREHALOSE AND BIOPOLYMER ON OIL ABSORPTION IN MODELS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.พนัธิพา จันท์วัฒน์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ, 100 หน้า. ISBN 974-17-0186-1.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของควมซึ้น เวลาทอด เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด การเติมทรีฮาโลสและพอลลิเมอร์ชีวภาพต่อปริมาณการดูดกลืนน้ำมันในแบบจำลอง แบบจำลอง จากแป้งสาลีที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าควมซึ้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 10.36, 8.19, 0.19, 0.46 และ 80.80 ตามลำดับ ในขั้นตอนการวิจัยได้เตรียมแบบจำลองจากแป้งสาลี โดยปรับควมซึ้นเป็นร้อยละ 40, 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนัก ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที และจุ่มตัวอย่างในปิโตรเลียมอีเทอร์ 2 วินาทีทันทีเมื่อนำตัวอย่างออกจาก น้ำมัน พบว่าในแต่ละควมซึ้น เมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันดูดกลืนเพิ่มขึ้น และที่เวลาทอด 7 นาที แบบจำลองควมซึ้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60, 70 และ 80 มีปริมาณน้ำมันดูดกลืนร้อยละโดย น้ำหนักแห้งเป็น 78.35, 65.64, 57.73 และ 18.49 ตามลำดับ และพบว่าอัตราการสูญเสีย ควมซึ้นมีความสัมพันธ์กับอัตราการดูดกลืนน้ำมัน ต่อมาศึกษาผลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด โดยทอดแบบจำลองที่มีควมซึ้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60 และ 80 เป็นเวลา 5 นาที หลังทิ้งให้เย็น หลังทอด 0, 1, 3 และ 6 นาที พบว่าเวลาที่ทิ้งให้เย็นมีผลต่อปริมาณน้ำมันที่ผิวและปริมาณน้ำมัน ดูดกลืน โดยปริมาณน้ำมันที่ผิวลดลง ส่วนปริมาณน้ำมันดูดกลืนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลัง ทอดเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ควมซึ้นของพื้นผิวแบบจำลองด้วยวิธี fractal analysis พบว่า เมื่อปริมาณควมซึ้นเริ่มต้นในแบบจำลองเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ย apparent fractal dimension มีค่า สูงขึ้น และค่าดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณควมซึ้นเริ่มต้นและปริมาณน้ำมันที่ผิวที่ เวลาทิ้งให้เย็นหลังทอด 0 นาที จากการศึกษาผลการเติมทรีฮาโลส ร้อยละ 0, 3 และ 5 โดย น้ำหนักในแบบจำลองที่มีควมซึ้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 และ HPMC ร้อยละ 0, 0.2, 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนัก ในแบบจำลองที่มีควมซึ้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ทอดเป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที พบว่า ทรีฮาโลส และ HPMC ไม่มีผลในการลดการดูดกลืนน้ำมันและมีแนวโน้มที่ปริมาณน้ำมันใน แบบจำลองเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณทรีฮาโลสสูงขึ้น

ภาควิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2001	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4172350723 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD: MODEL / OIL ABSORPTION / FRACTAL / TREHALOSE / HPMC

PARIYA THANATUKSORN : THESIS TITLE (EFFECTS OF MOISTURE, TREHALOSE AND BIOPOLYMER ON OIL ABSORPTION IN MODELS) THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PANTIPA JANTAWAT, Ph.D., THESIS COADVISOR : CHIDPHONG PRADISTSUWANA, Ph.D., 100 pp. ISBN 974-17-0186-1.

The purpose of this study was to investigate the effects of initial moisture content, frying time, cooling time and the addition of trehalose and biopolymer on oil absorption in wheat flour model. Wheat flour used was composed of 10.36% moisture, 8.19% protein, 0.19% fat, 0.46% ash and 80.80% carbohydrate. The flour models were prepared by adjusting the initial moisture content from 40-80% by wet weight and fried at 150°C in palm olein for 1, 3, 5 and 7 min. After the respective frying time, the fried samples were immediately dipped in petroleum ether for 2 sec. It was found that increasing of frying time affected oil content in all moisture level models. At frying time of 7 min, the lower of the initial moisture level resulted in the higher of the oil absorption. The rate of moisture loss was related to the oil absorption rate. The study on effect of cooling time on oil absorption was conducted. The flour models at three levels of initial moisture content, 40, 60 and 80%, were fried at 150°C for 5 min and let cool for 0, 1, 3 and 6 min. It was evident that increasing of cooling time resulted in increasing of absorbed oil. Results on fractal analysis revealed that apparent fractal dimension was related to the initial moisture content of the model and correlated linearly with the initial moisture content and the surface oil, at cooling time of 0 min. Effect of trehalose and HPMC on reduction of the absorbed oil could not be observed.

Department of Food Technology

Student's signature.....

Field of study Food Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2001

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พันธิพา จันทวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ ดร.ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัย ตลอดจนแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ Dr. Toru Suzuki ที่ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัย

กราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.รมณี สงวนดีกุล และ รองศาสตราจารย์ ดร.นินนาท ชินประห์รัฐ ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเถียร ที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนด้านเครื่องมือ

ขอบพระคุณโครงการ OECF ที่สนับสนุนด้านเครื่องมือและสารเคมี

ขอบพระคุณ บริษัท ไอลีน จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุดิบในงานวิจัย

ขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความร่วมมือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณ คุณสุวิทย์ ศรีโมรา และคุณสุภาวดี ดิสโร ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดการวิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่สนับสนุนในด้านกำลังใจ การเงิน และให้ความช่วยเหลือทุกอย่างแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ปรียา ถนัดอักษร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
2 วารสารปริทัศน์	2
3 การทดลอง	23
4 ผลการทดลอง	29
5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	65
6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	78
รายการอ้างอิง	79
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	91
ภาคผนวก ค	92
ภาคผนวก ง	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี	29
4.2 คุณภาพของน้ำมันปาล์มโอเลอิน.....	29
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นของแบบจำลอง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7นาที่.....	31
4.4 ผลของเวลาทอดต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นของแบบจำลองความชื้น เริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที่ เมื่อพิจารณา อิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นและเวลาทอด.....	32
4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละพื้นที่รูพรุนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที่	44
4.6 พื้นที่รูพรุนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที่ เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น	44
4.7 พื้นที่รูพรุนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที่ เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของเวลาทอด	45
4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที่ และเวลาที่ทิ้งให้เย็น หลังทอด 0-6 นาที่	47
4.9 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที่ เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที่ เมื่อพิจารณาเฉพาะ อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น.....	47
4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้น เริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที่ และเวลาที่ทิ้ง ให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที่	49
4.11 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่ อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที่ เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที่ เมื่อพิจารณา เฉพาะอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น.....	49

ตารางที่

หน้า

- 4.12 ปริมาณน้ำมันดุดกิ้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด.....50
- 4.13 ปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที52
- 4.14 ค่าเฉลี่ย apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นต่าง ๆ ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที.....56
- 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำมันดุดกิ้นและความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 โดยเติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที60
- 4.16 ผลของการเติม trehalose ต่อปริมาณน้ำมันดุดกิ้นและความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 ที่เติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของความชื้นเริ่มต้นและเวลาทอด61
- 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยเติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที64
- 4.18 ปริมาณน้ำมันดุดกิ้นและความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยเติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.1 ปริมาณน้ำมันดุดกิ้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที	30
4.2 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที.....	31
4.3 ความสัมพันธ์ของรากที่สองของเวลาทอดและปริมาณความชื้นสูญเสียของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที	33
4.4 ความสัมพันธ์ของรากที่สองของเวลาทอดและปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที	34
4.5 ความสัมพันธ์ของอัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดุดกิ้นน้ำมันของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที	35
4.6 ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)	36
4.7 ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 60 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)	38
4.8 ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 70 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)	40
4.9 ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)	42
4.10 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที	46

4.11 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที	48
4.12 ปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที	51
4.13 ความถี่สะสมของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที	53
4.14 ความถี่สะสมของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 60 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที	54
4.15 ความถี่สะสมของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที	55
4.16 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย apparent fractal dimension กับปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาทีและเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0 นาที	57
4.17 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 ที่เติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที	58
4.18 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 ที่เติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที	59
4.19 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ที่เติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที	62
4.20 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ที่เติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที	63

บทที่ 1

บทนำ

การทอดแบบน้ำมันท่วม (deep-fat frying) เป็นกรรมวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการเตรียมอาหารทั้งระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้เวลาน้อยและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีกลิ่น รส และเนื้อสัมผัสที่มีลักษณะเฉพาะตัวเป็นที่ชื่นชอบของผู้บริโภค การทอดแบบน้ำมันท่วมเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนเนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสารเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยในการถ่ายโอนความร้อน อาหารจะได้รับพลังงานความร้อนจากน้ำมันที่อยู่รอบ ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพได้แก่ การเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ของแป้ง การเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (protein denature) การระเหยของน้ำภายในอาหาร และการสร้างเปลือก (crust formation) ส่วนการถ่ายโอนมวลสารระหว่างการทอดคือ การเคลื่อนที่ของน้ำจากอาหารสู่น้ำมันในรูปไอน้ำและการเคลื่อนที่ของน้ำมันเข้าสู่อาหาร (Singh, 1995) ซึ่งน้ำมันที่ถูกดูดกลืนเข้าสู่อาหารจะช่วยให้อาหารมีกลิ่น รสที่น่ารับประทาน (Moreira, Castell-Perez และ Barrufat, 1999) แต่ในทางกลับกันทำให้อาหารทอดมีปริมาณไขมันสูง และในปัจจุบันผู้บริโภคคำนึงถึงสุขภาพมากขึ้น นอกจากนี้ Food and Drug Administration รายงานว่าการบริโภคอาหารที่มีไขมัน ไขมันอิ่มตัว และโคเลสเตอรอล (cholesterol) ต่ำ จะช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ และโรคที่เกี่ยวข้องกับหลอดเลือดเลี้ยงหัวใจ (coronary heart disease) (Anonymous, 2001) จึงได้มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดกลืนน้ำมันและแนวทางในการลดการดูดกลืนน้ำมันอย่างกว้างขวาง พบว่าสมบัติทางกายภาพบางประการของวัตถุดิบเช่น ความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content) ความพรุนเริ่มต้น (initial porosity) ภาวะที่ใช้ในการทอด ได้แก่ คุณภาพของน้ำมันทอด เวลาและอุณหภูมิทอด และภาวะหลังการทอดมีผลต่อการดูดกลืนน้ำมัน (Moreira และคณะ, 1999) แต่กลไกของปัจจัยแต่ละปัจจัยต่อการดูดกลืนน้ำมันยังสรุปได้ไม่ชัดเจน และโดยที่การเข้าใจในกลไกของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดกลืนน้ำมัน จะช่วยให้สามารถควบคุมปริมาณน้ำมันในอาหารทอดได้ งานวิจัยนี้จึงกำหนดขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษากลไกการดูดกลืนน้ำมันอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากปัจจัยบางประการได้แก่ ความชื้นเริ่มต้น เวลาทอด เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด (cooling time) และการเติมสารเจือปนอาหารได้แก่ trehalose และพอลิเมอร์ชีวภาพ และเพื่อให้สามารถวิเคราะห์กลไกของปัจจัยได้ชัดเจนโดยไม่มีผลแทรกซ้อนจากองค์ประกอบของอาหารจึงใช้แบบจำลอง (model) เฉพาะของคาร์โบไฮเดรตในงานวิจัยนี้

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

การทอดแบบน้ำมันท่วม

การทอดแบบน้ำมันท่วมเป็นหน่วยปฏิบัติการ (unit operation) ที่ใช้ในการเปลี่ยนคุณภาพอาหารให้เหมาะสมสำหรับการใช้บริโภคและนอกจากนั้นยังมีผลในการเก็บถนอม (preservative effect) อาหารโดยการทำลายจุลินทรีย์และเอนไซม์อาหารด้วยความร้อนและการลดลงของ water activity ที่ผิวอาหาร (Fellows, 2000) และเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่นและรสที่ดีเป็นที่ชื่นชอบของผู้บริโภค กระบวนการนี้จึงเป็นวิธีการเตรียมอาหารที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ได้แก่ มันฝรั่งแผ่นทอด french fries ไก่ทอด โดนัท ผลิตภัณฑ์ปลาขึ้นรูปชุบแป้งทอด และขนมขบเคี้ยว เป็นต้น

วัตถุประสงค์หลักของการทอดแบบน้ำมันท่วมคือ การพัฒนาลักษณะสี รสชาติ และกลิ่นซึ่งจะถูกเก็บไว้ในเปลือก (crust) ของอาหารทอด คุณภาพของอาหารทอดขึ้นกับชนิดของน้ำมันทอดและภาวะที่ใช้ในการทอด ตลอดจนคุณภาพของอาหารที่นำมาทอด (Moreira และคณะ, 1999)

ชนิดของน้ำมันทอดและภาวะที่ใช้ในการทอด น้ำมันทอดนอกจากมีบทบาทเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงานความร้อนแล้วยังส่งผลต่อเนื้อสัมผัสและรสชาติของอาหารอีกด้วย น้ำมันที่ใช้ในการทอดอาหารควรมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) และสารประกอบมีขั้ว (polar compounds) ต่ำ และควรมีความเสถียรต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิทอดสูงอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไป อุณหภูมิที่ใช้ทอดอาหารอยู่ในช่วง 150-190°C ขึ้นกับลักษณะที่ต้องการในผลิตภัณฑ์เช่น ถ้าต้องการให้มีลักษณะภายนอกเป็นเปลือกแข็งและภายในมีความชุ่มน้ำ ต้องใช้อุณหภูมิทอดสูงเพื่อให้เกิดการสร้างเปลือกอย่างรวดเร็วพอที่จะช่วยรักษาความชื้นภายใน แต่จะมีข้อจำกัดต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่ภายในชิ้นอาหาร ส่วนอาหารที่ต้องการให้มีลักษณะแห้งควรทอดที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการทอดด้วยอุณหภูมิต่ำส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ของระนาบการระเหย (plane of evaporation) เข้าสู่ภายในอาหารก่อนที่จะเกิดการสร้างเปลือกทำให้ด้านในของผลิตภัณฑ์แห้งก่อนที่ผิวภายนอกของอาหารไหม้เกรียม (Fellows, 2000) Krokida และคณะ (2001a) พบว่า ชนิดของน้ำมันทอดมีผลต่อความกรอบซึ่งวัดด้วยวิธี compression test ของชิ้นมันฝรั่งทอดที่อุณหภูมิ 170°C โดยเมื่อใช้ hydrogenated oil แทนที่น้ำมันเมล็ดฝ้าย (cotton seed oil) จะทำให้ความกรอบของชิ้นมันฝรั่ง

เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก hydrogenated oil เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (solid fat index ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 45.9) และในทางกลับกันอุณหภูมิของน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจะลดความกรอบของชั้นมันฝรั่งลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากการที่อุณหภูมิสูงระหว่างทอด ทำให้เกิดเปลือกอย่างรวดเร็วจึงลดการสูญเสียความชื้นภายในชิ้นตัวอย่าง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีลักษณะกรอบนอกนุ่มใน Krokida และคณะ (2001b) ศึกษาภาวะที่ใช้ในการทอดต่อการเปลี่ยนแปลงสีของ french fries โดยทอดที่ 150, 170 และ 190°C ในน้ำมันเมล็ดฝ้าย hydrogenated cotton seed oil และน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันเมล็ดฝ้ายกับ hydrogenated cotton seed oil พบว่าการทอดที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่อการลดลงของค่าความขาว (L^*) ของตัวอย่างที่เวลาทอดเดียวกัน ส่วนชนิดของน้ำมันไม่มีผลต่อค่าดังกล่าว Sulaeman และคณะ (2001) ศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำมันต่อสีและเนื้อสัมผัสของแผ่นแครอททอด พบว่าอุณหภูมิทอดที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดลงของค่าความขาว, ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) และสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณ α -carotene, β -carotene และปริมาณ carotenoids รวม นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตอดทำให้ความแข็ง (hardness) ของตัวอย่างลดลงเนื่องจากการทอดที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดเปลือกอย่างรวดเร็ว ซึ่งลดการระเหยของน้ำทำให้น้ำสัมผัสของตัวอย่างมีความแข็งน้อยลง

อาหาร สมบัติทางกายภาพของอาหาร เช่น ความพรุนก่อนทอด และองค์ประกอบอาหารมีผลต่อคุณภาพของอาหารทอด ปริมาณน้ำในอาหารมีผลต่อความกรอบของขนมขบเคี้ยว (Katz และ Labuza, 1981) สีของ french fries และมันฝรั่งแผ่นทอดสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาล reduce โดยมันฝรั่งที่มีปริมาณน้ำตาล reduce ต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 0.10) ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีน้ำตาลทองที่เหมาะสม (Moreira และคณะ, 1999) แต่เมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้นปริมาณ น้ำตาล reduce เพิ่มขึ้น สีของผลิตภัณฑ์จะเข้มขึ้น (Lisinska, 1973) Kawas และ Moreira (2001) ศึกษาผลของการเตรียมตัวอย่างก่อนทอดต่อคุณภาพของ tortilla chip โดยเปรียบเทียบเนื้อสัมผัสและระดับการพองตัว (degree of puffiness) ของตัวอย่างที่ทำแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying) และผ่านการนึ่งแล้วอบ (steam-baked tortillas) พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการนึ่งแล้วอบมีระดับการพองตัวสูงกว่า เนื่องจากตัวอย่างที่ผ่านการนึ่งแล้วอบเกิดเจลแบ่งขุ่นหนึ่ง และกลายเป็นเปลือกแข็งเมื่อผ่านการอบ ทำให้น้ำภายในระเหยออกได้ยากระหว่างทอดและแรงดันจากไอน้ำภายในส่งผลให้เกิดการพองตัว ส่วนตัวอย่างที่ทำแห้งแบบเยือกแข็งมีการพองตัวน้อยกว่าเนื่องจากการระเหยของน้ำขณะทำแห้ง ทำให้เกิดโครงสร้างที่ง่ายต่อการระเหยของน้ำระหว่างทอด ส่งผลให้ตัวอย่างพองตัวน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) พบว่า ตัวอย่างที่ทำแห้งแบบเยือกแข็งมีรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมากกระจาย (distribution) อย่างสม่ำเสมอ ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการนึ่งแล้วอบมีรูพรุนขนาดใหญ่เล็กน้อย ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งแบบเยือกแข็งมีความกรอบมากกว่า Nair, Seow และ Sulebele (1996) พบว่า

ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแผ่นเจลแป้งมันสำปะหลังอบแห้งสูงกว่าร้อยละ 15 (โดยน้ำหนักแห้ง) มีการขยายตัว (linear expansion) มากขึ้นที่อุณหภูมิและเวลาทอดเดียวกัน นอกจากนี้การเติมสารเจือปน (additives) บางอย่างเช่น โพรตีนไฮขาว อะไมโลส ช่วยเพิ่มความกรอบในผลิตภัณฑ์ด้วย (Baker และ Scott-Kline, 1988)

ผลของการทอดแบบน้ำมันท่วมต่อคุณภาพของน้ำมัน

การให้ความร้อนสูงอย่างต่อเนื่องแก่น้ำมันขณะทอด ในภาวะที่มีความชื้นและออกซิเจน ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมัน โดยปฏิกิริยาสำคัญที่มีผลชัดเจนได้แก่ hydrolysis, oxidation และ polymerization ระดับความไม่อิ่มตัว (degree of unsaturation) ของกรดไขมันในน้ำมันทอดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อลักษณะการสลายตัว (degradation) ของน้ำมันทอด ซึ่งอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา oxidation เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันในน้ำมันทอด กรด linolenic เป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 3 ตำแหน่ง ซึ่งเกิดปฏิกิริยา oxidation ได้ง่ายกว่ากรด oleic ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมัน canola มีกรด linolenic สูง จึงไม่เหมาะในการนำมาใช้เป็นน้ำมันทอด (Paul และ Mittal, 1997)

Warner และคณะ (1994) ศึกษาผลของชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันทอดต่อคุณภาพและความเสถียรของน้ำมัน โดยทอดตัวอย่างในน้ำมัน canola และน้ำมัน canola ที่ผ่านการดัดแปรด้วยการทำให้กลายพันธุ์ (mutation breeding) ให้มีองค์ประกอบกรดไขมันที่แตกต่างกัน ให้ความร้อนแก่น้ำมันวันละ 9 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 วัน เก็บตัวอย่างวิเคราะห์ทุก 3 ชั่วโมง พบว่าน้ำมัน canola ดัดแปร มีความเสถียรต่อปฏิกิริยา oxidation สูงกว่า และปริมาณสารประกอบมีขี้ขาว และสารประกอบที่ระเหยได้ (volatile compounds) ของน้ำมัน canola ดัดแปรที่มีปริมาณกรด oleic สูง (ร้อยละ 78) มีค่าต่ำที่สุดทุกช่วงเวลา Márquez-Ruiz และ Dobarganes (1996) ศึกษาการสลายตัวจากปฏิกิริยา oxidation ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันดอกทานตะวันที่มีกรด oleic สูง โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 0, 5, 10, 15 และ 20 ชั่วโมง วัดปริมาณสารประกอบมีขี้ขาว กรดไขมันที่มีขี้ขาว (polar fatty acids) และกรดไขมันที่มีสายโซ่สั้น (short-chain fatty acids) ได้แก่ heptanoic (C7:0) และ octanoic (C8:0) ที่เกิดจากการสลายตัวของ hydroperoxides ของกรด oleic และ polyunsaturated acids พบว่าร้อยละของสารประกอบมีขี้ขาว กรดไขมันที่มีขี้ขาว และกรดไขมันสายโซ่สั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทอดนานขึ้น และการเพิ่มขึ้นของสารประกอบเหล่านี้สัมพันธ์กับระดับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันในน้ำมันที่เพิ่มขึ้น Takeoka, Full และ Dao

(1997) ศึกษาความเสถียรต่อความร้อนของน้ำมันทอด โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C และ 204°C วันละ 8 ชั่วโมง (โดยไม่มีตัวอย่างอาหาร) วัดปริมาณสารประกอบมีซีว และ dimeric กับ polymeric triglycerides (DPTG) ในน้ำมันชนิดต่าง ๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 204°C อัตราการสร้างสารประกอบมีซีว และ DPTG ของน้ำมันเมล็ดฝ้ายสูงที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิ 190°C น้ำมันข้าวโพดมีสารประกอบมีซีวและ DPTG สูงสุด ซึ่งจากการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันทั้ง 2 ชนิด พบว่ามีปริมาณกรด linoleic สูง (มากกว่าร้อยละ 54) ผู้วิจัยสรุปว่า น้ำมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่า มีความเสถียรต่อการเสื่อมคุณภาพจากความร้อนมากกว่า Holownia และคณะ (2000) พบว่า การเคลือบขึ้นตัวอย่างด้วย hydroxypropyl methyl cellulose ช่วยลดการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันทอด เนื่องจากฟิล์มที่เคลือบช่วยลดอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา hydrolysis จากตัวอย่างไปสู่น้ำมัน

ผลของการทอดแบบน้ำมันท่วมต่อผลิตภัณฑ์

การทอดแบบน้ำมันท่วมอาจกล่าวได้ว่าเป็นกระบวนการทำแห้งโดยการสัมผัสกับน้ำมันร้อน จนมีผลทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสารพร้อมกัน การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 แบบ คือการนำความร้อน (conduction) และการพาความร้อน (convection) โดยการนำความร้อนเป็นการถ่ายโอนพลังงานภายในชิ้นอาหาร ขณะที่กระบวนการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อนเกิดขึ้นระหว่างอาหารกับน้ำมันที่อยู่รอบ ๆ การถ่ายโอนความร้อนจาก น้ำมันไปสู่อาหารนี้ทำให้สารอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ เช่น แป้งเกิดเจล โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ น้ำในอาหารระเหยและเกิดการสร้างเปลือกที่ผิวภายนอกอาหาร ส่วนการถ่ายโอนมวลขณะทอดเกิดเมื่อน้ำในอาหารเคลื่อนย้ายออกสู่น้ำมันในรูปไอน้ำ และน้ำมันเคลื่อนย้ายเข้าแทนที่ในช่องว่างที่น้ำระเหยออก (Singh, 1995)

การเปลี่ยนแปลงของอาหารขณะทอดแบบน้ำมันท่วมมี 4 ขั้นตอนคือ การถ่ายโอนความร้อนขึ้น การถ่ายโอนน้ำมัน การสร้างเปลือก และการสุกของเนื้ออาหารด้านใน (Paul และ Mittal, 1997)

การถ่ายโอนความร้อน เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการทอด ทันทีที่อาหารสัมผัสกับน้ำมันร้อน จะมีการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำมันที่อยู่รอบ ๆ สู่วิวอาหาร ส่งผลให้น้ำที่อยู่บริเวณผิวด้านนอกระเหย การลดลงของความชื้นที่ผิวภายนอกทำให้น้ำภายในชิ้นอาหารเคลื่อนมาอยู่ที่ผิว น้ำที่แพร่มาอยู่ที่ผิวเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากน้ำมันจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำ ทำให้อาหารมีอุณหภูมิ

ประมาณ 100°C และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะป้องกันไม่ให้น้ำมันเคลื่อนย้ายเข้าไปในอาหารในระยะนี้ ดังนั้นอาหารจึงไม่เกิดภาวะไหม้เกรียม (Blumenthal, 1991)

การถ่ายโอนน้ำมัน หลังจากที่ยื่นอาหารสูญเสียความชื้นไปร้อยละ 60 น้ำมันทอดจะเริ่มเคลื่อนเข้าไปในชั้นอาหารโดยผ่านรูเล็ก (capillaries) ที่น้ำระเหยออก (Paul และ Mittal, 1997) ซึ่งอัตราเร็วของน้ำมันที่เข้าสู่อาหารขึ้นกับความหนืดและแรงตึงผิว (surface tension) ของน้ำมัน โดยการลดลงของแรงตึงผิวและความหนืดส่งผลให้อัตราการดูดกลืนน้ำมันในรูเล็กเพิ่มขึ้น (Hiçsasmaz และ Clayton, 1995)

การเกิดเปลือก การเกิดเปลือกเป็นลักษณะเฉพาะที่ทำให้อาหารทอดเป็นที่ชื่นชอบของผู้บริโภค เกิดเมื่อพลังงานจากน้ำมันทอดทำให้น้ำบริเวณผิวอาหารระเหยออกและพลังงานบางส่วนผลักดันให้น้ำเคลื่อนออกจากรูเล็กที่บริเวณใต้ผิวอาหาร การสูญเสียความชื้นนี้ส่งผลให้เกิดการสร้างเปลือกที่มีรูพรุนจำนวนมาก และทำให้อาหารมีพื้นที่ผิวมากขึ้น (Moreira และคณะ, 1999) จากนั้นน้ำมันทอดเริ่มแพร่เข้าไปในอาหารทางรูเล็กของเปลือก สีน้ำตาลทองของเปลือกเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) ซึ่งเวลาและอุณหภูมิทอดร่วมกับองค์ประกอบทางเคมีของอาหารมีอิทธิพลต่อการเกิดสีน้ำตาลมากกว่าชนิดของน้ำมันทอด การเกิดเปลือกสังเกตเห็นได้ใน 3-6 นาทีหลังจากเริ่มทอด (Paul และ Mittal, 1997) และน้ำมันที่ถูกดูดกลืนส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนเปลือกและผิวนอกของอาหาร (Saguy และ Pinthus, 1995)

การสุกของอาหาร เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการทอด โดยความชื้นภายในอาหารลดลงและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเช่น การเกิดเจลของแป้ง การเสียสภาพโปรตีนด้านในชั้นอาหาร ความหนาของเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Singh, 1995) และอาหารส่วนใหญ่สุกได้จากกระบวนการนำความร้อนจากผิวภายนอกสู่เนื้อในมากกว่าที่จะเป็นการถ่ายโอนพลังงานความร้อนจาก น้ำมันที่เคลื่อนย้ายเข้าสู่อาหาร (Paul และ Mittal, 1997)

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดกลืนน้ำมันในอาหารทอด

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันที่อาหารดูดกลืนระหว่างการทอด ได้แก่ คุณภาพและองค์ประกอบของน้ำมัน อุณหภูมิและเวลาทอด ความชื้นในอาหาร องค์ประกอบของอาหาร การเตรียมอาหารก่อนทอด การเคลือบผิวอาหาร แรงตึงระหว่างหน้า (interfacial tension) ของอาหารกับน้ำมันทอด ความพรุน เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด และพื้นที่ผิวและความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวอาหาร (Saguy และ Pinthus, 1995)

คุณภาพและองค์ประกอบของน้ำมัน น้ำมันเป็นของผสม (mixture) ของ triglycerides ประมาณร้อยละ 96-99 ขณะที่น้ำมันได้รับความร้อนสูงในภาวะที่มีอากาศและความชื้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สารประกอบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของไขมันได้แก่ สารประกอบที่ระเหยได้ สารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง polymer ที่มีอัตราการระเหยปานกลางถึงต่ำ กรดอินทรีย์ชนิด dimers และ polymers กับ dimeric glycerides และ polymeric glycerides และกรดไขมันอิสระ (Nawar, 1985)

