

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประเมินการเสียรูปของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง
ด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ

EVALUATION OF AGAR GEL DEFORMATION DURING DRYING
BY IMAGE ANALYSIS



T139716



ณัฐวุฒิ

เบญจพร

ปกรณ์

พงศธร

สุขวัฒน์

ตังนอบน้อม

อ่อนสำลี

ทองนุช

ส.พ.

๑๖๖๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....139716
วัน,เดือน,ปี... 16 ๗๕๗ 2558

b. 1272483 X
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EVALUATION OF AGAR GEL DEFORMATION DURING DRYING
BY IMAGE ANALYSIS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557


ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประเมินการเสียรูปของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ
EVALUATION OF AGAR GEL DEFORMATION DURING DRYING BY IMAGE ANALYSIS

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------|-------------|-----------------------|
| 1 นายณัฐวุฒิ | สุขพัฒน์ | รหัสนักศึกษา 54010459 |
| 2 นางสาวเบญจพร | ตั้งนอบน้อม | รหัสนักศึกษา 54010742 |
| 3 นายปกรณ์ | อ่อนสำลี | รหัสนักศึกษา 54010750 |
| 4 นายพงศธร | ทองนุช | รหัสนักศึกษา 54010845 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.มธุรดา จิโนรส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์เรื่อง	การประเมินการเสีรรูปของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ		
นักศึกษา	นายณัฐวุฒิ	สุขพัฒน์	รหัสนักศึกษา 54010459
	นางสาวเบญจพร	ตั้งนอบน้อม	รหัสนักศึกษา 54010742
	นายปกรณ์	อ่อนสำลี	รหัสนักศึกษา 54010750
	นายพงศธร	ทองนุช	รหัสนักศึกษา 54010845
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
หลักสูตร	วิศวกรรมอาหาร		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ดร.มธุรดา	จิโนรส	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะการเสีรรูปของอาหารในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน รวมทั้งพัฒนาและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพเพื่อการวิเคราะห์การเสีรรูปของอาหาร ทั้งนี้เนื่องจากการเสีรรูปของอาหารเป็นสิ่งที่ควบคุมได้ยากและส่งผลเป็นอย่างมากต่อการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การเสีรรูปด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพซึ่งสามารถทำได้โดยไม่สัมผัสกับอาหาร อีกทั้งเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ในการติดตามและควบคุมกระบวนการจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง ในการทดลองเลือกใช้ Agar gel ทรงลูกบาศก์ เป็นตัวแทนของวัสดุอาหารในกระบวนการอบแห้ง ศึกษาอิทธิพลของปริมาณของแข็งในอาหารต่อการเสีรรูป โดยเติมน้ำตาลลงใน Agar gel ในอัตราส่วน 0 %, 20 % และ 40 % (โดยน้ำหนัก) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C, 70 °C และ 90 °C นอกจากนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของการคลายความเครียด (Stress relaxation) ต่อการเสีรรูปของอาหาร และแบ่งภาวะการอบแห้งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบวางกับที่, แบบหมุน และแบบพลิก เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพพบว่าการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เป็นตัวบ่งชี้การหดตัว เนื่องจากสัมพันธ์กับการหดตัวที่คำนวณได้จากวิธีมาตรฐาน (liquid displacement method) มากที่สุด ส่วนค่ามิติแฟร็กทัลสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ จากการทดลองพบว่าการพลิกขึ้นตัวอย่างช่วยให้อัตราการแห้งเร็วขึ้นแล้วยังช่วยลดการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าของแข็งในอาหารมีส่วนช่วยให้อาหารเกิดการเสีรรูปน้อยลง

Thesis	Evaluation of Agar Gel Deformation durring Drying by Image Analysis		
Student	Mr. Nattawut	Sukkapat	Student ID. 54010459
	Miss Benjaporn	Tangnobnom	Student ID. 54010742
	Mr. Pakorn	Onsumlee	Student ID. 54010750
	Mr. Pongsatorn	Thongnuch	Student ID. 54010845
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Food Engineering		
Academic Year	2014		
Thesis Advisor	Dr. Maturada Jinorose		

ABSTRACT

This thesis is to study the deformation of food during drying process using hot air, and development of image analysis technic for food deformation analyze. Since during drying process, deformation of food can be difficult to control and may affect the consume acceptance. This application can be done without food being touched and it is a non-destructive detection. In monitoring and contorl processing as an alternative, that is interesting. In this experiment the cube-shape was agar gel represented the food in drying process. Study influence of solid content of Agar Gel by added sugar in to agar gel in ratio of 0 %, 20 % and 40 % (by weight) and dried at 50 °C, 70 °C and 90 °C. In addition to study influence of Stress relaxation on deformation of food and divided the sample in to 3 mode including Static, Rotating, and Flipping. The analysis found that projected area make it best suit for shrinkage indicator and related well with the standrard volume measurment method (liquid displacement method), as for the fractal dimension it can be used as an indicator for shape changes. The experiment found that flipping the sample lead to faster drying less volumetric shrinkage and less non-uniform deformation. In addition to found that the solids content in food also help decreasing food deformation.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.มธุรดา จิโนรส ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการดำเนินงาน ตลอดจนช่วยชี้แนะแก้ไขในสิ่งที่บกพร่อง และให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาในการทำโครงการ ซึ่งทางคณะผู้ทดลองต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีทั้งในด้านการศึกษา คุณธรรม และการใช้ชีวิต ตลอดจนให้การสนับสนุนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยดูแลและให้กำลังใจในการศึกษา และสนับสนุนโอกาสด้านการศึกษาตลอด 4 ปี อย่างเต็มที่

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญานิพนธ์ นางสาวอัญญนันท์ เสถียรกิจอำไพ ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทำโครงการ

และขอขอบคุณ นางสาววรุณี จำเริญพูน และนายอรรถพร ธนาวินชกุล ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำโครงการนี้จนสำเร็จ รวมถึงเพื่อน ๆ วิศวกรรมอาหารรุ่นที่ 16

นายณัฐวุฒิ	สุขพัฒน์
นางสาวเบญจพร	ตั้งอบน้อม
นายปกรณ์	อ่อนสำลี
นายพงศธร	ทองนุช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กระบวนการอบแห้ง.....	3
2.1.1 กลไกการอบแห้ง.....	4
2.1.2 อัตราการอบแห้ง.....	4
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง	6
2.2 การเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างการอบแห้ง.....	6
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารระหว่างการอบแห้ง.....	7
2.2.2 การเสีรูปร่างของอาหารระหว่างการอบแห้ง.....	7
2.3 การวิเคราะห์การเสีรูปร่างด้วยวิธีมาตรฐาน.....	8
2.3.1 การแทนที่ด้วยของแข็ง (Glass beads displacement method)	8
2.3.2 การแทนที่ด้วยของเหลว (Solvent displacement method).....	9
2.3.3 การแทนที่ของเหลวในขวดพิโคโนมิเตอร์ (Liquid pycnometry).....	10
2.3.4 การแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว (liquid displacement method).....	10
2.4 เทคนิควิเคราะห์ภาพ	11
2.4.1 การได้มาซึ่งภาพ (Image acquisition)	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 การประมวลผลภาพ (Image processing)	12
2.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis).....	13
2.4.4 ข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากภาพ.....	13
2.5 Agar	15
2.5.1 โครงสร้างและสมบัติของ Agar.....	15
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลของ Agar	17
2.5.3 การประยุกต์ใช้ Agar ในอุตสาหกรรม.....	18
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	19
3.1 อุปกรณ์	19
3.2 การเตรียมชิ้นตัวอย่างการทดลอง.....	21
3.3 วิธีการทดลอง	21
3.3.1 การทดลองขั้นที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทาง กายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง.....	21
3.3.2 การทดลองขั้นที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของของแข็ง (น้ำตาล) ในอาหารต่อการ เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง	22
3.3.3 การทดลองขั้นที่ 3 อิทธิพลของการคลายความเครียด (Stress relaxation) ต่อ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการ อบแห้ง.....	22
3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของชิ้นตัวอย่าง	23
3.5 การวิเคราะห์หาปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง.....	24
3.6 การวิเคราะห์หาร้อยละการหดตัว.....	24
3.7 การวิเคราะห์ภาพ.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	26
4.1 การเลือกค่าตัวแปรที่ใช้บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ระหว่าง กระบวนการอบแห้ง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง.....	28
4.3 อิทธิพลของของแข็ง (น้ำตาล) ในอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง.....	32
4.4 อิทธิพลของการคลายความเครียด (Stress relaxation) ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	41
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาเพิ่มเติม	42
บรรณานุกรม.....	43
ภาคผนวก.....	46
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	47
ภาคผนวก ข ชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 วิธีพลิก Agar gel.....	23
ก.1 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบวางกับที่ (Static) ในระหว่างกระบวนการ อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	48
ก.2 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบหมุน (Rotating) ในระหว่างกระบวนการ อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	49
ก.3 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบพลิก (Flipping) ในระหว่างกระบวนการ อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	50
ก.4 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบวางกับที่ (Static) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	51
ก.5 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบหมุน (Rotating) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	52
ก.6 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบพลิก (Flipping) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	53
ก.7 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบวางกับที่ (Static) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	54
ก.8 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบหมุน (Rotating) ใน ระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	55
ก.9 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบพลิก (Flipping) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	56
ก.10 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบวางกับที่ (Static) ในระหว่างกระบวนการ อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	57
ก.11 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบหมุน (Rotating) ในระหว่างกระบวนการ อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	58
ก.12 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบพลิก (Flipping) ในระหว่างกระบวนการ อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	59
ก.13 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบวางกับที่ (Static) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	60
ก.14 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบหมุน (Rotating) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.15 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบพลิก (Flipping) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	62
ก.16 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบวางกับที่ (Static) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	63
ก.17 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบหมุน (Rotating) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	64
ก.18 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบพลิก (Flipping) ในระหว่าง กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	65



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอัตราการอบแห้งระหว่างการอบแห้ง.....	5
2.2 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ด้วยของแข็ง.....	9
2.3 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ด้วยของเหลว.....	9
2.4 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ด้วยของเหลวในขวดพิโคโนมิเตอร์.....	10
2.5 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว	11
2.6 การแบ่งมาตราส่วน.....	14
2.7 ความสัมพันธ์ของจำนวนของตารางที่มีข้อมูลกับขนาดของมาตรวัด	14
2.8 โครงสร้างของ Agarose และ Agarpectin	16
2.9 การเกิดเจลของ Agar.....	16
3.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ.....	19
3.2 อุปกรณ์การอบแห้ง.....	20
3.3 การเตรียม Agar gel.....	21
3.4 การหาปริมาตรโดยวิธีการแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว	24
4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกบที่ (Static).....	26
4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกบที่ (Static).....	27
4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ต่อการหดตัวของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกบที่ (Static).....	28
4.4 รูปร่างของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	28
4.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกบที่ (Static)	29
4.6 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกบที่ (Static).....	30
4.7 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกบที่ (Static).....	31
4.8 ค่ามิติแฟร็คทัลที่เปลี่ยนแปลงต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกบที่ (Static).....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, <i>RTY</i>) ต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกับที่ (Static).....	32
4.10 รูปร่างของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่าง ๆ หลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	32
4.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static).....	33
4.12 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static).....	34
4.13 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static).....	34
4.14 ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, <i>RTY</i>) ต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static).....	35
4.15 ค่ามิติแฟร็กทัลที่เปลี่ยนแปลงต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static).....	36
4.16 รูปร่างของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลและภาวะการอบต่าง ๆ หลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	36
4.17 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ	37
4.18 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ	38
4.19 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ค่ามิติแฟร็กทัลที่เปลี่ยนแปลงต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	39
4.21 ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, <i>RTY</i>) ต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	40



รายการคำย่อ

$1/s$	มาตราส่วน (scal)
A_{ef}	พื้นที่วงรีที่เล็กที่สุดที่สามารถครอบคลุมสี่เหลี่ยมได้พอดี, จุดภาพ ²
FD	มิติแฟร็กทัล (Fractal Dimension)
G	น้ำหนักลอยตัว, กิโลกรัม
H_b	ความสูงของสี่เหลี่ยมที่วัดได้จากภาพ, จุดภาพ
M	น้ำหนักของชิ้นตัวอย่าง, กิโลกรัม
M_b	น้ำหนักของภาชนะรวมกับทราย, กิโลกรัม
M_f	น้ำหนักของภาชนะ (flask), กิโลกรัม
M_{f+l}	น้ำหนักรวมของภาชนะ และของเหลว, กิโลกรัม
M_{t+b}	น้ำหนักรวมของภาชนะ ชิ้นตัวอย่าง และทราย, กิโลกรัม
M_{t+l}	น้ำหนักรวมของภาชนะ ชิ้นตัวอย่าง และของเหลว, กิโลกรัม
m_i	มวลของชิ้นตัวอย่างก่อนอบ, กิโลกรัม
m_s	มวลแห้งของชิ้นตัวอย่าง, กิโลกรัม
$n()$	จำนวนตารางข้อมูล (Number of box)
RTY	ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity)
V	ปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง, ลูกบาศก์เมตร
V_f	ปริมาตรของภาชนะ, ลูกบาศก์เมตร
V_i	ปริมาตรเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่าง, ลูกบาศก์เมตร
W_b	ความกว้างของสี่เหลี่ยมที่วัดได้จากภาพ, จุดภาพ
X_c	ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content, CMC)
X^*	ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC)
ρ_b	ความหนาแน่นของทราย, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลว, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นหลัก ผลผลิตทางการเกษตรที่ผลิตได้เมื่อจำหน่ายไม่หมดจะเกิดการเน่าเสีย กระบวนการอบแห้งจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการถนอมอาหาร โดยมีเป้าหมายในการอบแห้งคือ การลดปริมาณน้ำในอาหาร เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และลดการเสื่อมเสียของอาหารจากปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ รวมไปถึงการลดน้ำหนักและปริมาตรเพื่อความสะดวกในการขนส่ง

การอบแห้งนั้นอาศัยกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนด้วยการพา การนำ และการแผ่รังสีไปยังอาหาร ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลและความร้อน โดยมวลส่วนใหญ่ที่ถ่ายเทคือน้ำ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในอาหารขึ้น เช่น การหดตัว Aprajeeta และคณะ (2014) พบว่าในช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้ง การหดตัวและความพรุนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนการเปลี่ยนแปลงสีนั้น Serghei (2010) ซึ่งศึกษาอิทธิพลของช่วงอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในมะเขือเทศ พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ทำให้มะเขือเทศไม่เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ และได้สีที่ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส จากการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของอาหารดังกล่าว จึงจำเป็นต้องมีการสังเกตและประเมินการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตเพื่อควบคุมระบบหรือคุณภาพของอาหารอบแห้ง

การประเมินลักษณะปรากฏของอาหารระหว่างการอบแห้งนั้น ส่วนใหญ่มักทำโดยใช้สายตาของผู้ตรวจสอบซึ่งเป็นการตรวจสอบแบบจิตวิสัย (Subjective) และขึ้นอยู่กับความชำนาญของแต่ละบุคคล จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ อีกทั้งไม่สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติภายในของอาหารได้ ซึ่งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถช่วยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของอาหารได้ ทว่าวิธีเหล่านี้มีความซับซ้อนและต้องทำในห้องปฏิบัติการ เช่น optical microscope และ scanning electron microscope (SEM) (สั๊กมน, 2555)

การวิเคราะห์ลักษณะปรากฏของอาหารโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะสามารถตรวจสอบสมบัติเฉพาะได้และเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing) เช่น Briones และคณะ (2006) ซึ่งศึกษาพื้นผิวของช็อคโกแลต ด้วยวิธี grey level co-occurrence matrix พบว่า สามารถตรวจสอบเนื้อสัมผัสได้รวดเร็วและแม่นยำ ใกล้เคียงกับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) ด้วยผู้เชี่ยวชาญ, Leiva-Valenzuela และคณะ (2013) ได้ประยุกต์ใช้ hyperspectral imaging technique มาใช้ในการคัดแยกขนาดของบลูเบอร์รี่ พบว่าสามารถคัดแยกบลูเบอร์รี่ได้ดี และ Antonelli และคณะ (2004) ได้นำเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ภาพ multivariate image ผสานกับ wavelet-based เพื่อนำมาตัดแยกสีในกระบวนการผลิตของซอสโหระพา (pesto sauce) พบว่าสามารถตัดแยกได้ดี มีประสิทธิภาพในการตัดแยกถึง 97 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพเพื่อศึกษาลักษณะการเสีรูปร่างของอาหารที่เสีรูปร่างได้ง่ายในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Tray drying) เพื่อให้เข้าใจลักษณะการเสีรูปร่างของอาหารและสามารถนำไปควบคุมการออกแบบกระบวนการและระบบการอบแห้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะการเสีรูปร่างของอาหารในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน

1.2.2 เพื่อพัฒนาและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพในการวิเคราะห์การเสีรูปร่างของอาหาร

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาลักษณะการเสีรูปร่างของอาหารที่มีลักษณะการเสีรูปร่างได้ง่ายในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน โดยตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ Agar gel รวมถึงศึกษาอิทธิพลของปริมาณของแข็งต่อลักษณะการเสีรูปร่างด้วยการเติมน้ำตาล (Sucrose)

1.3.2 ศึกษาลักษณะการเสีรูปร่างของอาหารในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน โดยทำการอบในหลายช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ 50 องศาเซลเซียส, 70 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที \pm 0.1 เมตรต่อวินาที

1.3.3 ศึกษาและพัฒนาระบบในการวิเคราะห์การเสีรูปร่างของอาหารระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ

1.3.4 เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์การเสีรูปร่างของอาหารด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพกับวิธีมาตรฐาน ได้แก่ การแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว (liquid displacement method)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจลักษณะการเสีรูปร่างของอาหารในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน

1.4.2 ได้วิธีประเมินการเสีรูปร่างของอาหารระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพ และสามารถนำวิธีที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการติดตามและควบคุมระบบการอบแห้งอาหารได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการอบแห้ง

ในอดีตกาลผู้คนรู้จักที่จะนำอาหารมาทำแห้ง (Dehydration) เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานหลายฤดูกาล โดยนำอาหารเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการทำแห้ง อาจเป็นวิธีการแบบง่าย ๆ เช่น การตากแดดด้วยแสงอาทิตย์ เป็นต้น ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการทำแห้งจนแผ่ขยายเป็นอุตสาหกรรมมากมายทั่วโลก (Barbosa-Cánovas และ Vega-Mercado, 1996) เช่น ในปี 2557 อาหารแปรรูปแห้ง (Dried processed food) ได้รับความนิยมมากเป็นลำดับที่ 2 ของการบริโภคอาหารแปรรูปภายในประเทศไทย ซึ่งมีมูลค่าถึง 61,933.2 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2557)

การอบแห้ง (Drying) เป็นวิธีหนึ่งในการทำแห้ง (Dehydration) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อน ด้วยการนำความร้อน การพาความร้อน หรือ การแผ่รังสีความร้อนไปยังอาหารที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งความร้อนจะทำให้น้ำในอาหารเกิดการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวกลายเป็นไอที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นอาหาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณน้ำในอาหาร การอบแห้งจึงนิยมใช้กับผักและผลไม้หรืออาหารที่มีปริมาณน้ำมาก โดยมีเป้าหมายเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการลดปริมาณน้ำในอาหารทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และลดการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ รวมไปถึงการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและจัดเก็บผลิตภัณฑ์ (สั๊กมน, 2555)

กระบวนการอบแห้งนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น การอบแห้งแบบลมร้อน (Tray drying) การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) และการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำยวดยิ่ง (Superheated steam) เป็นต้น แต่วิธีที่นิยมมากที่สุด คือ วิธีอบแห้งแบบลมร้อน (Tray drying)

การอบแห้งแบบลมร้อน (Tray drying) จะใช้กับอาหารที่มีลักษณะเป็นชิ้น ก้อน หรือเป็นแท่ง ภายในห้องอบมีการติดตั้งพัดลมเพื่อหมุนเวียนตัวกลางการอบแห้ง ตัวกลางที่นิยมใช้คือ อากาศร้อน การหมุนเวียนตัวกลางการอบแห้งจะทำให้ชิ้นอาหารได้รับพลังงานความร้อนอย่างทั่วถึงและน้ำภายในชิ้นอาหารจะระเหยออกมา ด้วยเหตุนี้ระบบหมุนเวียนตัวกลางการอบแห้งจึงเป็นหัวใจที่สำคัญในการอบแห้งแบบลมร้อน (สั๊กมน, 2555)

การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาและอาหาร (ยกเว้นอาหารที่มีปริมาณไขมันสูง) ซึ่งมีสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางยา กลิ่นรสที่อาจเสื่อมสลายได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงหรือสำหรับอาหารที่ไม่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนรูปและต้องการให้คืนรูปได้อย่างรวดเร็ว โดยการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเริ่มจากการนำอาหารไปแช่เยือกแข็ง (Freezing) จนกระทั่งอาหารมีอุณหภูมิประมาณ -30 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า จากนั้นจึงทำการอบแห้งอาหารที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