สารประกอบที่ระเหยได้ เป็นสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยา oxidation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนและอุณหภูมิสูง การเกิดปฏิกิริยา oxidation ของน้ำมันเกิดโดยผ่านกลไกการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) โดยมีแสงและโลหะเป็นตัวเร่งการเกิดอนุมูลอิสระ ผลผลิตตั้งต้นของปฏิกิริยา oxidation คือ hydroperoxides ซึ่งเป็นสารไม่มีกลิ่นและไม่เสถียร ที่จะสลายตัวทันทีที่เกิดขึ้น โดยการสลายตัวของ hydroperoxides เกิดขึ้นหลายขั้นตอนและเป็นผลให้ได้สารหลายชนิด สารประกอบที่ระเหยได้ที่เกิดขึ้นได้แก่ สารประเภท aldehydes, ketones, hydrocarbons, lactones, alcohols, กรด และ esters (Nawar, 1985) สารประเภทนี้บางส่วนระเหยไปขณะทอด ส่วนที่เหลือในน้ำมันทำให้เกิดกลิ่นหืนในน้ำมันและอาหารทอด (Paul และ Mittal, 1997)

สารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง polymer ที่มีอัตราการระเหยปานกลางถึงต่ำ เช่น กรด hydroxy และกรด epoxy เป็นต้น เป็นสารที่เกิดจากการสลายตัวของ hydroperoxides ที่เกิดจากปฏิกิริยา oxidation สลายตัวต่อไปเป็น aldehyde radical และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบดังกล่าว (Nawar, 1985) สารกลุ่มนี้มีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวของน้ำมัน (Blumenthal, 1991) ซึ่งมีผลในการเพิ่มอัตราการดูดกลืนน้ำมันระหว่างใช้ทอด

กรดอินทรีย์ชนิด dimers และ polymers กับ dimeric glycerides และ polymeric glycerides สารประกอบเหล่านี้เกิดจากการรวมตัว (combination) กันของอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยา oxidation และปฏิกิริยาสลายตัวจากความร้อน (thermal decomposition) การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ทำให้เกิดสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่งผลให้ความหนืดของน้ำมันเพิ่มขึ้น (Nawar, 1985)

กรดไขมันอิสระ เป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยา hydrolysis ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นระหว่างการทอดเมื่อมีความชื้นจากอาหารและพลังงานความร้อน ทำให้เกิดการแตกตัวของ triglycerides เป็นกรดไขมันอิสระ, monoglycerides, diglycerides และ glycerol ซึ่งกรดไขมันอิสระส่งผลให้อุณหภูมิเกิดควัน (smoke point) ของน้ำมันลดลงและเกิดกลิ่นหืน (hydrolytic rancidity) ใน

น้ำมันและไขมันบางชนิด ส่วน monoglycerides, diglycerides และ glycerol ส่งผลให้อุณหภูมิเกิดควั่นลดลง และลดแรงตึงระหว่างหน้าของอาหารกับน้ำมัน (Varvil, 1983)

สารลดแรงตึงผิวที่เกิดจากปฏิกิริยา hydrolysis และ oxidation ของน้ำมันทอดจะเพิ่มการสัมผัสกันระหว่างอาหารกับน้ำมัน ทำให้อาหารมีการดูดกลืนน้ำมันมากขึ้น และการสัมผัสกันระหว่างอาหารกับน้ำมันทอดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนไปสู่อาหารมีมากขึ้นทำให้ผิวของอาหารแห้งและมีสีคล้ำ อย่างไรก็ตามน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการทอดจะมีสารลดแรงตึงผิวน้อยมาก (Blumenthal, 1991)

อุณหภูมิและเวลาทอด Moreira และคณะ (1995) พบว่าการดูดกลืนน้ำมันของ tortilla chip ทอดที่อุณหภูมิ 190°C เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทอดนานขึ้น การดูดกลืนน้ำมันส่วนใหญ่เกิดขึ้นหลังทอด 15 วินาที Gamble, Rice และ Selman (1987a) ศึกษาการทอดมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 145, 165 และ 185°C นาน 0-5 นาที โดยเพิ่มช่วงละ 30 วินาที พบว่าปริมาณน้ำมันที่ดูดกลืนไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทอดและการดูดกลืนน้ำมันมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรากที่สองของเวลาทอด Bouchon และคณะ (2001) ศึกษาการดูดกลืนน้ำมันของมันฝรั่งทอดที่ 155 และ 185°C เป็นเวลา 1 และ 3 นาที พบว่า ในช่วงแรกของการทอดอุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณน้ำมันในตัวอย่าง เนื่องจากในช่วงแรกของการทอดทั้ง 2 อุณหภูมิ การเกิดเปลือกยังไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้อุณหภูมิทอดไม่มีผลต่อการแพร่ของน้ำมันเข้าภายในตัวอย่าง Pravisani และ Calvelo (1986) รายงานว่าในช่วง $155-200^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิภายในกึ่งกลางตัวอย่างไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำมันเนื่องจากการระเหยของน้ำขณะทอดทำให้อาหารมีอุณหภูมิประมาณ 100°C Sulaeman และคณะ (2001) พบว่า อุณหภูมิทอดในช่วง $165-185^{\circ}\text{C}$ ไม่มีผลต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืนในแผ่นแครอท ทอด เนื่องจากการระเหยของน้ำภายในตัวอย่างซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นจะป้องกันไม่ให้น้ำมันเคลือบเข้าไปในอาหาร

ความชื้นของอาหาร Gamble และคณะ (1987a) กล่าวว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นของอาหารมีผลต่อการดูดกลืนน้ำมัน โดยน้ำมันจะเข้าไปแทนที่น้ำในอาหารที่ระเหยขณะทอด และพบว่าทั้งการสูญเสียความชื้นและการดูดกลืนน้ำมันโดยขึ้นอาหารเป็นสัดส่วนตรงกับ รากที่สองของเวลาทอด Mohamed, Hamid, และ Hamid (1998) ศึกษาผลของความชื้นต่อการดูดกลืนน้ำมันของแบบจำลองแป้งชุบทอด โดยเติมน้ำในแป้งชุบทอด 1.50, 1.75, 2, 2.25, 2.50, 2.75 และ 3 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมของแป้งข้าวเจ้า พบว่าปริมาณน้ำมากกว่า 2 กิโลกรัมให้แป้งชุบทอดที่ดูดกลืนน้ำมันมากขึ้น ผู้วิจัยกล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำทำให้แป้งชุบทอดมีความหนืดลดลงและความชื้นระเหยออกไปได้มากขณะทอด ทำให้มีความพรุนสูงขึ้น และส่งผลให้แบบจำลองดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้น Gamble Rice

และ Selman (1987b) ศึกษาการกระจายของน้ำมันในมันฝรั่งแผ่นทอดและรายงานว่าการดูดกลืนน้ำมันเกี่ยวข้องกับกาสูญเสียความชื้นในอาหารขณะทอด โดยน้ำมันจะแพร่เข้าแทนที่ความชื้นส่วนที่ระเหยออกไปได้ง่าย ดังนั้นการเติมสารที่ช่วยรักษาความชื้นในอาหารเช่น เซลลูโลส ซึ่งมีผลช่วยลดการดูดกลืนน้ำมันและการสูญเสียความชื้นขณะทอด (Ang, 1993)

องค์ประกอบของอาหาร อาหารที่มีไขมันสูงไม่ดูดกลืนน้ำมันขณะทอด ในทางกลับกันไขมันในอาหารจะถูกปลดปล่อยออกจากเนื้อเยื่อและเคลื่อนย้ายเข้าสู่ไขมัน (Paul และ Mittal, 1997) Makinson และคณะ (1987) ศึกษาลักษณะการดูดกลืนน้ำมันของอาหารจากเนื้อเยื่อพืชและสัตว์ พบว่าเนื้อเยื่อจากสัตว์มีไขมันมากกว่าจึงดูดกลืนน้ำมันน้อยกว่าเนื้อเยื่อพืชประมาณ $\frac{1}{4}$ เท่า Hagenimana, Karuri และ Oyunga (1998) พบว่าปริมาณน้ำมันของแผ่นมันเทศทอดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับองค์ประกอบแห้ง (dry matter) ในมันเทศสด โดยเมื่อองค์ประกอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำมันในตัวอย่างลดลง

การเตรียมอาหารก่อนทอด การทำให้อาหารมีความชื้นลดลงก่อนทอดช่วยลดการดูดกลืนน้ำมันได้ Gamble และ Rice (1987) รายงานว่าการทำแห้งแผ่นมันฝรั่งด้วยลมร้อน และด้วยพลังงาน microwave มีผลให้การดูดกลืนน้ำมันระหว่างทอดลดลงแต่การทำแห้งแบบเยือกแข็ง ทำให้อาหารดูดกลืนน้ำมันมากขึ้น และการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าแผ่นมันฝรั่งประกอบด้วยโครงข่ายของเซลล์ที่มีแบ่งอยู่ภายใน และจากการคำนวณปริมาณน้ำมันหลังทอดพบว่าน้ำมันจะเข้าไปแทนที่ปริมาตรของช่องว่างในผลิตภัณฑ์ ซึ่งการทำแห้งด้วยพลังงาน microwave ทำให้แบ่งเกิดเจลและพองตัวบรรจุเต็มพื้นที่ของเซลล์ และเจลที่เกิดขึ้นยังช่วยลดอัตราการแพร่ของน้ำมันเข้าสู่อาหาร ส่วนการทำแห้งแบบลมร้อนทำให้แบ่งบางส่วนเกิดเจล มีผลให้น้ำมันเข้าไปแทนที่ช่องว่างในแผ่นมันฝรั่งได้น้อยลง ขณะที่การทำแห้งแบบเยือกแข็ง แบ่งไม่เกิดเจล น้ำมันจึงเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในได้เต็มปริมาตร ทำให้มีการดูดกลืนน้ำมันสูง

การเคลือบผิวอาหาร เป็นวิธียับยั้งการดูดกลืนน้ำมันขณะทอด โดยทั่วไปแบ่งชุบทอดและเกล็ดขนมปังมีอิทธิพลต่อการดูดกลืนน้ำมันของผลิตภัณฑ์ชุบทอด Makinson และคณะ (1987) พบว่าปลาชิ้นรูปที่เคลือบด้วยแป้งชุบทอดดูดกลืนน้ำมันน้อยกว่าปลาชิ้นรูปที่ไม่ได้เคลือบ ผู้วิจัยอธิบายว่าแป้งชุบทอดยับยั้งการดูดกลืนน้ำมันได้ จากการเกิดเปลือกแข็งที่มีผลในการชะลอหรือยับยั้งการเสียความชื้นและการแพร่ของน้ำมัน ส่วนการชุบด้วยเกล็ดขนมปังไม่มีผลในการลดการดูดกลืนน้ำมันเนื่องจากเกล็ดขนมปังเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของอาหารกับน้ำมัน นอกจากนี้การเคลือบผิวอาหารด้วยสาร hydrocolloids สามารถกั้นการแพร่ของน้ำมัน สารกลุ่มนี้ที่มีผลในการลดการดูดกลืน

น้ำมันได้แก่ gellan gum, methyl cellulose, hydroxypropyl methyl cellulose และ amylose (Nisperos-Carriedo, 1994)

แรงดึงระหว่างหน้าของอาหารกับน้ำมัน จากทฤษฎีสารลดแรงดึงผิว

(surfactant theory) ของ Blumenthal (1991) กล่าวว่า ในช่วงแรกของการทอด น้ำภายในอาหารจะเคลื่อนมาที่ผิวโดยการแพร่และออกสู่ภายนอกในรูปของไอน้ำผ่านทางรูเล็กและรูเปิดที่ผิวน้ำมันจะเคลื่อนย้ายเข้าสู่อาหารโดย capillary action ซึ่งแรงนี้ขึ้นกับความหนืดและแรงดึงผิวของน้ำมัน อย่างไรก็ตามการเคลื่อนย้ายของน้ำมันเข้าสู่อาหารเกิดไม่ถาวรเนื่องจากน้ำและน้ำมันไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในช่วงแรกของการทอด แรงดึงระหว่างหน้าของอาหารกับน้ำมันมีค่าสูงการดูดกลืนน้ำมันเข้าผลิตภัณฑ์เกิดได้น้อย แต่เมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้นแรงดังกล่าวนี้ลดต่ำลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณของสารลดแรงดึงผิวที่เกิดจากการสลายของน้ำมัน และเมื่อน้ำมันสลายตัวมากขึ้น สารลดแรงดึงผิวเกิดมากขึ้น เป็นเหตุให้การสัมผัสระหว่างอาหารกับน้ำมันเกิดได้ดี ทำให้มีการดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้น Pinthus และ Saguy (1994) ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของเคมีพื้นผิว (surface chemistry) ในการพัฒนาสมการสำหรับคำนวณค่าแรงดึงระหว่างหน้าเริ่มต้น (ก่อนทอด) ระหว่างชั้นมันฝรั่งขึ้นรูปกับน้ำมันที่ใช้ทอด จากแรงดึงผิวของน้ำมันและมุมสัมผัส (contact angle) ที่ภาวะสมดุล (θ_0) ก่อนทอด พบว่าแรงดึงระหว่างหน้าเริ่มต้นที่มีค่าสูงเป็นผลให้การดูดกลืนน้ำมันเกิดได้น้อย การเติมสารบางอย่างที่เพิ่มความชอบน้ำแก่ผิวหน้าอาหารทำให้แรงดึงระหว่างหน้าของอาหารกับน้ำมันเพิ่มขึ้นและช่วยลดการดูดกลืนน้ำมัน

ความพรุน คือส่วนปริมาตรของอากาศหรือช่องว่างในเนื้ออาหารซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการดูดกลืนน้ำมัน ในอาหารส่วนใหญ่จะมีรูพรุนอยู่ส่วนหนึ่งแล้วตามธรรมชาติและนอกจากนั้นยังมีรูพรุนที่เกิดขึ้นระหว่างทอดด้วย Moreira และคณะ (1995) พบว่าความพรุนของ tortilla chip เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้น เนื่องจากขณะทอดตัวอย่างมีการขยายตัวจากการระเหยของไอน้ำทำให้ความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) ของตัวอย่างลดลง ส่งผลให้ตัวอย่างมีความพรุนเพิ่มขึ้น และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นหลังจากทอด 5-15 วินาที Pinthus, Weinberg และ Saguy (1995) ศึกษาผลของความพรุนเริ่มต้น (ก่อนทอด) และการเปลี่ยนแปลงความพรุนขณะทอดที่มีต่อการดูดกลืนน้ำมันในมันฝรั่งขึ้นรูป พบว่าความพรุนเริ่มต้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการดูดกลืนน้ำมันและเมื่อเวลาในการทอดเพิ่มขึ้นความพรุนเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยได้สรุปว่า ความพรุนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดกลืนน้ำมัน จากผลการทดลองสรุปได้ 2 แนวทางคือ ความพรุนเริ่มต้นสัมพันธ์กับการดูดกลืนน้ำมันในลักษณะเชิงเส้น หรือทั้งความพรุนและการดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้นขณะทอดและมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของรูพรุนทำให้การ

ดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้นและขณะเดียวกันผู้วิจัยให้ความเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของการดูดกลืนน้ำมันน่าที่จะเป็นผลให้ความพรุนในตัวอย่างลดลง อย่างไรก็ตามกลไกความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนน้ำมันและความพรุนยังสรุปได้ไม่ชัดเจน

เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดจะเริ่มทันทีหลังนำอาหารออกจากเครื่องทอด Moreira, Sun และ Chen (1997) พบว่า tortilla chip ดูดกลืนน้ำมันขณะทอด ร้อยละ 20 ของปริมาณน้ำมันทั้งหมด ในขณะที่อีกร้อยละ 80 จะอยู่บนผิวของตัวอย่าง และพบว่าร้อยละ 64 ของปริมาณน้ำมันที่ผิวจะถูกดูด (suck) เข้าภายในชิ้นอาหารขณะทิ้งให้เย็น Aguilera และ Gloria-Hernandez (2000) ศึกษาผลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นต่อปริมาณน้ำมันในส่วนเปลือกของมันฝรั่งแช่เยือกแข็งที่ผ่านการทอดถึงสุก (frozen partial fried potatoes) โดยใช้ น้ำมันทอดอุณหภูมิ 180°C ทอดนาน 150 วินาที แล้วศึกษาเวลาที่ทิ้งให้เย็นตั้งแต่ 0-120 วินาที โดยเมื่อถึงเวลาที่ทิ้งให้เย็นที่กำหนดจะนำตัวอย่างใส่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำมันมะพร้าวอุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 5 วินาที ซึ่งผู้วิจัยตั้งสมมติฐานไว้ว่าเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นนานขึ้น น้ำมันทอดจะเข้าไปในเปลือกได้มากขึ้นและยับยั้งน้ำมันมะพร้าวที่ผ่านเข้าสู่เปลือกของอาหาร จากการทดลองพบว่าปริมาณของน้ำมันทอดที่อยู่ในเปลือกของมันฝรั่งภายหลังจากแช่น้ำมันมะพร้าวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.3 เป็นร้อยละ 12.8 เมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นเป็น 0 และ 20 วินาที ตามลำดับ และเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นมากกว่า 20 วินาที ปริมาณน้ำมันทอดในเปลือกจะค่อนข้างคงที่ และตัวอย่างที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดเป็นเวลา 0-10 วินาที ปริมาณน้ำมันทอดส่วนใหญ่จะถูกแทนที่ด้วยน้ำมันมะพร้าว และเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นมากกว่า 60 วินาที น้ำมันทอดบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยน้ำมันมะพร้าว ผู้วิจัยอธิบายว่าเมื่อนำตัวอย่างออกจากน้ำมันทอด ตัวอย่างจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำมันและน้ำภายในยังอยู่ในรูปไอน้ำเมื่ออุณหภูมิลดลงไอน้ำเกิดการควบแน่น ทำให้เกิดสุญญากาศภายในอาหาร ส่งผลให้อาหารดูดน้ำมันที่ผิวเข้าภายในเนื้อ

พื้นที่ผิวและความขรุขระของพื้นผิวอาหาร เนื่องจากการดูดกลืนน้ำมันเป็นปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวอาหาร ดังนั้นพื้นที่ผิวและความขรุขระของผิวจึงมีผลต่อการดูดกลืนน้ำมัน Gamble และ Rice (1988) พบว่าการดูดกลืนน้ำมันสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของแผ่นมันฝรั่ง โดยปริมาตรน้ำมันดูดกลืนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น Rubnov และ Saguy (1997) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของผิว (โดยการเติมน้ำตาลฟรุกโทสที่ระดับต่าง ๆ) ต่อการดูดกลืนน้ำมันในมันฝรั่งขึ้นรูป และวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวด้วยวิธี fractal analysis ซึ่งค่าที่แสดงความขรุขระคือ apparent fractal dimension ผู้วิจัยพบว่าความขรุขระของพื้นผิวสัมพันธ์กับการเติมน้ำตาลฟรุกโทส โดยเมื่อปริมาณน้ำตาลฟรุกโทสเพิ่มขึ้น ค่า apparent fractal dimension ลดลง นั่นคือความขรุขระของผิวมันฝรั่งขึ้นรูปลดลง ส่งผลให้การดูดกลืนน้ำมันลดลงด้วยเนื่องจากน้ำตาลฟรุกโทส

มีผลในการเร่งการเกิดเปลือก ซึ่งเปลือกที่เกิดเร็วจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของผิวจากการระเหยของน้ำ ความขรุขระจึงลดลง

สารลดการดูดกลืนน้ำมัน

คาร์โบไฮเดรตและโปรตีนบางชนิดที่มีความชอบน้ำและมีความสามารถในการเกิดฟิล์มที่ลดการดูดกลืนน้ำมันในอาหารทอดได้ โดยอาจนำมาเคลือบที่ผิวอาหาร ผสมในแป้งชุบทอด ผสมในผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป (restructured products) และผสมในส่วนผสมของขนมปังที่นำมาใช้ใน ผลิตภัณฑ์ชุบทอด พอลิเมอร์ชีวภาพที่มีการนำมาใช้ลดการดูดกลืนน้ำมัน ได้แก่ แป้ง เซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส สาร hydrocolloids และโปรตีนที่มีความชอบน้ำ นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลโมเลกุลคู่ เช่น trehalose

แป้ง มีองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ amylose และ amylopectin ซึ่ง amylose มีโครงสร้างเป็นสายตรงของกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 glucosidic โดยจำนวนของกลูโคสมีตั้งแต่ 200-3,000 โมเลกุล ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดและแหล่งของแป้ง amylopectin มีโครงสร้างที่ซับซ้อน โดยมีทั้งส่วนที่เป็นสายตรงและส่วนที่เป็นกิ่งก้านต่อกับโครงสร้างที่เป็นสายตรงด้วยพันธะ α -1,6 glucosidic โดยทั่วไปแป้งจะมี amylose ร้อยละ 18-30 ยกเว้น waxy corn starch ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น amylopectin ซึ่ง amylose ในแป้งสามารถเกิดฟิล์มได้และให้เจลที่มีความแข็งแรงจึงสามารถนำมาใช้ลดการดูดกลืนน้ำมันในอาหารทอดได้ (Kester และ Fennema, 1986)

Shih และ Daigle (1999) ศึกษาภาวะการดูดกลืนน้ำมันของแป้งชุบทอดที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า (rice flour) และแป้งสาลี พบว่าแป้งชุบทอดจากแป้งข้าวเจ้าดูดกลืนน้ำมันน้อยกว่าและจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้ง แป้งข้าวเจ้ามี amylose สูงกว่าแป้งสาลี Mohamed และคณะ (1998) แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวเหนียวปริมาณ 0-500 กรัมในแป้งข้าวเจ้า 1 กิโลกรัม พบว่าแป้งชุบทอดข้าวเจ้าดูดกลืนน้ำมันน้อยกว่าและให้ความกรอบมากกว่าตัวอย่างที่แทนที่ด้วยแป้งข้าวเหนียว เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามี amylose สูงกว่าซึ่งสามารถเพิ่มอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสาย polysaccharides เป็นผลให้การดูดกลืนน้ำมันลดลงและความกรอบของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ แป้งดัดแปร (modified starch) มีผลต่อการดูดกลืนน้ำมันในอาหารทอดด้วยโดย phosphorylated starch esters ลดการดูดกลืนน้ำมันในแป้งชุบทอดได้ เนื่องจากมีลักษณะเป็นสารให้ความข้นเหนียวและเกิดฟิล์มได้ดี (Shih และ Daigle, 1999) แต่ pregelatinized rice flour และ cross-link modified tapioca starch ในแป้งชุบทอดมีผลในการเพิ่มการดูดกลืนน้ำมัน เนื่องจากการแทนที่ด้วย

pregelatinized rice flour ทำให้ปริมาณ amylose ในตัวอย่างลดลง ส่วนการแทนที่ด้วย cross-link modified tapioca starch เนื่องจากแป้งชนิดนี้ต้องการพลังงานสูงมากในการทำลายพันธะ cross-link จึงไม่เกิดเจลขณะทอด ทำให้มีปริมาณ amylose ลดลงเช่นกัน จึงส่งผลให้การดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้น (Mohamed และคณะ, 1998)

เซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของผนัง

เซลล์ของพืช มีพันธะ β -1,4 glucosidic เชื่อมต่อกลูโคสเป็นสายตรงยาว ไม่ละลายน้ำเนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุลเป็นผลให้เกิดการรวมกันของสายเซลลูโลส (Sanderson, 1981) ถึงแม้เซลลูโลสจะไม่ละลายน้ำแต่สามารถดูดน้ำได้ 3.5-10 เท่า ขึ้นกับความยาวของสายโซ่ (Ang, 1991) Ang (1993) ใช้เซลลูโลสผงดความยาว 35-290 μm ผสมในแป้งชุบทอด พบว่าเฉพาะตัวอย่างที่ผสมเซลลูโลสผงดที่มีความยาวมากกว่า 100 μm เท่านั้นที่ดูดกลืนน้ำมันน้อยลงเนื่องจากจับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่า ทำให้มีปริมาณของพันธะไฮโดรเจนมากขึ้นจึงดูดกลืน น้ำมันน้อยลง การเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของเซลลูโลสทำได้โดยทำปฏิกิริยากับ chloroacetic acid, methyl chloride หรือ propylene oxide ในภาวะที่เป็นต่างจะได้ carboxy methyl cellulose (CMC), methyl cellulose (MC) และ hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระดับของการแทนที่ของหมู่ methoxyl, hydroxypropyl และ carboxymethyl มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมี อาทิ สมบัติการอุ้มน้ำ อุณหภูมิการละลาย (dissolution temperature) และสมบัติการเกิดเจล (Nisperos-Carriedo, 1994) CMC ละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและเย็น ใช้เป็นสารป้องกันโปรตีนเปลี่ยนแปลงสภาพในขณะแช่เยือกแข็ง (cryoprotectant) ในปลาบดและในขณะเดียวกันช่วยลดการดูดกลืนน้ำมันได้เมื่อนำปลาบดมาขึ้นรูปและทอด (Da Ponte, Roozen และ Pilnik 1987) MC และ HPMC สามารถเกิดเจล (gel) เมื่อได้รับความร้อนและกลับสู่สภาพเดิมเมื่อเย็นลง เจลที่เกิดขึ้นขณะได้รับความร้อนสามารถยับยั้งการสูญเสียความชื้นขณะทอดและกั้นการผ่านของน้ำมัน Pinthus, Weinberg และ Saguy (1993) แทนที่ส่วนผสมแห้งของ falafell balls ด้วยเซลลูโลสผงดร้อยละ 2 และ HPMC ร้อยละ 1 เมื่อนำไปทอดและวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน พบว่าตัวอย่างที่เติมเซลลูโลสผงดและ HPMC ดูดกลืนน้ำมันลดลง และ HPMC มีประสิทธิภาพในการลดการดูดกลืนน้ำมันสูงกว่าเซลลูโลสผงด เนื่องจาก HPMC เกิดเจลที่กั้นการเคลื่อนย้ายของน้ำมันระหว่างทอด ส่วนเซลลูโลสผงดไม่สามารถเกิดเจลแต่สามารถจับน้ำได้ดี จึงอาจจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความพรุนและความขรุขระของผิวได้ Balasubramaniam และคณะ (1997) ศึกษาประสิทธิภาพของ HPMC เมื่อนำมาเคลือบลูกชิ้นไก่เมื่อนำไปทอดและวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและน้ำมัน พบว่าฟิล์ม HPMC ช่วยลดการสูญเสียและการดูดกลืนน้ำมันได้ Huse และคณะ (1998) พบว่าปริมาณน้ำมันรวมของ akara ที่เคลือบด้วย HPMC

ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบ ซึ่งสำหรับเหตุผลเช่นเดียวกับการใช้ HPMC เดิมในผลิตภัณฑ์

สาร hydrocolloids pectin และ alginate เป็น hydrocolloids ที่นำมาใช้ลดการดูดกลืนน้ำมันเนื่องจากมีโครงสร้างที่มีความชอบน้ำและเกิดเจลได้เมื่อมี calcium ion Khalil (1999) เคลือบ french fries ด้วย pectin หรือ sodium alginate โดยเคลือบด้วยสารละลาย calcium chloride (CaCl_2) ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 ก่อน แล้วเคลือบด้วยสารละลาย pectin หรือสารละลาย sodium alginate ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 เมื่อนำไปทอดและวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน พบว่า french fries ที่เคลือบด้วย pectin หรือ alginate เมื่อมี CaCl_2 ลดการดูดกลืนน้ำมันได้ร้อยละ 6-40 เนื่องจากการเคลือบด้วย pectin/ CaCl_2 หรือ sodium alginate/ CaCl_2 เกิดเครือข่ายพันธะข้าม (cross linked network) ที่แข็งแรง ซึ่งช่วยประสานผนังเซลล์และหุ้มผิวภายนอกจึงป้องกันการแพร่เข้ามาของน้ำมัน

โปรตีน ลดการดูดกลืนน้ำมันได้โดยขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบ เนื่องจากกรดอะมิโนมีทั้งชนิดชอบและไม่ชอบน้ำ โปรตีนที่มีกรดอะมิโนที่มีความชอบน้ำมากกว่าลดการดูดกลืนน้ำมันได้ดีกว่า Mohamed, Lajis และ Hamid (1995) ศึกษาผลของโปรตีนจาก ไข่ขาว ไข่แดง หางนม (skimed milk powder) ข้าวสาลี (gluten) whey และถั่วเหลืองต่อการดูดกลืนน้ำมัน และสีของแป้งชุบทอดและโดนัทโดยในโดนัทใช้โปรตีนเหล่านี้ทดแทนโปรตีนที่มีอยู่ในสูตรมาตรฐาน ร้อยละ 50 และ 100 และทดแทนในแป้งชุบทอดร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8, 10, และ 15 พบว่าโดนัทที่แทนที่ด้วยโปรตีนไข่ขาว โปรตีนถั่วเหลืองและหางนมร้อยละ 100 ในสูตรมาตรฐาน มีการดูดกลืนน้ำมันน้อยลง ในแป้งชุบทอดที่ทดแทนด้วยโปรตีนไข่ขาวร้อยละ 2 มีการดูดกลืนน้ำมันลดลงและความกรอบเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่ทดแทนด้วยโปรตีนจากแป้งสาลี หางนม และ whey ไม่ดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้นมากนัก แต่โปรตีนไข่แดงให้การดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากโปรตีนในไข่แดงส่วนใหญ่อยู่ในรูป lipoprotein และ phosphoprotein ซึ่งสามารถลดแรงดึงดูดระหว่างหน้าของน้ำกับน้ำมัน ทำให้มีการดูดกลืนน้ำมันมากขึ้น ส่วนโปรตีนในไข่ขาวคือ ovalbumin มีความชอบน้ำจึงลดการดูดกลืนน้ำมัน Mohamed และคณะ (1998) ใช้โปรตีนจากไข่ขาว ไข่แดง หางนม ข้าวสาลี และ whey เดิมในแบบจำลองของแป้งชุบทอดที่ทำด้วยแป้งข้าวเจ้าในปริมาณ 0, 20, 40, 60 และ 80 กรัมต่อแป้งข้าวเจ้า 1 กิโลกรัม พบว่าแป้งชุบทอดที่เติมไข่ขาว 20 กรัม ดูดกลืนน้ำมันน้อยที่สุด เพราะโปรตีนไข่ขาวชอบน้ำจึงช่วยลดการดูดกลืนน้ำมัน นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับการเกิดเจลเมื่อได้รับความร้อนและความสามารถในการเกิดฟิล์มของสารอื่นที่ไม่ใช่โปรตีนในแบบจำลองด้วย

trehalose เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุล เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α 1- α 1 glucosidic มีผลทำให้ trehalose ไม่มีหมู่รีดิวซ์ (non-reducing group) มีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ ย่อยได้ด้วยเอนไซม์ trehalase ที่มีอยู่ในระบบย่อยอาหารของคน ไม่มีรสหวานและไม่เปลี่ยนแปลงรสชาติของอาหาร มีคุณสมบัติที่ช่วยรักษาโมเลกุลชีวภาพรวมทั้งโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก (เช่น วิตามิน) ระหว่างการทำแห้ง ทำให้อาหารแห้งที่เติม trehalose มีคุณภาพดี คั้นตัวได้ง่ายเมื่อเติมน้ำ ให้ลักษณะไม่แตกต่างจากก่อนทำแห้ง และช่วยรักษากลิ่นของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ trehalose ยังยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล O'Brien (1996) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในแบบจำลองของกลูโคส ซูโครสและ trehalose เมื่อมี lysine ที่ความเป็นกรดต่าง 2.5 และ water activity 0.33 ทำแห้งแบบเยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 90°C พบว่าค่าคงตัวอัตราเร็วของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของซูโครสสูงกว่า trehalose 200-2,000 เท่า นอกจากนี้สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของน้ำตาลตัวอื่นเมื่อมีโปรตีนในระบบ สำหรับกลไกระดับโมเลกุลในการป้องกันโมเลกุลชีวภาพและโมเลกุลขนาดเล็กนั้นยังไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่พบทำให้มีการเสนอทฤษฎี 3 ทฤษฎี ได้แก่ water replacement, glass transformation และ chemical stability (Colaço และ Roser, 1994)

ทฤษฎี water replacement กล่าวว่า โดยทั่วไปความเสถียรของรูปร่าง 3 มิติของโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecules) ในสารละลายขึ้นกับโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบ โดยน้ำเกิดพันธะไฮโดรเจนกับผิวของโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งจากหลักฐานบางอย่างพบว่า โมเลกุลน้ำตาลมีความสามารถในการให้ความเสถียรแก่โมเลกุลขนาดใหญ่จากการแทนน้ำที่อยู่บริเวณผิวโครงสร้างของโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ โดยสันนิษฐานว่า น้ำตาลมีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจน แต่ trehalose แตกต่างจากน้ำตาลโมเลกุลคู่อื่น ๆ คือไม่มีพันธะไฮโดรเจนภายนอกโดยตรง พันธะภายนอกทั้ง 4 พันธะเกิดจากโมเลกุลของน้ำ 2 โมเลกุล ที่อยู่ในโครงสร้าง dihydrate การจัดเรียงตัวเช่นนี้ทำให้โมเลกุลมีความคล่องตัวมากกว่าพันธะของน้ำตาลโมเลกุลคู่อื่น ๆ และปรับตัวเข้ากับผิวที่ไม่สม่ำเสมอของโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดีกว่าน้ำตาลโมเลกุลคู่ชนิดอื่นที่มีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงสูงระหว่างวงแหวน (Murray และ Liang, 1999)

ทฤษฎี glass transformation อธิบายว่าน้ำตาลมีความสามารถในการเป็นของแข็งในลักษณะ glass มากกว่าเกิดผลึก จากหลักฐานงานวิจัยจำนวนมากรายงานว่า การเกิด glass transition เป็นสิ่งที่ต้องการในการป้องกันรักษาโมเลกุลชีวภาพ trehalose เมื่ออยู่ในภาวะ glass transition จะมีความไวต่อความชื้น (hygroscopic) ต่ำกว่า sucrose ดังนั้นเมื่อมีความชื้นสูง sucrose ที่อยู่ในภาวะ glass transition จะดูดซับน้ำไว้ที่ผิวและค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นผลึกเนื่องจากภาวะ

ผลึกมีความเสถียรมากกว่า ส่วน trehalose ที่อยู่ใน glass transition ยังคงมีความเสถียร ซึ่งภาวะนี้สามารถป้องกันการสูญเสีย esters ที่ระเหยได้ที่มีขนาดเล็กและมีความไม่ชอบน้ำขณะทำแห้งและเก็บรักษา จึงทำให้อาหารแห้งที่เติม trehalose ปลอดภัยกลับออกมาเมื่อเติมน้ำเท่านั้น (Colaço และ Roser, 1994)

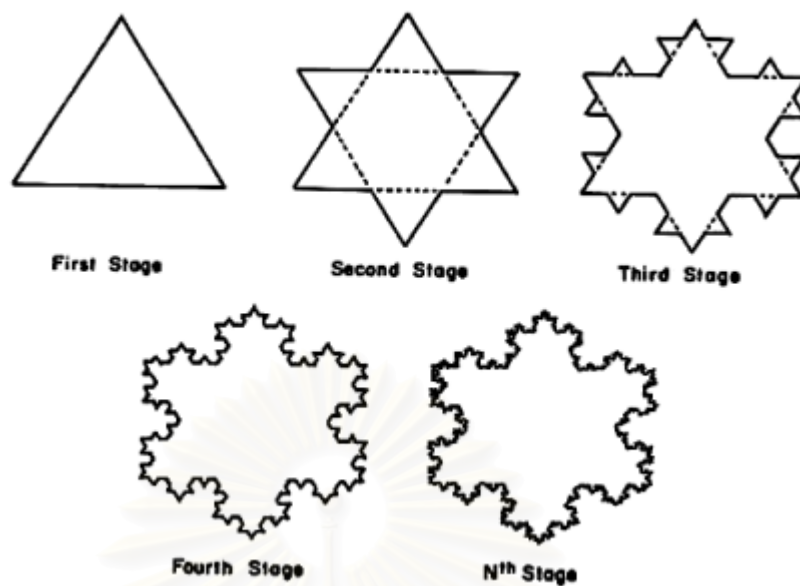
ทฤษฎี chemical stability กล่าวว่า trehalose เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่มีความเสถียรสูง เนื่องจากพันธะระหว่างกลูโคส เกิดขึ้นที่ C-1 กับ C-1 ส่งผลให้เป็นน้ำตาลที่ไม่มีหมู่ reduce และพันธะ glucosidic มีค่าคงตัวอัตราเร็วของปฏิกิริยา hydrolysis ต่ำ ($K_0 = 119 \text{ sec}^{-1}$) ทำให้มีโครงสร้างเสถียรต่อการถูก hydrolyzed ในภาวะที่มีความเป็นกรดต่ำ จึงไม่เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลกับโปรตีนหรือเปปไทด์

Fractal analysis

Fractals เป็นหลักการที่คิดค้นขึ้นโดย Benoit B. Mandelbrot (Takayasu, 1990) เพื่อใช้ในการอธิบายระบบที่มีความซับซ้อนตามธรรมชาติ คำว่า fractal เป็นคำที่ดัดแปลงมาจากภาษา ละติน 'fractus' ซึ่งหมายถึง สถานะที่ขึ้นส่วนที่แตกหักมารวมกันอย่างไม่สม่ำเสมอ

โดยทั่วไปในเรขาคณิตดั้งเดิม จุด (point) มีมิติ (dimension) เป็น 0 เส้นตรง (line) มีมิติเป็น 1 พื้นที่ (area) มีมิติเป็น 2 และปริมาตร (volume) มีมิติเป็น 3 แต่ในธรรมชาติรูปทรงบางอย่างอาจมีความไม่สม่ำเสมอหรือมีบางส่วนไม่ติดต่อกันซึ่งไม่สามารถใช้เรขาคณิตในการกำหนดมิติของรูปทรงในธรรมชาติเหล่านี้ได้ ดังนั้นจึงนำหลักการ fractal analysis มาใช้ในการกำหนดมิติของรูปทรง โดยสำหรับพื้นผิวของวัตถุที่มีความซับซ้อนหมายถึง พื้นผิวมีความสูงต่ำ หรือมีความเบี่ยงเบนไปจากระนาบไปสู่อัตราความสูงต่ำของพื้นผิว ทำให้พื้นผิวที่มีความซับซ้อนมีมิติอยู่ระหว่าง 2-3 ส่วนเส้นรอบรูปของพื้นผิวที่มีความซับซ้อนหรือเส้นรอบรูปของภาพเงา (silhouette) ของวัตถุที่มีความซับซ้อนนั้น มิติของเส้นรอบรูปที่ได้จะเบี่ยงเบนไปจาก 1 อยู่ระหว่าง 1-2 ซึ่งมิติที่ไม่เป็นจำนวนเต็มเรียกว่า fractal dimension (Peleg, 1993)

ตามหลักการของ fractal analysis โครงสร้างของวัตถุที่มีความเป็น fractal แท้จริง (true fractal) จะต้องมีความเป็น scale-invariance หรือ self-similarity หมายถึงว่า วัตถุหรือส่วนของวัตถุมีโครงสร้างที่เหมือนหรือคล้ายกันที่กำลังขยายใด ๆ ตัวอย่างของวัตถุที่มีความเป็น fractal แท้จริง เช่น Koch curve (Kaye, 1989) ซึ่งเป็นรูปร่างพื้นฐานที่สร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ (ดังแสดงในรูปด้านล่าง) จะพบว่าส่วนของ Koch curve มีรูปร่างที่เหมือนกันทุก ๆ กำลังขยาย



ส่วนตัวอย่างในธรรมชาติที่มีความเป็น fractal แท้จริง ได้แก่ การแตกกิ่งของ broccoli (ดังแสดงในรูปด้านล่าง) (Peleg, 1993)



อย่างไรก็ตามวัตถุในธรรมชาติส่วนใหญ่ไม่มีลักษณะความคล้ายในตัวเอง (self-similarity) แต่เนื่องจากเมื่อนำบางส่วนของขอบเขตของวัตถุมาพิจารณาพบว่าจะมีความคล้ายกับส่วนอื่น ๆ ของวัตถุที่มาจากตำแหน่งที่ต่างกัน ดังนั้น Mandelbrot จึงถือว่ารูปร่างในธรรมชาติมีความคล้ายในตัวเองทางสถิติ (statistically self-similarity) และค่า fractal dimension ที่ได้จากรูปร่างหรือวัตถุที่มีความคล้ายในตัวเองทางสถิติ เรียกว่า apparent fractal dimension หรือ natural fractal dimension (Kaye, 1989)

ปัจจุบันได้มีการนำหลักการของ fractal analysis ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั้งทางฟิสิกส์ ชีววิทยา เคมี และปฐพีวิทยา (earth science) สำหรับทางอาหารได้มีการวิจัยที่เริ่มนำหลักการไปประยุกต์ใช้โดย Peleg และ Normand (1985) ได้นำ fractal analysis มาใช้ในการหาความขรุขระของกาแฟผงสำเร็จรูปที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาดรู 0.595-1.70 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการสร้าง Richardson's plot เพื่อนำค่า natural fractal dimension มาใช้เป็นดัชนีบ่งบอกรูปร่าง โดยนำกาแฟผงสำเร็จรูปขยายด้วย SEM แล้วสังเกตภาพถ่ายจาก SEM พบว่า กาแฟผงที่ร่อนผ่านตะแกรงรูเล็กมีพื้นที่ผิวขรุขระน้อยกว่ากาแฟผงที่ร่อนผ่านตะแกรงรูใหญ่ เมื่อพิจารณาค่า natural fractal dimension ผลที่ได้สอดคล้องกับการสังเกตจากภาพถ่ายโดยกาแฟผงที่ร่อนผ่านตะแกรงรูเล็กมีค่า natural fractal dimension ต่ำกว่า ซึ่งผู้วิจัยสรุปว่าสามารถใช้ Richardson's plot ในการทำ natural fractal analysis เพื่อบอกความขรุขระของอนุภาคได้ Nagai และ Yano (1990) ใช้ fractal analysis ด้วยวิธี gas adsorption ประเมินพื้นที่ผิวของสสารธรรมชาติและสสารที่เป็นเจลผสมกับแอลกอฮอล์ร้อยละ 99 ซึ่งการเติมแอลกอฮอล์ระหว่างการเกิดเจล ทำให้สสารที่มีความพรุนมากขึ้น ผู้วิจัยพบว่าพื้นที่ผิวของสสารธรรมชาติมี natural fractal dimension น้อยกว่า สสารที่ผ่านการเกิดเจลผสมกับแอลกอฮอล์ การเพิ่มขึ้นของ natural fractal dimension แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของรูพรุนเล็ก ภายในอนุภาคของสสาร Rubnov และ Saguy (1997) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของผิว (โดยการเติมน้ำตาลฟรุกโทสที่ระดับต่าง ๆ) ต่อการดูดกลืนน้ำมันในมันฝรั่งขึ้นรูป และวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวด้วยวิธี fractal analysis ด้วยวิธีการสร้าง Richardson's plot ผู้วิจัยพบว่าความขรุขระของพื้นผิวสัมพันธ์กับการเติมน้ำตาลฟรุกโทส โดยเมื่อปริมาณน้ำตาลฟรุกโทสเพิ่มขึ้น ค่า apparent fractal dimension ลดลง Barrett และคณะ (1992) นำ fractal analysis ด้วยวิธีการสร้าง Richardson's plot มาใช้เป็นเครื่องมือในการแปลค่า (interpretation) ความกรอบ (crunchiness) ของขนมขบเคี้ยวจากเส้นขรุขระที่ได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นความเครียด (stress-strain relationship) นอกจากนี้ยังมีการนำหลักการนี้ไปใช้ในการบ่งบอกความแตกต่างของพื้นผิวอาหารบางชนิดเช่น ความเรียบหรือมีรูพรุนของพื้นผิวชอคโกแลตกับขนมปังได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Pedreschi และ Aguilera, 2000)

การหาค่า fractal dimension ทำได้หลายรูปแบบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ ได้แก่ changing coarse-graining level, using the fractal measure relations, using the correlation, using the distribution function และ using the power spectrum (Takayasu, 1990) แต่เนื่องจากวิธี changing coarse-graining level เป็นวิธีที่ง่ายและผู้วิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ จึงขอกล่าวถึงเฉพาะวิธีนี้เท่านั้น

changing coarse-graining level เป็นการประมาณค่า fractal dimension ของวัตถุที่มีความซับซ้อนด้วยรูปเรขาคณิตพื้นฐานเช่น วงกลม ส่วนของเส้นตรง สี่เหลี่ยม เป็นต้น ซึ่งการหาค่า fractal dimension ประเภทนี้ทำได้หลายวิธีได้แก่ gas adsorption, Richardson's plot และ box-counting method

Gas adsorption เป็นวิธีการประเมินโครงสร้างของพื้นผิวที่มีความขรุขระ โดยอาศัยการดูดซับก๊าซที่มีขนาดโมเลกุลต่าง ๆ กัน ในลักษณะการจัดเรียงตัวชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวนั้น ๆ (ดังแสดงในรูปด้านล่าง, Rahman, 1995)



ซึ่งวิธีนี้นิยมใช้ในการประเมินพื้นผิวของวัตถุที่มีรูพรุน โดย fractal dimension ของพื้นผิวหาได้จาก

	$n_m \propto r^{-D}$
เนื่องจาก	$r \propto \sigma^{1/2}$
ดังนั้น	$n_m \propto \sigma^{-D/2}$
โดย	n_m เป็นจำนวนโมเลกุลที่มากที่สุดที่จัดเรียงตัวชั้นเดียวบนพื้นผิวหน่วย โมลต่อกรัม
	r เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล
	σ เป็นพื้นที่หน้าตัดของโมเลกุล
	D เป็นค่า fractal dimension ของพื้นผิว

Richardson's plot Richardson เส้นการสร้างรูปหลายเหลี่ยมบนเส้นขอบเขตที่มี
ความขรุขระ (ดังแสดงด้านล่าง, Kaye, 1989)



ซึ่งความยาวของด้านของรูปหลายเหลี่ยมเรียกว่า stride length วัดความยาวรอบรูปของรูปหลายเหลี่ยมที่สร้างบนเส้นขอบเขตที่มีความยาวของเส้น stride length แตกต่างกัน รูปหลายเหลี่ยมที่สร้างจาก stride length ที่มีความยาวมากจะมีจำนวนด้านน้อยกว่ารูปหลายเหลี่ยมที่สร้างจาก stride length ที่มีความยาวน้อย (Rahman, 1995) ความยาวของเส้นรอบรูปหลายเหลี่ยมที่สร้างบนเส้นขอบเขตคำนวณจาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$p = Nx + \gamma$$

โดย	p	เป็นความยาวรอบรูป
	N	เป็นจำนวนของ stride length
	x	เป็นความยาวของ stride length
	γ	เป็นความยาวของส่วนที่เหลือ

ทำให้อยู่ในรูปไม่มีมิติ (dimensionless) โดยหารด้วยส่วนที่ยาวที่สุดของรูป ซึ่งเรียกว่า Feret's diameter จะได้

$$P = N\lambda + \gamma/L$$

โดย	P	เป็นเส้นรอบรูปที่หารด้วย Feret's diameter (normalized perimeter)
	λ	เป็น stride length ที่หารด้วย Feret's diameter (normalized stride length)
	L	เป็น Feret's diameter

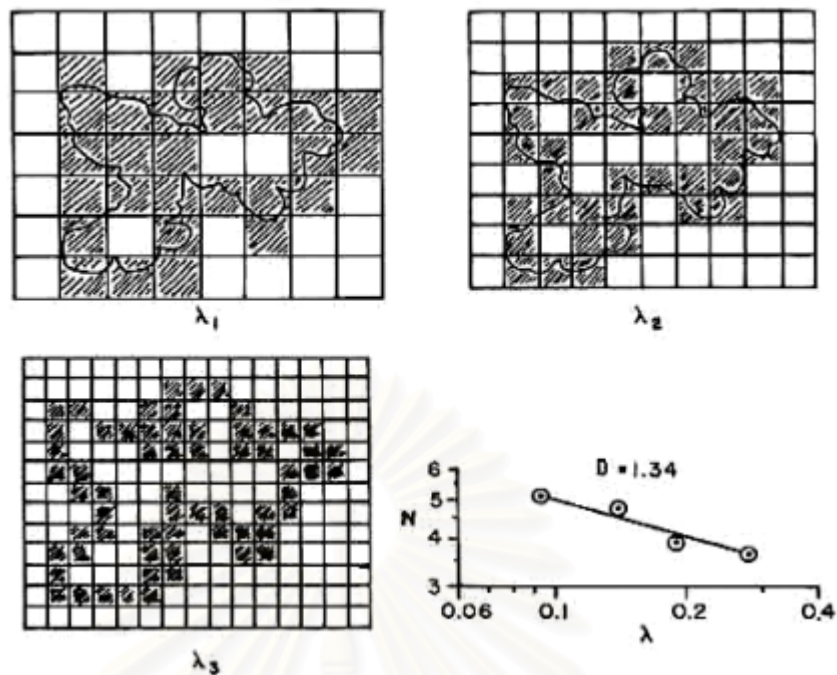
เขียนกราฟระหว่าง P กับ λ ใน log-log scale จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็น s และสามารถหา fractal dimension ได้จาก

$$D = 1-s$$

โดย D เป็น fractal dimension

Box-counting method เป็นวิธีการหนึ่งในการเปลี่ยนขอบเขตของเส้นขอบเขตที่มีความขรุขระด้วยช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส (grid) ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธี Richardson's plot โดยการสร้างชุดของช่องตารางบนเส้นขอบเขตที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปด้านล่าง (Kaye, 1989)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ความยาวรอบรูปของเส้นขอบเขตจะแทนด้วยจำนวนช่องตารางที่ครอบคลุมเส้นขอบเขต ซึ่งจำนวนช่องที่ครอบคลุมเส้นขอบเขตและขนาดของช่องตารางมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$N(r) \propto \lambda^{-D}$$

โดย $N(r)$ เป็นจำนวนช่องสี่เหลี่ยมที่ครอบคลุมเส้นขอบเขต

λ เป็นขนาดความกว้างของช่องตาราง

D เป็นค่า fractal dimension

เขียนกราฟระหว่างจำนวนช่องที่ครอบคลุมเส้นขอบเขตกับความกว้างของช่องตาราง ใน log-log scale จะได้กราฟเส้นตรงโดยความชันของกราฟคือ ค่า fractal dimension (Kaye, 1989)

Peleg (1997) ใช้ fractal analysis ในการประเมินเส้นขรุขระใด ๆ ด้วยวิธี Richardson's plot และ box-counting พบว่าค่า apparent fractal dimension ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีเป็นค่าที่ถูกต้องและเชื่อถือได้ และสามารถสลับสับเปลี่ยนใช้ทั้ง 2 วิธีในการประเมินความขรุขระได้

บทที่ 3

การทดลอง

วัตถุดิบ

แป้งสาลี ตราพัดโบก (บริษัท ยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด มหาชน)
น้ำมันปาล์มโอเลอิน ตราโกลีน (บริษัท โกลีน จำกัด)

สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

Sulfuric acid	(A.R.)
Copper sulphate	(A.R.)
Potassium sulphate	(A.R.)
Sodium hydroxide	(A.R.)
Boric acid	(A.R.)
Methyl red	(A.R.)
Methylene blue	(A.R.)
Petroleum ether	(A.R.)
Ethyl alcohol	(A.R.)
Phenolphthalein	(A.R.)

สารเคมีที่ใช้ในการตรึงรูปตัวอย่าง

พาราฟิน (บริษัท ซิมบอลส์ เซอร์วิส จำกัด)

สารเคมีที่ใช้ลดการดูดกลืนน้ำมัน

hydroxypropyl methyl cellulose (Aldrich Chemical), methoxy ร้อยละ 29, ระดับการแทนที่ด้วย methoxy 1.7-1.9, propylene ร้อยละ 7 ระดับการแทนที่ด้วย propylene oxide 0.1-0.2, ความหนืด (สารละลายความเข้มข้นร้อยละ 2 ในน้ำที่ 20°C) 4,000 cPs
trehalose (บริษัท ฮายาชิบาระ จำกัด)

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมและทอดแบบจำลอง

เครื่องผสมอาหาร (Kenwood, A9070)

เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Sartorius, BP3100S)

เครื่องทอดไฟฟ้ากึ่งลิทระบบดิจิทัล (Yamato, Thermo-mate BF600) ควบคุม

อุณหภูมิ $\pm 2^{\circ}\text{C}$

นาฬิกาจับเวลา (Alba, SW01-X002)

เครื่องวัดอุณหภูมิระบบดิจิทัล (FLUKE, 51)

เครื่องรีดปะหมี่ (ATLAS, 150 mm-DELUXE)

พิมพ์ตัดสแตนเลสกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร

พิมพ์สแตนเลสกลมเคลือบเทฟลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร

อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

เครื่องวัดความเหนียว (Brookfield Engineering Laboratory, USA, DV2 Version

3.2)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

(J.E.O.L, JSM-5410LV)

microtomes (ERMA, ERMA-300)

กล้องจุลทรรศน์ระบบดิจิทัล (Intel Play, QX3 plus)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป PC_Image Workshop (Foster Findlay, VGA

24)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Fractal (Fractal3)

อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

ตู้อบช่วงอุณหภูมิ 50-250 $^{\circ}\text{C}$ (WTB binder, E-53)

เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius, A200S)

ชุดวิเคราะห์โปรตีน (Kjeldatherm and Vadopest I, Gerhardt, KT 85)

ชุดวิเคราะห์ไขมัน (Gerhardt Soxtherm Automatic, S166)

เตาเผา (Isotemp, FT01/138)

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบ

3.1.1 วิเคราะห์คุณภาพแป้งสาลี

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า ตามวิธีของ AOAC (1995) วิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ซ้ำ (วิธีวิเคราะห์แสดงไว้ในภาคผนวก ก)

3.1.2 วิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอด

วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพคือ ค่าความหนืดของน้ำมันปาล์มโอเลอิน (Brookfield viscometer) วิธีวัดแสดงในภาคผนวก ก และคุณภาพทางเคมีคือ ปริมาณกรด ไขมันอิสระ ตามวิธีของ AOAC (1995)

3.2 เตรียมแบบจำลองก่อนทอด

ผสมแป้งสาลีกับน้ำกลั่นในเครื่องผสมอาหาร Kenwood ที่ความเร็วรอบระดับต่ำ โดยใช้หัวตีรูปตัวเค เป็นเวลา 15 นาที แปรปริมาณความชื้นเริ่มต้นเป็นร้อยละ 40, 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักเปียก สำหรับตัวอย่างความชื้นร้อยละ 40 มีลักษณะเป็นโด (dough) พักโดไว้ 10 นาที นำมารีดเป็นแผ่นหนา 0.8 เซนติเมตร ตัดเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร น้ำหนัก 3.00 ± 0.05 กรัม ส่วนแบบจำลองความชื้นร้อยละ 60, 70 และ 80 มีลักษณะเป็นของเหลว (batter) ชั่งน้ำหนักน้ำแป้ง 4.50 ± 0.05 , 6.00 ± 0.05 และ 9.00 ± 0.05 กรัม ตามลำดับ ใส่พิมพ์กลมเคลือบด้วยเทฟลอน โดยแบบจำลองแต่ละความชื้นมี น้ำหนักแป้งแห้งเท่ากัน

3.3 ศึกษาผลของเวลาทอด

ทอดแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60, 70 และ 80 ในน้ำมันปาล์มโอเลอิน อุณหภูมิ 150 ± 2 °C เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที ทิ้งที่ที่นำออกจากน้ำมันจุ่มตัวอย่างในบีกเกอร์ที่มีปิโตรเลียมอีเทอร์ปริมาตร 100 ml เป็นเวลา 2 วินาที เพื่อกำจัดน้ำมันที่ผิว ประเมินคุณภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้

3.3.1 ปริมาณความชื้น ตัดตัวอย่างให้มีขนาด 0.5×0.5 cm ชั่งน้ำหนัก 3 g ใส่ในภาชนะอลูมิเนียมที่บุด้วยกระดาษกรองซึ่งอบแห้งและชั่งน้ำหนักไว้แล้ว นำตัวอย่างเข้าอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณความชื้นจาก

$$\text{ร้อยละความชื้น (โดยน้ำหนักแห้ง)} = \frac{(\text{น้ำหนักก่อนอบ (g)} - \text{น้ำหนักหลังอบ (g)}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (g) ที่สกัดน้ำมันดูดกสิ้นแล้ว}}$$

ตามข้อ 3.3.2

3.3.2 ปริมาณน้ำมันดูดกสิ้น นำตัวอย่างอบแห้งจากข้อ 3.3.1 สกัดไขมันตามวิธีของ AOAC (1995) คำนวณปริมาณน้ำมันดูดกสิ้นจาก

$$\text{ร้อยละน้ำมันดูดกสิ้น (โดยน้ำหนักแห้ง)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (g) ที่สกัดน้ำมันดูดกสิ้นแล้ว}}$$

วางแผนการทดลองแบบ Symmetric Factorial 4^2 ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (Cochran และ Cox, 1985)

3.3.3 หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียความชื้นกับอัตราการดูดกสิ้น น้ำมัน อัตราการสูญเสียความชื้นคือ ปริมาณน้ำที่สูญเสียเมื่อเวลาเปลี่ยนไป 1 นาทีและอัตราการดูดกสิ้นน้ำมันคือ ปริมาณน้ำมันที่ดูดกสิ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป 1 นาที

3.3.4 โครงสร้างแบบจำลอง นำตัวอย่างทำแห้งที่อุณหภูมิห้องโดยวางตัวอย่างไว้ใน desiccator ที่บรรจุ silica gel เป็นเวลา 7 วัน ฉาบทองและส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 150 เท่า แล้ววัดพื้นที่รูพรุนจากภาพถ่ายของตัวอย่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป PC_image (Barrett และ Ross, 1990) (ขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นที่รูพรุนแสดงไว้ในภาคผนวก ข) คำนวณร้อยละพื้นที่รูพรุนจาก

$$\text{ร้อยละพื้นที่รูพรุน} = \frac{\text{พื้นที่รูพรุน } (\mu\text{m}^2) \times 100}{\text{พื้นที่ทั้งหมด } (\mu\text{m}^2)}$$

วางแผนการทดลองแบบ Symmetric Factorial 4^2 ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (Cochran และ Cox, 1985)

3.4 ศักยภาพผลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด

ทอดแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60 และ 80 ในน้ำมันปาล์มโอเลอิน อุณหภูมิ 150 ± 2 °C เป็นเวลา 5 นาที นำตัวอย่างออกจากน้ำมันแล้วตั้งทิ้งให้เย็นเป็นเวลา 0, 1, 3 และ 6 นาที จากนั้นจุ่มตัวอย่างในปิโตรเลียมอีเทอร์ปริมาตร 100 ml ที่บรรจุใน ปีกเกอร์ที่ ทราบน้ำหนักแน่นอนเป็นเวลา 2 วินาที (Southern และคณะ, 2000) แล้วยกขึ้นและนำมาประเมิน คุณภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้

3.4.1 ปริมาณน้ำมันที่ผิว ดัดแปลงจากวิธีของ Moreira และคณะ (1999) โดยระเหย ปิโตรเลียมอีเทอร์ในปีกเกอร์ที่จุ่มตัวอย่างหลังทอดนำปีกเกอร์ที่มีน้ำมันเหลืออยู่ไปอบในตู้อบ อุณหภูมิ 105 °C จนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณน้ำมันที่ ผิวจาก

$$\text{ร้อยละน้ำมันที่ผิว (โดยน้ำหนักแห้ง)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันในปีกเกอร์ (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (g) ที่สกัดน้ำมันดูดกลั่นแล้ว}}$$