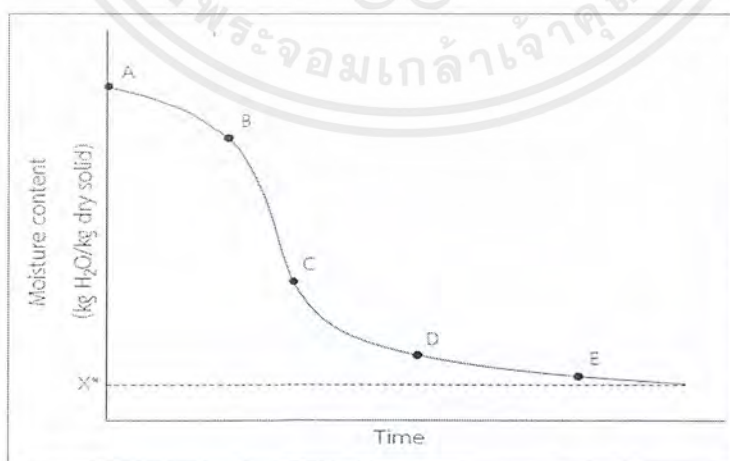
อุณหภูมิและความดันต่ำกว่าจุดรวมสามของน้ำ โดยจุดรวมสามของน้ำเป็นจุดที่น้ำ น้ำแข็ง และไอน้ำอยู่ร่วมกันในสภาวะสมดุล (หรือของเหลวอื่นที่ต้องการขจัดออกจากอาหารเช่นตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ) โดยการระเหิด (Sublimation) ของน้ำแข็งหรือของแข็งอื่นกลายเป็นไอซึ่งจะถูกพาออกไปจากห้องอบแห้งโดยระบบสุญญากาศ (สีกมณ, 2555)

การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำยวดยิ่ง (Superheated steam) โดยเริ่มจากการป้อนไอน้ำอิ่มตัว (Saturated steam) จากหม้อต้ม (Boiler) เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (Heater) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัวให้กลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุและรับความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุทำให้มีอุณหภูมิลดลงและกลายเป็นไอน้ำอิ่มตัวดั้งเดิม ดังนั้นไอน้ำที่ไหลออกจากห้องอบแห้งจึงอยู่ในสภาวะของไอน้ำอิ่มตัวซึ่งสามารถนำกลับไปให้ความร้อนและเปลี่ยนสภาพเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ใหม่จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกวิธีการอบแห้ง (สีกมณ, 2555)

2.1.1 กลไกการอบแห้ง

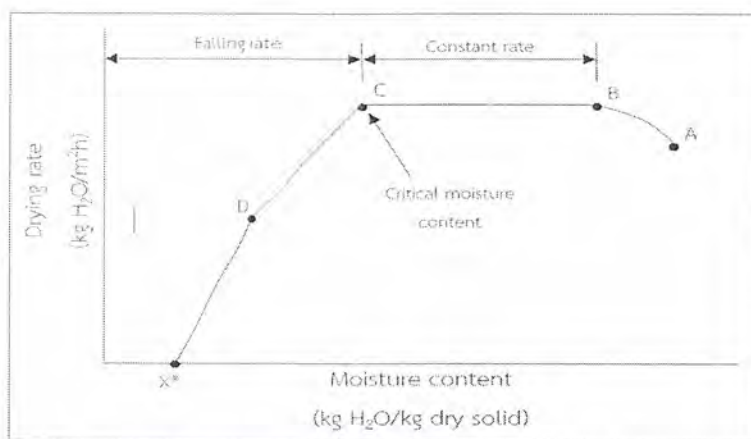
เมื่ออากาศร้อนสัมผัสผิวหน้าของอาหารที่มีความชื้น ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวหน้าของอาหารและภายในอาหาร ทำให้น้ำที่ผิวหน้าของอาหารเกิดการระเหยและเกิดความแตกต่างของความดันระหว่างผิวหน้าและภายในชั้นของอาหาร โดยที่ความดันภายในชั้นอาหารสูงกว่าบริเวณผิวหน้า ซึ่งการเกิดความแตกต่างของความดันนี้ทำให้เกิดแรงดันที่ทำให้น้ำในอาหารเคลื่อนที่มายังผิว โดยการเคลื่อนที่ของน้ำออกมายังผิวนั้นยังเป็นผลเนื่องมาจากกลไก อันได้แก่ การเคลื่อนที่ของของเหลวด้วยแรงแคปิลลารี การแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวทำละลายในอาหารส่วนต่าง ๆ การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในอาหาร และการแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศซึ่งเกิดความแตกต่างของความดันไอ เป็นต้น (Araya-Farias และ Ratti, 2009)

2.1.2 อัตราการอบแห้ง



(ก) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) อัตราการอบแห้งระหว่างการอบแห้ง

รูปที่ 2.1 (ก) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (ข) อัตราการอบแห้งระหว่างการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งคือ อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลา ระหว่างการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งโดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งช่วงของการอบแห้งได้เป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.1 ช่วงแรกหรือช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period, AB) เป็นช่วงเริ่มต้นในการอบแห้ง ซึ่งในช่วงนี้ความชื้นของอาหารยังสูงอยู่ และผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมากเมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับอาหาร อุณหภูมิที่พื้นผิวอาหารจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของอากาศร้อน โดยในช่วงนี้ความชื้นของอาหารจะลดลงเรื่อย ๆ และอัตราการอบแห้งจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นก่อนจะเข้าสู่ช่วงที่สองหรือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period, BC) ช่วงนี้เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า ซึ่งพลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากอาหารอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของอาหารจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง ซึ่งในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะคงที่ จนถึงจุด ๆ หนึ่งที่อัตราในการอบแห้งจะเริ่มลดลง และความชื้นของอาหาร ณ เวลานั้น เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content, X_c) ต่อจากนั้นอัตราการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลง เข้าสู่ช่วงที่สามหรือช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period, CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่องและผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งอัตราการอบแห้งจะลดลงและความชื้นก็จะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งความชื้นของอาหารไม่เปลี่ยนแปลง หรือกล่าวได้ว่าการอบแห้งได้มาถึงจุดสิ้นสุดที่ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, X^*) ซึ่งเป็นความชื้นต่ำที่สุด ภายใต้สภาวะที่อบแห้งอยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการอบแห้งเป็นศูนย์และน้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก (Tang และ Yang, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

1. ลักษณะโครงสร้างภายในของอาหาร ความแตกต่างของโครงสร้างภายในของอาหาร ทำให้อัตราการอบแห้งแตกต่างกัน จากการศึกษาผลของการปรับสภาพของแผ่นแอปเปิ้ล โดย Ramirez และคณะ (2011) พบว่าขนาดของช่องว่างระหว่างเซลล์ (Cell cavities size) ของแผ่นแอปเปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพนั้นแตกต่างจากเดิม คือ แผ่นแอปเปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพขนาดของช่องว่างระหว่างเซลล์จะมีขนาดเล็กลง และมีผลทำให้อัตราการอบแห้งแผ่นแอปเปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพนั้นเร็วกว่าแผ่นแอปเปิ้ลที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Rahman และ Perera, 2007)

2. สมบัติทางกายภาพของอาหาร เช่น ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของอาหาร ซึ่งมีผลต่อการอบแห้ง โดยอาหารที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะมีพื้นที่ระเหยน้ำมากเป็นผลทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น และหากอาหารที่มีความหนามากอัตราการอบแห้งจะช้ากว่าอาหารที่มีความหนาน้อยกว่า เนื่องจากน้ำในชิ้นอาหารที่มีความหนามากกว่าจะเกิดการแพร่ได้ยากกว่าอาหารที่มีความหนาน้อยกว่า โดยอัตราการอบแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร (Rahman และ Perera, 2007)

3. ปริมาณของอาหารที่นำมาอบแห้ง การที่นำอาหารมาอบแห้งในปริมาณมาก ๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้าเนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอาหารได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารเกิดได้ยากขึ้น เป็นผลทำให้อัตราการอบแห้งช้าลง (Rahman และ Perera, 2007)

4. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ของอากาศ เนื่องด้วยที่อุณหภูมิการทำแห้งสูงน้ำจะสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากได้รับพลังงานความร้อนมากกว่า ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้อากาศสามารถรับปริมาณไอน้ำที่ระเหยออกมาจากอาหารได้มากกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง และความเร็วลมที่เร็วจะทำให้ไอน้ำระเหยได้รวดเร็วเพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนมาก เนื่องจากความเร็วลมที่เร็วกว่า จะพาความชื้นไปได้มากกว่าความเร็วลมที่ช้ากว่า (Rahman และ Perera, 2007)

5. ความดันอากาศ สัมพันธ์กับการระเหยของน้ำ เนื่องจากน้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลงจึงระเหยได้ง่ายที่ความดันต่ำ ดังนั้นการอบแห้งภายใต้ความดันที่ต่ำส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น ทำให้สามารถคงคุณค่าทางอาหารไว้ได้ (Rahman และ Perera, 2007)

2.2 การเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างการอบแห้ง

ในระหว่างกระบวนการอบแห้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ภายในชิ้นอาหาร ทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ, เคมี, เคมีกายภาพ และโครงสร้างจุลภาค เช่น การเปลี่ยนสี, การหดตัว, การเกิดเปลือกแข็งบริเวณผิว และปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของลิพิด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารระหว่างการอบแห้ง

ในระหว่างการอบแห้งน้ำจากภายในชิ้นอาหารจะเกิดการแพร่ไปยังผิวของอาหาร ต่อมาเมื่อน้ำได้รับความร้อนจึงเกิดการระเหยที่บริเวณพื้นผิวหน้าของชิ้นอาหาร ทำให้น้ำภายในชิ้นอาหารมีปริมาณลดลงจึงนำมาสู่การเปลี่ยนแปลงหลายประการ เช่น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัว, การเกิดเปลือกแข็งที่ผิว การเปลี่ยนแปลงทางเคมี ได้แก่ ปฏิกิริยาการเกิดน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์, ปฏิกิริยาการเกิดน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ และปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของรงควัตถุ (Rahman และ Perera, 2007)

2.2.2 การเสีรูของอาหารระหว่างการอบแห้ง

กระบวนการเสีรูของวัสดุ คือ การเปลี่ยนแปลง ขนาด รูปร่าง ปริมาตร ภายใต้แรงที่มากระทำต่อวัสดุนั้น ๆ เช่น แรงบิด แรงดึง แรงเฉือน หรือแรงกด ทำให้เกิดความเค้น และความเครียด นำไปสู่การเสีรูของวัสดุ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การเสีรูแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) เป็นการเสีรูแบบยืดหยุ่น คือ เมื่อวัสดุมีแรงมากระทำและเมื่อนำเอาแรงกระทำนั้นออก วัสดุสามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ทั้งหมด ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ การเสีรูแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นกระบวนการเสีรูถาวร คือ เมื่อวัสดุมีแรงมากระทำจนถึงจุดเกินพิกัดที่จะสามารถทนอยู่ในสภาพนั้นได้ จนทำให้เกิดการเสีรูไปอย่างถาวร ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

การหดตัว

การหดตัวเป็นลักษณะการเสีรูระหว่างการอบแห้งที่พบมากในอาหารที่มีลักษณะเป็นชิ้น และมีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่เป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะผักและผลไม้อบแห้ง ซึ่งการหดตัวของชิ้นอาหารนอกจากจะมีผลต่อสมบัติของอาหาร เช่น การดูดซับน้ำ และการคืนตัว ยังส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตอาหารออกมาจำหน่ายอีกด้วย การหดตัวของอาหารระหว่างการอบแห้งเกิดจากโครงสร้าง 2 ส่วนของเซลล์อาหาร ได้แก่ ผนังเซลล์ซึ่งทำหน้าที่ให้ความยืดหยุ่นกับเซลล์และของเหลวภายในเซลล์ เกิดการยุบตัวหรือหดตัวเนื่องจากการระเหยหรือระเหิดของน้ำ ซึ่งทำหน้าที่ให้แรงดันไฮโดร-สแตติกกับผนังเซลล์ซึ่งในระหว่างนี้ปริมาณอิสระในอาหารจะมีมากขึ้นทำให้เกิดช่องว่างที่จำเป็นในการเคลื่อนที่ของอาหาร ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนน้ำในอาหารจึงสามารถระเหยหรือระเหิดออกมาได้ในปริมาณมาก ของเหลวภายในเซลล์มีปริมาตรลดลงและส่งผลให้ผนังเซลล์ยุบตัวลงมาทำให้ชิ้นอาหารมีขนาดเล็กลง (Mayor, 2004 ; สวนิต, 2556)

การเกิดเปลือกแข็งและรอยแตกที่ผิว

การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้วัสดุเกิดเปลือกแข็งที่บริเวณผิว เนื่องจากน้ำที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุเกิดการระเหยน้ำเร็วเกินไป ส่งผลให้น้ำจากภายในชิ้นวัสดุเกิดการแพร่ออกมายังบริเวณพื้นผิวหน้าวัสดุได้ไม่ต่อเนื่องจึงทำให้เกิดเปลือกแข็งดังกล่าวขึ้น ในกรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง วัสดุอาจมีชั้นแข็งเกิดขึ้นที่บริเวณผิว เนื่องจากการระเหยของความชื้นออกไปจากผิวอย่างรวดเร็ว เหลือทิ้งไว้

แต่เพียงองค์ประกอบบางชนิด เช่น เกลือ หรือน้ำตาล ซึ่งทำให้เกิดชั้นแข็งดังกล่าวขึ้น ส่วนการเกิด รอยร้าวที่บริเวณผิวมักจะเกิดขึ้นเมื่อการหดตัวของวัสดุเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งก่อให้เกิดความเค้นที่ไม่เท่ากันที่แต่ละตำแหน่งของวัสดุนำไปสู่รอยปริแตก (สั๊กมน, 2555)

2.3 การวิเคราะห์การเสียรูปด้วยวิธีมาตรฐาน

การหดตัวเป็นการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยการหดตัวจะถูกอธิบายในรูปของอัตราส่วนระหว่าง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อปริมาตรเริ่มต้น การหดตัวนั้นจะสามารถบอกถึงการเปลี่ยนไปของขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่างได้ โดยทั่วไปวัดจากขนาดของชิ้นตัวอย่างที่เปลี่ยนไปด้วยเวอร์เนียสคาลิปเปอร์หรืออาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) และการแทนที่ (Displacement method) จากงานวิจัยของ Yan และคณะ (2008) ทำการทดลองเปรียบเทียบวิธีการหาปริมาตร 4 วิธี คือ การแทนที่ด้วยของแข็ง การแทนที่ด้วยของเหลว การแทนที่ของเหลวในขวดพิโคโนมิเตอร์ และการแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่า การแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัวมีความแม่นยำมากที่สุด

2.3.1 การแทนที่ด้วยของแข็ง (Glass beads displacement method)

การแทนที่ด้วยของแข็งโดยใช้ทราย มีวิธีการดังนี้ นำภาชนะไปชั่งน้ำหนักแล้วเติมน้ำลงไป ในภาชนะเพื่อหาปริมาตรของภาชนะ เทน้ำออกจากภาชนะจนหมด จากนั้นเติมทรายลงไปจนเต็มภาชนะแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าความหนาแน่นของทรายโดยคำนวณจากสมการ

$$\rho_b = \frac{M_b - M_f}{V_f} \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ_b คือ ความหนาแน่นของของทราย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร), M_b คือ น้ำหนักของภาชนะรวมกับทราย (กิโลกรัม), M_f คือ น้ำหนักของภาชนะ (กิโลกรัม) และ V_f คือ ปริมาตรของภาชนะ (ลูกบาศก์เมตร)

(ที่มา: Yan และคณะ, 2008)

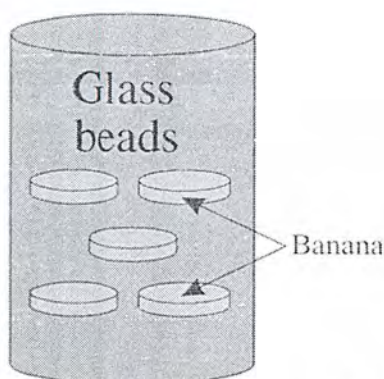
หลังจากนั้นใส่ชิ้นตัวอย่างลงไปภาชนะแล้วเติมทรายลงไปจนเต็มภาชนะ นำไปชั่งน้ำหนักคำนวณหาปริมาตรของชิ้นตัวอย่างจากสมการ

$$V = \frac{M_b - (M_{t+b} - M)}{\rho_b} \quad (2.2)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร), M_b คือ น้ำหนักของภาชนะรวมกับทราย (กิโลกรัม), M_{t+b} คือ น้ำหนักรวมของภาชนะ ชิ้นตัวอย่าง และของทราย (กิโลกรัม), M คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่าง (กิโลกรัม) และ ρ_b คือ ความหนาแน่นของของทราย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

(ที่มา: Yan และคณะ, 2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ด้วยของแข็ง (Yan และคณะ, 2008)

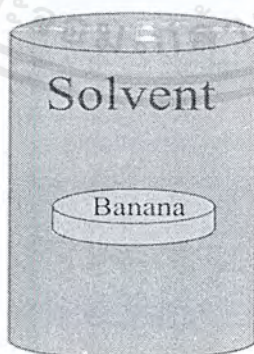
2.3.2 การแทนที่ด้วยของเหลว (Solvent displacement method)

การแทนที่ด้วยของเหลวโดยใช้ของเหลว เช่น แอลกอฮอล์ โทลูอีน เฮปเทน และปีโตรเลียม อีเทอร์ มีวิธีการดังนี้ นำภาชนะ (flask) ไปชั่งน้ำหนัก แล้วเติมน้ำลงไปในภาชนะเพื่อหาปริมาตร เทน้ำออกจากภาชนะจนหมด จากนั้นเติมของเหลวจนเต็มแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของของเหลว เทของเหลวในภาชนะออกพอประมาณ หลังจากนั้นใส่ชิ้นตัวอย่างลงไปในภาชนะแล้วเติมของเหลวลงไปจนเต็มภาชนะ นำไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาตรของชิ้นตัวอย่างจากสมการ

$$V = V_f - \frac{M_{t+l} - M_f - M}{\rho_l} \quad (2.3)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร), V_f คือ ปริมาตรของภาชนะ (ลูกบาศก์เมตร), M_f คือ น้ำหนักของภาชนะ (กิโลกรัม), M_{t+l} คือ น้ำหนักรวมของภาชนะ ชิ้นตัวอย่าง และของเหลว (กิโลกรัม), M คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่าง (กิโลกรัม) และ ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

(ที่มา: Yan และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.3 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ด้วยของเหลว (Yan และคณะ, 2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

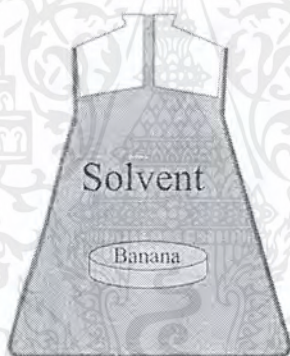
2.3.3 การแทนของเหลวในขวดพิโคโนมิเตอร์ (Liquid pycnometry)

การแทนที่ด้วยของเหลวในขวดพิโคโนมิเตอร์ โดยใช้ของเหลว เช่น แอลกอฮอล์ โทลูอีน เฮปเทน และปิโตรเลียมอีเทอร์ มีวิธีการดังนี้ ใส่ของเหลวในขวดพิโคโนมิเตอร์จนเต็มแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งน้ำหนักขึ้นตัวอย่างแล้วนำไปใส่ในขวดพิโคโนมิเตอร์ที่มีของเหลวอยู่เต็ม เมื่อของเหลวล้นออกมาจนแห้งสนิท นำขวดพิโคโนมิเตอร์ไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาปริมาตรของขึ้นตัวอย่างจากสมการ

$$V = \frac{M + M_{f+e} - M_{t+e}}{\rho_e} \quad (2.4)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของขึ้นตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร), M คือ น้ำหนักของขึ้นตัวอย่าง (กิโลกรัม), M_{f+e} คือ น้ำหนักรวมของภาชนะ และของเหลว (กิโลกรัม), M_{t+e} คือ น้ำหนักรวมของภาชนะ ขึ้นตัวอย่าง และของเหลว (กิโลกรัม), และ ρ_e คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

(ที่มา: Yan และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.4 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ด้วยของเหลวในขวดพิโคโนมิเตอร์ (Yan และคณะ, 2008)

2.3.4 การแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว (Liquid displacement method)

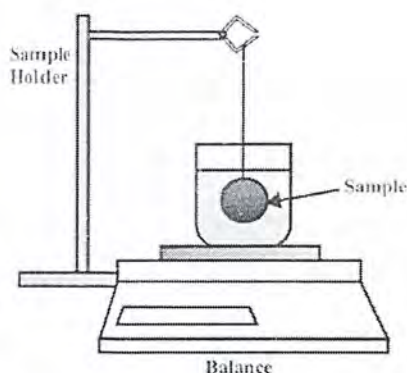
การแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัวโดยใช้ของเหลว เช่น แอลกอฮอล์ โทลูอีน เฮปเทน และปิโตรเลียมอีเทอร์ มีวิธีการดังนี้ นำภาชนะที่มีของเหลวบรรจุอยู่ไปวางบนเครื่องชั่งน้ำหนัก จากนั้นจุ่มขึ้นตัวอย่างลงในบีกเกอร์ให้ลอยอยู่ใต้ผิวของของเหลว และอ่านค่าน้ำหนักที่ได้จากนั้นคำนวณหาปริมาตรของขึ้นตัวอย่างจากสมการ

$$V = \frac{G}{\rho_e} \quad (2.5)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของขึ้นตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร), G คือ น้ำหนักลอยตัว (กิโลกรัม) และ ρ_e คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

(ที่มา: Sahin และ Sumnu, 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว

(Sahin และ Sumnu, 2005)

2.4 เทคนิควิเคราะห์ภาพ

เทคนิควิเคราะห์ภาพถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพเพื่อแยกจำพวกและคัดขนาดวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อติดตาม ตรวจสอบ และควบคุมกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ซึ่งข้อดีของการใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพคือ เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการผลิตได้อย่างรวดเร็วถูกต้องและแม่นยำ เมื่อเทียบกับการใช้เทคนิคอื่น ๆ

ในการประเมินลักษณะปรากฏของอาหารระหว่างกระบวนการผลิตนั้น ส่วนใหญ่มักทำโดยใช้สายตาของผู้ตรวจสอบซึ่งเป็นการตรวจสอบแบบจิตวิสัย (Subjective) และขึ้นอยู่กับความชำนาญของแต่ละบุคคล จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากระบบการมองเห็นของมนุษย์มีขีดจำกัดในการประเมินผลเชิงปริมาณหรือเชิงตัวเลข และไม่สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติภายในของอาหารได้ ดังนั้นการใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ภาพจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ เนื่องจากสามารถนำขั้นตอนวิธีที่หลากหลายทั้งเทคนิคในการตรวจวิเคราะห์ภาพ และเทคนิคทางสถิติ มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาในการวิเคราะห์ เช่น การเกิดสัญญาณรบกวนและการบิดเบี้ยวของสัญญาณในระหว่างประมวลผล ทั้งนี้การวิเคราะห์ภาพในกระบวนการผลิต มีทั้งการวิเคราะห์ภาพอย่างง่าย เช่น การประเมินสีของผลิตภัณฑ์ และการวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อน เช่น การประเมินลักษณะพื้นผิว และโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์ ตลอดกระบวนการผลิต (สั๊กมน, 2555)

โดยเทคนิควิเคราะห์ภาพประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การได้มาซึ่งภาพ (Image acquisition) การประมวลผลภาพ (Image processing) และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากภาพ (Data analysis) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.4.1 การได้มาซึ่งภาพ (Image acquisition)

กระบวนการวิเคราะห์ภาพมักเน้นที่การใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

ในการจำแนกความแตกต่างและคุณภาพของภาพ ดังนั้นสีหรือค่า RGB ที่ได้จึงมีความสำคัญอย่างมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยมีความสัมพันธ์กับแสงสว่าง วัตถุ และผู้สังเกต (Yam และ Papadakis, 2004) จึงมีการวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีที่เหมาะสมในการประเมินคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ เพื่อลดข้อจำกัดเรื่องการกระจายของสีที่ไม่สม่ำเสมอของวัสดุ จึงมีการนำระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์มาประยุกต์ใช้โดยมีองค์ประกอบพื้นฐาน 4 อย่างได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง กล้องถ่ายภาพ ฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์

แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้มากในงานวิจัยอาหารคือ แหล่งกำเนิดแสงแบบ D₆₅ ซึ่งให้แสงในช่วงเที่ยงวัน และควรเลือกแหล่งกำเนิดแสงให้เหมาะสมกับการใช้งานเนื่องจากหากเลือกไม่เหมาะสมแล้วอาจเกิดความผิดพลาดในการรับรู้สีของวัตถุได้ นอกจากนี้การจัดวางตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงและกล้องถ่ายภาพก็มีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปนิยมจัดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงและกล้องถ่ายภาพให้ทำมุมกัน 45 องศา เพื่อให้สามารถดักแสงที่สะท้อนจากวัตถุได้ดีที่สุด (สีกกมน, 2555)

การถ่ายภาพขึ้นตัวอย่างมักใช้กล้องดิจิทัลเป็นตัวเก็บภาพ โดยต้องคำนึงถึงแสงที่ส่องสว่างเป็นสิ่งสำคัญ รวมถึงสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ สีของวัตถุ, การดูดกลืนสีของสิ่งรอบข้าง, การตั้งค่าโหมดของกล้อง และการเลือกสีของพื้นหลัง ควรเลือกพื้นหลังที่มีสีตัดกับสีของวัตถุอย่างชัดเจนและการถ่ายภาพควรทำในสภาพแวดล้อมแบบปิด สำหรับการถ่ายภาพไม่ควรตั้งเป็นระบบอัตโนมัติ ไม่ใช้การซูมและแสงแฟลชเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของข้อมูลภาพที่ได้ ภาพที่ถ่ายได้ควรบันทึกโดยใช้สกุลไฟล์ที่ไม่มีการบีบอัดข้อมูล และจัดเก็บอยู่ในรูปแบบของภาพ เช่น TIFF (Tagged image file format) แล้วนำไปเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อเข้าสู่กระบวนการประมวลผลภาพต่อไป (Mendoza และคณะ, 2007)

2.4.2 การประมวลผลภาพ (Image processing)

การประมวลผลภาพอาจใช้โปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นในโปรแกรม เช่น Microsoft Visual C++ (Microsoft Corporation, USA), MATLAB® (Mathworks Inc., USA) หรือโปรแกรมวิเคราะห์ภาพสำเร็จรูปอื่น ๆ เช่น ImageJ (Wayne Rasband National Institute of Health, USA.), Adobe Photoshop (Adobe Systems, Inc., USA) เป็นต้น

ขั้นตอนการประมวลผลภาพ

เริ่มต้นด้วยการรับข้อมูลภาพเพื่อเตรียมการประมวลผลภาพ (Preprocessing) ซึ่งวัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือ การปรับปรุงภาพเพื่อเพิ่มโอกาสที่จะประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์ภาพ ตัวอย่างของการปรับปรุงภาพ ได้แก่ การเพิ่มคอนทราสต์ การกำจัดสัญญาณรบกวน (noise) เป็นต้น จากนั้นเข้าสู่การแยกส่วนภาพ (Segmentation) ซึ่งเป็นการแบ่งส่วนภาพออกตามองค์ประกอบหรือตามวัตถุที่ประกอบเป็นภาพ เอกลักษณ์ที่ได้จากการแบ่งส่วนภาพจะเป็นข้อมูลจุดภาพดิบ ๆ ซึ่งรวมส่วนที่เป็นขอบภาพ และจุดทุกจุดภายในบริเวณที่แยกได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลออกมาจากภาพ เช่น พื้นที่ภาพฉาย, เส้นรอบรูป, แกนหลัก และแกนรอง เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis)

ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพจะถูกนำไปวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำได้หลากหลายวิธี เช่นการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform), การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) และการใช้วิธีทางสถิติและความน่าจะเป็น (สั๊กมน, 2555)

2.4.4 ข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากภาพ

ขนาดของวัตถุ (Size)

ขนาดเป็นสิ่งที่วัดได้ง่าย เพราะมีอุปกรณ์หลากหลายชนิดที่สามารถใช้ในการวัดขนาดได้ ตั้งแต่ไม้บรรทัด ไปจนถึงเครื่องสแกนด้วยรังสีแม่เหล็ก ทว่าแม้การวัดขนาดจะสามารถทำได้ง่ายแต่ก็มีโอกาสผิดพลาดสูงเช่นกัน ในการวิเคราะห์ด้วยภาพนั้น ขนาดของวัตถุสามารถหาได้จากขนาดพื้นที่ของวัตถุ (Foreground) หรือพื้นที่สีขาวหรือดำในภาพลักษณะฐานสอง (Binary image) ที่ได้จากการแยกบริเวณภาพ (Image segmentation)

พื้นที่ภาพฉาย (Projected area)

พื้นที่ภาพฉายเป็นการวัดพื้นที่สองมิติจากการฉายภาพจากวัตถุสามมิติ พื้นที่ที่ได้รับการฉายภาพวัสดุลงบนแผ่นระนาบพื้นที่ภาพฉายจัดเป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของชิ้นงาน

เส้นรอบรูปพื้นที่ภาพฉาย (Perimeter)

การวัดเส้นทางปิดที่ล้อมรอบพื้นที่สองมิติจากการฉายภาพจากวัตถุสามมิติ

แกนหลักและแกนรอง (Major axis and minor axis)

แกนหลักคือ แกนที่ยาวที่สุดของวัตถุเมื่อลากตัดผ่านวัตถุ และแกนรองคือ แกนที่ยาวที่สุดของวัตถุที่ตั้งฉากกับแกนหลักเมื่อลากตัดผ่านวัตถุ (Zheng และ Sun, 2008)

รัศมีเฟอร์เรต์ (Ferret diameter)

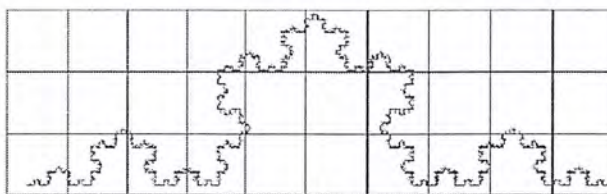
ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดที่อยู่ตรงข้ามกัน และตั้งฉากกับทิศทางที่กำหนดตั้งแต่ 1 องศาไปจนถึงค่ามากที่สุดที่ 180 องศา (Zheng และ Sun, 2008)

มิติแฟร็กทัล (Fractal Dimension, FD)

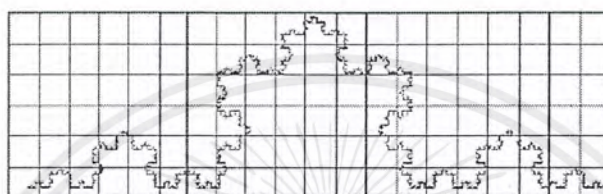
ตัวแปรที่ใช้สำหรับบอกความเป็นแฟร็กทัลของวัตถุแฟร็กทัล บ่งชี้ความคล้ายตัวตน (Self-similarity) ของโครงสร้างเศษส่วนที่ขยายตัวออกอย่างไม่สิ้นสุด ไม่ว่ามิติทางเวลา (Time) และมิติทางพื้นที่ (Space) ล้วนเป็นมิติที่มีรูปร่างคล้ายคลึงซ้ำกันเป็นแบบอย่าง (Pattern) โดยแบบอย่างเกิดจากการลอกเลียนตามแม่แบบเบื้องต้นของวัตถุ มิติแฟร็กทัลเป็นแนวคิดทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่ออธิบายความซับซ้อนของรูปร่างที่ไม่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิตและรูปร่างที่ไม่มีความสม่ำเสมอของวัตถุ มิติแฟร็กทัลไม่ใช่การนิยามสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ที่คิดขึ้นมาเอง แต่เป็นการแสดงให้เห็นสมบัติของวัตถุในระดับต่าง ๆ ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ โดยปกตินิยมวิเคราะห์ด้วยวิธีบอกซ์เคาน์ติง (Box-counting) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน (Buczowski และคณะ, 1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

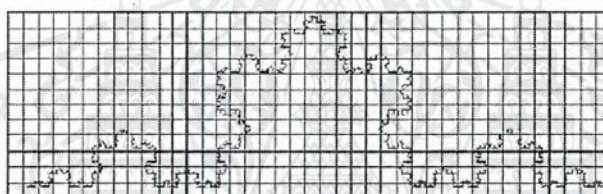
บ็อกซ์เคาน์ติง (Box-counting) เป็นวิธีการหามิติแฟร็กทัลจากภาพโดยมีกระบวนการดังนี้ เริ่มจากการแบ่งรูปออกเป็นมาตราส่วน (Scale) จากนั้นนับตารางที่มีข้อมูลรูปอยู่ในตารางและบันทึกค่า ทำการลดขนาดมาตราส่วนครึ่งละครึ่งหนึ่งของตารางและทำการนับข้อมูลเช่นเดิม ดังรูป 2.6



(ก) การแบ่งมาตราส่วนเท่ากับ 1



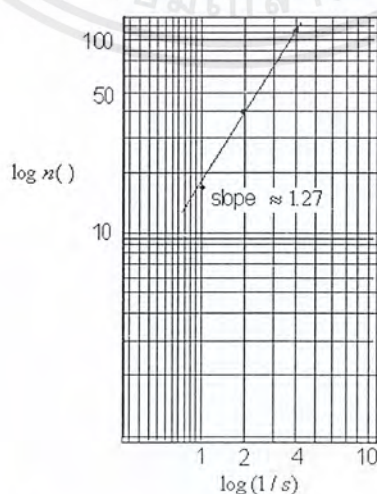
(ข) การแบ่งมาตราส่วนเท่ากับ 1/2



(ค) การแบ่งมาตราส่วนเท่ากับ 1/4

รูปที่ 2.6 (ก) การแบ่งมาตราส่วนเท่ากับ 1 (ข) การแบ่งมาตราส่วนเท่ากับ 1/2 (ค) การแบ่งมาตราส่วนเท่ากับ 1/4 (Wahl, 2014)

ค่ามิติแฟร็กทัลสามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟระหว่างจำนวนของตารางที่มีรูปอยู่ในตารางกับขนาดของมาตราส่วนบนกราฟของฟังก์ชันลอการิทึม



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของจำนวนของตารางที่มีข้อมูลกับขนาดของมาตราวัด (Wahl, 2014)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟของฟังก์ชันลอการิทึมสามารถคำนวณหามิติแฟร็กทัลได้จากสมการ

$$FD = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{\log n(a) - \log n(b)}{\log \frac{1}{s_a} - \log \frac{1}{s_b}} \quad (2.6)$$

โดยที่ FD คือ มิติแฟร็กทัล, $n(\)$ คือ จำนวนตารางข้อมูลที่มีภาพอยู่ และ $1/s$ คือ มาตรการส่วน (ที่มา: Wahl, 2014)

ความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, RTY)

ค่าที่บอกความเป็นสี่เหลี่ยมของวัตถุ ถ้ามีค่าเป็น 1 แสดงว่ามีความเป็นสี่เหลี่ยม คำนวณได้จากสมการ

$$RTY = \frac{A_{ef}}{H_b \times W_b} \quad (2.7)$$

โดยที่ RTY คือ ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม, A_{ef} คือ พื้นที่วงรีที่เล็กที่สุดที่สามารถครอบคลุมสี่เหลี่ยมได้พอดี (จุดภาพ²), H_b คือ ความสูงของสี่เหลี่ยมที่วัดได้จากภาพ (จุดภาพ) และ W_b คือ ความกว้างของสี่เหลี่ยมที่วัดได้จากภาพ (จุดภาพ)

(ที่มา: Lgathinathane และคณะ, 2008)

2.5 Agar

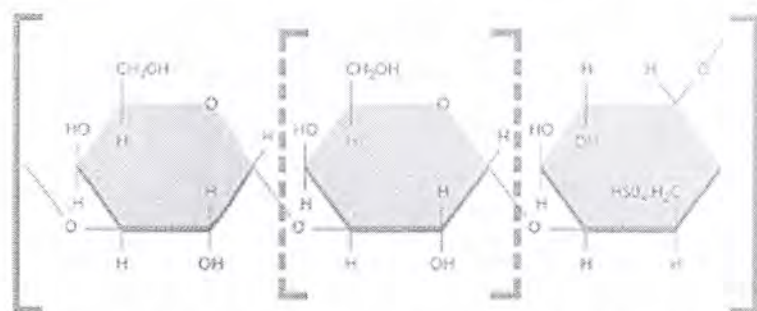
Agar หรือที่เรียกกันว่า วุ้น เป็นวัตถุเจือปนในอาหาร (Food additive) ที่ทำให้เนื้อสัมผัสของอาหารมีลักษณะเป็นเจล (Gelling agent) สามารถเกิดเจลได้โดยไม่ต้องอาศัยสารอื่น และมีลักษณะคล้ายเจลาติน (Gelatin) แตกต่างกันโดย Agar สกัดมาจากสาหร่ายทะเลสีแดง แต่เจลาตินสกัดมาจากส่วนประกอบต่าง ๆ ของสัตว์ เช่น เนื้อเยื่อ, ผิวหนัง และกระดูก เป็นต้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดอาการแพ้หรืออาจมีเชื้อโรคปะปน และ Agar ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างมากมาย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร, อุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ (Moncel, 2015)

2.5.1 โครงสร้างและสมบัติของ Agar

Agar เป็นสารสกัดที่ได้มาจากสาหร่ายสีแดง (*Rhodophyceae*) ในแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน โดยสาหร่ายที่นิยมนำมาสกัดคือ *Gelidium cartilagineum*, *Gracilaria confervoides* และ *Pteroclaia capillacea* โดย Agar มี Agarose และ Agaropectin เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งมีโครงสร้างแบบโพลีแซคคาไรด์ (Armisen, 1987)

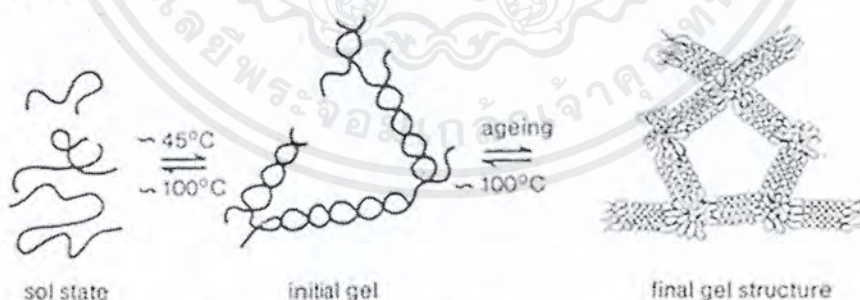
โครงสร้างของ Agar ประกอบด้วยสายโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) 2 ชนิด ได้แก่ Agarose และ Agaropectin (รูปที่ 2.5) Agarose เป็นโพลีเมอร์สายยาวที่ประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) เกาะเชื่อมสลับกัน Agarose ค่อนข้างเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุน้อยมากจึงถูกเรียกว่า non-ionic polysaccharide สำหรับ Agaropectin มีโครงสร้างคล้าย Agarose แต่มีความซับซ้อนกว่าเนื่องจากบางโมเลกุลของ L-galactose จะมีอนุโมลซัลเฟตเกาะอยู่ และโมเลกุลเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ D-galactose จะมีไพรูเวท (Pyruvate) เกาะอยู่ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้โพลีเมอร์เหล่านี้มีประจุ จึงมักถูกเรียกว่า charged Agarose (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2012)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ Agarose และ Agaropectin (Porto, 2015)

Agar มีสมบัติเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ไม่ละลายในน้ำเย็น ละลายได้อย่างช้า ๆ ในน้ำร้อน ละลายได้ดีที่ความเข้มข้นไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในน้ำร้อน Agar มีความสามารถดูดน้ำได้ดี โดยเกิดเจลได้ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สามารถเกิดเจลได้โดยไม่ต้องอาศัยสารอื่น ๆ ช่วยในการเกิดเจล ซึ่งการเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า physical gel โดยทั่วไปอุณหภูมิเกิดเจล ประมาณ 35 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส Agar มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 90 องศาเซลเซียส ถึง 95 องศาเซลเซียส เจลที่ได้มีลักษณะเนื้อแข็ง ชุ่มสีเหลืองอ่อน เปราะแตกง่าย เนื้อสัมผัสเป็นแบบ juiciness และ crunchy ส่วนการเติมน้ำตาลหรือเดกซ์ทริน จะทำให้เจลที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรง (gel strength) และความยืดหยุ่น (elasticity) เพิ่มขึ้น เจลที่เกิดขึ้นจะทนความร้อนเพราะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลและจุดหลอมเหลวของเจลมีช่วงที่ห่างกันมาก ส่วนใหญ่มีการนำ Agar มาใช้ในส่วนประกอบของอาหาร ยา และเครื่องสำอาง (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2012)



รูปที่ 2.9 การเกิดเจลของ Agar (Medin, 1995)

โดยทั่วไปสามารถจัดแบ่งประเภทของ Agar ตามลักษณะในการเป็นเจล (Setting power of gel) ออกได้ 3 กลุ่ม คือ Gelidium type เป็นสาหร่ายชนิดที่ให้ Agar ซึ่งสามารถแข็งตัวได้ดี แม้จะใช้ที่ความเข้มข้นต่ำ, Gelidium Hypnea type เป็นสาหร่ายที่ให้ Agar ซึ่งจะแข็งตัวได้ เมื่อใช้ในปริมาณความเข้มข้นค่อนข้างสูง และ Chondrus type เป็นสาหร่ายให้วุ้น ซึ่งจะแข็งตัวได้ เมื่อใช้ในปริมาณความเข้มข้นสูงเท่านั้น (ขจรเกียรติ, 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลของ Agar