3.4.2 ปริมาณความชื้น เช่นเดียวกับข้อ 3.3.1

3.4.3 ปริมาณน้ำมันดูดกลั่น เช่นเดียวกับข้อ 3.3.2

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial 3×4 ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทาง สถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (Cochran และ Cox, 1985)

3.4.4 apparent fractal dimension ด้วยวิธี box-counting (Kaye, 1989)

3.4.4.1 เตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ fractal dimension โดยนำแบบจำลอง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60 และ 80 ทอดที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 5 นาที แช่ในพาราฟิน หลอมเหลว ปริมาตร 80 ml อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น ตัดเป็นแผ่นบาง (ประมาณ 0.5 มิลลิเมตร) ด้วย microtomes บันทึกภาพผ่านกล้องจุลทรรศน์ระบบดิจิทัล กำลังขยาย 60 เท่า ถ่ายภาพตัวอย่าง 4 ภาพต่อ 1 ชิ้น และวัด 5 ชิ้นต่อ 1 แบบจำลอง

3.4.4.2 วิเคราะห์ค่า fractal dimension โดยเปลี่ยนภาพสีที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ ระบบดิจิทัลเป็นภาพขาว-ดำด้วยโปรแกรม Photoshop เปลี่ยนจากภาพเป็นเส้นด้วยโปรแกรม PC_image ใช้โปรแกรม Photoshop ลบเส้นที่ไม่ต้องการให้เหลือแต่เส้นขอบรูป และหาค่า fractal

dimension ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป fractal analysis แบบ box-counting method (ขั้นตอนการวิเคราะห์ fractal dimension แสดงไว้ในภาคผนวก ค)

3.5 ศึกษาผลของ trehalose ต่อการดูดกลืนน้ำมัน

เตรียมแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 เช่นเดียวกับข้อ 3.2 โดยแปรปริมาณ trehalose เป็นร้อยละ 0, 3, และ 5 โดยน้ำหนักแบบจำลอง (ด้วยการแทนที่น้ำหนักแป้งแห้ง) ทอดแบบจำลองในน้ำมันปาล์มโอเลอิน อุณหภูมิ 150 ± 2 °C เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที วางบนกระดาษซับน้ำมัน โดยซับน้ำมันด้านละ 5 นาที (Funami และคณะ, 1999) ประเมินคุณภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้

3.5.1 ปริมาณความชื้น เช่นเดียวกับข้อ 3.3.1

3.5.2 ปริมาณน้ำมันดูดกลืน เช่นเดียวกับข้อ 3.3.2

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial $2 \times 3 \times 4$ ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (Cochran และ Cox, 1985)

3.6 ศึกษาผลของ HPMC ต่อการดูดกลืนน้ำมัน

เตรียมแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 เช่นเดียวกับข้อ 3.2 โดยแปรปริมาณ HPMC เป็นร้อยละ 0, 0.2, 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนักแบบจำลอง (ด้วยการแทนที่น้ำหนักแป้งแห้ง) ทอดแบบจำลองในน้ำมันปาล์มโอเลอิน อุณหภูมิ 150 ± 2 °C เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที วางบนกระดาษซับน้ำมัน โดยซับน้ำมันด้านละ 5 นาที ประเมินคุณภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้

3.6.1 ปริมาณความชื้น เช่นเดียวกับข้อ 3.3.1

3.6.2 ปริมาณน้ำมันดูดกลืน เช่นเดียวกับข้อ 3.3.2

วางแผนการทดลองแบบ Symetric Factorial 4^2 ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (Cochran และ Cox, 1985)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 วิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของแป้งสาลี ความหนืดและกรดไขมันอิสระของน้ำมันทอด ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี

องค์ประกอบ	ค่าเฉลี่ย ¹
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10.36 ± 0.09
โปรตีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	8.19 ± 0.13
ไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.19 ± 0.03
เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.46 ± 0.05
คาร์โบไฮเดรต ² (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	80.80 ± 0.25

¹ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

² คำนวณจากผลต่างของ 100 กับปริมาณองค์ประกอบอื่น

ตารางที่ 4.2 คุณภาพของน้ำมันปาล์มโอเลอิน

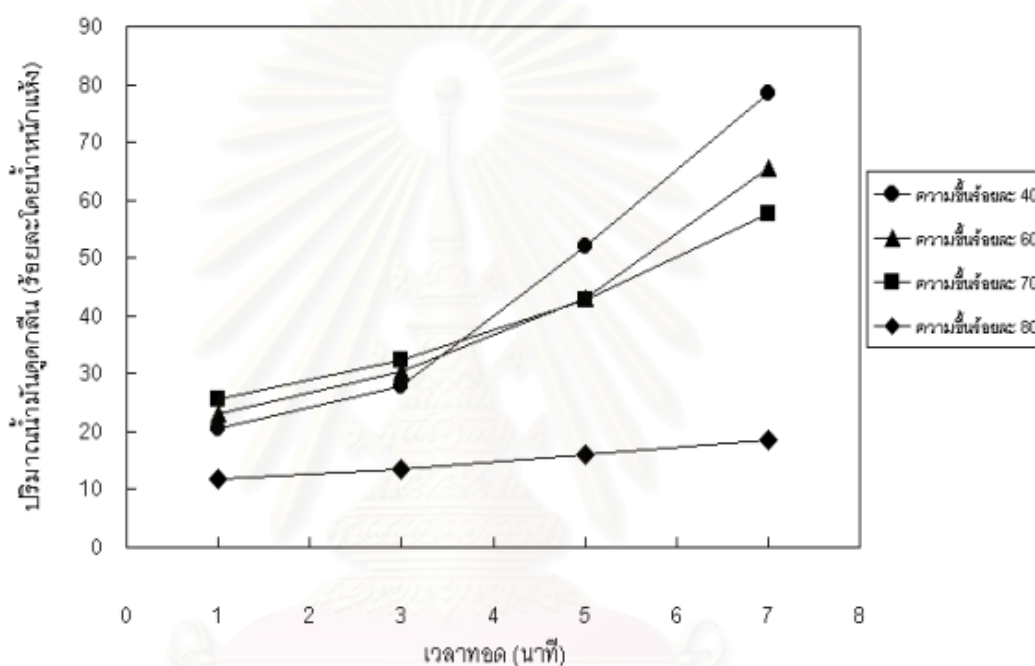
ดัชนีคุณภาพ	ค่าเฉลี่ย ¹
ความหนืด (cPs)	52.77 ± 0.40
กรดไขมันอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.15 ± 0.00

¹ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

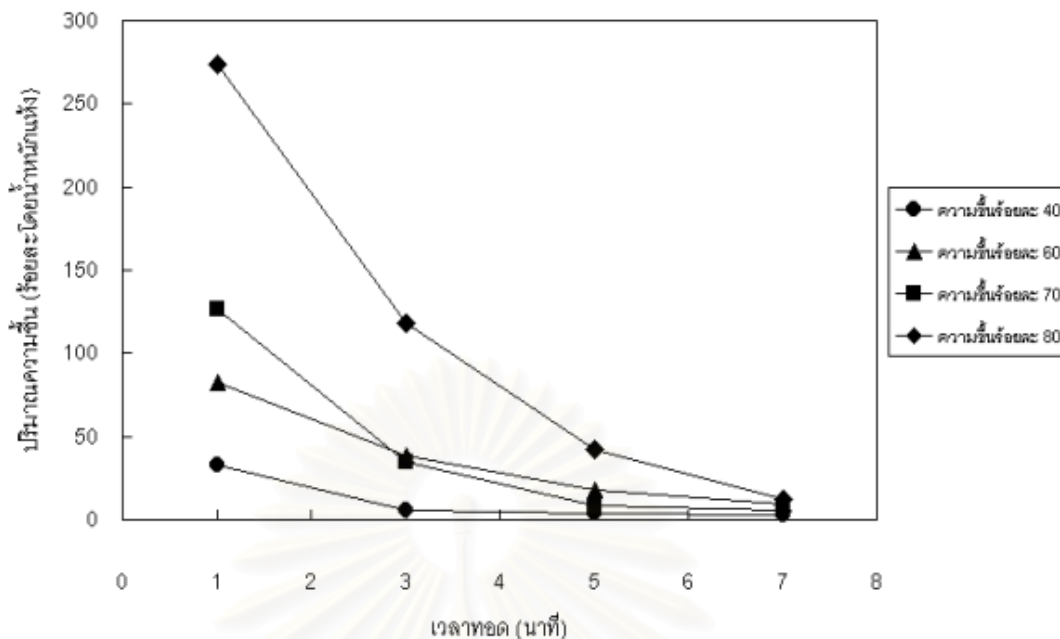
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี พบว่ามีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับเตรียมแบบจำลองเพื่อศึกษาปัจจัยการดูดกลืนน้ำมัน เพราะมีปริมาณไขมันต่ำ สำหรับคุณภาพน้ำมันทอด พบ กรดไขมันอิสระร้อยละ 0.15 (โดยทั่วไปน้ำมันทอดที่ไม่เคยผ่านการให้ความร้อนควรมีกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 0.5, Vavil, 1983) มีความหนืด 52.77 (Tseng, Moreira และ Sun, 1996 รายงานว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีความหนืดประมาณ 53.17 cPs) ซึ่งอาจสรุปได้ว่าน้ำมันที่ใช้ในการทดลองมีคุณภาพเหมาะสมสำหรับใช้ทอดตัวอย่าง

4.2 ผลของเวลาทอด

แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60, 70 และ 80 ที่ผ่านการทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที (จากข้อ 3.3) นำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันดูดกลืน และความชื้น ได้ผล ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.2 และตารางที่ 4.3-4.4 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นกับรากที่สองของเวลาทอด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นกับรากที่สองของเวลาทอดแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.1 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที



รูปที่ 4.2 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

SOV	df	MS	
		ปริมาณน้ำมันดูดกลืน	ปริมาณความชื้น
ความชื้นเริ่มต้น (A)	3	1460.437*	14568.106*
เวลาทอด (B)	3	1900.997*	24174.657*
AB	9	191.835*	4062.177*
Error	16	8.530	95.279

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Symmetric Factorial Experiment ขนาด 4^2 พบอิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นกับเวลาทอด (AB) ต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้น ($p \leq 0.05$) จึงวิเคราะห์ตามปัจจัยที่มีผลต่อค่าดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 4.4

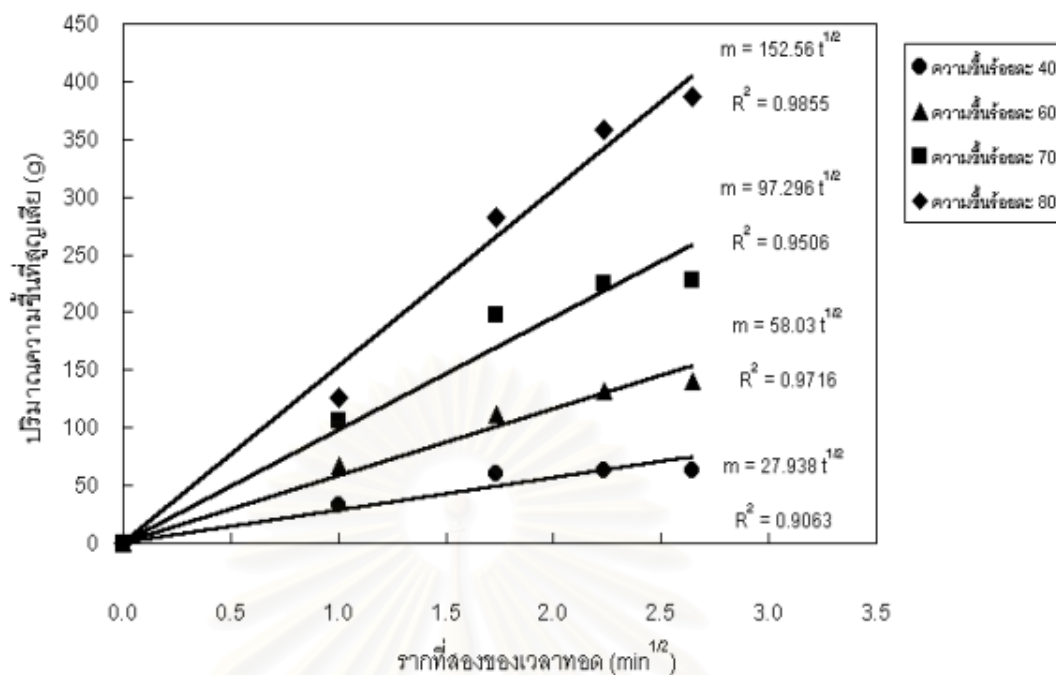
ตารางที่ 4.4 ผลของเวลาทอดต่อปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นและความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที เมื่อพิจารณา อิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นและเวลาทอด

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	เวลาทอด (นาที)	ปริมาณน้ำมันดูดกลิ่น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
40	1	20.46 ^{hij} ± 1.19	33.28 ^{def} ± 2.01
	3	27.85 ^{efg} ± 2.36	6.04 ^g ± 1.05
	5	52.13 ^c ± 0.57	3.86 ^g ± 0.95
	7	78.35 ^a ± 5.84	3.11 ^g ± 0.05
60	1	23.17 ^{ghi} ± 0.68	82.32 ^c ± 6.28
	3	30.40 ^{ef} ± 2.72	38.44 ^{de} ± 11.06
	5	43.12 ^d ± 0.25	18.13 ^{efg} ± 7.82
	7	65.64 ^b ± 2.96	9.13 ^g ± 1.35
70	1	25.52 ^{fgh} ± 0.28	126.60 ^b ± 11.56
	3	32.41 ^e ± 1.57	34.99 ^{de} ± 6.92
	5	42.67 ^d ± 3.65	8.30 ^g ± 2.85
	7	57.73 ^c ± 3.18	5.31 ^g ± 0.08
80	1	11.71 ^l ± 4.62	273.81 ^a ± 23.99
	3	13.58 ^{kl} ± 2.65	117.88 ^b ± 17.19
	5	16.08 ^{kl} ± 0.21	41.93 ^d ± 15.09
	7	18.49 ^{ijk} ± 4.89	12.39 ^{fg} ± 2.30

a,b,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลของอิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นและเวลาทอด แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นของทุกแบบจำลองเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้น

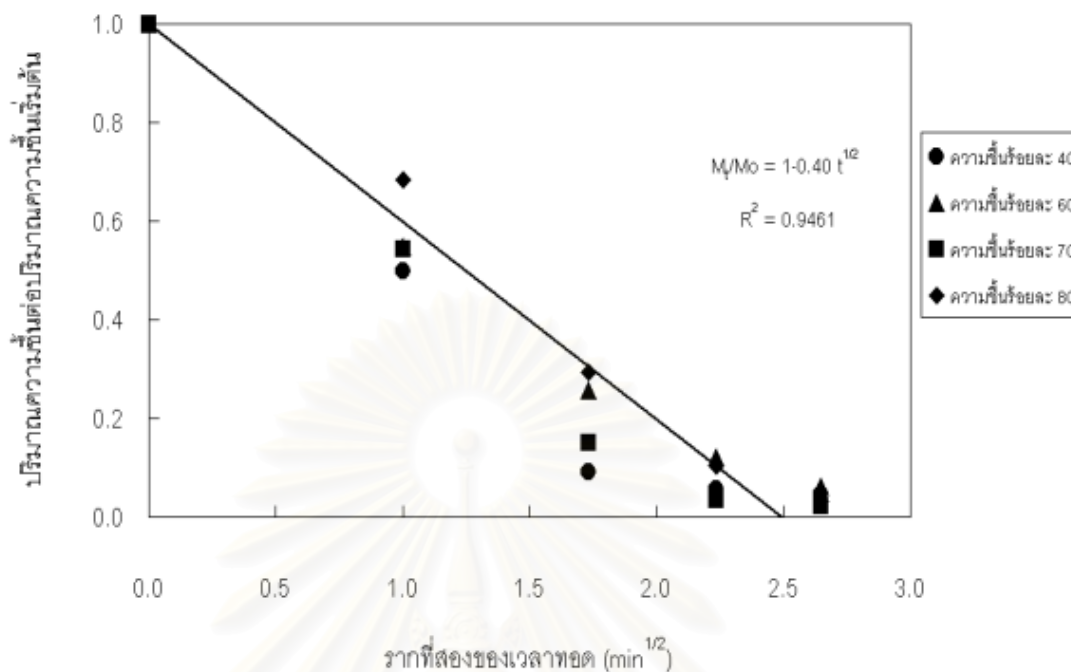
ผลของอิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นและเวลาทอด แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นของทุกแบบจำลองลดลงเมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของรากที่สองของเวลาทอดและปริมาณความชื้นสูญเสียบของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

จากรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณความชื้นที่สูญเสียบของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรากที่สองของเวลาทอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



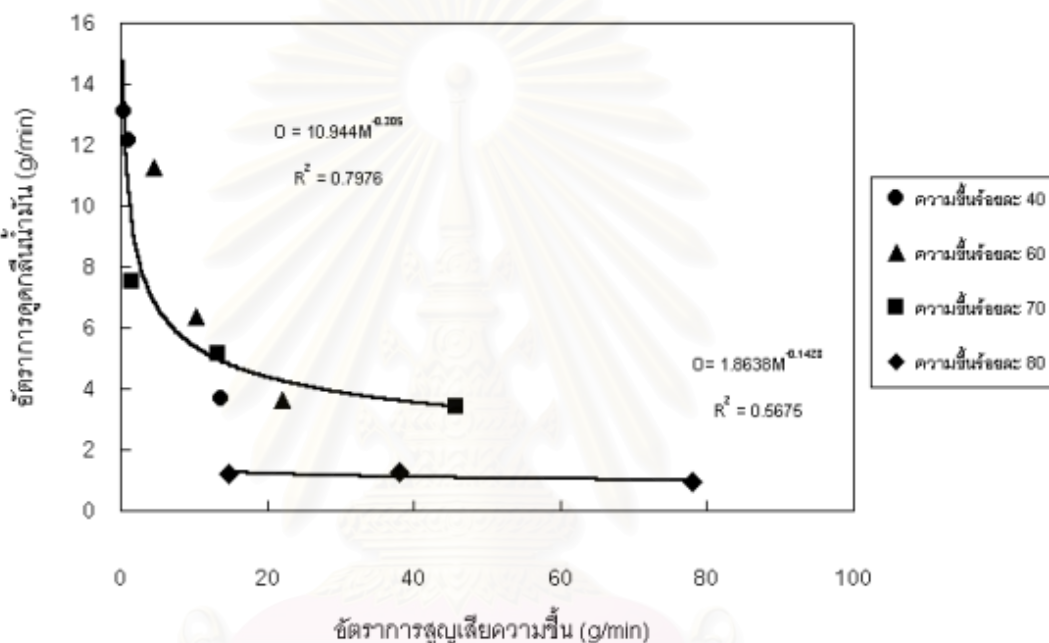
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของรากที่สองของเวลาทอดและปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

จากรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรากที่สองของเวลาทอด และพบว่าเส้นความสัมพันธ์ของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเดียวกัน โดยมีสมการความสัมพันธ์เป็น $M_t/M_o = 1 - 0.40t^{1/2}$ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9461)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

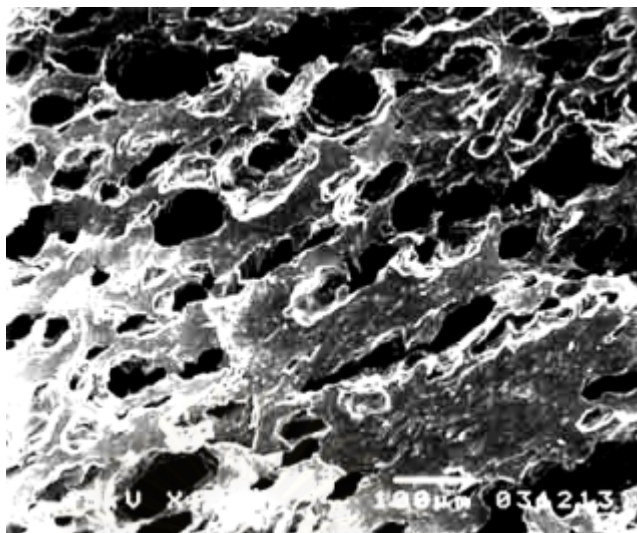
4.3 ความสัมพันธ์ของอัตราการดูดกลืนน้ำมันและอัตราการสูญเสียความชื้น

ปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นในแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที ตามข้อ 4.2 นำมาหาอัตราการดูดกลืนน้ำมันและอัตราการสูญเสียความชื้นเฉลี่ย โดยความสัมพันธ์ของอัตราการดูดกลืนน้ำมันและอัตราการสูญเสียความชื้นเฉลี่ยได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5 และโครงสร้างของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 4.6-4.9 และนำมาวิเคราะห์พื้นที่รูปทรงได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.7

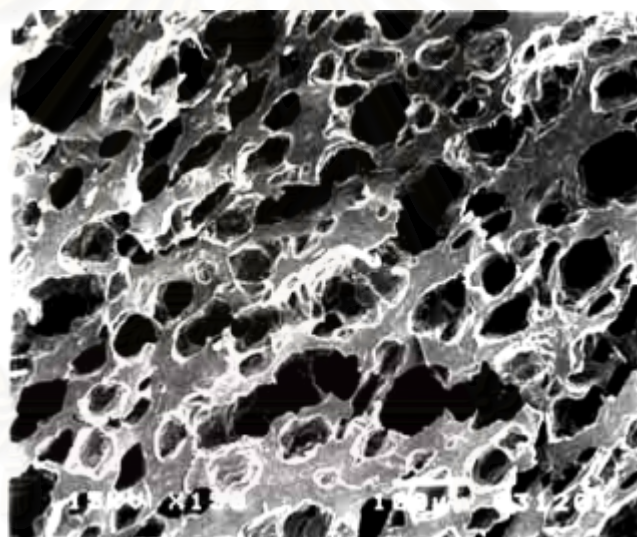


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของอัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดกลืนน้ำมันของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

จากรูปที่ 4.5 พบว่าแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60 และ 70 มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดกลืนน้ำมันที่คล้ายกัน และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวของแบบจำลองทั้ง 3 โดยพิจารณาว่าเส้นความสัมพันธ์ของแบบจำลองทั้ง 3 ทับเป็นเส้นเดียวกัน พบว่ามีสมการความสัมพันธ์เป็น $O=10.944M^{-0.205}$ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.7976) นั่นคืออัตราการดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการสูญเสียความชื้นของแบบจำลองลดลง ส่วนแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 พบว่าอัตราการสูญเสียความชื้นมีความสัมพันธ์กับอัตราการดูดกลืนน้ำมันเป็น $O=1.8638M^{-0.1428}$ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.5675) ซึ่งหมายถึง เมื่ออัตราการสูญเสียความชื้นของแบบจำลองลดลง อัตราการดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

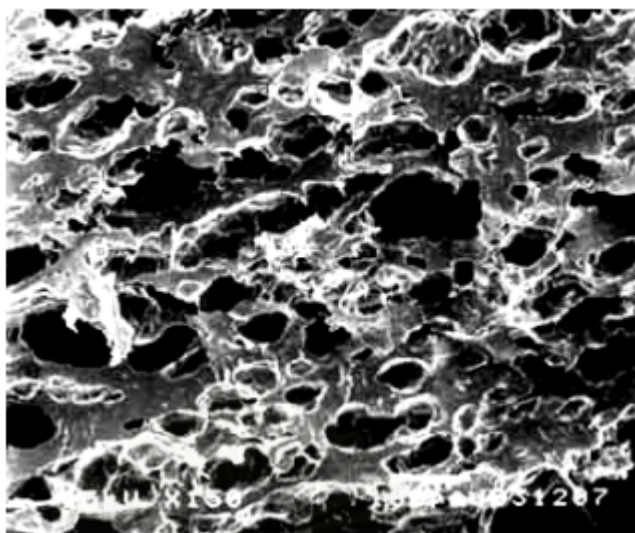


(a)

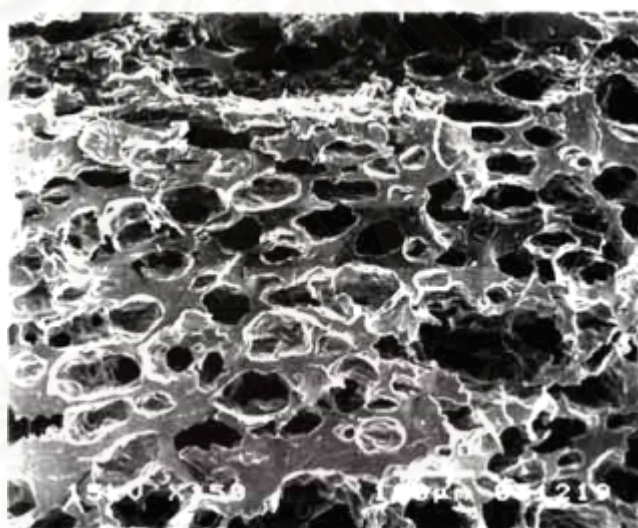


(b)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)

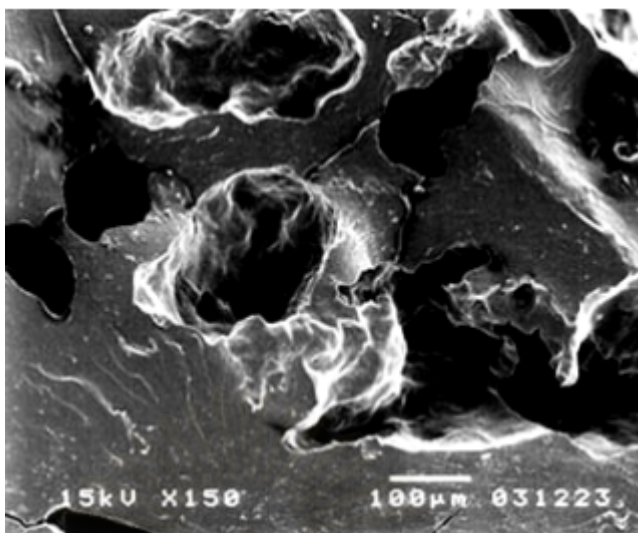


(c)

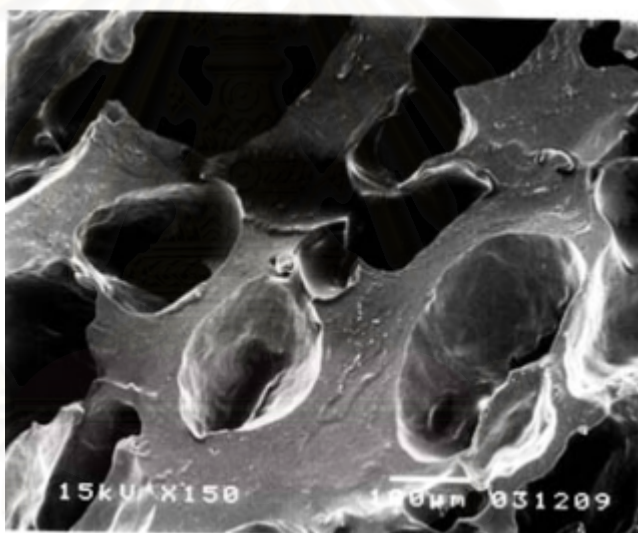


(d)

รูปที่ 4.6 (ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)

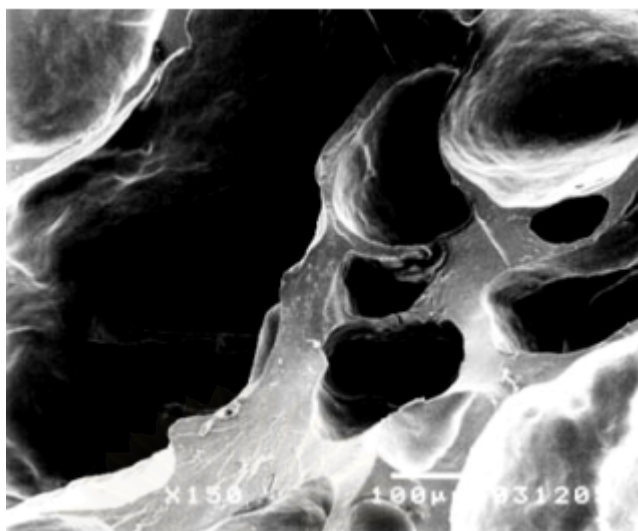


(a)

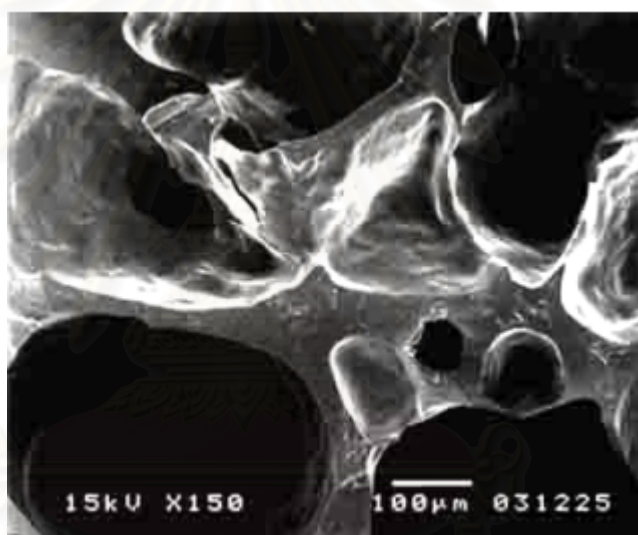


(b)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 60 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)