ชนิดของสาหร่าย

Agar ที่สกัดได้จากสาหร่ายต่างชนิดกันมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้สมบัติของ Agar gel ที่ได้มีความแตกต่างกัน แม้จะใช้ที่ความเข้มข้นเท่ากัน เนื่องจากอัตราส่วนของ Agarose และ Agaropectin ในสาหร่ายแต่ละชนิดนั้นมีปริมาณไม่เท่ากัน กล่าวคือหากสาหร่ายชนิดใดมี Agarose สูงความแข็งแรงของ Agar จะเพิ่มขึ้น (ฉิมภักทร, 2556)

แหล่งกำเนิดของสาหร่าย

แหล่งกำเนิดของสาหร่ายมีผลต่อสมบัติของ Agar gel เช่นกัน ถึงแม้สาหร่ายที่นำมาสกัดนั้นจะเป็นชนิดเดียวกัน และเก็บจากประเทศเดียวกันก็ตาม เนื่องจากในแต่ละพื้นที่ที่ทำการเก็บเกี่ยวสาหร่ายนั้นมีสภาวะทางด้านต่าง ๆ และอาหารสำหรับสาหร่ายที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้สาหร่ายแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้เจลของ Agar มีสมบัติแตกต่างกัน ถึงแม้จะเก็บสาหร่ายภายในเดือนเดียวกัน (ฉิมภักทร, 2556)

วิธีการสกัด

กระบวนการสกัด Agar นั้นจะต้องกำจัดหมู่ซัลเฟตออกโดยการแช่ในสารละลายต่างและสกัดด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้ล้วนส่งผลต่อคุณภาพของ Agar ที่สกัดได้ การแช่ Agar ในสารละลายต่างนั้นเป็นเทคนิคในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับ Agar gel เนื่องจากเป็นวิธีการกำจัดหมู่ซัลเฟตออกจากโมเลกุลของ Agar แต่การใช้ต่างที่ความเข้มข้นต่างกันจะส่งผลต่อความแข็งแรงของ Agar gel ที่ต่างกันด้วย ซึ่งหากความเข้มข้นของสารละลายต่างเพิ่มขึ้นจะมีความแข็งแรงของ Agar gel เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายต่างที่สูงขึ้นทำให้หมู่ซัลเฟตที่อยู่ในโมเลกุลของสาหร่ายถูกกำจัดออกไปเพิ่มขึ้น แต่หากใช้ความเข้มข้นของต่างที่สูงจนเกินไปก็อาจทำให้โครงสร้างของโมเลกุลถูกทำลายลงได้ และส่งผลต่อคุณภาพของ Agar อีกทั้งในขั้นตอนของการสกัดด้วยน้ำร้อนนั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อความแข็งแรงของ Agar gel เช่นกัน ซึ่งการสกัด Agar โดยใช้ความร้อนควรใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสกัด หากใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในการสกัด อาจส่งผลทำให้สายโซ่ของพอลิแซ็กคาไรด์ถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของ Agar เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ส่งผลต่อคุณภาพของเจล (ฉิมภักทร, 2556)

ความเข้มข้นของ Agar

ความเข้มข้นของ Agar ที่ใช้ในการเตรียมเจลจะมีผลต่อสมบัติของ Agar gel เช่นกัน กล่าวคือความแข็งแรงจะเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของ Agar ที่ผสม นอกจากนี้ความเข้มข้นของ Agar ที่ใช้ยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการเกิดเจลและอุณหภูมิในการหลอมเหลว กล่าวคือ อุณหภูมิในการเกิดเจลและอุณหภูมิในการหลอมเหลวจะเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ Agar (ฉิมภักทร, 2556)

การผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น

การผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นกับ Agar อาจช่วยปรับปรุงให้ Agar มีสมบัติที่ดีขึ้น เนื่องจาก Agar มีข้อด้อยคือ เปราะและแตกง่าย ดังนั้นการผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น เช่น เจลาติน (gelatin) คาร์ราจีแนน (carrageenan) และโลคัสบีงกัม (locust bean gum) อาจช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของ Agar ให้ดีขึ้น (ฉิมภาทร, 2556)

2.5.3 การประยุกต์ใช้ Agar ในอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมอาหาร

ในผลิตภัณฑ์เนื้อและสัตว์ปีก มีการใช้ Agar เป็นวัตถุเจือปนอาหารเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ช่วยให้ลักษณะเนื้อสัมผัส ความสามารถในการอุ้มน้ำ สี และกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น อาทิ ผลิตภัณฑ์เนื้อและไก่กระป๋อง มักมีการเติม Agar เพื่อช่วยป้องกันการละลายของเนื้อสัมผัส และช่วยให้ผลิตภัณฑ์เนอบดต่าง ๆ มีการจับตัวกันได้ดียิ่งขึ้น สำหรับผลิตภัณฑ์ปลากระป๋อง Agar สามารถช่วยรักษาคุณภาพของเนื้อปลาไม่ให้เกิดความเสียหายจากการถูกระทบกระแทกระหว่างการขนส่ง นอกจากนี้ Agar ยังเป็นส่วนผสมในอาหารควบคุมน้ำหนัก (Diet food) ช่วยให้อิ่มท้องได้นานขึ้นโดยไม่ให้ทำให้อ้วนจากสมบัติที่เป็นไฮโดรคอลลอยด์ของ Agar (Panda, 2010)

ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน Agar ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเมื่อนำไปผสมกับขนมหวานจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์เกิดความคงตัว, ลักษณะเนื้อสัมผัสดีขึ้น, และเป็นตัวชะลอการตกผลึกของน้ำตาล ช่วยให้อิมัลชันคงตัวและกระจายตัวสม่ำเสมอ ทำให้เกิดฟองที่มีความคงตัว เช่น โยเกิร์ต มีการใช้ Agar เพื่อให้อุ่นหนืด, ในนมรสช็อกโกแลต Agar จะช่วยให้การแขวนลอยดีขึ้น และขนมเค้ก อาจใช้ Agar เป็นตัวจับน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ เพื่อไม่ให้น้ำตาลบนผิวหน้าของผลิตภัณฑ์หลอมละลายและเหนียวติดกับวัสดุที่ห่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เสียไป (Panda, 2010)

อุตสาหกรรมเวชภัณฑ์

Agar gel เป็นสารคงความยืดหยุ่นและลื่น จึงมีการนำ Agar มาใช้เป็นส่วนประกอบของยาระบาย (Laxative) ทั้งนี้เนื่องจาก Agar ช่วยทำให้เกิดกากอาหารในลำไส้ และไม่เกิดการระคายเคืองต่อผนังลำไส้ ช่วยให้การบีบรัดตัวของผนังลำไส้ (Peristalsis) เป็นไปอย่างปกติ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมของปลอกหุ้ม (Capsule) ของเม็ดยาอีกด้วย นอกจากนี้อาจใช้เป็นส่วนผสมของพวกผลิตภัณฑ์บำรุงผิว (Panda, 2010)

อุตสาหกรรมเกษตร

Agar เป็นส่วนผสมหลักของอาหารเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช เพียงผสม Agar กับอาหารที่พืชต้องการ นำไปนึ่งในหม้อนึ่งความดัน เทใส่ภาชนะและทิ้งให้เย็นตัวจะได้วุ้นกึ่งแข็ง (Agar medium) ที่เหมาะต่อการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ โดยรากพืชสามารถยึดเกาะและดูดซึมอาหารได้ดี ดังนั้น Agar จึงเหมาะที่จะใช้เป็นส่วนผสม เนื่องจาก Agar ทำหน้าที่ช่วยพยุงเนื้อเยื่อพืชให้ตั้งอยู่บนอาหารได้ และให้ความชื้นระหว่างการเจริญเติบโตของพืช (Panda, 2010)

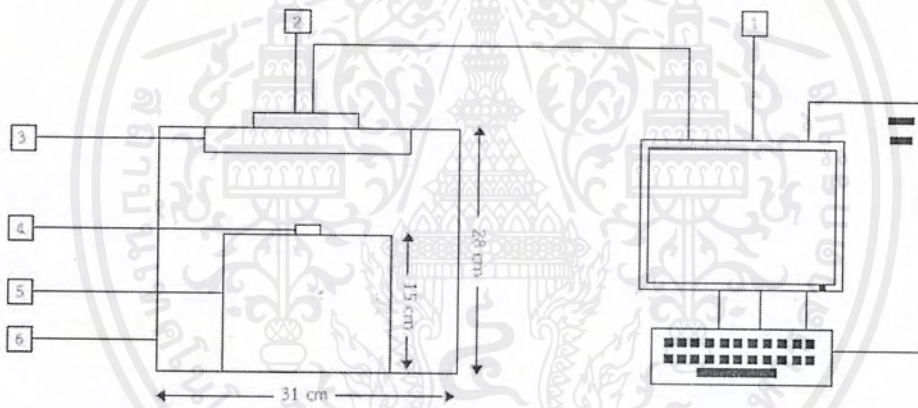
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 อุปกรณ์

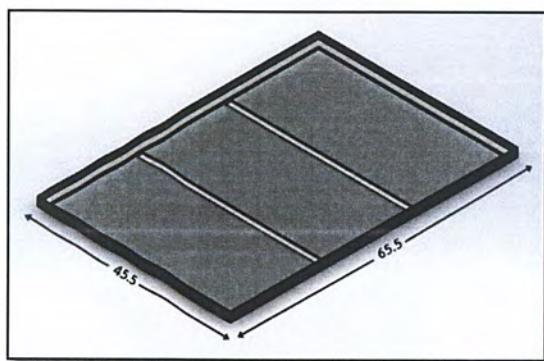
1. เครื่องคอมพิวเตอร์ (MSI GP70 2PE 'Leopard' CPU 2.5 GHz Ram 4 Gbyte การ์ดจอ nVIDIA Geforce GT 840M, China)
2. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล (Samsung Digimax NV3, Korea)
3. ชุดอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ ประกอบด้วย กล้องขนาด 31 เซนติเมตร x 31 เซนติเมตร x 28 เซนติเมตร มีฝาปิดสามารถยกเปิดปิดได้ ผนังของกล่องด้านในเป็นสีขาว พื้นหลังเป็นสีดำ โดยทำการติดตั้งกล้องดิจิทัลไว้ที่ด้านบนบริเวณกึ่งกลางของฝากล่อง และมีแหล่งกำเนิดแสง (Light source) เป็นหลอดไฟ ชนิดฟลูออเรสเซนต์แบบวงกลม ชนิด Daylight มีอุณหภูมิแสง 6500 K (Philips, TL-E super 80, ประเทศไทย) ติดตั้งไฟกึ่งกลางกล่อง



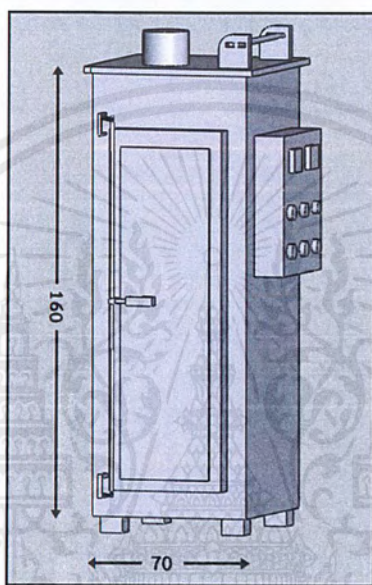
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ (1) คอมพิวเตอร์ (2) กล้องถ่ายภาพ (3) หลอดไฟ (4) ชั้นตัวอย่าง (5) ฐานสำหรับวางชั้นตัวอย่าง (6) กล่อง

4. ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) (กล้วยน้ำไท, ประเทศไทย) ซึ่งตู้อบลมร้อนมีขนาด 70 เซนติเมตร x 70 เซนติเมตร x 160 เซนติเมตร และถาดมีขนาด 45.5 เซนติเมตร x 65.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ถาด (Tray)



(ข) ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer)

รูป 3.2 อุปกรณ์การอบแห้ง (ก) ถาด (Tray) (ข) ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer)

5. เตาอบลมร้อน (Hot air oven) (Memmert, UM500, Germany)
6. เครื่องให้ความร้อน (Stainless steel hot plate) (Rommelsbacher, ROM-AK1599/E, Germany)
7. เครื่องผสม (Mixer) (EURO-ST P DV, IKA, IKA Works, Inc.)
8. แม่พิมพ์ซิลิโคน ชนิดสัมผัสอาหารได้ (Food grade silicone) ขนาด 30 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร x 2.5 เซนติเมตร และรอยพิมพ์ขนาด 2 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร
9. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Shimadzu, UX3200G, Japan)
10. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Yamato electronic balance, HB-120, Japan)
11. โปรแกรม MATLAB[®] รุ่น 2013 (Mathworks Inc., USA)

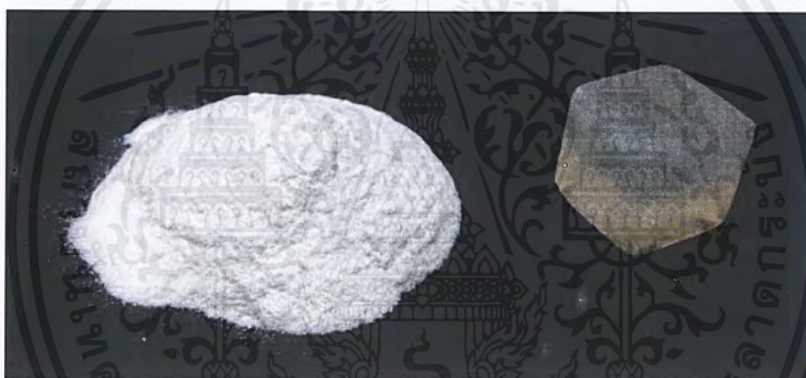
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมชิ้นตัวอย่างการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ผงวุ้น (Agar powder) เกรดทางการค้า (ตรานางเงือก) ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัด พัฒนาสินเอ็นเตอร์ไพรส์ (กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย) และน้ำตาลทรายขาว (ตรามิตรผล) ผลิตโดย บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด (กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย)

วิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างขั้นต้น

1. แช่ผง Agar ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส \pm 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ผงวุ้น (Agar gel) ดูดซับน้ำจนอิ่มตัว
2. นำผง Agar และน้ำตาลทรายขาว มาให้ความร้อนผ่านน้ำที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. เทลงในรอยพิมพ์ ขนาด 2 เซนติเมตร \times 2 เซนติเมตร \times 2 เซนติเมตร และทิ้งไว้เป็นเวลา 40 นาที ที่อุณหภูมิห้องจนเย็นตัวลงและแข็งตัวเป็นก้อน
4. นำไปแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส \pm 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



ก) Agar powder

ข) Agar gel

รูปที่ 3.3 การเตรียม Agar gel (ก) Agar powder (ข) Agar gel

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การทดลองขั้นที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

1. นำชิ้นตัวอย่าง Agar gel ที่เตรียมไว้ในขั้นต้นไปอบด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) ดังรูปที่ 3.2 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส, 70 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที \pm 0.1 เมตรต่อวินาที
2. ระหว่างการอบแห้งสุ่มตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น และทำการถ่ายภาพชิ้น Agar gel ด้วยชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพ ดังแสดงในรูป 3.1 ทุก 30 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นทุก 1 ชั่วโมง จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการถ่ายภาพ ไปคำนวณหาปริมาตรโดยวิธีการแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว ดังอธิบายในหัวข้อ 3.5

4. นำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB® เพื่อวิเคราะห์การเสีรูปร่างของชิ้นตัวอย่าง Agar gel ระหว่างการอบแห้ง

5. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของ Agar gel ระหว่างการอบแห้งกับเวลาและอัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้น

3.3.2 การทดลองขั้นที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของของแข็ง (น้ำตาล) ในอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

1. นำชิ้นตัวอย่าง Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล, เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์ และเติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์ ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนไปอบด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) ดังรูปที่ 3.2 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส, 70 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที \pm 0.1 เมตรต่อวินาที

2. ระหว่างการอบแห้งสุ่มตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น และทำการถ่ายภาพชิ้น Agar gel ด้วยชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพ ดังแสดงในรูป 3.1 ทุก 30 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นทุก 1 ชั่วโมง จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 8

3. นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการถ่ายภาพ ไปคำนวณหาปริมาตรโดยวิธีการแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว ดังอธิบายในหัวข้อ 3.5

4. นำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB® เพื่อวิเคราะห์การเสีรูปร่างของชิ้นตัวอย่าง Agar gel ระหว่างการอบแห้ง

5. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของ Agar gel ระหว่างการอบแห้งกับเวลาและอัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้น

3.3.3 การทดลองขั้นที่ 3 อิทธิพลของการคลายความเครียด (Stress relaxation) ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

1. นำชิ้นตัวอย่าง Agar gel ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 40 ชิ้น ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 ชิ้นตัวอย่างวางกับที่ บนถาดโดยไม่มีการหมุนและพลิกชิ้นตัวอย่างระหว่างการอบแห้ง

- กลุ่มที่ 2 ระหว่างการอบแห้งทำการหมุนชิ้นตัวอย่างตามแนวอนในทิศตามเข็มนาฬิกา ทุก 30 นาที

- กลุ่มที่ 3 ระหว่างการอบแห้งทำการพลิกชิ้นตัวอย่างเพื่อให้ทุกด้านสัมผัสกับลมร้อน ทุก 30 นาที โดยมีวิธีพลิกดังนี้

ตารางที่ 3.1 วิธีการพลิก Agar gel

ครั้งที่	วิธีพลิก
1	พลิกขึ้นตัวอย่างขึ้น 1 ครั้ง
2	พลิกขึ้นตัวอย่างไปทางด้านขวา 1 ครั้ง
3	พลิกขึ้นตัวอย่างไปทางด้านขวา 1 ครั้ง
4	พลิกขึ้นตัวอย่างไปทางด้านขวา 1 ครั้ง
5	พลิกขึ้นตัวอย่างไปทางด้านขวา 1 ครั้ง และพลิกขึ้นอีก 1 ครั้ง
6	พลิกขึ้นตัวอย่างขึ้น 2 ครั้ง

2. ระหว่างการอบแห้งส้อมตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น และทำการถ่ายภาพขึ้น Agar gel ด้วยชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพ ดังแสดงในรูป 3.1 ทุก 30 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นทุก 1 ชั่วโมง จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 8

3. นำขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการถ่ายภาพ ไปคำนวณหาปริมาตรโดยวิธีการแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว ดังอธิบายในหัวข้อ 3.5

4. นำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB® เพื่อวิเคราะห์การเสีรูปร่างของขึ้นตัวอย่าง Agar gel ระหว่างการอบแห้ง

5. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของ Agar gel ระหว่างการอบแห้งกับเวลาและอัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้น

3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของขึ้นตัวอย่าง

1. ชั่งน้ำหนักขึ้นตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. อบขึ้นตัวอย่างในเตาอบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส \pm 2 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่
3. ชั่งน้ำหนักแห้งของขึ้นตัวอย่าง นำค่าที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้งจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง} = \left(\frac{m_i - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ m_i คือ มวลของขึ้นตัวอย่างก่อนอบ (กิโลกรัม) และ m_s คือ มวลแห้งของขึ้นตัวอย่าง (กิโลกรัม) (ที่มา: AOAC, 2000)

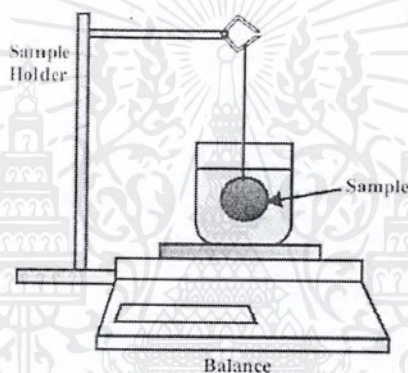
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์หาปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง

1. นำบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายปิโตรเลียมอีเทอร์บรรจุอยู่ 500 มิลลิลิตร วางบีกเกอร์บนเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
2. นำชิ้นตัวอย่าง Agar gel จุ่มลงในบีกเกอร์ ให้ลอยอยู่ใต้ผิวของสารละลาย ดังรูปที่ 3.7
3. อ่านค่าน้ำหนักที่ได้จากเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาตรจากสมการ

$$V = \frac{G}{\rho_l} \quad (3.2)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร), G คือ น้ำหนักลอยตัว (กิโลกรัม) และ ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
(ที่มา: Sahin และ Sumnu, 2005)



รูปที่ 3.4 การหาปริมาตรโดยวิธีการแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว
(Sahin and Sumnu, 2005)

3.6 การวิเคราะห์หาร้อยละการหดตัว

สำหรับการหดตัวของชิ้นตัวอย่าง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละการหดตัว} = \left(\frac{V_i - V}{V_i} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่ V_i คือ ปริมาตรของ Agar gel ก่อนการอบแห้ง (ลูกบาศก์เมตร) และ V คือ ปริมาตรของ Agar gel ที่เวลาใด ๆ (ลูกบาศก์เมตร)

(ที่มา: Davahastin และคณะ, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การวิเคราะห์ภาพ