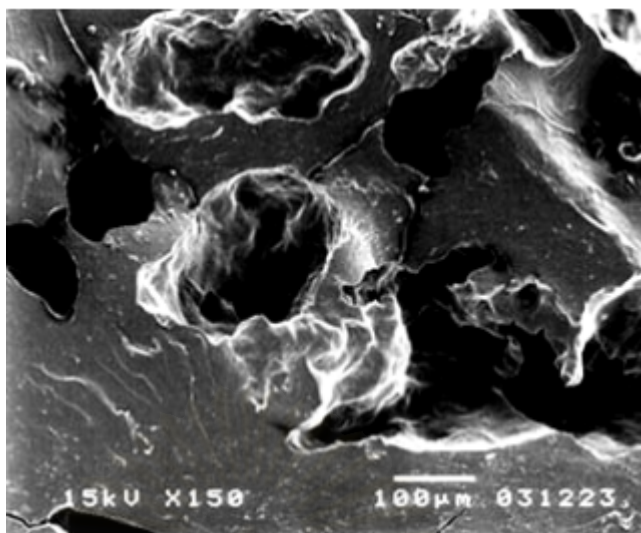


(c)

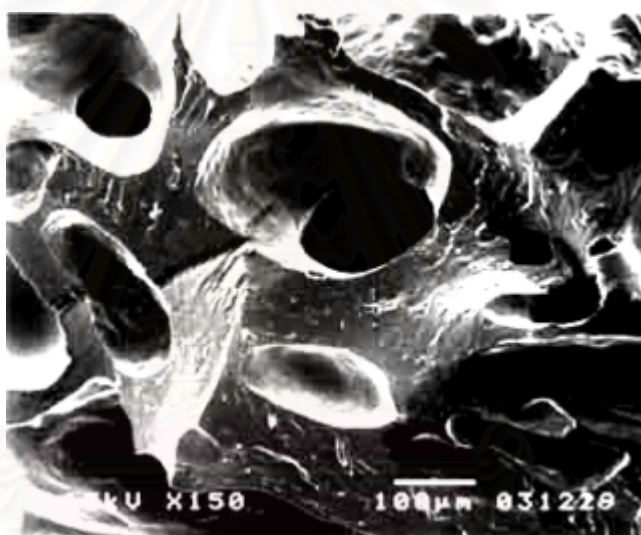


(d)

รูปที่ 4.7 (ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 60 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)

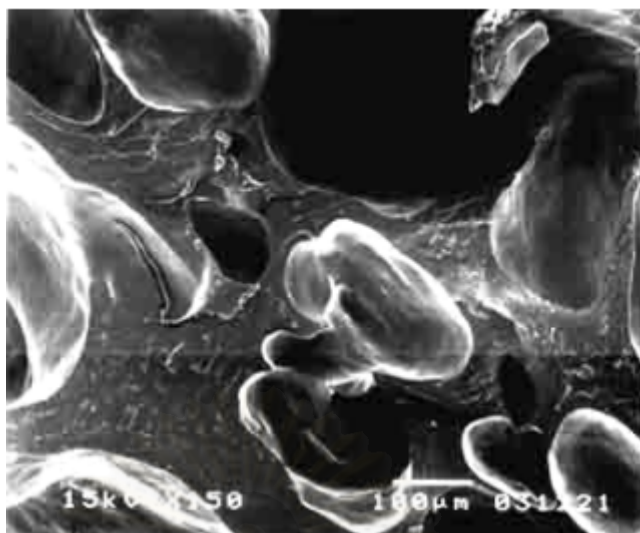


(a)

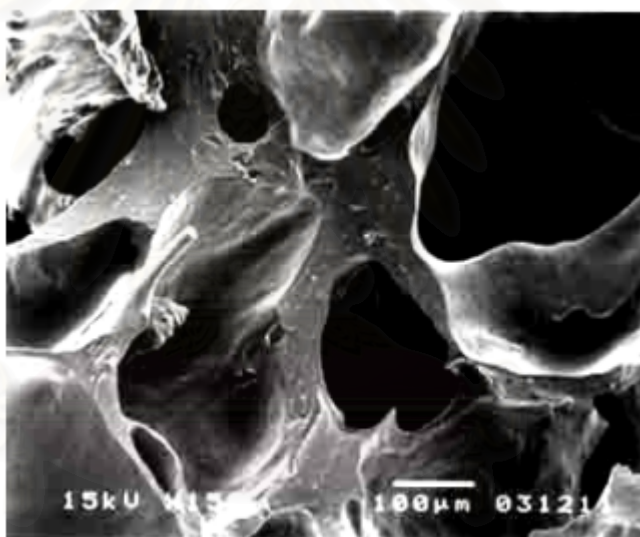


(b)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 70 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)

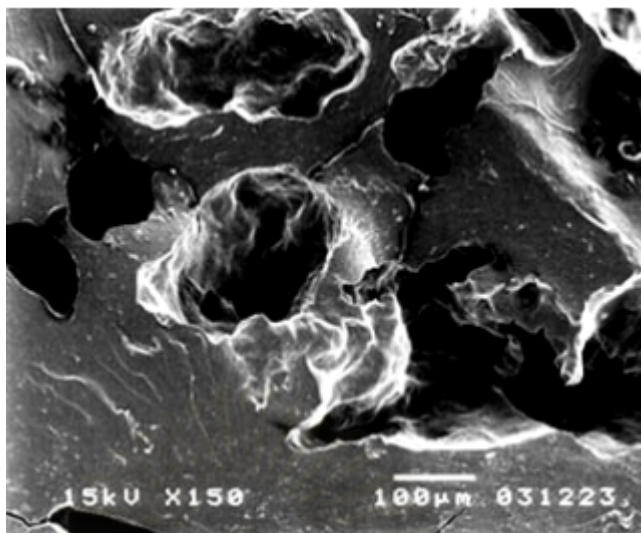


(c)

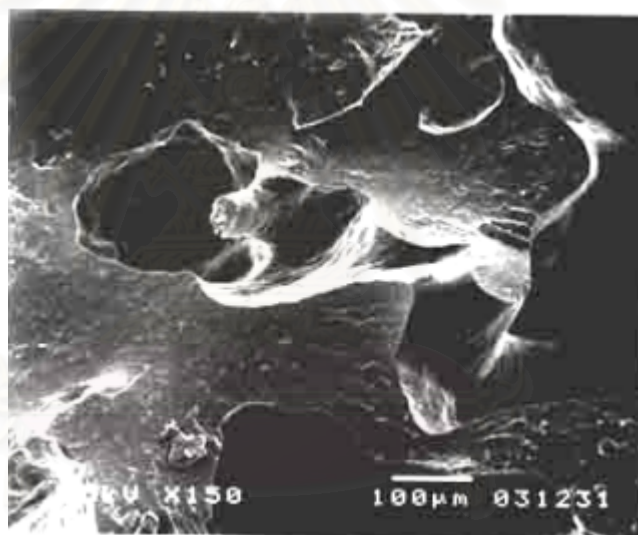


(d)

รูปที่ 4.8 (ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 70 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)

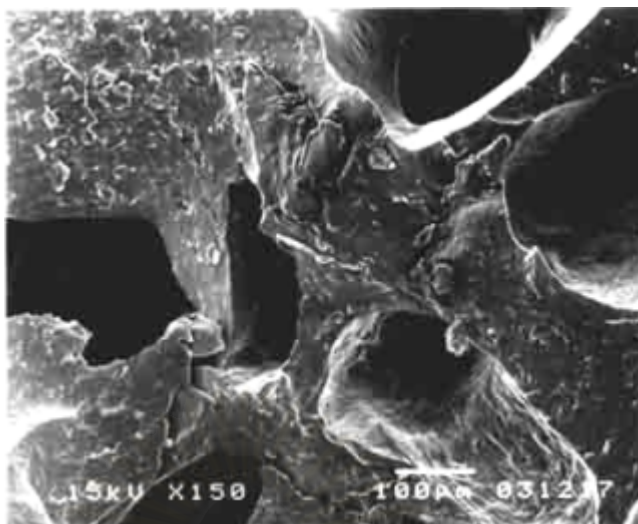


(a)

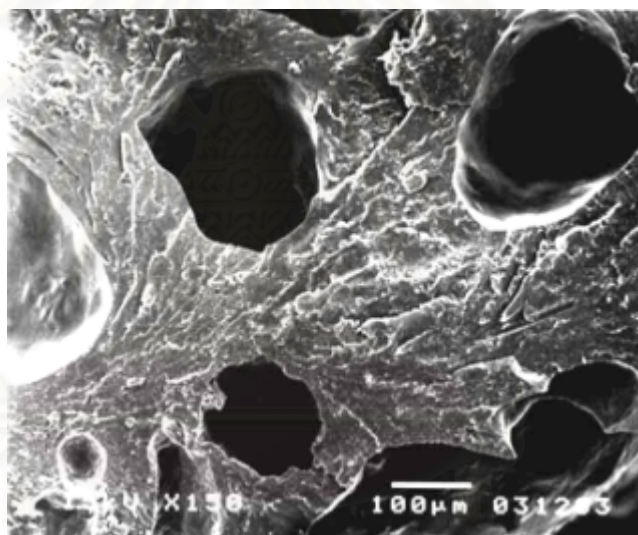


(b)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)



(c)



(d)

รูปที่ 4.9 (ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 150 เท่าของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C ที่เวลา 1 นาที (a), 3 นาที (b), 5 นาที (c) และ 7 นาที (d)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละพื้นที่รุกรานของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

SOV	Df	MS
ความชื้นเริ่มต้น (A)	3	438.667 [*]
เวลาทอด (B)	3	271.784 [*]
AB	9	26.961
error	16	14.191

^{*}แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ไม่พบอิทธิพลร่วมของความชื้นเริ่มต้นและเวลาทอด ($p > 0.05$) จึงแยกวิเคราะห์ตามปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละพื้นที่รุกราน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 พื้นที่รุกรานของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	พื้นที่รุกราน (ร้อยละ)
40	27.99 ^b ± 4.83
60	32.61 ^a ± 9.62
70	30.74 ^{ab} ± 6.67
80	16.13 ^c ± 4.83

a,b,.. ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.7 พื้นที่รูปวงรีของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของเวลาทอด

เวลาทอด (นาที)	พื้นที่รูปวงรี (ร้อยละ)
1	18.51 ^b ± 4.88
3	27.30 ^a ± 7.53
5	30.29 ^a ± 8.85
7	31.37 ^a ± 9.81

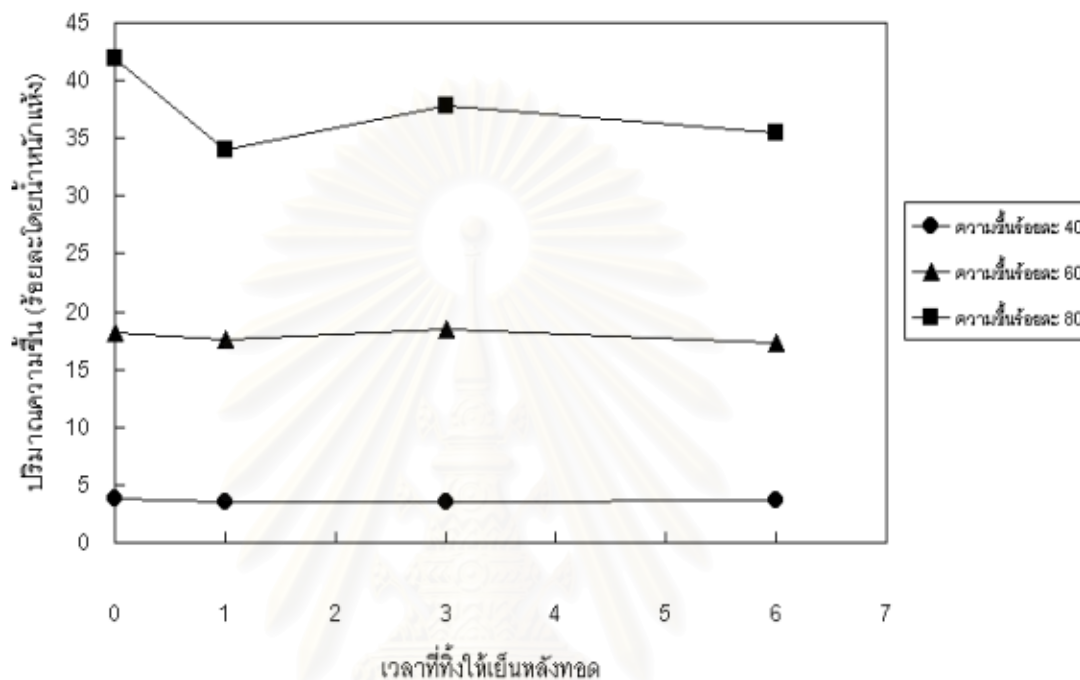
a,b, ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลการเปรียบเทียบพื้นที่รูปวงรี เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น (ตารางที่ 4.6) และเวลาทอด (ตารางที่ 4.7) พบว่า เมื่อความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น พื้นที่รูปวงรีลดลง ขณะที่เมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้นมีผลทำให้พื้นที่รูปวงรีเพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด

แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60 และ 80 จากข้อ 3.2 นำมาทอดตามขั้นตอนในข้อ 3.4 แล้ววิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมันดูดกลืน ปริมาณน้ำมันที่ผิวและค่า apparent fractal dimension ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.16 และตารางที่ 4.8-4.14



รูปที่ 4.10 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็น 0-6 นาที

SOV	Df	MS
ความชื้นเริ่มต้น (A)	2	2281.163*
เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด (B)	3	10.548
AB	6	7.093
error	12	75.161

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

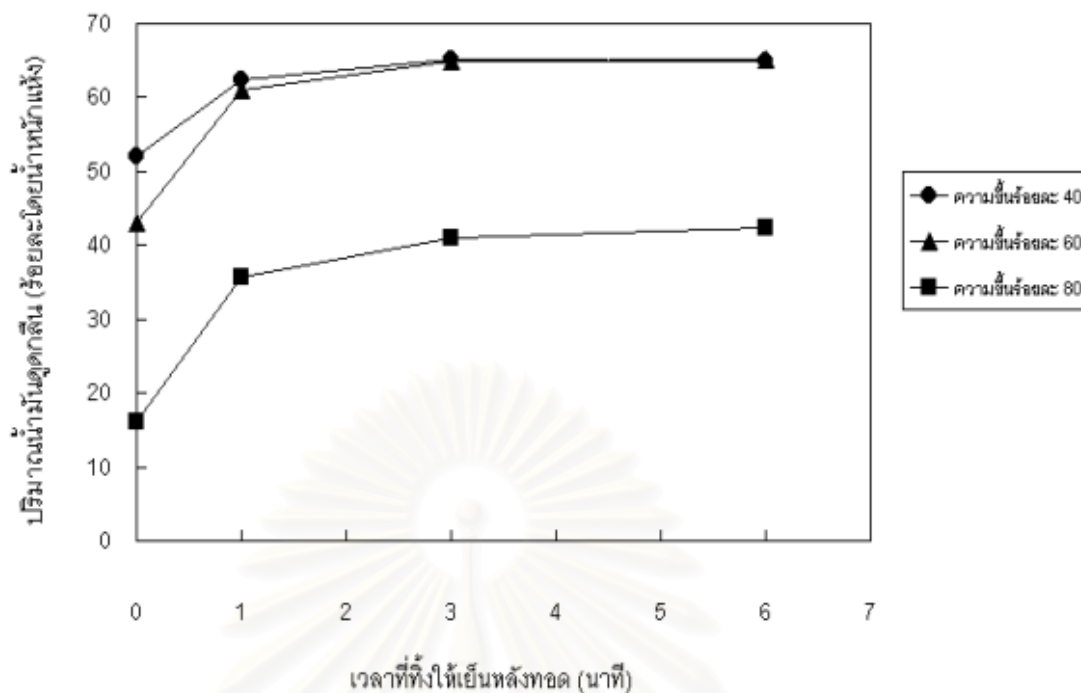
ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ไม่พบอิทธิพลร่วมของความชื้นเริ่มต้นและเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด ($p > 0.05$) ความชื้นเริ่มต้นเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่อปริมาณความชื้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
40	$3.65^c \pm 0.51$
60	$17.84^b \pm 5.76$
80	$37.29^a \pm 10.30$

a,b,.. ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นของแบบจำลอง พบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายเพิ่มขึ้นและเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณความชื้นสุดท้าย



รูปที่ 4.11 ปริมาณน้ำมันดอกสลีนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที

SOV	Df	MS
ความชื้นเริ่มต้น (A)	2	1827.184 [*]
เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด (B)	3	553.018 [*]
AB	6	19.379
error	12	22.802

^{*} แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ไม่พบอิทธิพลร่วมของความชื้นเริ่มต้นและเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด ($p > 0.05$) จึงแยกวิเคราะห์ตามปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.11 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	ปริมาณน้ำมันดูดกลืน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
40	61.20 ^a ± 7.39
60	58.56 ^a ± 10.10
80	33.81 ^b ± 11.67

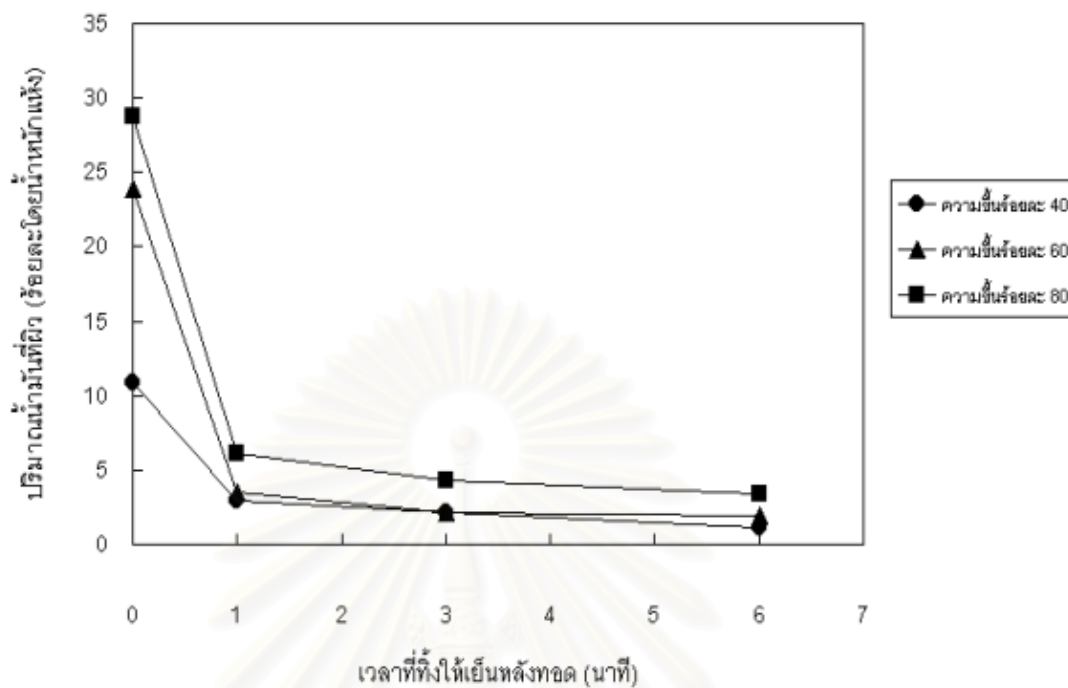
a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที เมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด

เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด (นาที)	ปริมาณน้ำมันดูดกลิ่น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
0	37.11 ^b ± 16.78
1	53.05 ^a ± 13.70
3	57.04 ^a ± 12.51
6	57.56 ^a ± 13.52

a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นของแบบจำลอง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้น (ตารางที่ 4.11) และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด (ตารางที่ 4.12) พบว่า เมื่อความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นลดลง ขณะที่เมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นเพิ่มขึ้น



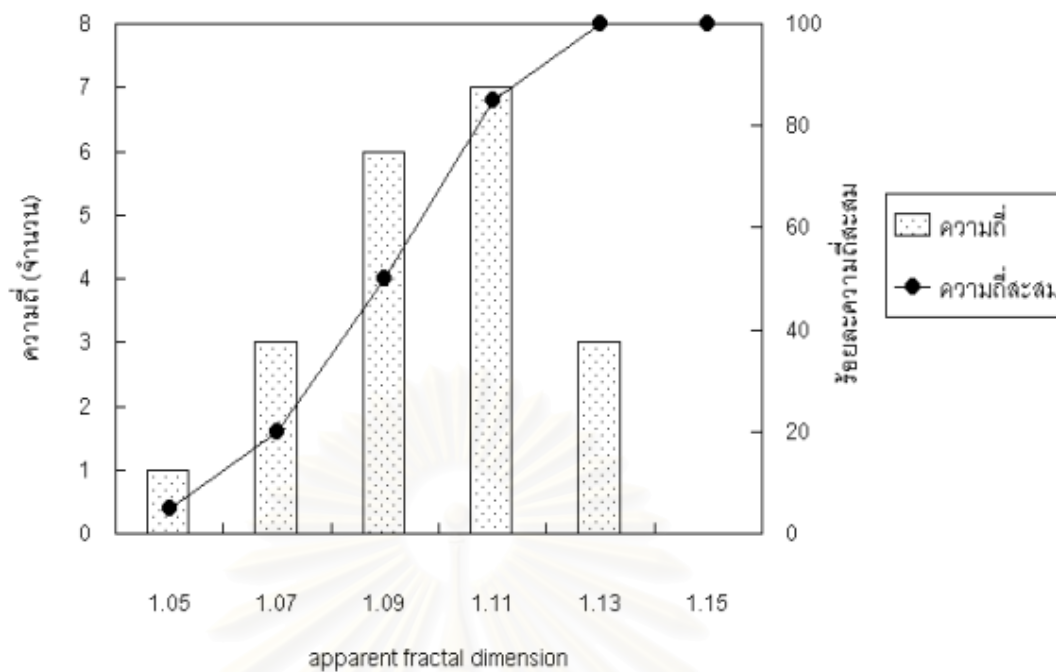
รูปที่ 4.12 ปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที

ตารางที่ 4.13 ปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที

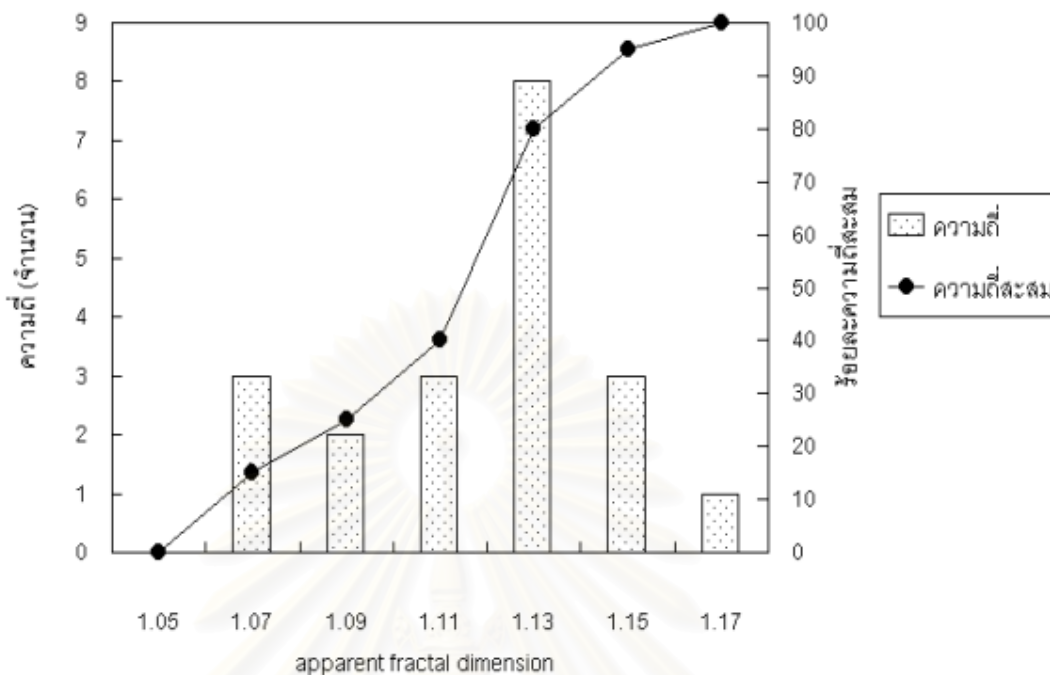
ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด (นาที)	ปริมาณน้ำมันที่ผิว (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
40	0	10.88 ^b ± 1.13
	1	2.95 ^c ± 1.12
	3	2.10 ^c ± 0.26
	6	1.17 ^c ± 0.31
60	0	23.91 ^a ± 9.65
	1	3.51 ^c ± 2.30
	3	2.12 ^c ± 1.37
	6	1.89 ^c ± 0.95
80	0	28.81 ^a ± 3.09
	1	6.08 ^{bc} ± 0.69
	3	4.34 ^{bc} ± 0.83
	6	3.37 ^c ± 0.95

a,b,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

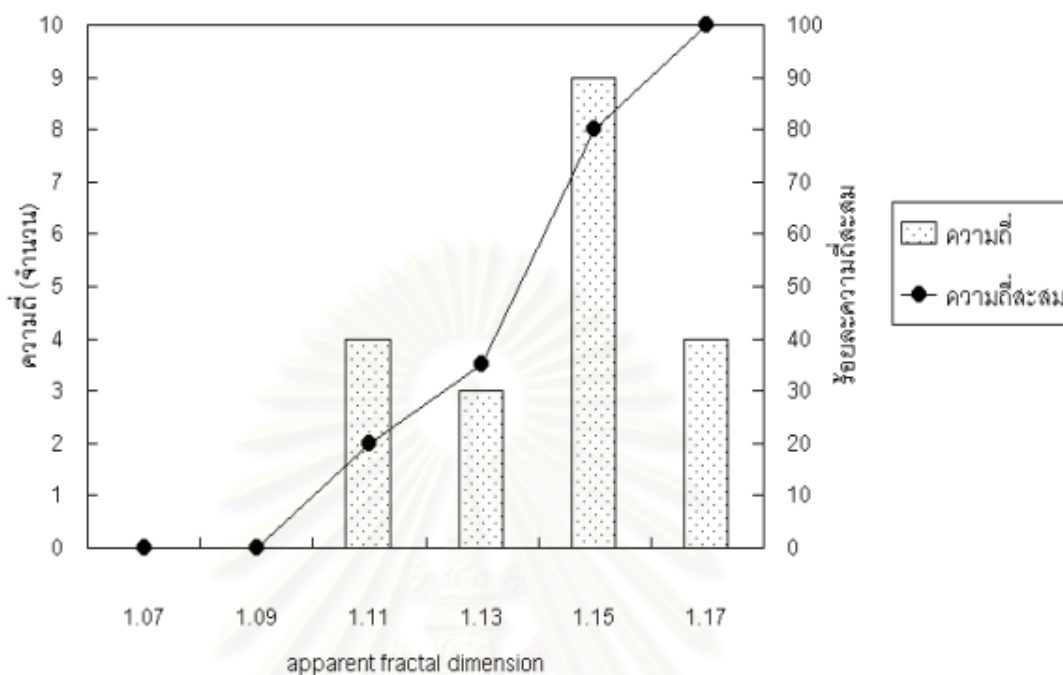
จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบอิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นกับเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดต่อปริมาณน้ำมันที่ผิว ($p \leq 0.05$) ของแบบจำลอง และจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพบว่า ปริมาณน้ำมันที่ผิวของทุกแบบจำลองลดลงเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นเพิ่มขึ้น และแบบจำลองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีปริมาณน้ำมันที่ผิวสูงกว่าแบบจำลองที่ความชื้นเริ่มต้นต่ำที่เวลาทิ้งให้เย็นเท่ากัน



รูปที่ 4.13 ความถี่สะสมของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 40 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 4.14 ความถี่สะสมของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 60 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 4.15 ความถี่สะสมของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที

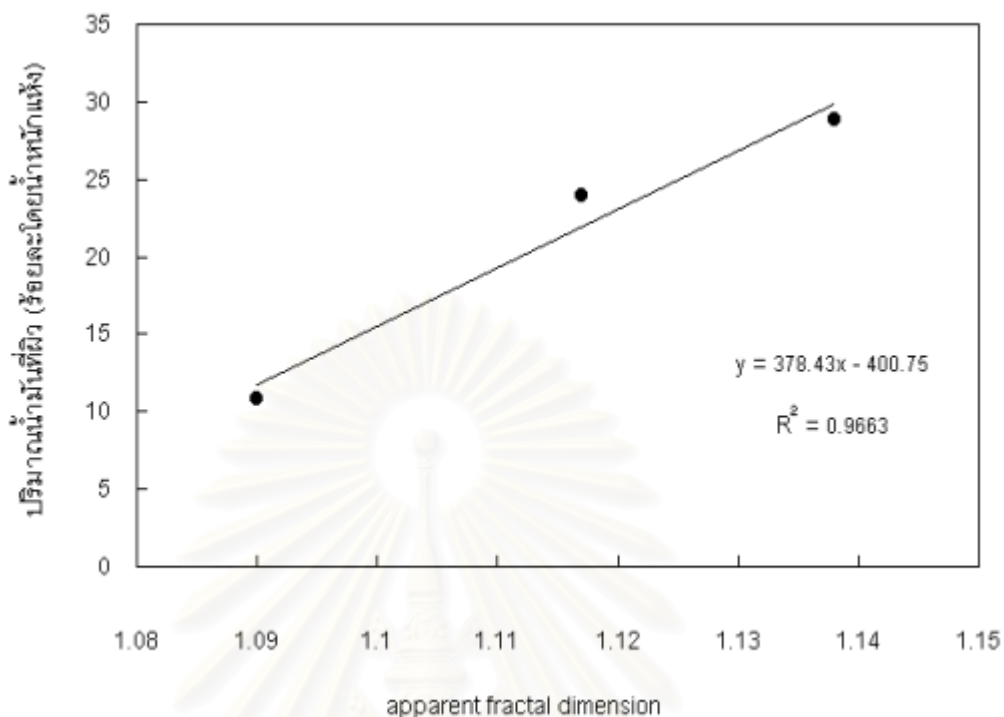
จากค่าความถี่สะสมของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลอง นำมาหาค่าเฉลี่ยของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 โดยพิจารณาเฉลี่ยที่ร้อยละ 50 ของความถี่สะสม ในรูปที่ 4.13-4.15 ซึ่งค่า apparent fractal dimension เฉลี่ยของแบบจำลอง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ย apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นต่าง ๆ ทอดที่ อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที

แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ	ค่า apparent fractal dimension
40	1.090
60	1.117
80	1.138

ผลการเปรียบเทียบค่า apparent fractal dimension เฉลี่ยของแบบจำลอง พบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น มีผลให้ความขรุขระของผิวตัวอย่างเพิ่มขึ้นโดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ย apparent fractal dimension และเมื่อนำค่า เฉลี่ย apparent fractal dimension มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองที่ทอด 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16

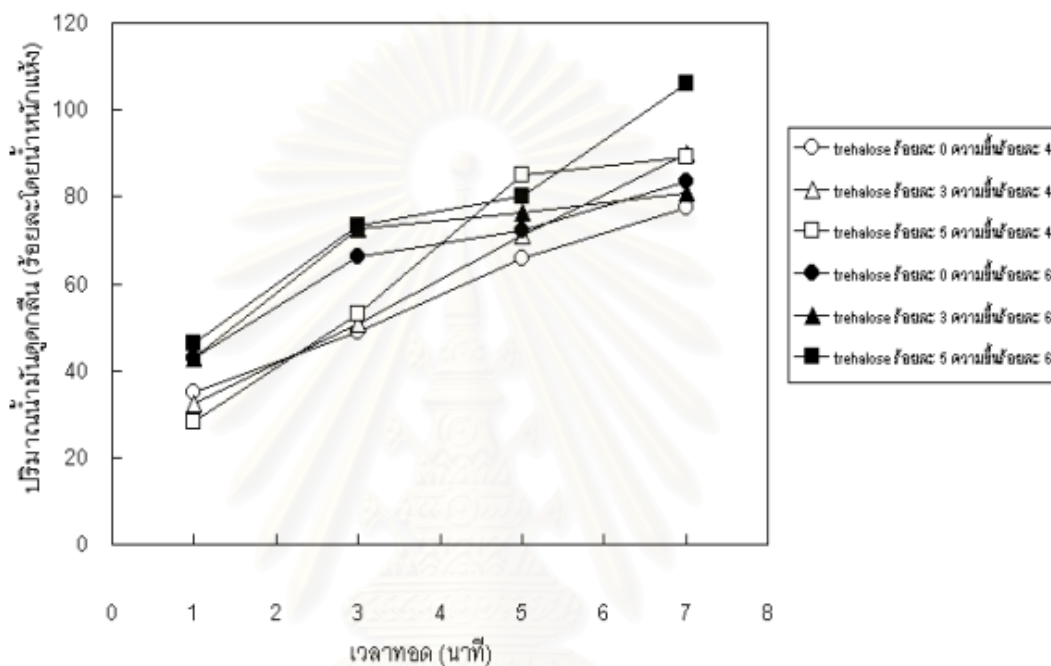


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย apparent fractal dimension กับปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150° C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0 นาที

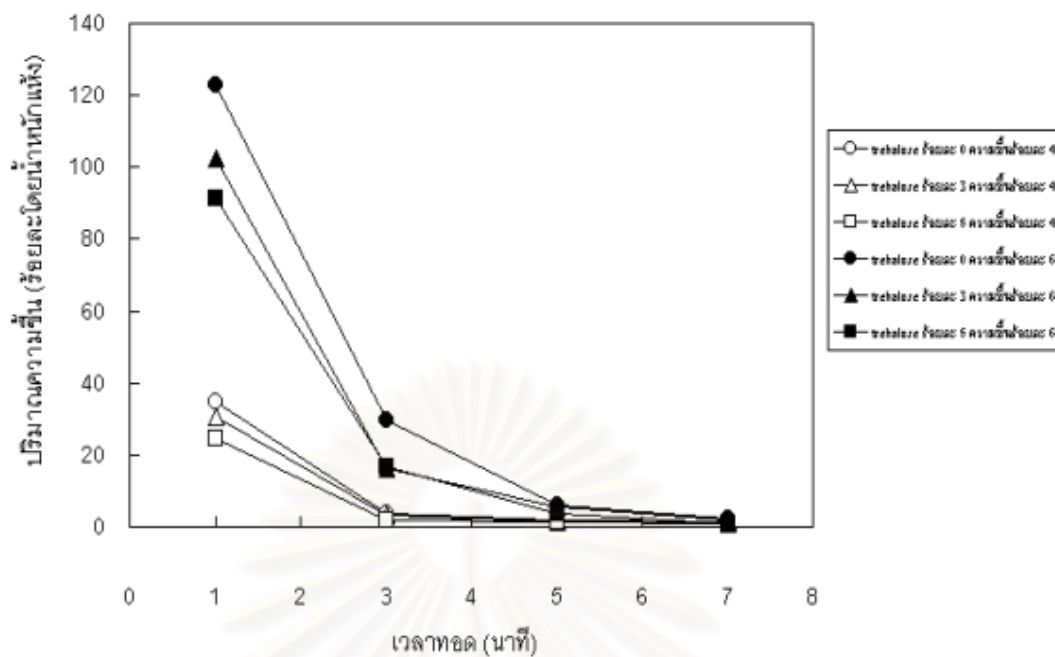
จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่าเฉลี่ย apparent fractal dimension มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันที่ผิว (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9663) โดยความขรุขระที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันที่ผิว นั่นคือเมื่อแบบจำลองมีพื้นผิวที่ขรุขระเพิ่มขึ้น น้ำมันสามารถเกาะที่ผิวตัวอย่างได้มาก

4.5 ผลของ trehalose ต่อการดูดกลืนน้ำมัน

แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 และแปรปริมาณ trehalose เป็นร้อยละ 0, 3 และ 5 นำมาทอดตามขั้นตอนในข้อ 3.5 แล้ว วิเคราะห์ปริมาณน้ำมันดูดกลืน ความชื้น ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.18 และตารางที่ 4.15-4.16



รูปที่ 4.17 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 ที่เติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที



รูปที่ 4.18 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 ที่เติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นและความชื้นของแบบจำลอง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 โดยเติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

SOV	df	MS	
		ปริมาณน้ำมันดูดกลิ่น	ปริมาณความชื้น
ความชื้นเริ่มต้น (A)	1	1140.909 [*]	7139.871 [*]
ปริมาณ trehalose (B)	2	319.478 [*]	235.823 [*]
เวลาทอด (C)	3	5488.895 [*]	11841.270 [*]
AB	2	28.473	89.133
AC	3	187.921 [*]	3674.568 [*]
BC	6	75.438	88.774
ABC	6	68.887	28.836
error	24	37.115	36.289

^{*} แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Experiment ขนาด 2 x 3 x 4 พบ อิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นกับเวลาทอด (AC) ต่อปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นและความชื้น ($p \leq 0.05$) จึงวิเคราะห์ตามปัจจัยที่มีผลต่อค่าดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 4.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 ผลของการเติม trehalose ต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นของแบบจำลอง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 ที่เติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของความชื้นเริ่มต้นและเวลา ทอด

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	เวลาทอด (นาที)	ปริมาณน้ำมันดูดกลืน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
40	1	31.84 ^d ± 3.19	29.94 ^b ± 4.56
	3	50.92 ^c ± 5.66	2.99 ^d ± 0.82
	5	74.01 ^b ± 10.41	1.67 ^d ± 0.83
	7	85.50 ^a ± 10.19	1.15 ^d ± 0.14
60	1	44.12 ^c ± 2.09	105.55 ^a ± 19.09
	3	70.67 ^b ± 4.57	21.05 ^c ± 7.54
	5	76.27 ^b ± 5.14	5.09 ^d ± 1.50
	7	90.22 ^a ± 13.58	1.64 ^d ± 0.61

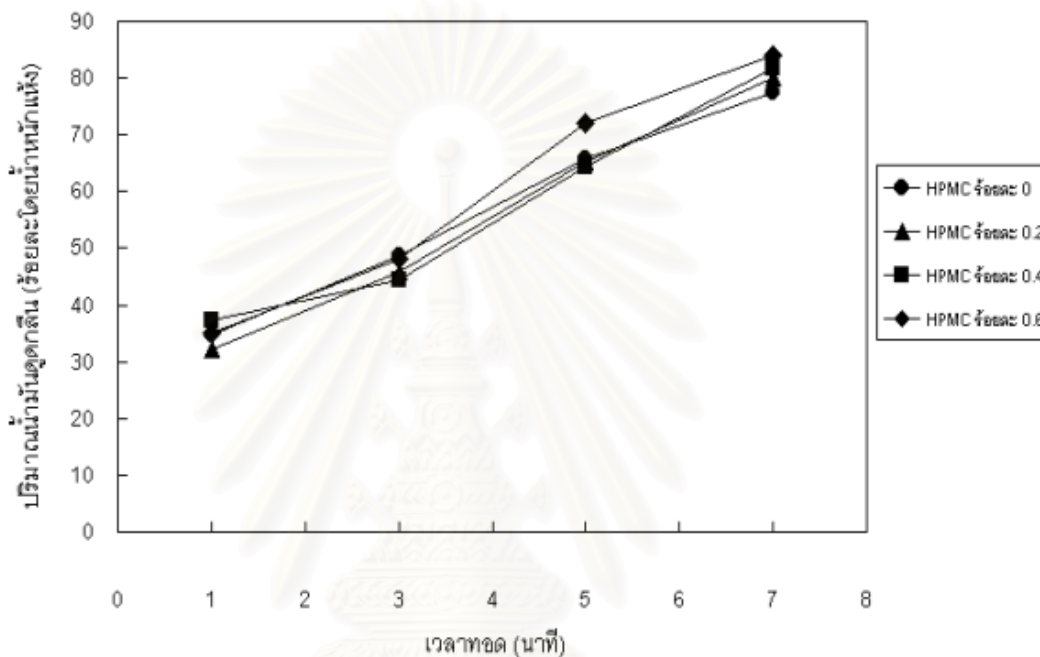
a,b,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลของอิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองและเวลาทอดต่อปริมาณ น้ำมันดูดกลืนและความชื้น พบว่า ปริมาณน้ำมันดูดกลืนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้นในทุกความชื้น เริ่มต้นของแบบจำลอง และแบบจำลองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงมีปริมาณน้ำมันดูดกลืนสูงกว่าที่เวลา ทอดเดียวกัน และปริมาณความชื้นลดลงเมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้นในทุกความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

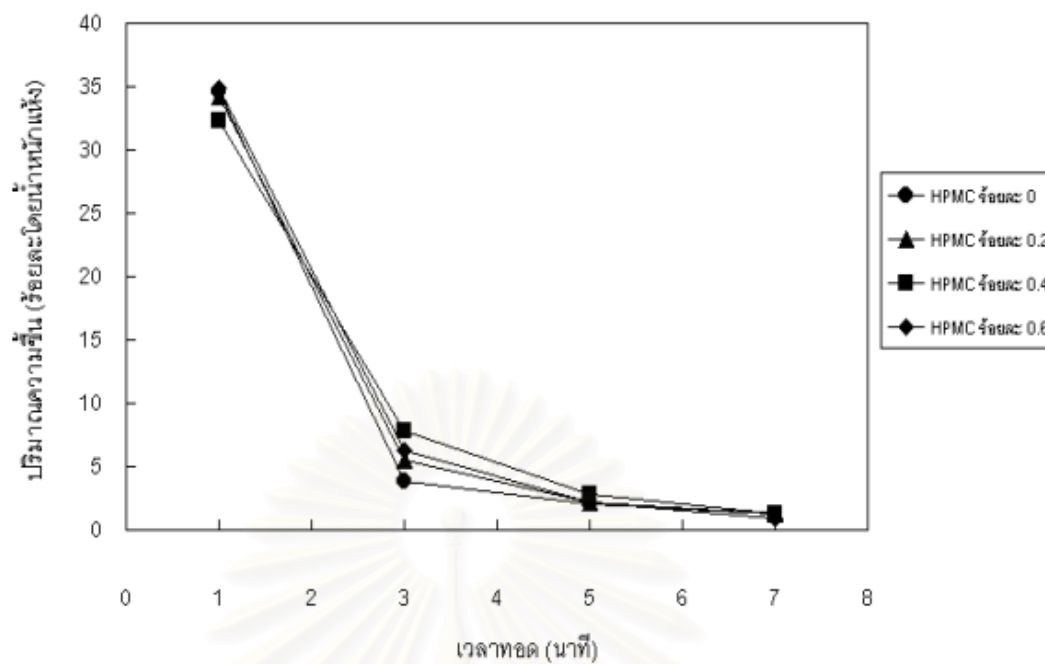
4.6 ผลของ HPMC ต่อการดูดกลืนน้ำมัน

แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และแปรปริมาณ HPMC เป็นร้อยละ 0, 0.2, 0.4 และ 0.6 นำมาทอดตามขั้นตอนในข้อ 3.6 แล้วประเมินปริมาณน้ำมันดูดกลืน ความชื้น ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19-4.20 และตารางที่ 4.17-4.18



รูปที่ 4.19 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ที่เติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 ปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ที่เติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 40 โดยเติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

SOV	df	MS	
		ปริมาณน้ำมันดูดกลืน	ปริมาณความชื้น
ปริมาณ HPMC (A)	3	24.445	0.783
เวลาทอด (B)	3	3353.760 [*]	1950.680 [*]
AB	9	10.862	2.354
error	16	19.007	2.562

^{*} แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าอิทธิพลร่วมของปริมาณ HPMC กับเวลาทอดไม่มีผลต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้น โดยเวลาทอดเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่อค่าดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.18 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยเติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

เวลาทอด (นาที)	ปริมาณน้ำมันดูดกลืน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
1	34.84 ^d ± 4.03	34.11 ^a ± 2.03
3	46.78 ^c ± 4.16	5.90 ^b ± 1.89
5	66.80 ^b ± 3.80	2.33 ^c ± 0.55
7	80.80 ^a ± 4.45	1.19 ^c ± 0.19

a,b,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นของแบบจำลองจากอิทธิพลของเวลาทอด พบว่า เมื่อเวลาทอดนานขึ้น ปริมาณน้ำมันดูดกลืนเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณความชื้นหลังทอดลดลง

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบ

ในงานวิจัยนี้เพื่อให้สามารถศึกษากลไกของปัจจัยการดูดกลืนน้ำมันได้ชัดเจนโดยมีผลแทรกซ้อนจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของอาหารน้อยที่สุดจึงเลือกใช้แบบจำลอง (model) ของคาร์โบไฮเดรต โดยแบบจำลองที่กล่าวนี้จะเป็นตัวแทนในการศึกษาการดูดกลืนน้ำมันในผลิตภัณฑ์ทอดที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ขนมขบเคี้ยว แป้งชุบทอด เป็นต้น และโดยที่ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ใช้แป้งสาลีเป็นองค์ประกอบหลัก จึงเลือกใช้แป้งสาลีเป็นวัตถุดิบในการสร้างแบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลีที่ใช้ในการเตรียมแบบจำลอง ดังตารางที่ 4.1 พบ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 10.36, 8.19, 0.19, 0.46 และ 80.80 ตามลำดับ ซึ่งแป้งสาลีที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีปริมาณไขมันต่ำ จึงไม่มีผลกระทบต่อผลของปริมาณน้ำมันดูดกลืน Knight (1969) รายงานว่า แป้งสาลีโดยทั่วไปมีความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต โดยประมาณร้อยละ 13-16, 8-13, 1.2, 0.40 และ 65-70 ตามลำดับ จากการรายงานของ Olewnik และ Kulp (1990) พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนในแป้งสาลีส่งผลให้การดูดกลืนน้ำมันในแป้งชุบทอดเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์แป้งสาลีที่มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 8.19 นั้นถือว่าอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำซึ่งเหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการศึกษาปัจจัยการดูดกลืนน้ำมัน

เมื่อพิจารณาคุณภาพของน้ำมันทอด โดยวิเคราะห์ความหนืดและกรดไขมันอิสระของน้ำมัน ดังตารางที่ 4.2 พบว่า น้ำมันมีร้อยละกรดไขมันอิสระ 0.15 และความหนืด 52.77 cPs โดยทั่วไปน้ำมันที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนควรจะมีกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 0.5 (Vavil, 1983) และ Tseng และคณะ (1996) รายงานว่า น้ำมันถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีความหนืด 53.17 cPs น้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการดูดกลืนน้ำมันเมื่อใช้ทอดผลิตภัณฑ์เนื่องจากกรดไขมันอิสระมีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว (Blumenthal, 1991) Pinthus และ Saguy (1994) พบว่าสารลดแรงตึงผิวในน้ำมันส่งผลให้แรงตึงระหว่างหน้าของอาหารกับน้ำมันลดลง ทำให้อาหารสัมผัสกับน้ำมันมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้การดูดกลืนน้ำมันสูงขึ้น ดังนั้นน้ำมันทอดที่ใช้ควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำเพื่อลดปัจจัยจากน้ำมันทอด ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำ และอยู่ในเกณฑ์

มาตรฐานน้ำมันและไขมันบริโภคของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2535) ด้วยจึงสรุปได้ว่าน้ำมันที่ใช้ทอดมีคุณภาพดีเหมาะแก่การนำมาใช้ในการทดลอง

5.2 ผลของเวลาทอดต่อการดูดกลืนน้ำมัน

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของเวลาทอดต่อการดูดกลืนน้ำมันของแบบจำลองที่มีความชื้นตั้งต้น 40, 60, 70 และ 80 โดยใช้อุณหภูมิทอด 150°C แปรเวลาทอดเป็น 1, 3, 5 และ 7 นาที ประเมินคุณภาพโดยวัดปริมาณน้ำมันดูดกลืน และปริมาณความชื้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับรากที่สองของเวลาทอด และปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นกับรากที่สองของเวลาทอด ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1-4.4 และตารางที่ 4.3-4.4

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการทอดแบบน้ำมันท่วมอยู่ในช่วง $150-190^{\circ}\text{C}$ (Moreira และคณะ, 1999) การใช้อุณหภูมิต่ำจะต้องใช้เวลาทอดนานเพื่อให้ภายในอาหารสุก ซึ่งส่งผลให้อาหารมีการดูดกลืนน้ำมันสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิต่ำที่ 150°C เพื่อติดตามผลของปัจจัยของความชื้นเริ่มต้นในช่วงกว้างได้อย่างชัดเจนตั้งแต่แบบจำลองในลักษณะที่เป็นโดจนถึงแบบจำลองที่มีลักษณะเป็นน้ำแป้งเหลว (slurry) รวมถึงผลการเติมสารเจือปนต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นที่สัมพันธ์กับเวลาทอดที่เพิ่มขึ้นในช่วง 0-7 นาที อีกด้วย

จากการทดลองพบ อิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นและเวลาทอดต่อปริมาณความชื้นหลังทอด ($p \leq 0.05$) ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันดูดกลืนในแบบจำลองทอดที่ 150°C พบว่าปริมาณความชื้นหลังทอดของทุกแบบจำลองลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3 นาทีแรกของการทอด และที่เวลาทอด 5 และ 7 นาที ความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 40, 60 และ 70 ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากแบบจำลองที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ (แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40) เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสูงพอระหว่างทอดจะมีผลให้น้ำอิสระที่อยู่ภายในเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว (Nair และคณะ, 1996) ทำให้ความชื้นในตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อความชื้นลดลงจนถึงระดับที่น้ำที่เหลืออยู่เป็นส่วนของน้ำที่จับแน่นกับโครงสร้างด้วยพันธะที่แข็งแรง (bound water) อัตราการสูญเสียความชื้นและปริมาณความชื้นจึงเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนถึงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่ง Potter และ Hotchkiss (1998) รายงานว่า ในการทำแห้ง ความชื้นใน ตัวอย่าง ที่ต่ำกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง ถือเป็นน้ำที่จับกับโครงสร้าง ซึ่งจะระเหยออกได้ยาก ดังนั้นเมื่อทอดตัวอย่างนาน 5 และ 7 นาที ปริมาณความชื้นของแบบจำลองซึ่งลดต่ำลงถึงประมาณร้อยละ 3 แล้วจึงไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนแบบจำลองความชื้น

เริ่มต้นร้อยละ 60 และ 70 ขณะทอด น้ำที่ผิวและบริเวณใต้ผิวเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะระเหยเป็นไอ ขณะเดียวกันแป้งเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชันด้วยเนื่องจากมีน้ำในปริมาณสูงพอ ซึ่งเจลลิตีที่เกิดขึ้นกักน้ำไว้ในร่างแหได้ ส่งผลให้มีปริมาณความชื้นในช่วงแรกของการทอดสูงกว่า แต่เมื่อทอดนานขึ้นพลังงานความร้อนที่ถ่ายโอนจากน้ำมันทอดทำให้น้ำในตัวอย่างระเหยไปจนเหลือส่วนที่เป็นน้ำที่จับแน่นกับโครงสร้างและน้ำบริเวณรอบ ๆ ที่ระเหยได้ยากขึ้นทำให้แบบจำลองความชื้นร้อยละ 60 และ 70 มีปริมาณความชื้นไม่ต่างกันเมื่อทอดนาน 7 นาที ส่วนแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อแป้งสูง ทำให้แป้งส่วนใหญ่เกิดเจลลิตีในเซชันก่อนที่น้ำภายในตัวอย่างจะระเหย ทำให้เกิดเจลที่แข็งแรง โครงสร้างร่างแหของเจลที่เกิดขึ้นจะกักเก็บโมเลกุลน้ำไว้ ทำให้แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 มีปริมาณความชื้นสูงกว่าแบบจำลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำมันดูดกลืน พบ อิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นและเวลาทอดต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืน ($p \leq 0.05$) เมื่อเวลาทอดนานขึ้น ปริมาณน้ำมันดูดกลืนในทุกแบบจำลองสูงขึ้น ที่เวลาทอด 1 และ 3 นาที ปริมาณน้ำมันที่ดูดกลืนในแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40, 60 และ 70 ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทอด 5 นาที ปริมาณน้ำมันดูดกลืนในแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40 สูงกว่าตัวอย่างอื่น และเมื่อทอด 7 นาที แบบจำลองความชื้นร้อยละ 40 มีปริมาณน้ำมันดูดกลืนสูงสุด รองลงมาคือแบบจำลองความชื้นร้อยละ 60, 70 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองความชื้นร้อยละ 80 มีปริมาณน้ำมันดูดกลืนต่ำสุดทุกเวลาทอด ซึ่งอาจจะมีผลของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทั่วไปแป้งสามารถเกิดเจลลิตีในเซชันเมื่อมีน้ำและได้รับพลังงานความร้อน ซึ่ง Lund (1984) รายงานว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อแป้งที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเจลลิตีในเซชันอย่างสมบูรณ์ของแป้งคือ 2:1 (ตัวอย่างมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 60) ซึ่งอุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature) ของแป้งนั้นขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อแป้งด้วย โดยตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อแป้งสูง อุณหภูมิการเกิดเจลต่ำ ซึ่งสำหรับแป้งสาลีจะมีอุณหภูมิการเกิดเจลที่ 50°C เมื่อมีน้ำมากเกินไป (Hoseney, 1998) นอกจากนี้ปริมาณโปรตีนในแป้งมีผลทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลสูงขึ้นด้วย (Hoseney และ Rogers, 1990) จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40, 60 และ 70 ใกล้เคียงกันในช่วง 1 และ 3 นาทีแรก เนื่องจากในช่วงแรกเมื่อแบบจำลองสัมผัสกับน้ำมัน น้ำบริเวณผิวภายนอกและชั้นใต้ผิวแบบจำลองเปลี่ยนสถานะเป็นไอระเหยออกมาค่อนข้างเร็ว ความดันไอที่สูงทำให้น้ำมันแพร่เข้าสู่อาหารได้น้อย (Singh, 1995) แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อแป้งน้อยกว่า 2:1 และยังมีปริมาณโปรตีนในตัวอย่างสูงส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลสูงขึ้น ทำให้น้ำในแบบจำลองระเหยก่อนที่จะเกิดเจล แต่เมื่อทอด 5 นาที น้ำใน

แบบจำลองความชื้น ร้อยละ 40 ลดลง ส่งผลให้แรงต้านจากไอน้ำต่ำลง ทำให้น้ำมันเริ่มแพร่เข้ามาในตัวอย่าง ในขณะที่แบบจำลองความชื้นร้อยละ 60 และ 70 ยังคงมีการระเหยของไอน้ำ น้ำมันจึงเข้าไปได้น้อยและเมื่อทอดนาน 7 นาที แบบจำลองความชื้นร้อยละ 60 น้ำมันจะในตัวอย่างเริ่มลดลง น้ำมันจึงสามารถเข้าไปในรูพรุนที่น้ำระเหยออกได้ (Paul และ Mittal, 1997) ในขณะที่ตัวอย่างความชื้นร้อยละ 70 ไอน้ำในตัวอย่างยังระเหยออกสู่ภายนอก น้ำมันจึงเข้าไปได้น้อยกว่าแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40 และ 60 ส่วนแบบจำลองความชื้นร้อยละ 80 มีปริมาณน้ำมันดูดกลืนน้อยกว่าตัวอย่างอื่นที่ทุก ๆ เวลาทอด เนื่องจากแบบจำลองความชื้นร้อยละ 80 มีอัตราส่วนระหว่างน้ำกับแป้งสูงจึงทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลต่ำ เกิดเจลแข็งก่อนที่น้ำในตัวอย่างจะระเหย เจลแข็งซึ่งเป็นโครงสร้างที่กักเก็บโมเลกุลของน้ำไว้ในปริมาณสูงมีผลในการป้องกันการดูดกลืนน้ำมัน ทำให้ปริมาณน้ำมันดูดกลืนในแบบจำลองที่ระดับความชื้นเริ่มต้นนี้น้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ในช่วงแรกของการทอด และเนื่องจากเจลแข็งมีความแข็งแรงจึงป้องกันการสูญเสียความชื้นจากโครงสร้างเป็นผลให้การเกิดรูพรุนจากการระเหยของไอน้ำลดน้อยลง นอกจากนี้แบบจำลองมีการหดตัวเมื่อทอดนานขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันดูดกลืนจึงน้อยกว่าแบบจำลองความชื้นอื่น สำหรับแบบจำลองความชื้น เริ่มต้นร้อยละ 60 และ 70 ถึงแม้ว่าจะมีอัตราส่วนระหว่างน้ำกับแป้งมากกว่า 2:1 แต่เนื่องจากมีโปรตีนในแป้งในสัดส่วนสูงกว่า และโปรตีนดังกล่าวนี้มีประจุอิสระในโครงสร้างที่สามารถจับประจุในโมเลกุลของน้ำได้เช่นกันทำให้ปริมาณน้ำอิสระในน้ำแป้งลดลง (Hoseney และ Rogers, 1990) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดเจลที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำภายในโครงสร้างน้อยกว่าแบบจำลองความชื้น เริ่มต้นร้อยละ 80

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสูญเสียกับรากที่สองของเวลาทอด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณความชื้นสูญเสียของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรากที่สองของเวลาทอด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mittelman, Mizrahi และ Berk, (1984) ที่สร้างแบบอย่าง (pattern) ของการถ่ายโอนพลังงานความร้อนและมวลสารของแบบจำลองของตัวอย่างที่มีรูพรุนและไม่เกิดเปลือกที่ทำจากโพลี urea-formaldehyde และพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการดังกล่าว โดยเชื่อมโยงระหว่างสมการถ่ายโอนพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำกับสมการการสูญเสียความชื้นขณะทอด ได้สมการเป็น

$$m_t = \frac{2kA^2 \rho}{\lambda} (T_o - T_w) (t - t_o) \quad (1)$$

โดย	m_t	ปริมาณความชื้นที่สูญเสียในช่วงระยะเวลาทอด (kg)
	k	ค่า thermal conductivity (W/m °C)
	A	พื้นที่ของการถ่ายโอนพลังงานความร้อนและมวลสาร (m ²)
	ρ	ความหนาแน่นของตัวอย่าง (kg/m ³)
	T_o	อุณหภูมิน้ำมันทอด (°C)
	T_w	อุณหภูมิเดือดของน้ำ (°C)
	t	เวลาทอด (วินาที)
	t_o	เวลาที่น้ำในตัวอย่างเดือด (วินาที)
	λ	ค่าพลังงานความร้อนแฝงที่น้ำกลายเป็นไอ (J/kg)

จากสมการ (1) ตั้งสมมติฐานว่า ที่ทุกเวลาทอด ค่า thermal conductivity (k) และพื้นที่ของตัวอย่าง (A) ใกล้เคียงกัน ความหนาแน่นของแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ค่าพลังงานความร้อนแฝง (λ) ไม่มีความแตกต่าง และเวลาที่น้ำในตัวอย่างเดือด (t_o) มีค่าใกล้เคียง 0 ดังนั้นค่าที่เปลี่ยนแปลงคือปริมาณความชื้นที่สูญเสียเมื่อเวลาทอดเปลี่ยนไป สมการ (1) จึงอยู่ในรูป

$$m_t = at^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{โดย } a = \frac{(\lambda)^{1/2}}{(2kA^2 \rho)^{1/2}}$$

ดังนั้นปริมาณความชื้นที่สูญเสียจึงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรากที่สองของเวลาทอด และเนื่องจากปริมาณความชื้นในตัวอย่างเท่ากับผลต่างของปริมาณความชื้นเริ่มต้นกับปริมาณความชื้นที่สูญเสีย ดังแสดงในสมการ (3)

$$M_t = M_o - m \quad (3)$$

โดย M_t ปริมาณความชื้นในตัวอย่างที่เวลาทอดใด ๆ (g)
 M_o ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (g)

จึงพัฒนาสมการต่อไปโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นกับรากที่สองของเวลาทอด โดยแทนสมการ (2) ในสมการ (3) สมการที่ได้คือ

$$M_t = M_o - at^{1/2} \quad (4)$$

หารสมการ (4) ด้วยปริมาณความชื้นเริ่มต้น จะได้เป็น

$$M_t / M_o = 1 - a't^{1/2} \quad (5)$$

โดย a' คือ a / Mo

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นกับรากที่สองของเวลาทอดที่ได้จากผลการทดลอง (รูปที่ 4.4) พบว่าปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรากที่สองของเวลาทอด และเส้นความสัมพันธ์ของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเดียวกัน โดยมีสมการความสัมพันธ์เป็น $M_t / Mo = 1 - 0.40t^{1/2}$ ซึ่งมีรูปแบบเดียวกับสมการที่พัฒนาได้ (สมการ (6)) แสดงว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้เป็นจริง นั่นคือที่ทุกเวลาทอดค่า thermal conductivity พื้นที่ของตัวอย่างและค่าความร้อนแฝงมีค่าใกล้เคียงกันและมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นน้อย Rice และ Gamble (1989) รายงานว่ากลไกการสูญเสียความชื้นขณะทอดถูกควบคุมโดยการแพร่กระจาย (diffusion) ภายในตัวอย่าง และจากผลการทดลองแม้ว่าแบบจำลองทั้ง 4 ระดับความชื้นมีความชื้นเริ่มต้นที่ต่างกัน แต่เส้นความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นกับรากที่สองของเวลาทอดของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีแบบอย่างเดียวกัน (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.9461) นั่นหมายถึงความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการสูญเสียความชื้น อาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีค่า diffusivity ที่ไม่แตกต่างกัน และนอกจากนี้เส้นความสัมพันธ์ดังกล่าว อาจนำไปประยุกต์ใช้ในการหาเวลาทอดเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่ต้องการได้

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดกลืนน้ำมัน

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดกลืนน้ำมัน ทำโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่สูญเสียและปริมาณน้ำมันดูดกลืนกับเวลาทอด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นที่สูญเสียและปริมาณน้ำมันที่ดูดกลืนต่อเวลาที่เปลี่ยนไป คืออัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดกลืนน้ำมัน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอัตราการสูญเสียความชื้นกับอัตราการดูดกลืนน้ำมัน ดังแสดงผลในรูปที่ 4.5 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดกลืนน้ำมันของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60 และ 70 มีลักษณะที่คล้ายกัน โดยแบบจำลองที่มีอัตราการสูญเสียความชื้นสูง จะมีอัตราการดูดกลืนน้ำมันต่ำเนื่องจากมีแรงต้านจากไอน้ำ และเมื่ออัตราการสูญเสียความชื้นต่ำ อัตราการดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้น และพบว่าเส้นความสัมพันธ์ของแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40, 60 และ 70 ทับเป็นเส้นเดียวกัน นั่นคือความชื้นเริ่มต้นของทั้ง 3 ตัวอย่างนี้ไม่มีผลต่ออัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดกลืนน้ำมัน ในขณะที่แบบจำลองความชื้นร้อยละ 80 ได้ผลตรงข้ามกับแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40, 60 และ 70 โดยที่ถึงแม้อัตราการสูญเสียความชื้นลดลงอัตราการดูดกลืนน้ำมันก็ไม่เพิ่มขึ้นมากนัก แสดงว่าแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40, 60 และ 70 มีกลไกการดูดกลืนน้ำมันที่ต่างจาก

แบบจำลองความชื้นร้อยละ 80 ซึ่งกลไกการดูดกลืนน้ำมันที่แตกต่างกันคาดว่าจะเกิดจากโครงสร้างของแบบจำลองขณะทอด ดังนั้นจึงได้ถ่ายภาพแบบจำลองด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าว

จากภาพถ่ายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ดังแสดงในรูปที่ 4.6-4.9 พบว่า ที่เวลาทอด 1 นาที โครงสร้างของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 มีลักษณะคล้ายฟองน้ำที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยมีร้อยละพื้นที่รูพรุนของแบบจำลองที่ทอดเป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที เป็น 20.65, 30.30, 30.33 และ 30.69 ตามลำดับ โครงสร้างเช่นนี้เกิดจากความชื้นในตัวอย่างที่มีอยู่ไม่สูงมากนัก เมื่อสัมผัสกับน้ำมัน น้ำภายในได้รับพลังงานความร้อนและอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจึงระเหยเป็นไอและเคลื่อนที่ออกจากโครงสร้างอย่างรวดเร็วทุกทิศทาง เมื่อทอด 3 นาที ปริมาณของรูพรุนจึงสูงมากขึ้น แต่เมื่อทอด 5 และ 7 นาที จะพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงปริมาณของรูพรุนเล็กน้อย เนื่องจากน้ำในตัวอย่างลดลงถึงระดับที่เหลือเฉพาะน้ำที่เป็นส่วนที่ยึดแน่นกับโครงสร้าง ซึ่งระเหยได้ยาก และสอดคล้องกับปริมาณความชื้นหลังทอดของแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อทอดเป็นเวลา 5 และ 7 นาที สำหรับแบบจำลองความชื้นร้อยละ 60 พบว่าเมื่อทอดนานขึ้น ขนาดและจำนวนของรูพรุนเพิ่มขึ้นจนคงที่ โดยร้อยละพื้นที่รูพรุนของแบบจำลองทอดเป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที เป็น 18.17, 33.40, 39.50 และ 39.37 ตามลำดับ โดยที่เวลาทอด 1 นาที เมื่อตัวอย่างได้รับความร้อน น้ำภายในแบบจำลองเปลี่ยนสถานะเป็นไอและเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดรูพรุนในตัวอย่าง และเมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้นเป็น 3 และ 5 นาที รูพรุนมีขนาดใหญ่และจำนวนมากขึ้น เนื่องจากไอน้ำบางส่วนเคลื่อนที่ออกทางรูเปิดเดิมที่มีอยู่แล้วและความดันไอน้ำทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ที่เวลาทอด 7 นาที การเปลี่ยนแปลงของรูพรุนมีเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 4.6) เนื่องจากเมื่อทอดนานขึ้นน้ำในตัวอย่างลดลง การระเหยของน้ำออกจากตัวอย่างน้อยลง สำหรับแบบจำลองความชื้นร้อยละ 70 มีโครงสร้างคล้ายกับแบบจำลองความชื้นร้อยละ 60 แต่เมื่อทอดนานขึ้นโครงสร้างรูพรุนขยายขนาดใหญ่ขึ้นโดยร้อยละพื้นที่รูพรุนเพิ่มขึ้นตามลำดับจาก 21.98, 29.22, 33.55 และ 38.21 เมื่อทอด 1, 3, 5 และ 7 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Moreira และคณะ (1995) ที่พบว่า โครงสร้างของ tortilla chip มีลักษณะคล้ายฟองน้ำคือ มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากเกิดขึ้นที่ 10-15 วินาทีแรกของการทอด เนื่องจากการระเหยของน้ำ จากนั้นไอน้ำยังคงระเหยออกอย่างต่อเนื่องผ่านทางรูที่ไอน้ำออกส่งผลให้รูพรุนขยายขนาดและเกิดการรวมตัวกับรูพรุนที่อยู่ข้างเคียงทำให้รูพรุนใน ตัวอย่างลดจำนวนลงแต่มีขนาดใหญ่เมื่อทอดนานขึ้น Kawas และ Moreira (2001) พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทอด tortilla chip จะมีรูพรุนมากขึ้น และขนาดของรูพรุนขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากการระเหยของน้ำในตัวอย่าง ส่วนภาพถ่ายจาก SEM ของแบบจำลองความชื้นร้อยละ 80 พบว่า รูพรุนของแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดและ

จำนวนเพียงเล็กน้อย โดยมีร้อยละพื้นที่รูพรุนของแบบจำลองที่ทอด 1, 3, 5 และ 7 นาที เป็น 13.26, 16.28, 17.76 และ 17.22 ตามลำดับ แบบจำลองที่ทอด 1 นาที มีรูพรุนน้อยเนื่องจากในตัวอย่างนี้อัตราส่วนระหว่างน้ำกับแป้งสูง ทำให้เกิดเจลแข็งก่อนที่น้ำในตัวอย่างจะระเหยและเจลแข็งที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงจึงทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีรูพรุนน้อย และเมื่อทอดนาน 3 นาที พบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยแม้ว่าจะมีการระเหยของน้ำ ทั้งนี้อาจเนื่องจากน้ำที่ระเหยเป็นน้ำอิสระที่อยู่บริเวณผิวภายนอกเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อทอดนานขึ้นจึงเกิดการหดตัวของแบบจำลอง เนื่องจากเริ่มมีการสูญเสียไอน้ำภายในตัวอย่าง (Potter และ Hotchkiss, 1998) ทำให้โครงสร้างของแบบจำลองมีความแน่นมากขึ้นและน้ำมันไม่สามารถแพร่เข้าไปได้

จากโครงสร้างของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นทอดที่เวลาต่าง ๆ พบว่า การเกิดรูพรุนในโครงสร้างแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40, 60 และ 70 มีลักษณะที่เหมือนกัน คือการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสัมพันธ์กับการสูญเสียความชื้นภายในตัวอย่าง แม้ว่าแบบจำลองทั้ง 3 ระดับความชื้นมีความชื้นเริ่มต้นที่ต่างกัน แต่รูพรุนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากแบบอย่าง การสูญเสียความชื้นขณะทอดเป็นลักษณะเดียวกัน จึงส่งผลให้มีกลไกการดูดกลืนน้ำมันที่คล้ายกันด้วย ส่วนแบบจำลองความชื้นร้อยละ 80 การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของโครงสร้างเมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการที่ความแข็งแรงและความชอบน้ำของเจลแข็งที่เกิดขึ้นก่อนการระเหยของน้ำภายในแบบจำลอง ช่วยชะลอการสูญเสียไอน้ำและการแพร่เข้าสู่อาหารของน้ำมัน ทำให้อัตราการดูดกลืนน้ำมันต่ำกว่าแบบจำลองอื่นและมีกลไกการดูดกลืนน้ำมันที่ต่างจากแบบจำลองที่ระดับความชื้นอื่น ๆ

5.4 ผลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด

เนื่องจากเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดกลืนน้ำมันของอาหารทอด (Moreira และคณะ, 1999) ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดในช่วงกว้าง คือ 0-6 นาทีเพื่อติดตามผลของปัจจัยของเวลาดังกล่าวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำมันดูดกลืนและปริมาณน้ำมันที่ผิวที่สัมพันธ์กับปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลอง

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดต่อการดูดกลืนน้ำมันของแบบจำลองที่มีความชื้น 40, 60 และ 80 ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที โดยแปรเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดเป็น 0, 1, 3 และ 6 นาที ประเมินคุณภาพโดยวัดปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมันดูดกลืน ปริมาณน้ำมันที่ผิว และความขรุขระของพื้นผิวด้วยวิธี fractal analysis ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.10-4.16 และตารางที่ 4.8-4.14

ปริมาณความชื้น (ตารางที่ 4.8-4.9) จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของความชื้นเริ่มต้นและเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด ($p > 0.05$) ต่อปริมาณความชื้นหลังทอด ขณะที่ความชื้นเริ่มต้นเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่อปริมาณความชื้นหลังทอด ทั้งนี้อาจเนื่องจากทันทีที่นำตัวอย่างออกจากน้ำมัน อุณหภูมิภายในของแบบจำลองยังคงสูงพอที่จะทำให้ไอน้ำปริมาณหนึ่งค้างอยู่ในโครงสร้างโดยที่ความดันไอน้ำไม่มากพอที่จะเคลื่อนย้ายออกนอกระบบ เมื่อระยะเวลาที่ตั้งทิ้งไว้นานขึ้นอุณหภูมิของตัวอย่างลดลง ไอน้ำภายในโครงสร้างเกิดการควบแน่นอยู่ภายใน เมื่อนำมาวิเคราะห์ความชื้นจึงเป็นผลให้เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นสุดท้าย สำหรับปัจจัยของความชื้นเริ่มต้นที่มีผลต่อปริมาณความชื้นสุดท้ายในตัวอย่างนั้นพบว่าแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นสูง มีปริมาณความชื้นหลังทอดที่สูงกว่า อาจเนื่องจากแบบจำลองมีความชื้นเริ่มต้นที่ไม่เท่ากัน เมื่อนำมาทอดที่เวลาและอุณหภูมิเดียวกัน ตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าจึงมีปริมาณความชื้นหลังทอดมากกว่า

ปริมาณน้ำมันดูดกลืน (ตารางที่ 4.10-4.12) จากการทดลองพบ อิทธิพลของเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดและความชื้นเริ่มต้นต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืน ($p \leq 0.05$) แต่ไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัย ($p > 0.05$) โดยเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นนานขึ้น ปริมาณน้ำมันดูดกลืนเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากทันทีที่นำแบบจำลองออกจากน้ำมัน แบบจำลองยังคงมีอุณหภูมิภายในเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันทอดและมีน้ำปริมาณหนึ่งในแบบจำลองอยู่ในรูปของไอน้ำ เมื่ออุณหภูมิของแบบจำลองลดลง ไอน้ำภายในจะควบแน่น เป็นผลให้เกิดภาวะสุญญากาศเป็นบางบริเวณขึ้นภายในแบบจำลองขณะที่อากาศภายนอกมีความดันมากกว่า จึงเกิดการดูด (suction) น้ำมันที่ผิวเข้าไป ทำให้ปริมาณน้ำมันดูดกลืนสูงขึ้น (Gamble และคณะ, 1987a) Kawas และ Moreira (2001) สรุปว่า อัตราการดูดกลืนน้ำมันของ tortilla chip ส่วนใหญ่เกิดในช่วงที่ทิ้งไว้ให้เย็นมากกว่าขณะทอด ผลจากการทดลองนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันดูดกลืนลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากที่เวลาทอด 5 นาที ปริมาณน้ำในแบบจำลองความชื้นร้อยละ 40 และ 60 ลดต่ำลงทำให้อัตราการระเหยของไอน้ำต่ำลงด้วย น้ำมันจึงแพร่เข้าสู่ตัวอย่างได้มาก ในขณะที่แบบจำลองความชื้นร้อยละ 80 ที่เวลาทอดเดียวกันยังมีอัตราการระเหยในระดับสูงกว่าอีกทั้งโครงสร้างการเกิดเจลที่สมบูรณ์กว่าอาจช่วยชะลอการสูญเสียความชื้นและป้องกันการแพร่ของน้ำมันเข้าสู่ตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำมันดูดกลืนต่ำกว่าตัวอย่างอื่น

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำมันดูดกลืนจากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า ปริมาณน้ำมันดูดกลืนของทุกแบบจำลองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะ 0-1 นาทีแรกหลังตั้งทิ้งไว้ หลังจากนั้นอัตราการดูดกลืนต่ำลงและหลัง 3 นาที ค่าดังกล่าวมีลักษณะค่อนข้างคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moreira และ Barrufet (1998) ที่พบว่า ปริมาณน้ำมันดูดกลืนในชั้น tortilla chip เมื่อทิ้งให้เย็นหลังทอดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ที่เวลามากกว่า 120 วินาที Aguilera และ Gloria-Hernandez (2000) พบว่าทันทีที่นำมันฝรั่งแช่เยือกแข็งที่ผ่านการทอดถึงสุก ทอดที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 150 วินาที ออกจากน้ำมัน ตัวอย่างมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำมันทอด หลังจากนั้นอุณหภูมิภายในตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วจาก 180°C เป็น 100°C ซึ่งในระยะดังกล่าวนี้เกิด suction pressure ภายในชั้นตัวอย่างสูง หลังเวลาทิ้งให้เย็น 15 วินาที อุณหภูมิตัวอย่างต่ำกว่า 100°C แรงดังกล่าวนี้จึงลดลง ส่งผลให้อัตราการดูดกลืนน้ำมันขณะทิ้งให้เย็นคงที่เมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นนานขึ้น

ปริมาณน้ำมันที่ผิว (ตารางที่ 4.13) จากการทดลองพบ อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอดกับความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองต่อปริมาณน้ำมันที่ผิว ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณน้ำมันที่ผิวของทุกแบบจำลองลดลงเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นเพิ่มขึ้น และที่เวลาทิ้งให้เย็นเท่ากันแบบจำลองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงมีปริมาณน้ำมันที่ผิวสูงกว่าแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นต่ำ ซึ่งลักษณะแบบอย่างปริมาณน้ำมันที่ผิวจะมีความสัมพันธ์ในทางกลับกันกับลักษณะแบบอย่างของปริมาณน้ำมันที่ตรวจพบภายใน (รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.11) ซึ่งผลดังกล่าวนี้ยืนยันว่ามีการดูดกลืนน้ำมันจากผิวภายนอกเข้าภายในโครงสร้างของแบบจำลองขณะทิ้งให้เย็นจริง และแบบจำลองที่ตรวจพบน้ำมันภายในโครงสร้างในปริมาณมากจะมีน้ำมันค้างอยู่ที่ผิวน้อยกว่า ซึ่งสำหรับปรากฏการณ์นี้อธิบายได้เช่นเดียวกับที่ผ่านมาแล้ว

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำมันที่ผิว (รูปที่ 4.12) พบว่าปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 ที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0 นาที สูงกว่าที่ตรวจพบในแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 60 และ 40 ซึ่งปริมาณน้ำมันที่ผิวที่แตกต่างกันอาจเป็นผลจากความขรุขระของผิวดตัวอย่างก็ได้ ซึ่งได้วิเคราะห์ความขรุขระผิวของแบบจำลองเพื่อยืนยันสมมติฐานดังกล่าวนี้

ความขรุขระของผิวแบบจำลอง การวิเคราะห์ความขรุขระของผิวดตัวอย่างด้วยวิธี fractal analysis ค่าที่ได้คือ apparent fractal dimension จากการวิเคราะห์ apparent fractal dimension นำมาสร้างกราฟความถี่สะสมของค่าดังกล่าวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60 และ 80 ในการหาตัวแทนของค่านี้สำหรับแต่ละแบบจำลองได้เลือกพิจารณาที่ร้อยละ 50 ของความถี่สะสมในกราฟความถี่สะสมเนื่องจากที่ร้อยละ 50 ของความถี่สะสมถือเป็นค่าเฉลี่ย

(mean) ของข้อมูล (Kaye, 1989) และค่าเฉลี่ยของ apparent fractal dimension ในแต่ละความขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.14

fractal dimension เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความขรุขระของรูปทรงที่มีความขรุขระ ซึ่ง fractal dimension ของเส้นรอบรูปของวัตถุหรือภาพเงาของวัตถุที่มีความขรุขระจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1-2 เส้นรอบรูปของวัตถุที่มีความขรุขระมากจะมีค่า fractal dimension มากกว่าเส้นรอบรูปของวัตถุที่มีความขรุขระน้อยกว่า สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ค่า fractal dimension เป็นตัวแทนของความขรุขระของเส้นรอบรูปของผิวแบบจำลอง และวิเคราะห์ด้วยวิธี box-counting ซึ่งเป็นการประมาณความยาวของเส้นรอบรูปด้วยช่องตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส และความชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่องตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ครอบคลุมเส้นขอบเขตกับความยาวด้านของช่องตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสในกราฟ log-log คือค่า fractal dimension

เมื่อพิจารณาค่า fractal dimension ของทุกแบบจำลองพบว่า สอดคล้องกับร้อยละความขึ้นเริ่มต้นของแบบจำลอง (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.995) แสดงว่าตัวอย่างที่มีความขึ้นสูงจะส่งผลให้มีผิวที่ขรุขระมากขึ้นเนื่องจากแรงดันจากไอน้ำที่ระเหยขณะทอด ทำให้เกิดการฉีกขาด (disruption) บริเวณผิวของตัวอย่าง (Bouchon และคณะ, 2001) และค่า fractal dimension มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมันที่ผิวเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0 นาที (รูปที่ 4.16) (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9663) ซึ่งปริมาณน้ำมันที่ผิวเมื่อเวลาที่ทิ้งให้เย็น 0 นาที ถือเป็นตัวแทนของปริมาณน้ำมันที่เกาะที่ผิวดตัวอย่าง พบว่า fractal dimension มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณน้ำมันที่ผิว นั่นคือเมื่อแบบจำลองมีผิวที่ขรุขระมาก น้ำมันสามารถเกาะที่ผิวดตัวอย่างได้มากขึ้น ส่งผลให้แบบจำลองนั้นดูดน้ำมันที่ผิวที่มีมากกว่าเข้าไปเมื่อทิ้งไว้ให้เย็น

5.5 ผลของ trehalose ต่อการดูดกลืนน้ำมัน

เนื่องจากน้ำตาลโมเลกุลคู่มีความชอบน้ำและสามารถจับกับน้ำได้ดี จึงคาดว่าน่าจะ สามารถช่วยจับน้ำภายในตัวอย่างอาหาร ซึ่งส่งผลให้ลดการดูดกลืนน้ำมันได้ และ trehalose เป็น น้ำตาลโมเลกุลคู่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α 1- α 1 glucosidic มีคุณสมบัติช่วยรักษาโมเลกุลชีวภาพ รวมทั้งโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก (เช่น วิตามิน) ระหว่างการทำแห้งและนอกจากนี้ น้ำตาลชนิดนี้ยังไม่มี หมู่ reducing จึงไม่น่าจะเกิดการสูญเสียไปโดยผ่านปฏิกิริยาสีน้ำตาลกับหมู่อะมิโนของกรดอะมิโนในโปรตีนด้วย ดังนั้นจึงเลือกน้ำตาลชนิดนี้มาใช้ในงานวิจัย

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของการเติม trehalose ต่อการดูดกลืนน้ำมันในแบบจำลอง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 ทอดที่ 150°C เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที โดยแปรปริมาณเป็น ร้อยละ 0, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ผลแสดงในรูปที่ 4.17-4.18 และตารางที่ 4.15-4.16

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.15) พบ อิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นเริ่มต้นกับเวลา ทอดต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืนและปริมาณความชื้น ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณน้ำมันดูดกลืนเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาทอดเพิ่มขึ้นในทุกความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลอง และแบบจำลองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงมี ปริมาณน้ำมันดูดกลืนสูงกว่าที่เวลาทอดเดียวกัน และปริมาณความชื้นลดลงเมื่อเวลาทอดของทุก แบบจำลองเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่า trehalose ไม่มีผลต่อการลดการดูดกลืนน้ำมันใน แบบจำลองทั้งความชื้นร้อยละ 40 และ 60 ($p > 0.05$) เนื่องจากในการทอดใช้อุณหภูมิสูงถึง 150°C ขณะที่ trehalose มีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 97°C (Roos, 1995) ดังนั้น trehalose จึงไม่สามารถช่วยลดการดูดกลืนน้ำมันได้ และจากผลการทดลองสังเกตเห็นว่าเมื่อปริมาณ trehalose เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่การดูดกลืนน้ำมันเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.17) ในขณะที่ปริมาณ trehalose เพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลง (รูปที่ 4.18) ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อ trehalose ได้รับความร้อนสูงจนถึงจุดหลอมเหลวจะเกิดการหลอม จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการคาราเมลเซชัน (caramelization) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะทำให้มีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำ จึงทำให้ปริมาณความชื้นใน แบบจำลองลดลงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติม (De Man, 1990) และการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาการ คาราเมลเซชันนี้จะส่งผลให้แบบจำลองที่เติม trehalose มีการดูดกลืนน้ำมันมากขึ้น และอีกประเด็นที่ น่าจะเป็นไปได้คือ trehalose ที่เติมลงไปอาจรบกวนการเกิดเจลของแป้งในแบบจำลอง Lund (1984) รายงานว่า น้ำตาลที่มีอยู่ในระบบจะทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งสูงขึ้น และ ร้อยละการเกิด เวลาตีในเซชันลดลง เนื่องจากมีการแย่ง (competition) น้ำในระบบ ระหว่างแป้งกับน้ำตาล สำหรับในงานวิจัยนี้เนื่องจากต้องการศึกษาผลของความชื้นเริ่มต้นของ แบบจำลอง ดังนั้นในการเติม trehalose จึงเป็นการแทนที่แป้ง โดยปริมาณน้ำในการเตรียม ตัวอย่างเท่ากับตัวอย่างที่ไม่เติมที่ระดับความชื้นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อแทนที่ด้วย trehalose มากขึ้น ปริมาณ amylose ที่สามารถเกิดเจลที่กั้นการแพร่ของน้ำมันเมื่อได้รับความร้อนลดลง และปริมาณ trehalose ที่มากขึ้นจะรบกวนการเกิดเจลมากขึ้น การดูดกลืนน้ำมันจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.6 ผลของ HPMC ต่อการดูดกลืนน้ำมัน

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของการเติม HPMC ต่อการดูดกลืนน้ำมันในแบบจำลอง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ทอดที่ 150°C เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 นาที โดยแปรปริมาณเป็น ร้อยละ 0, 0.2, 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การเติม HPMC ร้อยละ 0.25-1

โดยน้ำหนัก สามารถลดการดูดกลืนน้ำมันได้ (Anonymous, 1991) ผลแสดงในรูปที่ 4.19-4.20 และตารางที่ 4.17-4.18

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.17-4.18) ไม่พบ อิทธิพลร่วมของปริมาณ HPMC กับ เวลาทอดต่อปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้น ($p > 0.05$) และเวลาทอดเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่อ ค่าดังกล่าว ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณน้ำมันดูดกลืนเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นลดลงเมื่อเวลาทอด เพิ่มขึ้น HPMC ไม่มีผลในการลดการดูดกลืนน้ำมันในแบบจำลอง เนื่องจากโดยปกติ HPMC สามารถเกิดฟิล์มที่ป้องกันการผ่านของความชื้นและน้ำมันได้ ซึ่งสารละลายของ HPMC จะเกิด เจลที่อุณหภูมิสูงอยู่ในช่วง $50-85^{\circ}\text{C}$ โดยที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดเจล (thermal gel point) โมเลกุลของน้ำมีพลังงานการสั่น (vibrational energy) สูงขึ้น และมากพอที่จะทำให้ความแข็งแรง ของพันธะไฮโดรเจนลดลง เกิดการหมุนส่วนที่เป็น dipolar หันออกมาอยู่รอบ ๆ สายโซ่ของ พอลิเมอร์ โมเลกุลน้ำที่ได้รับพลังงานมีแนวโน้มที่จะหลุดออกจากน้ำที่จัดเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ รอบ ๆ สายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมักจะเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำในพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อส่วนที่ไม่ชอบน้ำใน สายพอลิเมอร์สูญเสียน้ำที่หุ้มไป เกิดอันตรกิริยากันระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำระหว่างสายโซ่ของ พอลิเมอร์ เมื่ออุณหภูมิและเวลาให้ความร้อนสูงขึ้นอันตรกิริยาระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดเจลที่มีความแน่นเนื้อ (firm) ขึ้นเนื่องจากเกิดการ crosslink เพิ่มขึ้น (Coffey, Bell และ Henderson, 1995) นั่นคือน้ำในสารละลาย HPMC มีบทบาทในการเกิดเจลที่ป้องกันการ เคลื่อนย้ายของน้ำมัน ซึ่งในการทดลองเป็นการศึกษาผลของ HPMC ในแบบจำลองที่มีความชื้น เริ่มต้นต่ำ (แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40) และทอดที่อุณหภูมิสูงทำให้น้ำระเหยออกอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีน้ำไม่เพียงพอในการเกิดเจล HPMC และไม่สามารถลดการดูดกลืนน้ำมันใน แบบจำลอง ดังนั้นการใช้ HPMC ในการลดการดูดกลืนน้ำมันในระบบที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ หลัก น้ำในระบบควรมีมากพอที่จะทำให้ไม่เกิดการแย่งกัน โดยอัตราส่วนระหว่างน้ำกับแป้งควร มากกว่า 2:1 หรือตัวอย่างควรมีความชื้นเริ่มต้นมากกว่าร้อยละ 66.67 เพื่อให้มีน้ำเหลือพอที่จะทำให้ พอลิเมอร์ชีวภาพสามารถละลายและเกิดเจลได้เมื่อได้รับความร้อน

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองมีผลต่อปริมาณน้ำมันดูตกคืน โดยเมื่อระดับความชื้นสูงขึ้นปริมาณการดูดน้ำมันลดลง และเวลาทอดที่นานขึ้นมีผลทำให้การดูดคืนน้ำมันเพิ่มขึ้นในตัวอย่างทุกระดับความชื้น

2. ปริมาณความชื้นสูญเสียของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรากที่สองของเวลาทอด และปริมาณความชื้นต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองทุกระดับความชื้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรากที่สองของเวลาทอดและมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเดียวกัน

3. แบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40, 60 และ 70 มีแบบอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียความชื้นกับอัตราการดูดคืนลักษณะเดียวกันคืออัตราการดูดคืนน้ำมันสูงขึ้นเมื่ออัตราการสูญเสียความชื้นลดลง ส่วนในแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น 80 อัตราการดูดคืนน้ำมันมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่ออัตราการสูญเสียความชื้นลดลง

4. เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-1 นาที ปริมาณน้ำมันดูตกคืนของทุกแบบจำลองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันดูตกคืนในแบบจำลองสูงขึ้น

5. ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแบบจำลองมีผลต่อความขรุขระของพื้นผิวแบบจำลอง โดยเมื่อระดับความชื้นสูงขึ้นความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความขรุขระของพื้นผิวแบบจำลองมีผลต่อการเกาะติดน้ำมันไว้ที่ผิวและส่งผลต่อการดูดคืนน้ำมันเข้าภายในหลังทิ้งไว้ให้เย็น

6. การเติม trehalose ร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลในการลดการดูดคืนน้ำมันในแบบจำลองที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 และมีแนวโน้มที่ปริมาณน้ำมันดูตกคืนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณทรีฮาโลสมากขึ้น

7. การเติม HPMC ร้อยละ 0.2-0.6 โดยน้ำหนักในแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 ไม่มีผลในการลดการดูดคืนน้ำมัน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณความชื้น เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด ในแบบจำลองคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น และในแบบจำลองโปรตีน

2. ควรมีการนำผลที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้จริง เช่น หากกระบวนการในการลดปริมาณน้ำมันที่ผิวทันทีที่นำอาหารออกจากน้ำมันทอด

รายการอ้างอิง

เอกสารภาษาไทย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2535. น้ำมันปาล์มสำหรับบริโภค 288-2535.