ข้อมูลที่ได้จากภาพสามารถวิเคราะห์ได้จากชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB® ได้แก่ พื้นที่ภาพฉาย เส้นรอบรูป แกนหลัก แกนรอง รัศมีเฟอร์เริต และค่ามิติแฟรกทัล ดังอธิบายในหัวข้อ 2.4.4 โดยตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลง Agar gel ด้วยค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับค่าตัวแปรของภาพ Agar gel ก่อนทำการอบแห้ง ดังแสดงในสมการ

$$\Delta value = \left(\frac{value_i - val}{value_i} \right) \quad (3.4)$$

โดยที่ $\Delta value$ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร, $value_i$ คือ ค่าตัวแปรของภาพ Agar gel ที่เวลาใด ๆ และ $value$ คือค่าตัวแปรของภาพ Agar gel ก่อนการอบแห้ง (ที่มา: Kerdpiboon และคณะ, 2007)

ในส่วนของค่าความเป็นสี่เหลี่ยมสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$RTY = \frac{A_{ef}}{H_b \times W_b} \quad (3.5)$$

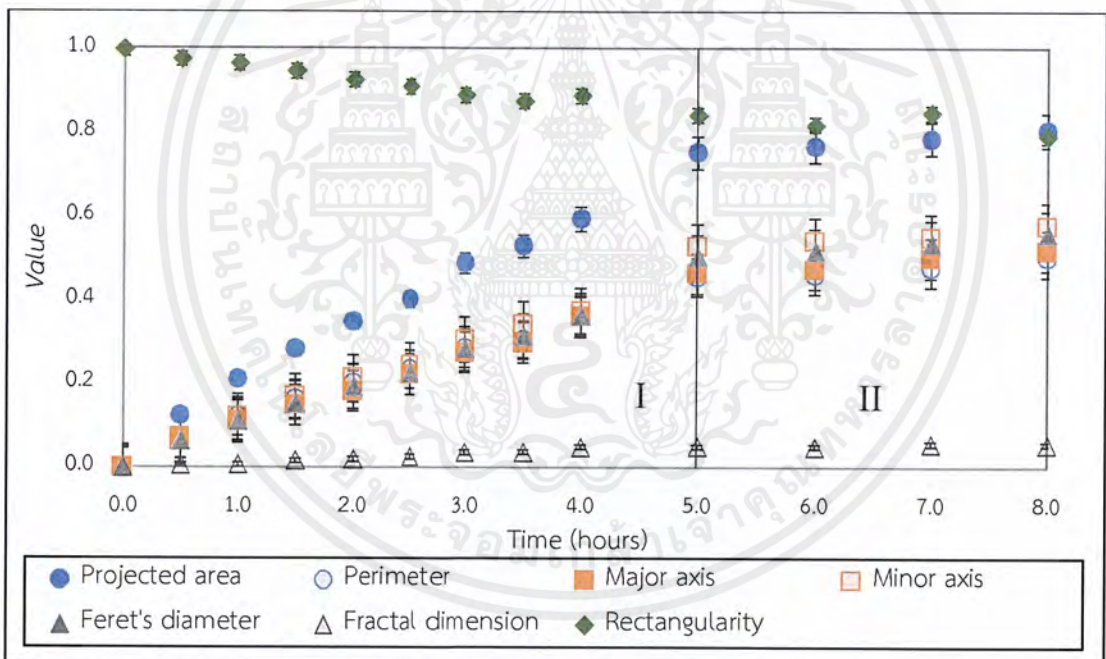
โดยที่ RTY คือ ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม, A_{ef} คือ พื้นที่วงรีที่เล็กที่สุดที่สามารถครอบสี่เหลี่ยมได้พอดี (จุดภาพ²), H_b คือ ความสูงของสี่เหลี่ยมที่วัดได้จากภาพ (จุดภาพ) และ W_b คือ ความกว้างของสี่เหลี่ยมที่วัดได้จากภาพ (จุดภาพ) (ที่มา: Lgathinathane และคณะ, 2008)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การเลือกค่าตัวแปรที่ใช้บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ระหว่างกระบวนการอบแห้ง

ระหว่างกระบวนการอบแห้ง อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญหลายประการ เช่น ทางกายภาพ, เคมี, เคมีกายภาพ และโครงสร้างจุลภาค ซึ่งส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นโครงการนี้จึงได้พัฒนาวิธีการประเมินและตรวจสอบ โดยนำเทคนิควิเคราะห์ภาพมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบ โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลออกมาจากภาพ ได้แก่ พื้นที่ภาพฉาย (Projected area), เส้นรอบรูปของภาพฉาย (Perimeter), แกนหลัก (Major axis), แกนรอง (Minor axis), รัศมีเฟอร์เรต์ (Ferret's diameter), ค่ามิติแฟร็กทัล (Fractal dimension) และค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, *RTY*) เพื่อนำมาเปรียบเทียบหาตัวแปรเพื่อที่จะบ่งชี้ถึงการเสีรูปร่างได้ดีที่สุด

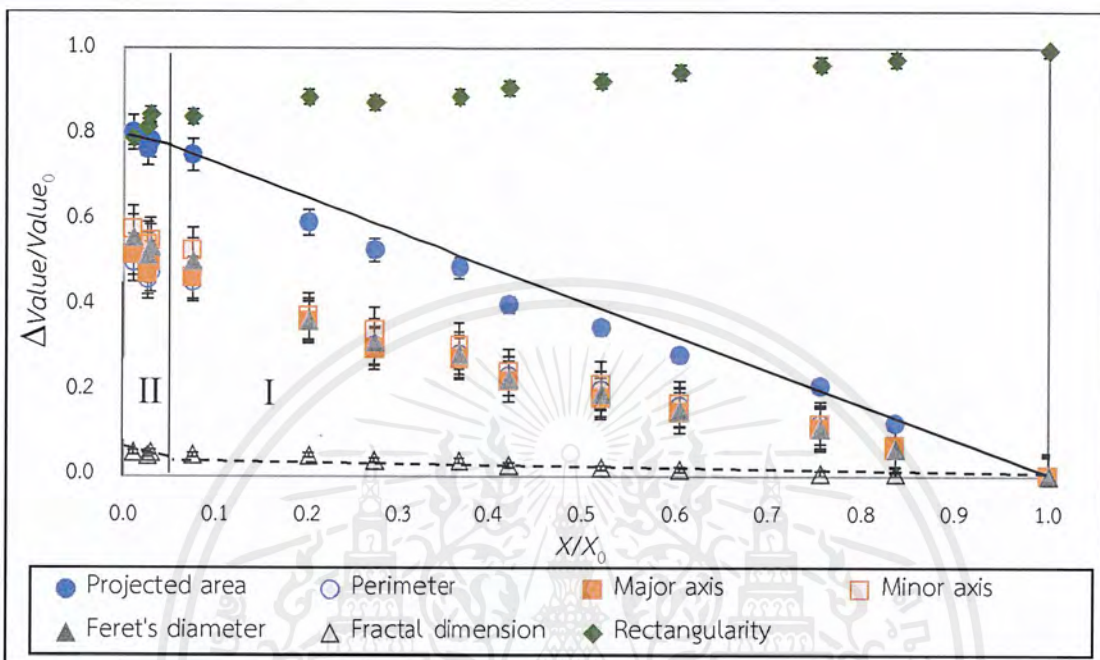


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static)

เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยช่วงแรกหรือช่วงที่มีอัตราส่วนของความชื้นที่เวลาใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นตั้งแต่ 1 ถึง 0.05 (critical moisture content, X_c) พบว่าพื้นที่ภาพฉายเกิดการเปลี่ยนแปลงมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเส้นรอบรูปของภาพฉาย, แกนหลัก, แกนรอง และรัศมีเฟอร์เรต์ เกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 45 เปอร์เซ็นต์ ถึง 50

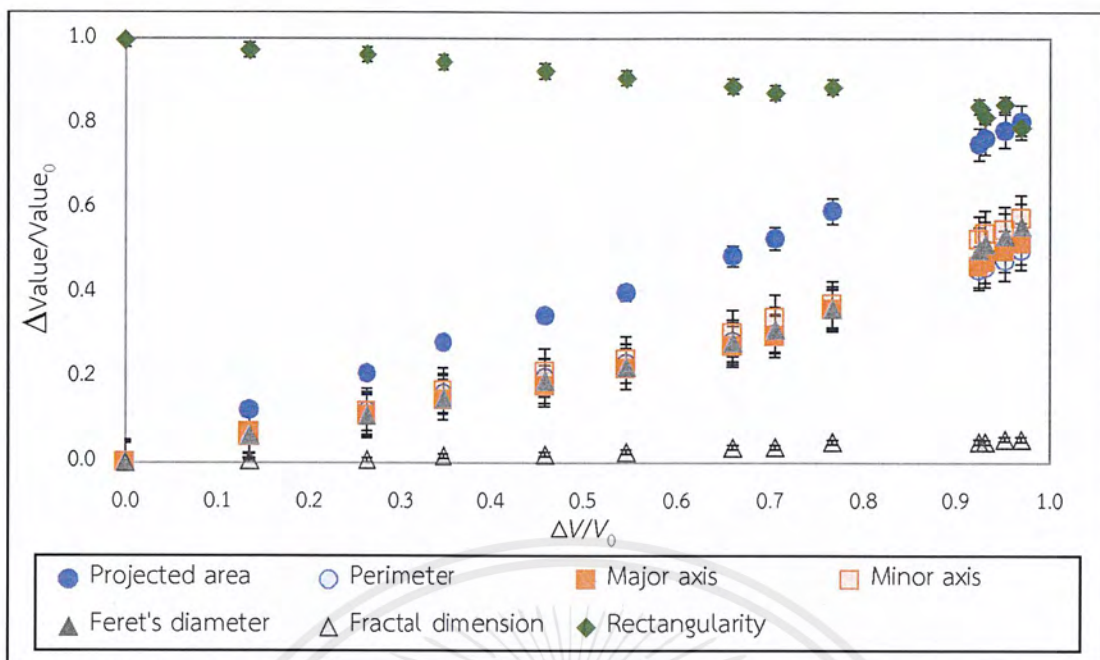
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในขณะที่ค่ามิติแฟร็กทัลเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าอื่น ๆ และค่อนข้างคงที่ จึงค่อนข้างเป็นเส้นตรง จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงที่สองหรือช่วงที่มีอัตราส่วนของความชื้นน้อยกว่า 0.05 พบว่าค่าตัวแปรต่าง ๆ เริ่มมีค่าคงที่ ในขณะที่ค่ามิติแฟร็กทัลเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าค่าตัวแปรอื่น ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าการหดตัว



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static)

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ได้จากภาพกับปริมาตรซึ่งวัดด้วยวิธีมาตรฐาน (การแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า พื้นที่ภาพฉายมีความสัมพันธ์กับวิธีมาตรฐานมากที่สุด ($R^2 = 0.99$) ดังนั้น จึงเลือกพื้นที่ภาพฉายเป็นตัวบ่งชี้การหดตัว เนื่องจากรวมถึงการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนที่สุดในตัวแปรต่าง ๆ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ง่าย และรวดเร็ว ส่วนค่ามิติแฟร็กทัลสามารถใช้ในการบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ค่าความเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นตัวประกอบรูปร่าง (shape factor) เนื่องจากขึ้นตัวอย่างมีลักษณะเป็นลูกบาศก์



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ต่อการหดตัวของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static)

4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

อุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏ เช่น สี ขนาด รูปร่าง และการหดตัว จากการศึกษอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งโดยอบ Agar gel ที่อุณหภูมิสูง, กลาง และต่ำ (90 องศาเซลเซียส, 70 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส) ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ± 0.1 เมตรต่อวินาที

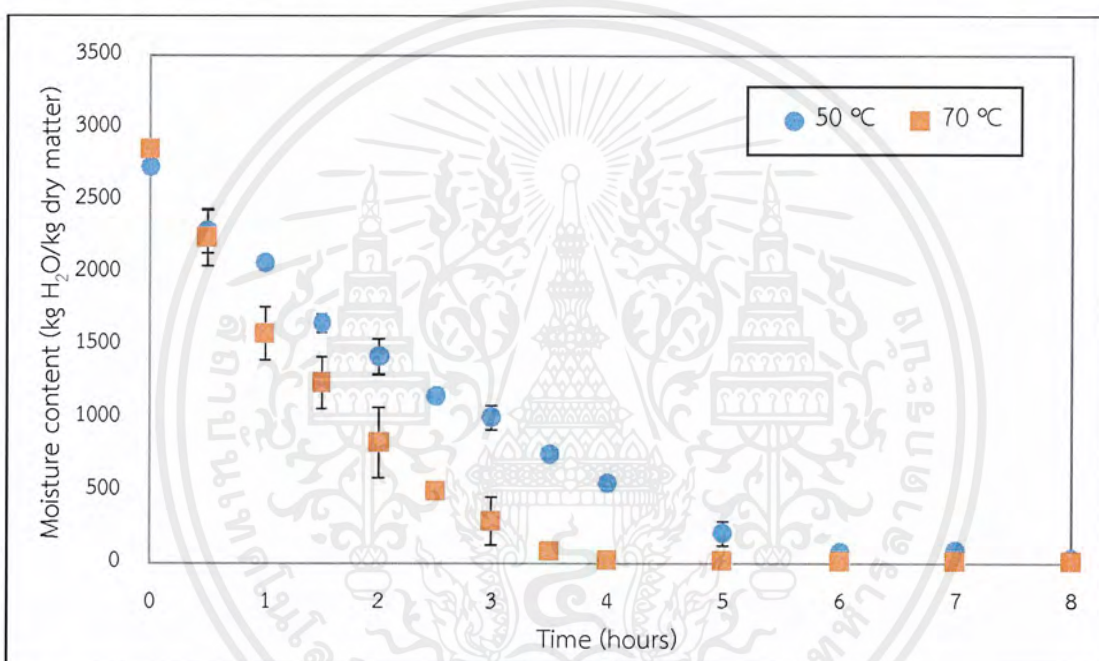


ก) ก่อนอบแห้ง ข) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

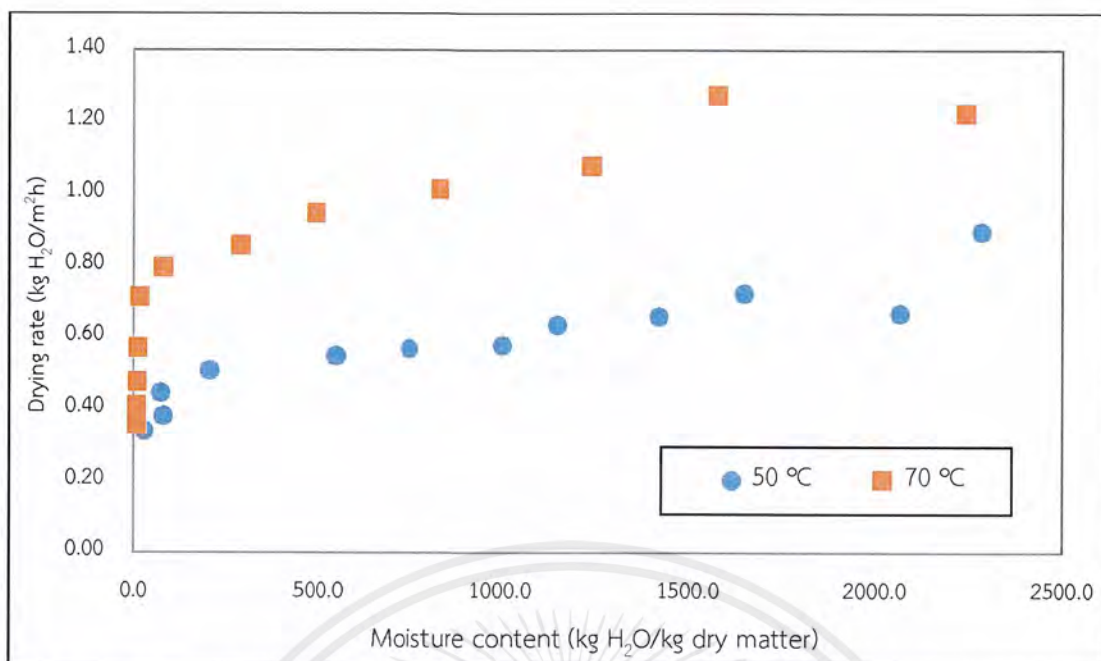
รูปที่ 4.4 รูปร่างของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
 (ก) ก่อนอบแห้ง (ข) อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (ค) อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการอบแห้ง Agar gel ที่ผสมปริมาณของแข็ง (น้ำตาล) ต่าง ๆ พบว่า ทุกสภาวะมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยพบว่า การอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ขึ้นตัวอย่างเกิดการละลายเนื่องจากจุดหลอมเหลวของ Agar โดยปกติอยู่ที่ 85 องศาเซลเซียส ทำให้ขึ้นตัวอย่างไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้ จึงไม่สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพได้ ส่วนในการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าความชื้นของขึ้นตัวอย่างลดลงเร็วกว่าการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ประมาณ 61.90 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อเทียบกับความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง ซึ่งเป็น critical moisture contain, X_c) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ น้ำจากภายในขึ้นตัวอย่างแพร่ออกมาและระเหยได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า จึงทำให้อัตราการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เร็วกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกับที่ (Static)

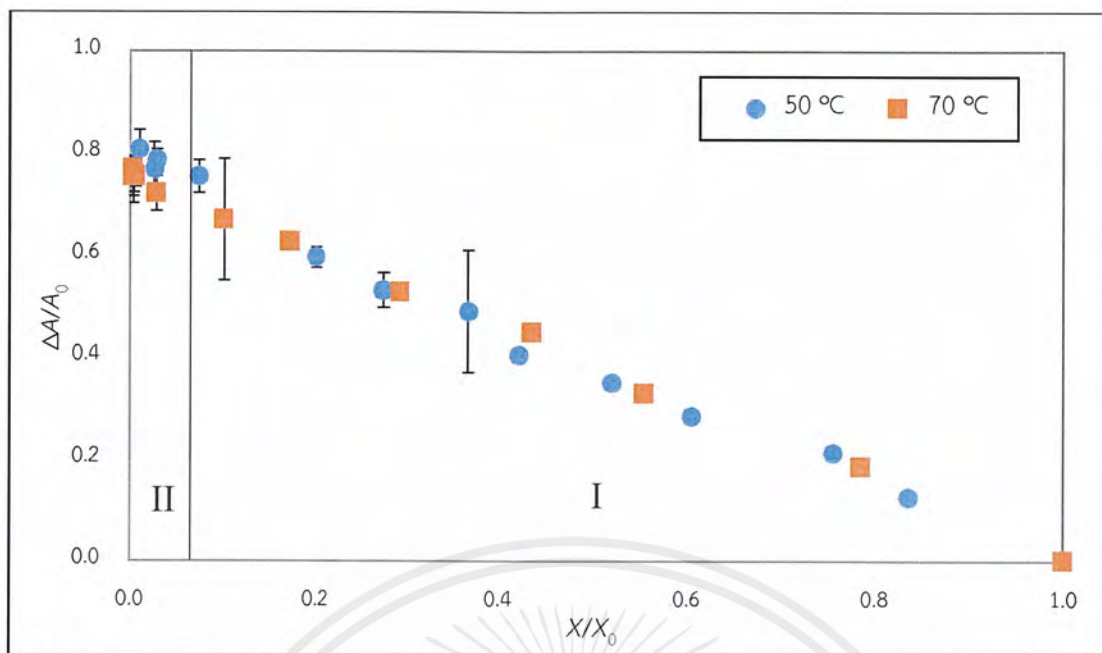


รูปที่ 4.6 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกับที่ (Static)

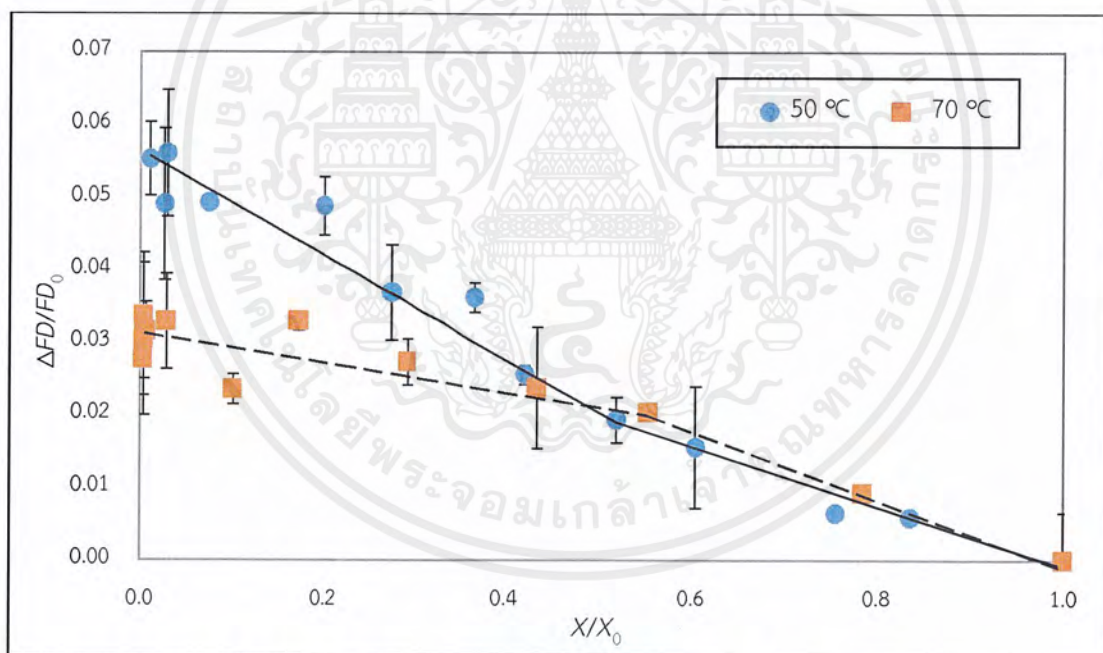
เมื่อพิจารณาการหดตัวพบว่า สามารถแบ่งการหดตัวได้เป็น 2 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ช่วงแรกหรือในช่วงที่มีอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ ต่อเวลาเริ่มต้นตั้งแต่ 1 ถึง 0.05 การอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีการหดตัวเท่ากับการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แต่มีอัตราการหดตัวที่เร็วกว่าเนื่องจากชื้นตัวอย่างมีความสามารถเกิดเจลและอุ้มน้ำได้ดีมาก แม้จะมีระดับความเข้มข้นต่ำจึงทำให้เกิดการพองตัว (Swell) เมื่อได้รับความร้อนจึงทำให้ชื้นตัวอย่างกลับคืนสู่สภาพเดิม น้ำภายในชื้นตัวอย่างสามารถแพร่ออกมาและระเหยได้อย่างสม่ำเสมอ ส่วนในช่วงที่สองหรือในช่วงที่มีอัตราส่วนความชื้นน้อยกว่า 0.05 พบว่าการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสมีการหดตัวน้อยกว่าการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากชื้นตัวอย่างได้รับพลังงานความร้อนที่มากกว่า ทำให้น้ำระเหยไปเร็ว ส่งผลให้การแพร่ของน้ำไปยังพื้นผิวของอาหารไม่ทัน ทำให้ความชื้นระหว่างภายในและพื้นผิวของชื้นตัวอย่างแตกต่างกันมาก เกิดขอบแข็งบริเวณพื้นผิวของชื้นตัวอย่าง จึงเกิดการหดตัวน้อยกว่า

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง พบว่าการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากในช่วงแรกอัตราการระเหยของน้ำบริเวณผิวของชื้นตัวอย่างใกล้เคียงกับการแพร่ของน้ำในชื้นตัวอย่าง ทำให้ไม่เกิดความแตกต่างของความชื้นภายในและภายนอก จึงไม่เกิดการดิ่งภายในโครงสร้างของชื้นตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย ส่วนในช่วงหลังปริมาณน้ำในชื้นตัวอย่างลดลง การระเหยของน้ำเร็วกว่าการแพร่ของน้ำจากภายในชื้นตัวอย่างออกมาสู่ผิว จึงทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นระหว่างพื้นผิวและภายในชื้นตัวอย่างมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความเค้นและความเครียดภายในชื้นตัวอย่างทำให้เกิดการดิ่งภายในโครงสร้างและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



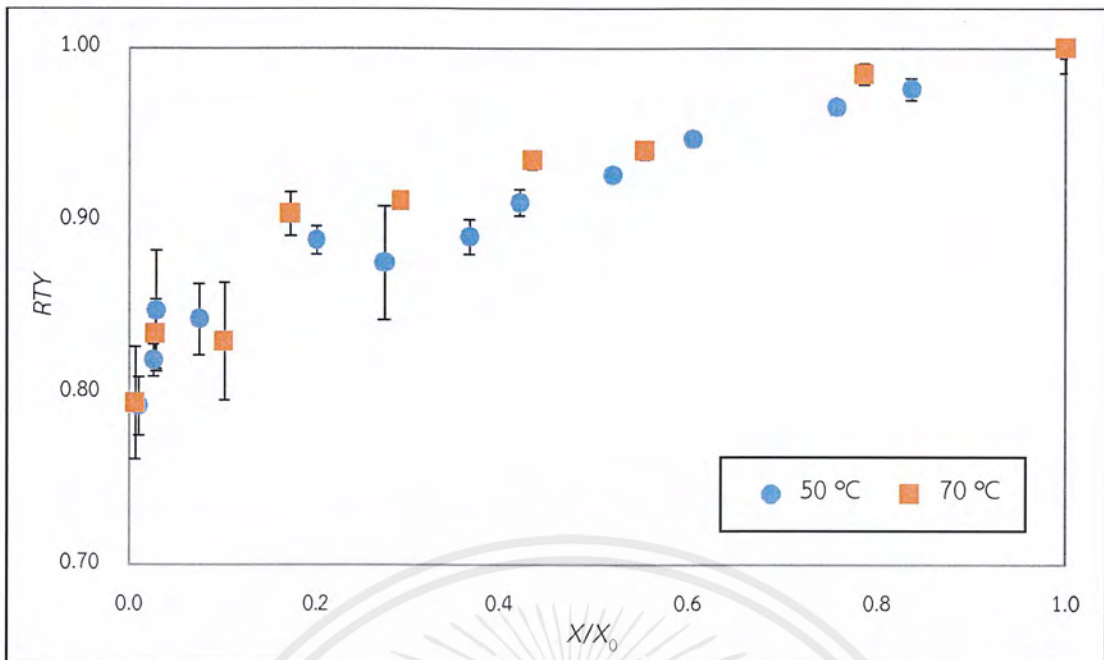
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกับที่ (Static)



รูปที่ 4.8 ค่ามิติแฟร็กทัลที่เปลี่ยนแปลงต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกับที่ (Static)

เมื่อพิจารณาค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, RTY) พบว่าการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถรูปร่างความเป็นสี่เหลี่ยมน้อยกว่าการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากขึ้นตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมมากกว่า ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น โดยขึ้นตัวอย่างที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์ และเติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, RTY) ต่ออัตราส่วนความเข้มข้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แบบวางกับที่ (Static)

4.3 อิทธิพลของของแข็ง (น้ำตาล) ในอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

ปริมาณของแข็งในอาหารมีผลต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอาหาร ดังนั้นทางคณะผู้ทดลองจึงได้ศึกษาอิทธิพลของของแข็ง โดยใช้น้ำตาลเป็นตัวแทนของแข็งในอาหาร ผสมลงใน Agar gel ในอัตราส่วน 0 เปอร์เซ็นต์, 20 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส, 70 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ± 0.1 เมตรต่อวินาที

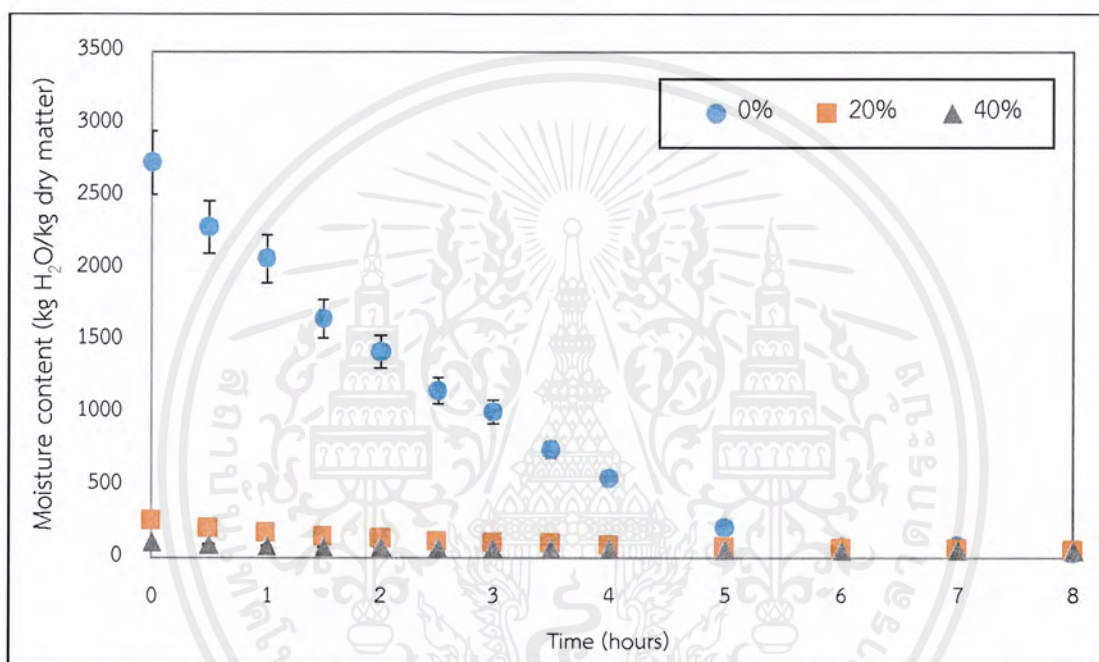


ก) ไม่เติมน้ำตาล ข) น้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์ ค) น้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์

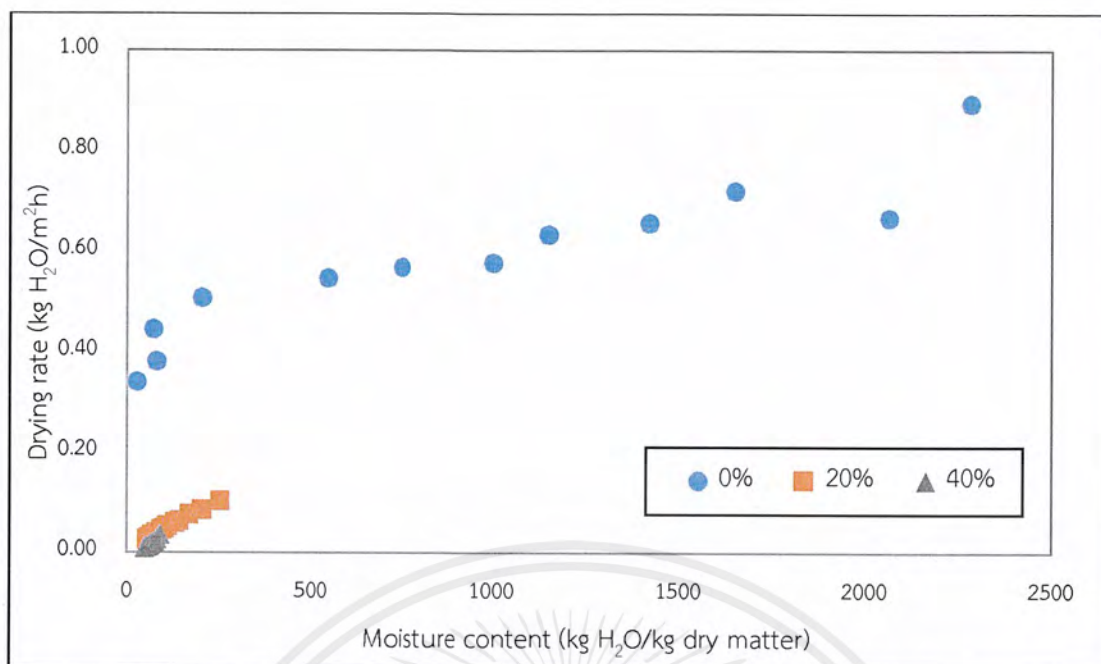
รูปที่ 4.10 รูปร่างของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่าง ๆ หลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ก) ไม่เติมน้ำตาล (ข) เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์ (ค) เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า การอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ไม่สามารถทำการทดลองได้ (ดังอธิบายในหัวข้อ 4.2) และพบว่า ชื้นตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล ความชื้นลดลงเร็วที่สุดเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน ตามด้วยชื้นตัวอย่างที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทั้งนี้เนื่องจากภายในชื้นตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล มีเพียงน้ำและ Agar ที่ทำพันธะกันอยู่ ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากจึงเกิดการแพร่และระเหยได้ดีกว่า ในขณะที่ชื้นตัวอย่างที่เติมน้ำตาล น้ำเกิดพันธะกับน้ำตาลทำให้ปริมาณน้ำอิสระในชื้นตัวอย่างมีน้อยกว่าชื้นตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล ดังนั้นการแพร่และการระเหยของน้ำจึงเกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้อัตราการอบแห้งของชื้นตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล เร็วกว่าชื้นตัวอย่างที่เติมน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.12

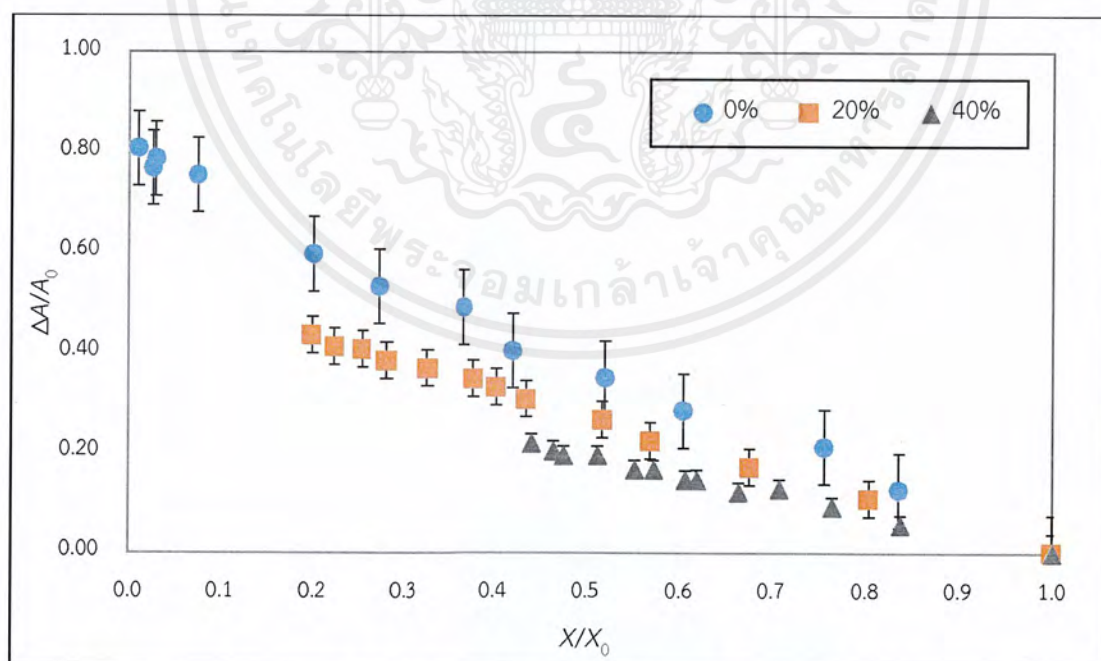


รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static)



รูปที่ 4.12 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static)

เมื่อพิจารณาในส่วนของการหดตัว พบว่าชิ้นตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล มีการหดตัวมากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีน้ำตาลผสมอยู่ โดยชิ้นตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำตาลที่น้อยกว่า มีการหดตัวมากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำตาลสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.13

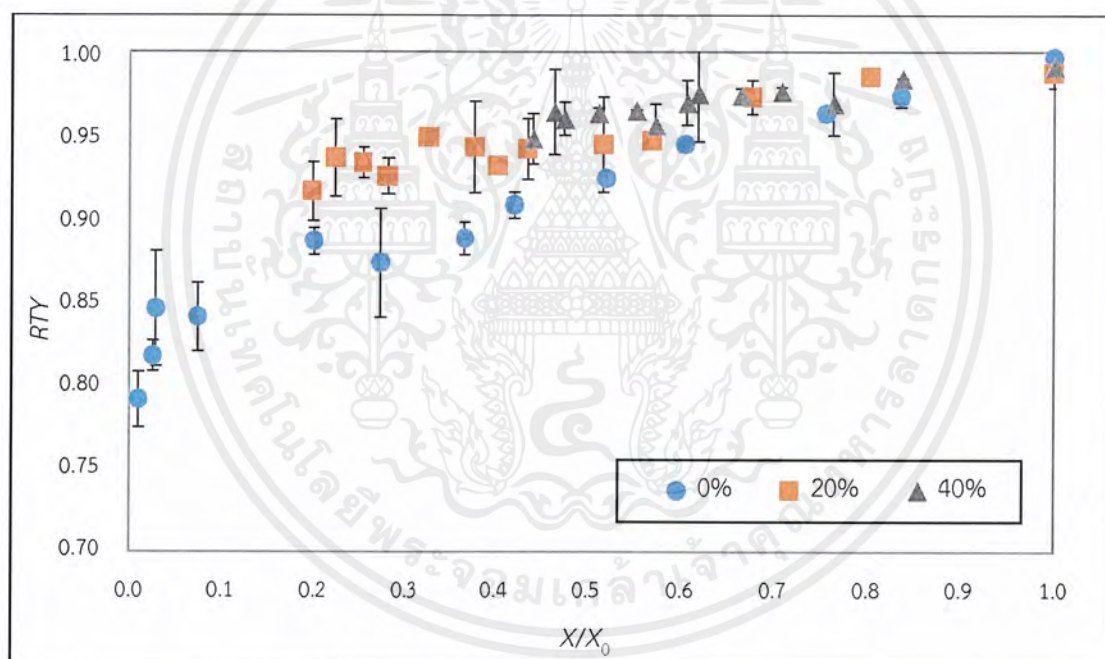


รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static)

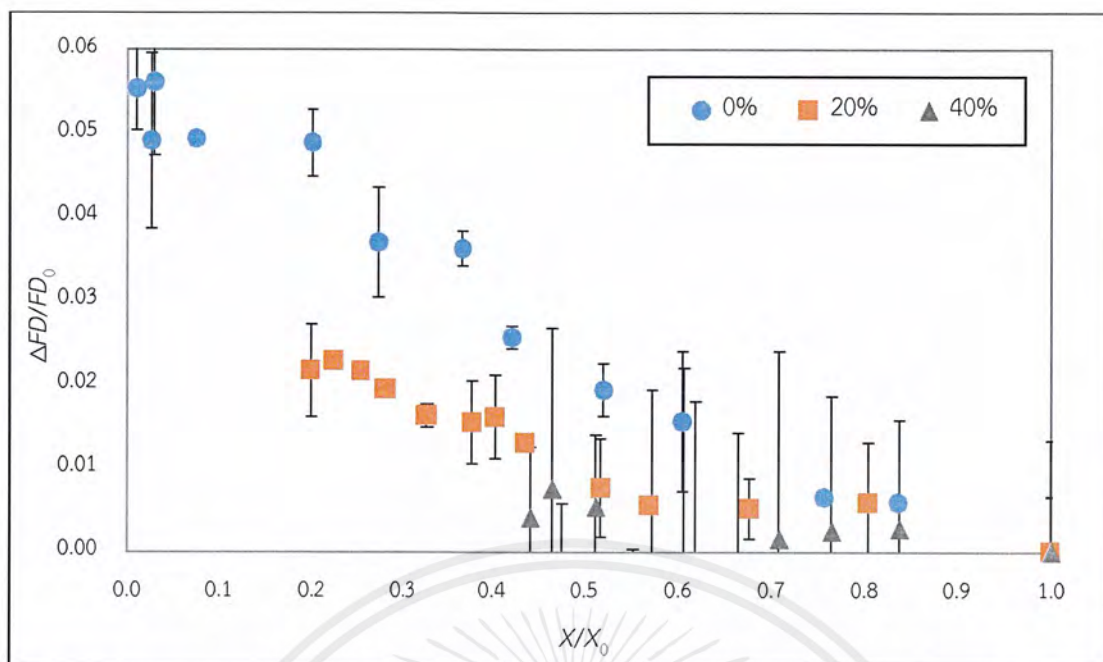
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากขึ้นตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล มีเพียงน้ำและ Agar ทำพันธะกันเกิดเป็นเจลเพื่อให้คงรูปร่างอยู่ได้ เมื่อมีการให้ความร้อน น้ำระเหยออกไปทำให้โครงสร้างที่เป็นเจลพองตัวอยู่กลับคืนสู่สภาพเดิม และส่งผลให้เกิดการหดตัว ในขณะที่ขึ้นตัวอย่างที่เติมน้ำตาล โครงสร้างภายในเกิดจากพันธะระหว่าง Agar, น้ำ และน้ำตาล ทำให้น้ำเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้การแพร่และการระเหยของน้ำเกิดขึ้นได้ยาก อีกทั้งโครงสร้างภายในมีน้ำตาลซึ่งเป็นของแข็งช่วยคงรูปร่าง จึงส่งผลให้เกิดการหดตัวน้อยกว่าขึ้นตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, *RTY*) พบว่าขึ้นตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าขึ้นตัวอย่างที่เติมน้ำตาล โดยขึ้นตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำตาลน้อยกว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าขึ้นตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำตาลมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 เนื่องจากโครงสร้างภายในมีน้ำตาลช่วยในการคงรูปร่าง และผลของการเติมน้ำตาลทำให้เจลที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรง (gel strength) และมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (ดูในรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อ 2.5.1)



รูปที่ 4.14 ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, *RTY*) ต่ออัตราส่วนความขึ้นที่ความขึ้นใด ๆ ต่อความขึ้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static)



รูปที่ 4.15 ค่ามิติแฟร็คทัลที่เปลี่ยนแปลงต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ปริมาณน้ำตาลต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบบวางกับที่ (Static)

4.4 อิทธิพลของการคลายความเครียด (Stress relaxation) ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ Agar gel ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

ในกระบวนการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของชิ้นตัวอย่างในแต่ละด้าน มีความแตกต่างกัน อาจเป็นผลเนื่องจากการได้รับความร้อนในแต่ละด้านไม่เท่ากัน ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างเกิดการหดตัวที่แตกต่างกัน จึงทำการศึกษาอิทธิพลของการคลายความเครียดโดยการพลิกและการหมุนชิ้นตัวอย่าง เปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบปกติ (วางกับที่) ต่อการเสีรูปร่างของ Agar gel ที่มีปริมาณน้ำตาล 0 เปอร์เซ็นต์, 20 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส, 70 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที \pm 0.1 เมตรต่อวินาที



ก) วางกับที่

ข) หมุน

ค) พลิก

รูปที่ 4.16 รูปร่างของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลและภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

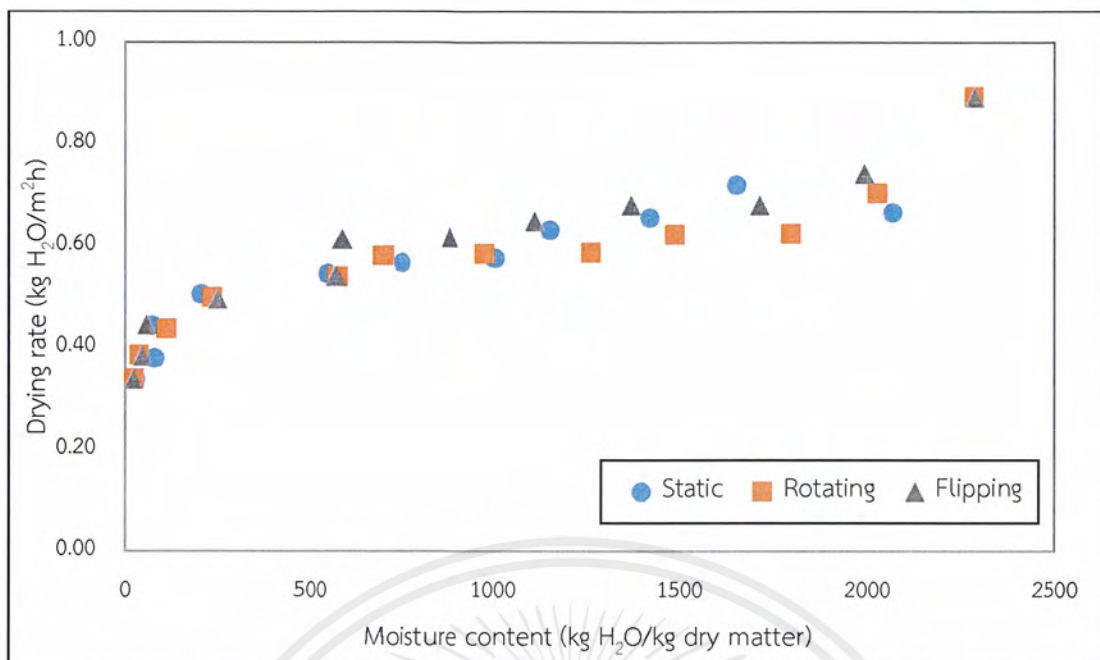
หลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ก) วางกับที่ (ข) หมุน (ค) พลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าในช่วง 5 ชั่วโมงแรก ความชื้นของชิ้นตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว ก่อนที่ความชื้นจะเริ่มเข้าสู่ช่วงความชื้นสมดุล โดยความชื้นของชิ้นตัวอย่างที่มีการพลิกลดลงเร็วกว่าชิ้นตัวอย่างที่วางกับที่ประมาณ 6.25 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อเทียบที่ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง) ส่วนชิ้นตัวอย่างที่มีการหมุนความชื้นลดลงเร็วกว่าชิ้นตัวอย่างที่วางกับที่เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เนื่องจากการพลิกชิ้นตัวอย่างจะช่วยให้แต่ละด้านมีโอกาสได้รับความร้อนสม่ำเสมอ ส่งผลให้น้ำภายในชิ้นตัวอย่างแพร่ไปยังผิวและระเหยโดยไม่เกิดขอบแข็ง ความชื้นจึงลดลงเร็วกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีการหมุน และวางกับที่ จึงทำให้อัตราการทำแห้งของชิ้นตัวอย่างที่มีการพลิก เร็วกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีการหมุน และวางกับที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.18

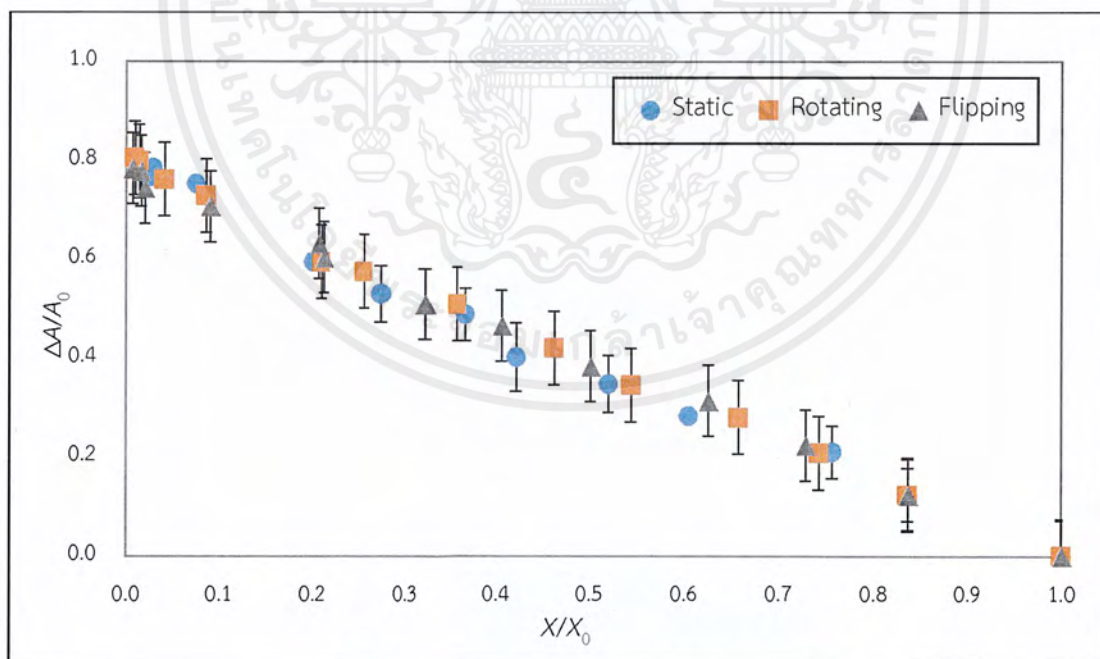


รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.18 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาการหดตัวพบว่าขึ้นตัวอย่างที่มีการพลิกหดตัวน้อยที่สุด ตามด้วยขึ้นตัวอย่างที่วางกับที่และขึ้นตัวอย่างที่มีการหมุน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19

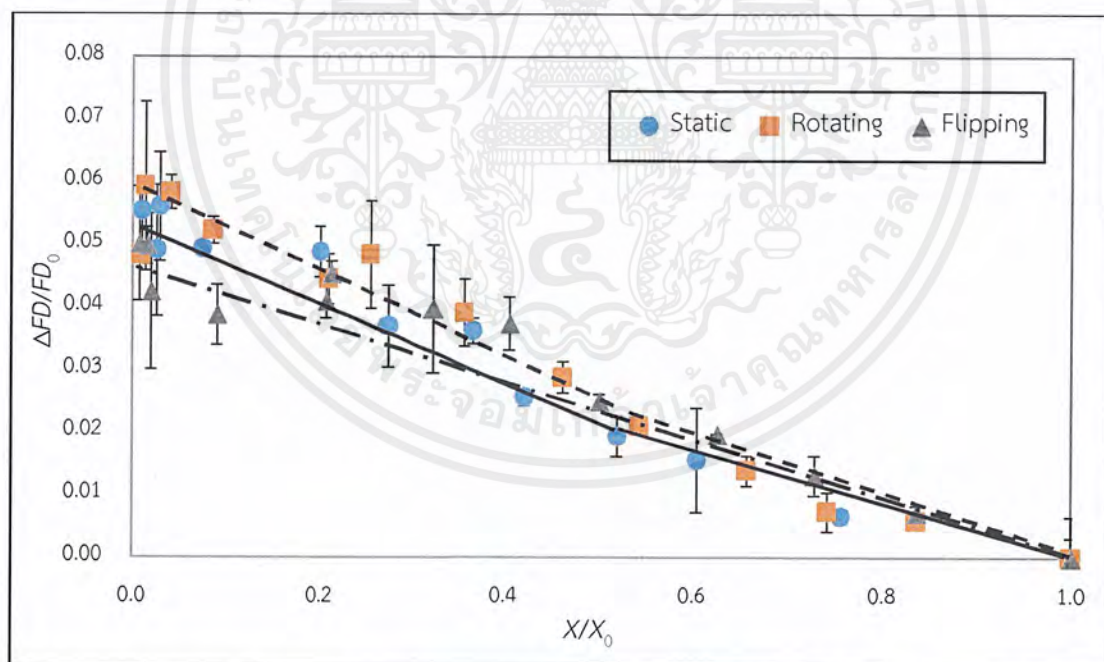


รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

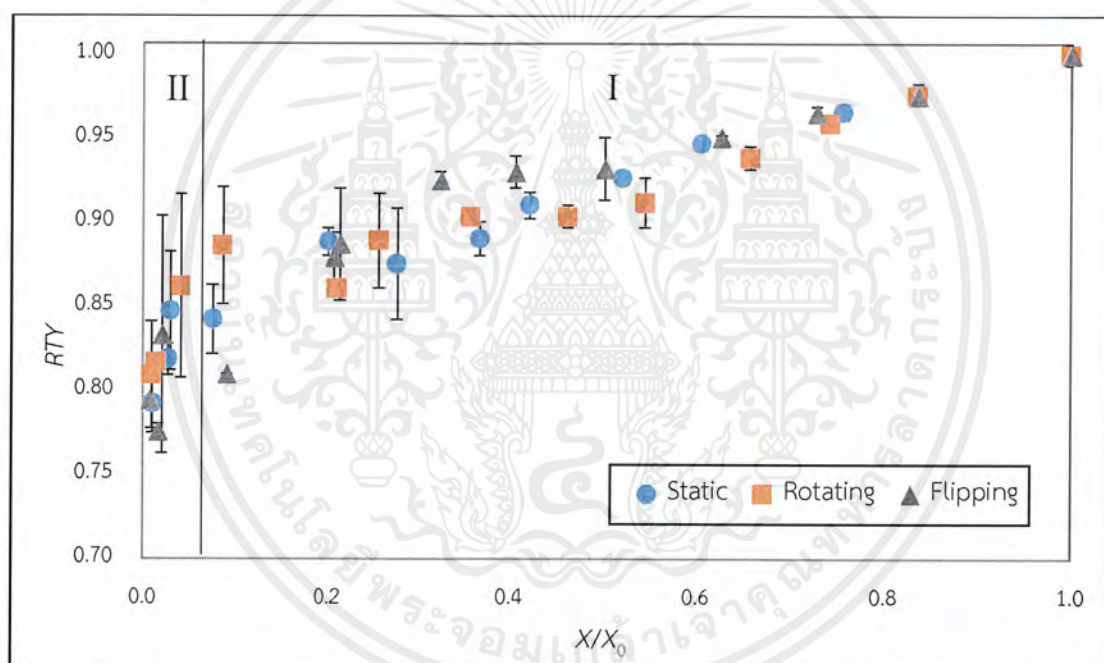
เนื่องจากการพลิกขึ้นตัวอย่าง ทำให้ด้านทุกด้านมีช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสลับกับคลายความร้อน ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีการคลายความเครียด (stress relief) จึงช่วยลดความเค้นและความเครียดภายในชิ้นตัวอย่าง จึงเกิดการเสีรูปน้อยกว่า ในขณะที่การหมุนและการวางกับที่ ด้านล่างที่ติดกับภาตได้รับความร้อนมากที่สุด จึงทำให้การหดตัวมีลักษณะใกล้เคียงกันคือ ด้านที่วางติดกับภาตมีลักษณะแข็งและถูกต้องเอาไว้ ทำให้การแพร่และการระเหยของน้ำเกิดขึ้นได้ยากที่ด้านนี้ ส่งผลให้น้ำแพร่ออกทางด้านข้างและด้านบนของชิ้นตัวอย่าง ส่งผลให้การหดตัวเกิดขึ้นมากในบริเวณนี้

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพบว่า การพลิกเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยที่สุด ตามด้วยชิ้นตัวอย่างที่วางกับที่และชิ้นตัวอย่างที่มีการหมุนดังแสดงในรูป 4.20 เนื่องจากการพลิกขึ้นตัวอย่าง มีการคลายความเครียด (ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น) ทำให้ทุกด้านมีการแพร่และระเหยของน้ำอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นไปอย่างค่อยเป็นค่อยไป ในขณะที่ชิ้นตัวอย่างที่มีการหมุนและวางกับที่ เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีการพลิก เนื่องจากด้านที่ติดกับภาตเกิดการนำความร้อนระหว่างภาตกับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง ทำให้ได้รับความร้อนสูงกว่าข้างที่สัมผัสกับลมร้อน ส่งผลให้ด้านที่ติดกับภาตมีลักษณะเกิดขอบแข็ง (caseharden) จึงหดตัวยาก ทำให้เกิดแรงดึงภายในชิ้นอาหารระหว่างฐาน (ด้านที่ติดกับภาต) กับด้านข้าง จึงเกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 4.20 ค่ามิติแฟร็คทัลที่เปลี่ยนแปลงต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, RTY) พบว่า สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 2 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ช่วงแรกหรือช่วงที่มีอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ ต่อเวลาเริ่มต้นตั้งแต่ 1 ถึง 0.05 การพลิกขึ้นตัวอย่างสามารถคงรูปร่างความเป็นสี่เหลี่ยมมากที่สุด ตามด้วยขึ้นตัวอย่างที่วางกับที่และขึ้นตัวอย่างที่มีการหมุน ตามลำดับ เนื่องจากขึ้นตัวอย่างที่มีการพลิก มีการหดตัวอย่างสม่ำเสมอในแต่ละด้าน ทำให้โครงสร้างภายในขึ้นตัวอย่างไม่เกิดการบิดเบี้ยว จึงสามารถคงรูปร่างความเป็นสี่เหลี่ยมไว้ได้ ในขณะที่ขึ้นตัวอย่างที่วางกับที่และขึ้นตัวอย่างที่มีการหมุน เกิดแรงดึงภายในขึ้นอาหารระหว่างฐาน (ด้านที่ติดกับถาด) กับด้านข้าง จึงเกิดการบิดเบี้ยวของขึ้นตัวอย่าง จึงคงรูปร่างความเป็นสี่เหลี่ยมได้น้อยกว่าขึ้นตัวอย่างที่มีการพลิก ส่วนในช่วงที่สองหรือช่วงที่มีอัตราส่วนความชื้นน้อยกว่า 0.05 ความชื้นเริ่มเข้าสู่ช่วงสมดุล น้ำภายในขึ้นตัวอย่างแพร่ออกมายังผิวหน้าได้อย่างไม่ต่อเนื่องทำให้โครงสร้างภายในเกิดการดึงกัน ส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวของขึ้นตัวอย่าง จนไม่สามารถคงรูปร่างความเป็นสี่เหลี่ยมไว้ได้



รูปที่ 4.21 ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangularity, RTY) ต่ออัตราส่วนความชื้นที่ความชื้นใด ๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาล ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ระหว่างกระบวนการอบแห้ง อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงมากมาย อาทิ ทางกายภาพ, เคมี, เคมีกายภาพ และโครงสร้างจุลภาค โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญ ได้แก่ การหดตัว การพองตัว และการเกิดเปลือกแข็ง โดยการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ส่งผลอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการประเมินและตรวจสอบลักษณะปรากฏของอาหาร เพื่อให้สามารถตรวจสอบคุณภาพของอาหารได้อย่างถูกต้องโดยมีเทคนิควิเคราะห์ภาพเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถตรวจสอบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวดเร็ว อีกทั้งเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายชิ้นอาหาร (Non-destructive testing)

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพเพื่อศึกษาลักษณะการเสีรูปร่างของอาหารที่เสีรูปร่างได้ง่ายในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Tray drying) เพื่อให้เข้าใจลักษณะการเสีรูปร่างของอาหาร โดยเลือกใช้ Agar gel (วุ้น) เป็นตัวแทนของวัสดุอาหาร และมีการศึกษาอิทธิพลของของแข็ง (น้ำตาล) ต่อการเสีรูปร่างของอาหาร โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ (50 องศาเซลเซียส, 70 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส) ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน (วางกับที่, การหมุน และการพลิก) ศึกษาอัตราการทำแห้ง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพในเทอมของพื้นที่ภาพฉาย เส้นรอบรูป แกนหลัก แกนรอง รัศมีเฟอร์เร็ด มิติแฟร็กทัล และค่าความเป็นสี่เหลี่ยม เปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีมาตรฐาน (การแทนที่ของเหลวด้วยหลักการแรงลอยตัว) พบว่าการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เป็นตัวบ่งชี้การหดตัว เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับการหดตัว (การเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่วัดด้วยวิธีมาตรฐาน) อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ห่อออกมาได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพบว่ามีค่ามิติแฟร็กทัลเป็นค่าที่สามารถบ่งชี้ได้ดีที่สุด

จากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง สามารถทำแห้งได้เร็วกว่า รวมถึงเกิดการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และพบว่าปริมาณของแข็งในอาหารส่งผลต่อการหดตัว โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย อีกทั้งยังสามารถคงรูปร่างความเป็นสี่เหลี่ยมไว้ได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมของแข็ง

เมื่อพิจารณาผลของการคลายความเครียด (Stress relaxation) พบว่าตัวอย่างที่มีการเคลื่อนที่มีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าตัวอย่างที่วางกับที่ ทั้งนี้พบว่าการพลิกช่วยคงรูปร่างและลดการหดตัวมากกว่าการหมุน

จากปริญญานิพนธ์นี้พบว่าเทคนิควิเคราะห์ภาพสามารถนำไปใช้ตรวจสอบการเสีรูปร่างของอาหารในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้ โดยไม่สัมผัสกับชิ้นอาหาร และเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการติดตามและควบคุมกระบวนการอบแห้งในอุตสาหกรรมได้ ดังนั้น หากต้องการอบแห้งอาหารโดยคงรูปร่างไว้ไม่ให้เกิดรูปร่างระหว่างการอบแห้งควรอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และมีการเพิ่มปริมาณของแข็งลงในอาหาร และควรมีการพลิกขึ้นตัวอย่างระหว่างการอบแห้ง เพื่อลดการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการอบแห้ง

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาเพิ่มเติม

1. เนื่องจากในวัสดุอาหารจริงตามธรรมชาติประกอบด้วยสารอาหารหลากหลายประเภท อาจมีการสร้างพันธะเฉพาะซึ่งกันและกัน และอาจส่งผลต่อลักษณะการเสีรูบของอาหารได้ จึงควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Agar gel โดยเพิ่มสารอื่น ๆ อาทิ โปรตีน, ไขมัน นอกเหนือจากน้ำตาลในวัสดุตัวอย่าง

2. ควรติดตั้งกล้องถ่ายภาพด้านข้างเพิ่มเติม เพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลภาพที่จะนำไปวิเคราะห์



บรรณานุกรม

- ขจรเกียรติ ศรีนวลสม. 2558. “การสกัดวุ้นจากสาหร่าย (Agar extraction from algae).” การเพาะเลี้ยงสาหร่าย. 15(6) : 41-43.
- ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์. 2555. การประมวลผลภาพดิจิทัลด้วย MATLAB. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด.
- ณิชากัทร สมบูรณ์. 2556. “สมบัติของเจลผสมระหว่างวุ้นกับเจลาตินปลา.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปานทิพย์ เปลี่ยนโมฬี. 2557. อุตสาหกรรมสาร. กรุงเทพฯ : บริษัท ซี แอด โพรโมชัน (1997) จำกัด. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. 2014. บทที่ 4 สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรต-ไฮโดรคอลลอยด์และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. [Online]. Available: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap4/Chap4_intro.htm.
- สวณิต อิชยาวณิชย์. 2556. “ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดกลาสทรานซิชันระหว่างการอบแห้งกับคุณภาพของอาหารแห้งที่ผลิตได้.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 23(1) : 241-249.
- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป.
- Antonelli, A., Cocchi, M., Fava, P., Foca, G., Franchini G., Manzini, D. and Ulrici, A. 2004. “Automated evaluation of food colour by means of multivariate image analysis coupled to a wavelet-based classification algorithm.” *Analytica Chimica Acta*. 515(2004): 3-13.
- Aprajeeta, J., Gopirjah, R. and Anandharmakrishnan, C. 2014. “Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying.” *Journal of Food Engineering*. 144(2015): 119-128.
- Araya-Farias, M. and Ratti, C. 2009. “Dehydration of Foods: General Concepts.” 2-32. In Ratti, C., editor. *Advances in Food Dehydration*. Boca Raton: CRC Press.
- Armisen, R. and Galactas, F. 1987. “Production, properties and uses of agar.” In: McHugh, D.J. (Ed.), *Production and Utilisation of Products from Commercial Seaweeds*. FAO Fish. Tech. 288: 1-57.
- ASTM International. 2012. ASTM E179-12: Standard Guide for Selection of Geometric Condition for Measurement of Reflection and Transmission Properties of Materials. West Conshohocken: ASTM International.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Barbosa-C' anovas, G. and Vega-Mercado, H. 1996. *Dehydration of Foods*. New York: Chapman & Hall.
- Briones, V., Aguilera, J., and Brown, C. 2005. "Effect of surface topography on color and gloss of chocolate samples." *Journal of Food Engineering*. 77(2006): 776-783.
- Buczowski, S., Hildgen, P. and Cartilier, S. 1997. "Measurements of fractal dimension by box-counting: a critical analysis of data scatter." *Physica A* 252(1998): 23-34.
- Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit, S. and Mujumdar, A.S. 2004. A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. *Drying Technology*, 22: 1845-1867.
- Kerdpiboon, S. and Devahastin, S. 2007. "Fractal characterization of some physical properties of a food product under various drying conditions." *Drying Technology*, 25: 135-146.
- Leiva-Valenzuela, G.A., Lu, R. and Aguilera, J. 2012. "Prediction of firmness and soluble solids content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging." *Journal of Food Engineering*. 115 (2013): 91-98.
- Lgathinathane, C., Pordesimo, L.O., Columbus, E.P., Batchelor, W.D. and Methuku, S.R. 2008. "Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ." *Computers and Electronics in Agriculture*. 63(2008): 168-182.
- Mayor, L., and Sereno, A.M. 2004. "Modelling shrinkage During Convective drying of food materials: a review." *Journal of Food Engineering*. 61(2): 373-386.
- Medin, A. 1995. "Studies of structure and properties of agarose." Ph.D. Thesis, Acta Universitatis Upsaliensis. 126
- Mendoza, F., Dejmek, P. and Aguilera, J. 2007. "Colour and image texture analysis in classification of commercial potato chips." *Food Research International*. 40(2007): 1146-1154.
- Moncel, B. 2015. **What is Agar-Agar?**. [Online]. Available: <http://foodreference.about.com/od/Food-Additives/a/What-Is-Agar-agar.htm>.
- Panda, H. 2010. *The Complete Book on Gums and Stabilizers for Food Industry*. Delhi: Asia Pacific Business Press Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Porto, S. 2015. Agar gel. [Online]. Available: <http://www.agargel.com.br/agar-techn.html>.
- Rahman, M.S, and Perera, C.O. 2007. "Drying and Food Preservation." 404-420. In Rahman, M.S., *Handbook of Preservation 2nd*. Boca Raton: CRC Press.
- Sahin, S. and Sumnu, S. 2005. *Physical properties of foods*. The United States of America: Springer Science.
- Serghei, C. 2009. "Effect of conventional and multisage drying processing on non-enzymatic browning in tomato." *Journal of Food Engineering*. 96(2010): 114-118.
- Tang, J. and Yang, T. 2004. "Dehydrated Vegetable: Principles and Systems." In Huy, Y.H., Ghazala, S., Graham, D.M., Murrell, K.D. and Nip, W., editor. *Handbook of Vegetable Preservation and Processing*. New York: Mercel Dekker.
- Wahl. 2014. *Fractals Dimension*. [Online]. Available: http://www.wahl.org/fe/HTML_version/link/contents.htm.
- Yam, K.L. and Papadakis, S. 2004. "A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces." *Journal of Food Engineering*. 61(2): 137-142.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J. and Oliveira, F. 2007. "Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying." *Journal of Food Engineering*. 84(2008): 430-44.
- Zheng, C., Sun, D. and Zheng, L. 2006. "Recent applications of image texture for evaluation of food qualities-a review." *Trend in Food Science & Technology*. 17(2006): 113-128.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบวงกบที่ (Static) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	2731.08 ± 30.32	7.79 ± 0.48	287311 ± 21484	2131.17 ± 86.44	627.34 ± 30.23	607.23 ± 15.54	604.60 ± 22.62	1.083 ± 0.007	1.00 ± 0.01
0.5	2284.82 ± 148.41	6.74 ± 0.26	2516578 ± 3501	1989.61 ± 25.09	582.54 ± 6.45	569.83 ± 1.66	565.93 ± 3.84	1.077 ± 0.000	0.98 ± 0.01
1	2066.31 ± 32.41	5.74 ± 0.04	226773 ± 1752	1871.81 ± 17.65	557.34 ± 0.87	534.16 ± 3.47	537.13 ± 2.02	1.076 ± 0.000	0.97 ± 0.00
1.5	1651.76 ± 65.20	5.09 ± 0.48	206071 ± 11901	1782.11 ± 49.18	533.97 ± 16.16	504.63 ± 14.31	511.92 ± 14.65	1.066 ± 0.008	0.95 ± 0.00
2	1421.45 ± 121.74	4.22 ± 0.17	187316 ± 2574	1702.39 ± 3.08	513.09 ± 2.20	476.94 ± 8.27	487.83 ± 3.39	1.062 ± 0.003	0.93 ± 0.00
2.5	1152.29 ± 21.76	3.53 ± 0.18	171743 ± 7029	1629.16 ± 28.18	487.36 ± 7.55	458.94 ± 11.81	467.21 ± 9.60	1.056 ± 0.001	0.91 ± 0.01
3	1005.43 ± 83.36	2.65 ± 0.27	146853 ± 4189	1521.72 ± 6.37	454.63 ± 3.12	421.36 ± 8.08	431.85 ± 6.13	1.044 ± 0.002	0.89 ± 0.01
3.5	748.47 ± 3.94	2.30 ± 0.27	134971 ± 6153	1480.72 ± 9.48	440.18 ± 2.17	399.37 ± 19.49	413.84 ± 9.90	1.043 ± 0.007	0.88 ± 0.03
4	548.82 ± 14.40	1.81 ± 0.00	116294 ± 4285	1357.33 ± 23.88	399.60 ± 9.37	379.46 ± 4.88	384.42 ± 7.04	1.030 ± 0.004	0.89 ± 0.01
5	206.38 ± 84.73	0.59 ± 0.21	70973 ± 5478	1160.87 ± 20.91	335.75 ± 14.66	286.09 ± 6.39	299.82 ± 11.22	1.030 ± 0.000	0.84 ± 0.02
6	73.52 ± 8.68	0.53 ± 0.01	66994 ± 1517	1148.58 ± 9.57	329.45 ± 7.74	278.36 ± 1.91	291.37 ± 2.84	1.030 ± 0.010	0.82 ± 0.01
7	81.63 ± 15.52	0.37 ± 0.16	61656 ± 1662	1113.21 ± 5.95	312.90 ± 10.53	272.69 ± 6.26	279.54 ± 3.41	1.023 ± 0.009	0.85 ± 0.04
8	29.72 ± 13.23	0.23 ± 0.00	55809 ± 457	1061.12 ± 9.78	301.55 ± 4.40	255.77 ± 2.87	265.86 ± 1.18	1.023 ± 0.005	0.79 ± 0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบหมุน (Rotating) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	2731.08 ± 30.32	7.79 ± 0.48	287311 ± 21484	2131.17 ± 86.44	627.34 ± 30.23	607.23 ± 15.54	604.60 ± 22.62	1.083 ± 0.007	1.00 ± 0.01
0.5	2284.82 ± 148.41	6.74 ± 0.26	2516578 ± 3501	1989.61 ± 25.09	582.54 ± 6.45	569.83 ± 1.66	565.93 ± 3.84	1.077 ± 0.000	0.98 ± 0.01
1	2027.79 ± 45.31	5.85 ± 0.04	227435 ± 111	1876.24 ± 3.10	557.22 ± 3.81	535.86 ± 3.06	537.82 ± 0.03	1.075 ± 0.003	0.96 ± 0.00
1.5	1796.41 ± 3.38	5.17 ± 0.03	206741 ± 709	1785.57 ± 12.82	532.14 ± 0.15	508.24 ± 2.13	512.73 ± 0.93	1.068 ± 0.002	0.94 ± 0.01
2	1487.22 ± 66.63	4.20 ± 0.35	187978 ± 6066	1705.91 ± 19.49	512.06 ± 3.76	479.10 ± 12.19	488.66 ± 8.02	1.061 ± 0.001	0.91 ± 0.01
2.5	1263.66 ± 15.77	3.43 ± 0.23	166371 ± 2036	1596.64 ± 6.13	478.97 ± 3.95	452.06 ± 1.19	459.93 ± 2.98	1.052 ± 0.002	0.90 ± 0.01
3	979.54 ± 24.77	2.70 ± 0.51	140862 ± 15916	1484.01 ± 62.90	438.86 ± 24.65	418.09 ± 22.64	422.92 ± 23.96	1.041 ± 0.005	0.90 ± 0.00
3.5	699.36 ± 7.51	2.01 ± 0.30	121985 ± 18292	1384.31 ± 98.86	408.73 ± 30.53	388.62 ± 28.83	393.17 ± 29.31	1.031 ± 0.009	0.89 ± 0.03
4	575.04 ± 10.57	1.76 ± 0.00	116397 ± 5493	1370.72 ± 20.35	396.77 ± 9.07	384.20 ± 8.86	384.45 ± 9.04	1.035 ± 0.004	0.86 ± 0.00
5	236.48 ± 56.23	0.79 ± 0.19	77767 ± 7795	1199.10 ± 49.22	342.42 ± 11.87	304.72 ± 15.47	313.80 ± 15.65	1.027 ± 0.002	0.89 ± 0.03
6	113.56 ± 55.13	0.59 ± 0.11	68416 ± 1145	1117.78 ± 23.28	316.91 ± 1.23	291.87 ± 0.47	294.59 ± 2.35	1.020 ± 0.003	0.86 ± 0.05
7	40.04 ± 29.15	0.28 ± 0.02	57809 ± 3057	1100.65 ± 11.51	307.51 ± 3.31	262.51 ± 13.94	270.55 ± 7.58	1.019 ± 0.014	0.82 ± 0.00
8	26.67 ± 4.20	0.20 ± 0.00	55856 ± 605	1098.77 ± 12.88	303.38 ± 7.88	258.20 ± 3.72	266.11 ± 1.31	1.031 ± 0.001	0.81 ± 0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบพลิก (Flipping) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่สภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	2731.08 ± 30.32	7.79 ± 0.48	287311 ± 21484	2131.17 ± 86.44	627.34 ± 30.23	607.23 ± 15.54	604.60 ± 22.62	1.083 ± 0.007	1.00 ± 0.01
0.5	2284.82 ± 148.41	6.74 ± 0.26	2516578 ± 3501	1989.61 ± 25.09	582.54 ± 6.45	569.83 ± 1.66	565.93 ± 3.84	1.077 ± 0.000	0.98 ± 0.01
1	1989.41 ± 33.73	5.73 ± 0.03	287299 ± 21500	1854.93 ± 18.98	547.36 ± 1.58	534.18 ± 8.26	532.60 ± 4.90	1.072 ± 0.003	0.97 ± 0.00
1.5	1710.93 ± 79.26	4.81 ± 0.07	251652 ± 3509	1740.49 ± 11.34	513.13 ± 1.59	501.29 ± 3.19	500.72 ± 0.48	1.064 ± 0.000	0.95 ± 0.00
2	1369.52 ± 29.94	4.00 ± 0.21	222866 ± 4113	1653.59 ± 9.35	487.07 ± 4.48	473.91 ± 6.41	474.59 ± 5.71	1.059 ± 0.001	0.93 ± 0.02
2.5	1109.59 ± 57.88	3.23 ± 0.19	196970 ± 391	1546.78 ± 23.98	455.87 ± 11.38	438.49 ± 5.27	441.75 ± 8.26	1.045 ± 0.004	0.93 ± 0.01
3	879.88 ± 2.27	2.74 ± 0.36	176980 ± 4230	1488.37 ± 61.03	438.94 ± 13.95	419.27 ± 22.70	423.41 ± 18.70	1.043 ± 0.010	0.93 ± 0.01
3.5	582.60 ± 71.82	1.89 ± 0.02	153317 ± 5736	1390.67 ± 82.90	395.15 ± 9.92	380.53 ± 9.02	380.28 ± 7.44	1.037 ± 0.002	0.89 ± 0.03
4	566.89 ± 33.25	1.51 ± 0.00	14097 ± 12401	1380.86 ± 6.54	383.94 ± 0.70	367.14 ± 5.34	366.63 ± 3.50	1.041 ± 0.003	0.88 ± 0.01
5	248.33 ± 56.82	0.81 ± 0.06	113693 ± 4515	1304.47 ± 30.96	350.84 ± 1.95	329.93 ± 8.23	327.25 ± 3.42	1.044 ± 0.005	0.81 ± 0.00
6	57.04 ± 15.78	0.40 ± 0.07	105686 ± 2007	1226.40 ± 56.06	328.44 ± 7.99	308.08 ± 0.25	305.24 ± 2.84	1.040 ± 0.012	0.83 ± 0.07
7	45.52 ± 28.75	0.26 ± 0.05	84207 ± 1811	1193.62 ± 91.28	312.64 ± 16.48	287.48 ± 11.50	283.91 ± 12.28	1.032 ± 0.003	0.78 ± 0.00
8	20.90 ± 2.89	0.14 ± 0.05	73332 ± 1447	1194.45 ± 38.05	312.51 ± 11.18	281.86 ± 3.45	280.46 ± 6.29	1.031 ± 0.009	0.79 ± 0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวสําหรับการเชางานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตหนาไปใชประโยชนดานการค้า
ไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อักทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบวางกบที่ (Static) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	257.32 ± 16.46	7.35 ± 0.17	273722 ± 13891	2092.15 ± 64.20	609.94 ± 14.68	596.11 ± 15.94	590.21 ± 14.98	1.079 ± 0.007	0.99 ± 0.01
0.5	207.03 ± 12.01	6.65 ± 0.51	244172 ± 14537	1960.13 ± 49.72	577.45 ± 13.58	558.87 ± 19.30	557.37 ± 16.60	1.073 ± 0.007	0.99 ± 0.00
1	174.04 ± 1.45	6.04 ± 0.38	227184 ± 8227	1888.79 ± 36.40	555.37 ± 9.17	539.76 ± 10.57	537.60 ± 9.78	1.074 ± 0.004	0.98 ± 0.01
1.5	146.47 ± 13.30	5.42 ± 0.06	212661 ± 719	1846.08 ± 1.89	536.94 ± 1.84	522.65 ± 2.84	520.05 ± 0.86	1.073 ± 0.000	0.95 ± 0.00
2	133.19 ± 4.80	4.88 ± 0.05	201242 ± 8236	1807.64 ± 48.66	522.43 ± 10.10	509.51 ± 10.27	505.84 ± 10.17	1.071 ± 0.006	0.95 ± 0.03
2.5	112.30 ± 0.29	4.41 ± 0.09	189806 ± 4944	1765.17 ± 43.65	510.52 ± 10.30	492.17 ± 2.85	491.11 ± 6.09	1.065 ± 0.001	0.94 ± 0.02
3	103.97 ± 4.36	4.17 ± 0.12	183426 ± 4131	1726.91 ± 19.46	502.61 ± 1.91	483.15 ± 8.98	482.91 ± 5.51	1.062 ± 0.005	0.93 ± 0.00
3.5	97.51 ± 2.13	3.87 ± 0.16	178784 ± 4909	1707.03 ± 35.90	496.14 ± 10.99	477.66 ± 2.81	476.59 ± 6.23	1.063 ± 0.005	0.95 ± 0.03
4	84.08 ± 1.45	3.75 ± 0.14	172981 ± 3485	1679.23 ± 11.65	489.37 ± 2.75	468.90 ± 6.32	468.86 ± 4.79	1.062 ± 0.001	0.95 ± 0.00
5	72.46 ± 1.06	3.37 ± 0.18	168853 ± 4980	1676.21 ± 19.92	484.17 ± 4.89	463.76 ± 9.26	463.03 ± 6.91	1.058 ± 0.001	0.93 ± 0.01
6	65.56 ± 0.61	3.13 ± 0.06	162655 ± 3388	1636.08 ± 19.72	474.76 ± 2.50	455.13 ± 7.22	454.60 ± 4.71	1.056 ± 0.000	0.94 ± 0.01
7	57.88 ± 2.64	3.13 ± 0.14	161349 ± 409	1630.35 ± 7.41	471.63 ± 3.52	454.94 ± 4.38	452.89 ± 0.72	1.055 ± 0.001	0.94 ± 0.02
8	51.36 ± 1.13	2.88 ± 0.07	154908 ± 5993	1606.63 ± 41.91	465.57 ± 8.04	443.58 ± 11.14	443.65 ± 8.47	1.056 ± 0.006	0.92 ± 0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบหมุน (Rotating) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	257.32 ± 16.46	7.35 ± 0.17	273722 ± 13891	2092.15 ± 64.20	609.94 ± 14.68	596.11 ± 15.94	590.21 ± 14.98	1.079 ± 0.007	0.99 ± 0.01
0.5	207.03 ± 12.01	6.65 ± 0.51	244172 ± 14537	1960.13 ± 49.72	577.45 ± 13.58	558.87 ± 19.30	557.37 ± 16.60	1.073 ± 0.007	0.99 ± 0.00
1	181.39 ± 7.31	5.98 ± 0.26	224515 ± 5591	1885.37 ± 16.87	551.26 ± 4.20	537.87 ± 8.78	534.41 ± 6.73	1.074 ± 0.000	0.96 ± 0.01
1.5	150.97 ± 7.97	5.47 ± 0.17	215526 ± 1839	1858.27 ± 1.70	540.31 ± 0.56	526.92 ± 3.99	523.62 ± 2.36	1.073 ± 0.001	0.96 ± 0.01
2	129.85 ± 7.08	4.77 ± 0.08	198640 ± 5457	1791.59 ± 23.08	521.38 ± 5.40	503.89 ± 860	502.59 ± 6.91	1.070 ± 0.005	0.96 ± 0.00
2.5	134.13 ± 24.44	4.60 ± 0.03	193361 ± 710	1767.45 ± 9.75	513.19 ± 3.57	498.07 ± 1.35	495.88 ± 0.90	1.066 ± 0.000	0.94 ± 0.00
3	104.40 ± 3.54	4.10 ± 0.12	181209 ± 2367	1718.66 ± 13.40	499.69 ± 3.95	480.98 ± 2.67	479.97 ± 3.09	1.063 ± 0.003	0.95 ± 0.00
3.5	91.55 ± 5.98	3.93 ± 0.01	182429 ± 1732	1727.86 ± 7.28	498.98 ± 3.84	484.38 ± 1.19	481.51 ± 2.13	1.064 ± 0.000	0.94 ± 0.00
4	89.31 ± 2.21	3.82 ± 0.00	176233 ± 4043	1694.92 ± 24.61	493.87 ± 4.55	473.28 ± 6.76	473.22 ± 5.49	1.061 ± 0.001	0.94 ± 0.02
5	71.05 ± 1.50	3.46 ± 0.13	171433 ± 501	1685.22 ± 2.62	486.62 ± 5.32	468.44 ± 5.36	466.82 ± 0.77	1.057 ± 0.004	0.92 ± 0.00
6	67.17 ± 0.89	3.34 ± 0.34	171725 ± 15861	1690.04 ± 80.05	487.59 ± 17.53	468.14 ± 27.45	466.95 ± 21.60	1.058 ± 0.008	0.91 ± 0.01
7	60.37 ± 2.35	2.99 ± 0.01	166805 ± 9295	1667.51 ± 48.09	485.71 ± 17.18	457.91 ± 10.07	460.07 ± 12.77	1.057 ± 0.003	0.93 ± 0.01
8	55.77 ± 0.74	2.94 ± 0.02	161886 ± 12793	1641.47 ± 76.43	473.69 ± 19.47	455.78 ± 19.12	453.36 ± 17.83	1.056 ± 0.008	0.92 ± 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบพลิก (Flipping) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	257.32 ± 16.46	7.35 ± 0.17	273722 ± 13891	2092.15 ± 64.20	609.94 ± 14.68	596.11 ± 15.94	590.21 ± 14.98	1.079 ± 0.007	0.99 ± 0.01
0.5	207.03 ± 12.01	6.65 ± 0.51	244172 ± 14537	1960.13 ± 49.72	577.45 ± 13.58	558.87 ± 19.30	557.37 ± 16.60	1.073 ± 0.007	0.99 ± 0.00
1	176.30 ± 3.81	5.86 ± 0.22	223848 ± 1344	1883.25 ± 16.51	551.81 ± 4.46	535.56 ± 0.46	533.72 ± 1.55	1.072 ± 0.003	0.97 ± 0.01
1.5	148.23 ± 7.43	5.32 ± 0.16	207932 ± 7920	1815.94 ± 35.33	530.08 ± 12.16	518.33 ± 8.45	514.38 ± 9.81	1.070 ± 0.001	0.97 ± 0.00
2	128.49 ± 4.61	4.74 ± 0.02	198289 ± 1670	1786.34 ± 13.30	516.98 ± 1.89	507.18 ± 2.31	502.22 ± 2.06	1.068 ± 0.003	0.96 ± 0.01
2.5	110.71 ± 0.69	4.34 ± 0.07	187872 ± 3528	1743.79 ± 24.61	504.58 ± 6.39	492.89 ± 3.41	488.78 