กรุงเทพมหานคร : กระทรวงอุตสาหกรรม.

เอกสารภาษาอังกฤษ

Aguilera, J.M., and Gloria-Hernandez, H. 2000. Oil absorption during frying of frozen parfried potatoes. J.Food Sci 65(3) : 476-479.

Ang, J.F. 1991. Water retention capacity and viscosity effect of powdered cellulose. J. Food Sci 56(6) : 1682-1684.

Ang, J.F. 1993. Reduction of fat in fried batter coatings with powdered cellulose. J. Am Oil Chem Soc 70(6) : 619-622.

Anonymous. 1991. Fried foods stabilizer keeps moisture in, fat out. Prepared Foods 160(3) : 61.

Anonymous. 2001. Diet and health research needs. Food Technol 55(5) : 189-191.

AOAC. 1995. Official Methods of Analysis. The Association of Official Analytical Chemists. 16thed. Washington D.C.

Baker, R.C., and Scott-Kline, D. 1988. Development of a high protein coating batter using egg albumen. Poultry Sci 67 : 557-564.

Balasubramaniam, V.M., Chinnan, M.S., Mallikarjunan, P., and Phillips, R.D. 1997. The effect of edible film on oil uptake and moisture retention of a deep-fat fried poultry product. J. Food Proc Eng 20 : 17-29.

Barrett, A.M., Normand, M.D., Peleg, M., and Ross, E. 1992. Characterization of the jagged stress-strain relationships of puffed extrudates using the fast fourier transform and fractal analysis. J. Food Sci 57(1) : 227-232, 235.

Barrett, A.H., and Ross, E.W. 1990. Correlation of extrudate infusibility with bulk properties using image analysis. J. Food Sci 55 (5) : 1378-1382.

Blumenthal, M.M. 1991. A new look at the chemistry and physics of deep-fat frying. Food Technol 45(2) : 68-71, 94.

- Bouchon, P., Hollins, P., Pearson, M., Pyle, D.L., and Tobin, M.J. 2001. Oil distribution in fried potatoes monitored by infrared microspectroscopy. J. Food Sci 66 (7) : 918-923.
- Cochran, W.C., and Cox, G.M. 1985. Experimental designs. New York : John Wiley & Sons.
- Coffey, D.G., Bell, D.A., and Henderson, A. 1995. Cellulose and cellulose derivatives. In A.M. Stephen (ed.), Food polysaccharides and their application, pp. 123-153. New York : Marcel Dekker, Inc.
- Colaço, C.A.L.S., and Roser, B. 1994. Trehalose- a multifunctional additive for food preservation. In M. Mathlouthi (ed.), Food packaging and preservation, pp. 123-140. London : Chapman & Hall.
- Da Ponte, D.J.B., Roozen, J.P., and Pilnik, W. 1987. Effects of iota carrageenan, carboxymethyl cellulose and xanthan gum on the stability of formulated minced fish products. Int J. Food Sci Technol 22(2) : 123-133.
- De Man, J.M. 1990. Principles of food chemistry. 2nd ed. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Fellows, P. 2000. Food processing technology. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press.
- Funami, T., Funami, M, Tawada, T., and Nakao, Y. 1999. Decreasing oil uptake of doughnuts during deep-fat frying using curdlan. J. Food Sci 64 (5) : 883-888.
- Gamble, M.H., and Rice, P. 1987. Effect of pre-fry drying of oil uptake and distribution in potato crisp manufacture. Int J. Food Sci Technol 22 : 535-548.
- Gamble, M.H., and Rice, P. 1988. The effect of slice thickness on potato crisp yield and composition. J. Food Eng 8 : 31-46.
- Gamble, M.H., Rice, P., and Selman, J.D. 1987 (a). Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record U.K. tubers. Int J. Food Sci Technol 22(2) : 233-241.
- Gamble, M.H., Rice, P., and Selman, J.D. 1987 (b). Distribution and morphology of oil deposits in some deep fried products. J. Food Sci 52 (6) : 1742-1743, 1745.
- Hagenimana, V., Karuri, E.G., and Oyunga, M.A. 1998. Oil content in fried processed sweetpotato products. J. Food Proc Pres 22 : 123-137.

- Hiçsasmaz, Z., and Clayton, J.T. 1995. Mechanisms involved in the infusion of starch based porous food materials by oil based liquid foods. J. Food Proc Eng 18 : 267-286.
- Holownia, K.I., Chinnan, M.S., Erickson, M.C., and Mallikarjunan, P. 2000. Quality evaluation of edible film-coated chicken strips and frying oils. J. Food Sci 65 (6) : 1087-1090.
- Hoseney, R.C. 1998. Gelatinization phenomena of starch. In M.A. Rao, and R.W. Hartel, (eds.), Phase/state transitions in foods : Chemical, structural, and rheological changes, pp. 95-110. New York : Marcel Dekker, Inc.
- Hoseney, R. C., and Rogers, D.E. 1990. The formation and properties of wheat flour doughs. Crit Rev Food Sci Nutr 29 (2) : 73-93.
- Huse, H.L., Mallikarjunan, P., Chinnan, M.S., Hung, Y.-C., and Phillips, R.D. 1998. Edible coatings for reducing oil uptake in production of akara (deep-fat frying of cowpea paste). J. Food Proc Pres 22 : 155-165.
- Katz, E.E., and Labuza, T.P. 1981. Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products. J. Food Sci 46 (2) : 403-409.
- Kawas, M.L., and Moreira, R.G. 2001. Effect of degree of starch gelatinization on quality attributes of fried tortilla chips. J. Food Sci 66 (2) : 300-306.
- Kaye, B.H. 1989. A random walk through fractal dimensions. New York : VCH Publishers.
- Kester, J.J., and Fennema, O.R. 1986. Edible films and coatings: A review. Food Technol 40(2) : 47-59.
- Khalil, A.H. 1999. Quality of french fried potatoes as influenced by coating with hydrocolloids. Food Chem 66 : 201-208.
- Knight, J.W. 1969. The starch industry. London : Pergamon Press Ltd.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B., and Marinos-Kouris, D. 2001 (a). Viscoelastic behavior of potato strips during deep fat frying. J. Food Eng 48 : 213-218.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B., and Marinos-Kouris, D. 2001 (b). Colour changes during deep fat frying. J. Food Eng 48 : 219-225.

- Lisinska, G. 1973. The starch-sugar transformation in potato tubers during drying and cooling. In G.G. Birch, and L.F. Green (eds), Molecular structure and function of food carbohydrate, pp. 208-215. London : Applied Science Publishers, Ltd.
- Lund, D. 1984. Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization. CRC Crit Rev Food Sci Nutr 20 (4) : 249-273.
- Makinson, J.H, Greenfield, H., Wong, M.L., and Wills, R.B.H. 1987. Fat uptake during deep-fat frying of coated and uncoated foods. J. Food Composition Anal 1 : 93-101.
- Márquez-Ruiz, G., Dobarganes, C. 1996. Short-chain fatty acid formation during thermoxidation and frying. J. Sci Food Agric 70 : 120-126.
- Mittelman, N., Mizrahi, S., and Berk, Z. 1984. Heat and mass transfer in frying. In B.M. McKenna (ed.), Engineering and food, Vol. 1 : Engineering sciences in the food industry, pp. 109-116. New York : Elsevier Applied Science Publishers.
- Mohamed, S., Hamid, N.A., and Hamid, M.A. 1998. Food components affecting the oil absorption and crispness of fried batter. J. Sci Food Agric 78(1) : 39-45.
- Mohamed, S., Lajis, S.M.M., and Hamid, N.A. 1995. Effects of protein from different sources on the characteristics of sponge cakes, rice cakes (apam), doughnuts and frying batters. J. Sci Food Agric 68 : 271-277.
- Moreira, R.G, and Barrufet, M.A. 1998. A new approach to describe oil absorption in fried foods: A simulation study. J. Food Eng 35 : 1-22.
- Moreira, R.G., Castell-Perez, M.E., and Barrufat, M.A. 1999. Deep-fat frying: Fundamentals and applications. Maryland : Aspen Publishers, Inc.
- Moreira, R.G., Palau, J., Sweat, V.E., and Sun, X. 1995. Thermal and physical properties of tortilla chips as a function of frying time. J. Food Proc Pres 19(4) : 175-189.
- Moreira, R.G., Sun, X., and Chen, Y. 1997. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in Deep-fat frying. J. Food Eng 31 : 485-498.
- Murray, B.S., and Liang, H-J. 1999. Enhancement of the foaming properties of protein Dried in the presence of trehalose. J. Agric Food Chem 47 : 4984-4991.
- Nagai, T., and Yano, T. 1990. Fractal structure of deformed potato starch and its sorption characteristics. J Food Sci 55(5) : 1334-1337.

- Nair, C.K.V., Seow, C.C., and Sulebele, G.A. 1996. Effects of frying parameters on physical changes of tapioca chips during deep-fat frying. Int J. Food Sci Technol 31 : 249-256.
- Nawar, W.W. 1985. Lipids. In O.R. Fennema (ed), Food chemistry, 2nd ed., pp. 139-244. New York : Marcel Dekker, Inc.
- Nisperos-Carriedo, M.O. 1994. Edible coatings and films based on polysaccharides. In J.M. Krochta, E.A. Baldwin, and M.O. Nisperos-Carriedo (eds.), Edible coatings and films to improve food quality, pp. 305-335. Pennsylvania : Technomic Publishing Co, Inc.,
- O'Brien, J. 1996. Stability of trehalose, sucrose and glucose to nonenzymatic browning in model systems. J. Food Sci 61(4) : 679-682.
- Olewnik, M., and Kulp, K. 1990. Factors affecting performance characteristics of wheat flour in batters. In K. Kulp, and R. Loewe (eds.), Batters and breadings in food processing, pp. 93-116. Minnesota : American Association of Cereal Chemists, Inc.
- Paul, S., and Mittal, G.S. 1997. Regulating the use of degraded oil/fat in deep-fat/oil Food frying. Crit Rev Food Sci Nutr 37 (7) : 635-662.
- Pedreschi, F., and Aguilera, J.M. 2000. Characterization of food surfaces using scale-sensitive fractal analysis. J. Food Proc Eng 23 : 127-143.
- Peleg, M. 1993. Fractals and foods. Crit Rev Food Sci Nutr 33(2) : 149-165.
- Peleg, M. 1997. Measures of line jaggedness and their use in foods textural evaluation. Crit Rev Food Sci Nutr 37(6) : 491-518.
- Peleg, M., and Normand, M.D. 1985. Characterization of the ruggedness of instant coffee particle shape by natural fractals. J. Food Sci 50 : 829-831.
- Pinthus, E.J., and Saguy, I.S. 1994. Initial interfacial tension and oil uptake by deep-fat Fried foods. J. Food Sci 59 (4) : 804-807, 823.
- Pinthus, E.J., Weinberg, P., and Saguy, I.S. 1993. Criterion for oil uptake during deep-fat frying. J. Food Sci 58 (1) : 204-205, 222.
- Pinthus, E.J., Weinberg, P., and Saguy, I.S. 1995. Oil uptake in deep fat frying as affected by porosity. J. Food Sci 60 (4) : 767-769.

- Potter, N.N., and Hotchkiss, J.H. 1998. Food dehydration and concentration. In N.N. Potter, and J.H. Hotchkiss (eds), Food science, pp. 200-243. Maryland : Aspen Publishers, Inc.
- Pravisani, C.I., and Calvelo, A. 1986. Minimum cooking time for potato strip frying. J. Food Sci 51(3) : 614-617.
- Rahman, S. 1995. Food properties handbook. New York : CRC Press, Inc.
- Rice, P., and Gamble, M.H. 1989. Technical note : Modelling moisture loss during potato slice frying. Int J. Food Sci Tech 24 : 183-187.
- Roos, Y.H. 1995. Phase transitions in foods. California : Academic Press, Inc.
- Rubnov, M., and Saguy, I.S. 1997. Fractal analysis and crust water diffusivity of a restructured potato product during deep-fat frying. J. Food Sci 62(1) : 135-137, 154.
- Saguy, I.S., and Pinthus, E.J. 1995. Oil uptake during deep-fat frying: Factors and mechanism. Food Technol 49(4) : 142-145, 152.
- Sanderson, G.R. 1981. Polysaccharides in foods. Food Technol 35(7) : 50-57, 83.
- Shih, F., and Daigle, K. 1999. Oil uptake properties of fried batters from rice flour. J. Agric Food Chem 47 : 1611-1615.
- Singh, R.P. 1995. Heat and mass transfer in foods during deep-fat frying. Food Technol 49(4) : 134-137.
- Southern, C.R., Chen, X.D., Farid, M.M., Howard, B., and Eyres, L. 2000. Determining internal oil uptake and water content of fried thin potato crisps. Trans Inst Chem Eng, Part C 78 : 119-125.
- Sulaeman, A., Keeler, L., Giraud, D.W., Taylor, S.L., Wehling, R.L., and Driskell, J.A. 2001. Carotenoid content and physicochemical and sensory characteristics of carrot chips deep-fried in different oils at several temperatures. J. Food Sci 66(9) : 1257-1264.
- Takayasu, H. 1990. Fractals in the physical sciences. Chichester : John Wiley & Sons.
- Takeoka, G.R., Full, G.H., and Dao, L.T. 1997. Effect of heating on the characteristics and chemical composition of selected frying oils and fats. J. Agric Food Chem 45 : 3244-3249.

- Tseng, Y-C., Moreira, R., and Sun, X. 1996. Total frying-use time effects on soybean-oil deterioration and on tortilla chip quality. Int J. Food Sci Tech 31 : 287-294.
- Varvil, R.D. 1983. Frying medium. In D.R. Suderman and F.E. Cunningham (eds.), Batter and breading, pp. 95-105. Westport, Connecticut : AVI Publishing Co, Inc.
- Warner, K., Orr, P., Parrott, L., and Glynn, M. 1994. Effects of frying oil composition on potato chip stability. J. Am Oil Chem Soc 71(10) : 1117-1121.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์และวิธีคำนวณ

ก. 1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

ตามวิธี AOAC (1995)

อุปกรณ์

ตู้อบลมร้อน

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 5 g ใส่ในภาชนะอลูมิเนียมซึ่งอบแห้ง และชั่งน้ำหนักไว้แล้ว
2. นำตัวอย่างเข้าอบแห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนัก

คงที่

3. นำมาทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณความชื้นโดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{[\text{น้ำหนักก่อนอบแห้ง (g)} - \text{น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)}] \times 100}{\text{น้ำหนักก่อนอบแห้ง (g)}}$$

ก. 2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

ตามวิธี AOAC (1995)

อุปกรณ์

ชุดวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

สารเคมี

1. สารละลายกรด sulfuric เข้มข้น
2. สารละลายกรด sulfuric ความเข้มข้น 0.1 N
3. สารละลาย sodium hydroxide ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร
4. สารละลายกรด boric ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร
5. catalyst (ส่วนผสมของ potassium sulphate 1.8 g และ cooper sulphate 0.32 g)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 2 g ใส่ลงในขวดย่อย
2. เติม catalyst
3. เติมสารละลายกรด sulfuric เข้มข้น 30 ml
4. ย่อยตัวอย่างด้วยเครื่อง Kjeldatherm จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน
5. กลับตัวอย่างที่ย่อยได้ด้วยเครื่อง Vapodest I โดยใช้สารละลาย sodium hydroxide เป็นตัวทำปฏิกิริยา และเก็บสารที่กลับได้ในสารละลายกรด boric ซึ่งเติม methyl red-methylene blue เพื่อใช้เป็น indicator 2-3 หยด
6. ไตเตรทสารละลายที่กลับได้ด้วยสารละลายกรด sulfuric ความเข้มข้น 0.1 N
คำนวณปริมาณโปรตีนโดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)} = \frac{A \times B \times 5.7 \times 1.4}{C}$$

A = ความเข้มข้นของกรด sulfuric ที่ใช้ไตเตรท (ml)

B = ปริมาตรกรด sulfuric ที่ใช้ไตเตรท (ml)

C = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ (g)

ก. 3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

ตามวิธี AOAC (1995)

อุปกรณ์

1. ชุดวิเคราะห์ปริมาณไขมัน
2. ตู้อบ

สารเคมี

Petroleum ether

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างแห้ง 2 g ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1
2. ใส่ตัวอย่างใน thimble ลงในชุดวิเคราะห์ปริมาณไขมัน
3. ต่อขวดสกัดที่แห้งและทราบน้ำหนักที่แน่นอนกับชุดวิเคราะห์ปริมาณไขมัน
4. เติม petroleum ether ซึ่งใช้เป็นสารสกัด 200 ml ลงในชุดวิเคราะห์ไขมันผ่าน thimble ลงมา

5. ให้ความร้อนจน petroleum ether เดือดและควบแน่นหยดใส่ตัวอย่างในอัตรา 150 หยดต่อนาที
6. สกัดไขมันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
7. ระเหย petroleum ether ในขวดสกัดไขมัน และอบขวดที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาทีหรือจนน้ำหนักคงที่
8. ทำให้เย็นใน desiccator และชั่งน้ำหนักขวดสกัด คำนวณไขมันโดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

ก. 4 การวิเคราะห์เถ้า

ตามวิธี AOAC (1995)

อุปกรณ์

1. เตาเผา
2. เตาให้ความร้อน

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 5 g ใส่ใน crucible ที่แห้งสนิทและทราบน้ำหนักที่แน่นอน นำไปเผาจนกระทั่งตัวอย่างไม่มีควัน
2. นำตัวอย่างไปเผาต่อใน muffle furnace ที่ 500-550 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งได้เถ้าที่มีสีขาว
3. ทำให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณเถ้าโดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)} = \frac{\text{ปริมาณเถ้า (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

ก. 5 การวัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer

อุปกรณ์

Brookfield Viscometer

วิธีการทดลอง

1. ใส่ตัวอย่างในบีกเกอร์ขนาด 500 ml ตี spindle เข้ากับแกนของเครื่องวัด จุ่มลงในตัวอย่างโดยให้ร่องของ spindle อยู่ในระดับเดียวกับผิวหน้าของตัวอย่าง
2. เลือกชนิดของ spindle ปรับระดับความเร็วรอบ
3. เปิด switch ให้ spindle หมุนเป็นเวลา 10 วินาที แล้วอ่านค่าตัวเลขบนหน้าปัทม์

ก. 6 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ตามวิธี AOAC (1995)

สารเคมี

1. ethyl alcohol
2. phenolphthalein
3. สารละลาย sodium hydroxide ความเข้มข้น 0.1 N

วิธีทดลอง

1. ใส่ alcohol 50 ml ในขวดรูปชมพู่ขนาด 150 ml ที่แห้งและสะอาด
2. เติมน้ำมันที่ต้องการทดสอบ 2-3 หยด และ phenolphthalein 2 ml ในขวดรูปชมพู่ นำไปอุ่นในน้ำร้อนอุณหภูมิ 60-65 °C จนสารละลายในขวดอุ่น
3. เติมสารละลาย sodium hydroxide ความเข้มข้น 0.1 N มากเกินพอจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูคงที่
4. เติมน้ำมัน 56.4 g ในขวดรูปชมพู่ ไตเตรตด้วยสารละลาย sodium hydroxide ความเข้มข้น 0.1 N ในขณะที่ไตเตรตสารละลายในขวดต้องอุ่น คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระโดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณกรดไขมันอิสระ (ร้อยละ)} = A \times 0.05$$

A = ปริมาตรสารละลาย sodium hydroxide ที่ใช้ไตเตรต (ml)

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการหาพื้นที่รูพรุน

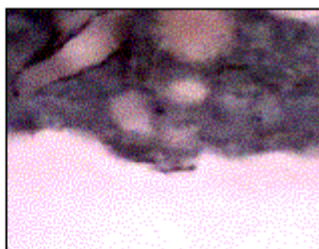
1. เปลี่ยนภาพถ่าย SEM ที่ได้จากภาพสีเป็นภาพขาวดำ ปรับแสงของภาพให้มีความแตกต่างระหว่างสีขาวและสีดำ (ส่วนที่เป็นรูพรุน) อย่างชัดเจนด้วยโปรแกรม Photoshop และเปลี่ยนนามสกุลเป็น .tif
2. calibrate หน่วยความยาวที่ใช้ในการวัดในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป PC_image โดยในงานวิจัยนี้ใช้หน่วยคือไมครอน
3. หาพื้นที่ส่วนที่เป็นรูพรุนในภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป PC_image โดยใส่ binary layer บนส่วนที่เป็นรูพรุน(ซึ่งจะเป็นบริเวณที่มีสีดำ) ด้วยคำสั่ง Threshold Image to Binary ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณพื้นที่ที่ถูกเลือก โดยกำหนดให้อ่านค่าพื้นที่ที่มากกว่า $100 \mu\text{m}^2$ เพื่อลดสิ่งรบกวน (noise) ที่อาจเกิดขึ้น
4. คำนวณร้อยละพื้นที่รูพรุน โดยใช้คำสั่ง Measure Object โดยร้อยละพื้นที่รูพรุนคำนวณจาก

$$\text{ร้อยละพื้นที่รูพรุน} = \frac{\text{พื้นที่รูพรุน} \times 100}{\text{พื้นที่ทั้งหมด}}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการวิเคราะห์ fractal dimension



ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล
กำลังขยาย 60 เท่า

↓
Photoshop



ภาพที่เปลี่ยนเป็นสีขาว-ดำด้วย
โปรแกรม Photoshop

↓
PC_image



เปลี่ยนจากภาพเป็นเส้นรอบรูป
ของแบบจำลองด้วยโปรแกรม
PC_image

↓
Photoshop



ลบส่วนที่ไม่ต้องการด้วย
โปรแกรม Photoshop



วิเคราะห์ fractal dimension ด้วยโปรแกรม Fractal

ภาคผนวก ง

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ ง.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำมันที่ผิวของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที และเวลาทิ้งให้เย็น 0-6 นาที

SOV	df	MS
ความชื้นเริ่มต้น (A)	2	81.701*
เวลาทิ้งให้เย็นหลังทอด (B)	3	497.818*
AB	6	33.838*
error	12	9.587

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 อัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดกลืนน้ำมันเฉลี่ยของแบบจำลอง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	เวลาทอด (นาที)	อัตราการสูญเสีย ความชื้น (g/min)	อัตราการดูดกลืนน้ำมัน (g/min)
40	2	13.62	3.70
	4	1.09	12.14
	6	0.375	13.11
60	2	21.94	3.62
	4	10.16	6.36
	6	4.5	11.26
70	2	45.80	3.45
	4	13.35	5.14
	6	1.50	7.53
80	2	77.97	0.94
	4	37.98	1.25
	6	14.77	1.205

ตารางที่ ง.3 พื้นที่รูปวงของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	เวลาทอด (นาที)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
40	1	20.65 ± 3.36
	3	30.30 ± 0.28
	5	30.33 ± 1.29
	7	30.69 ± 2.49
60	1	18.17 ± 6.07
	3	33.40 ± 1.24
	5	39.50 ± 1.02
	7	39.37 ± 1.81
70	1	21.98 ± 4.26
	3	29.22 ± 1.63
	5	33.55 ± 0.00
	7	38.21 ± 2.35
80	1	13.26 ± 3.41
	3	16.28 ± 7.06
	5	17.76 ± 6.43
	7	17.22 ± 6.00

ตารางที่ ง.4 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันดูดกลิ่นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5 นาที เวลาที่ทิ้งให้เย็นหลังทอด 0-6 นาที

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	เวลาที่ทิ้งให้เย็น หลังทอด (นาที)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ปริมาณน้ำมันดูดกลิ่น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
40	0	3.86 ± 0.95	52.13 ± 0.57
	1	3.54 ± 0.69	62.38 ± 4.04
	3	3.59 ± 0.48	65.25 ± 2.20
	6	3.62 ± 0.24	65.04 ± 11.44
60	0	18.13 ± 7.82	43.12 ± 0.25
	1	17.54 ± 9.70	61.09 ± 3.39
	3	18.43 ± 6.76	64.86 ± 2.76
	6	17.26 ± 5.45	65.19 ± 6.18
80	0	41.93 ± 15.09	16.08 ± 0.21
	1	33.97 ± 10.28	35.68 ± 2.00
	3	37.79 ± 17.05	41.02 ± 0.30
	6	35.46 ± 6.73	42.44 ± 7.73

ตารางที่ ง.5 ความถี่และร้อยละความถี่สะสมของค่า apparent fractal dimension ของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40-80

apparent fractal dimension	แบบจำลองความชื้นเริ่มต้น					
	ร้อยละ 40		ร้อยละ 60		ร้อยละ 80	
	ความถี่ (จำนวน)	ร้อยละ ความถี่ สะสม	ความถี่ (จำนวน)	ร้อยละ ความถี่ สะสม	ความถี่ (จำนวน)	ร้อยละ ความถี่ สะสม
1.04-1.06	1	5	0	0	0	0
1.06-1.08	3	20	3	15	0	0
1.08-1.10	6	50	2	25	0	0
1.10-1.12	7	85	3	40	4	20
1.12-1.14	3	100	8	80	3	35
1.14-1.16	0	100	3	95	9	80
1.16-1.18	0	100	1	100	4	100

ตารางที่ ง.6 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 และ 60 โดยเติม trehalose ร้อยละ 0-5 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	เวลาทอด (นาที)	ปริมาณ trehalose (ร้อยละ)	ปริมาณน้ำมันดูดกลืน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	
40	1	0	34.80 ± 1.59	34.54 ± 1.90	
		3	32.40 ± 2.05	30.49 ± 0.66	
		5	28.32 ± 1.01	24.74 ± 1.47	
	3	0	48.73 ± 8.48	3.86 ± 0.30	
		3	50.84 ± 8.27	3.03 ± 0.80	
		5	53.20 ± 0.32	2.08 ± 0.01	
	5	0	65.67 ± 2.83	2.06 ± 0.02	
		3	71.20 ± 2.10	1.45 ± 0.05	
		5	85.16 ± 11.20	1.50 ± 0.24	
	7	0	77.49 ± 5.54	1.32 ± 0.10	
		3	89.73 ± 8.92	1.06 ± 0.05	
		5	89.27 ± 14.72	1.07 ± 0.04	
	60	1	0	42.90 ± 1.95	122.83 ± 16.07
			3	43.05 ± 0.45	102.28 ± 19.24
			5	46.41 ± 1.51	91.53 ± 13.46
3		0	66.09 ± 4.78	29.90 ± 4.40	
		3	72.46 ± 1.48	16.33 ± 5.33	
		5	73.47 ± 3.91	16.91 ± 1.08	
5		0	72.16 ± 3.25	6.10 ± 0.26	
		3	76.48 ± 5.84	5.48 ± 0.31	
		5	80.15 ± 4.87	3.70 ± 2.22	
7		0	83.54 ± 4.62	2.11 ± 0.42	
		3	81.05 ± 5.30	1.70 ± 0.48	
		5	106.06 ± 10.64	1.09 ± 0.63	

ตารางที่ ง.7 ปริมาณน้ำมันดูดกลืนและความชื้นของแบบจำลองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยเติม HPMC ร้อยละ 0-0.6 ทอดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1-7 นาที

ปริมาณ HPMC (ร้อยละ)	เวลาทอด (นาที)	ปริมาณน้ำมันดูดกลืน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
0	1	34.80 ± 1.59	34.58 ± 1.90
	3	48.73 ± 8.48	3.86 ± 0.30
	5	65.67 ± 2.83	2.07 ± 0.02
	7	77.49 ± 5.54	1.32 ± 0.10
0.2	1	32.21 ± 3.09	34.29 ± 3.19
	3	45.81 ± 2.38	5.56 ± 1.76
	5	65.10 ± 2.97	2.24 ± 0.16
	7	80.03 ± 2.71	1.26 ± 0.04
0.4	1	37.21 ± 5.48	32.65 ± 1.05
	3	44.55 ± 4.62	7.85 ± 1.42
	5	64.26 ± 2.19	2.80 ± 1.15
	7	81.71 ± 7.07	1.29 ± 0.07
0.6	1	35.14 ± 6.81	34.92 ± 4.01
	3	48.02 ± 0.06	6.33 ± 1.82
	5	72.15 ± 1.05	2.19 ± 0.32
	7	83.98 ± 2.44	0.89 ± 0.02

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปรีชา ถนัดอักษร เกิดวันที่ 1 มกราคม 2519 ที่จังหวัดสงขลา ได้รับปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เมื่อปีการศึกษา 2539



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย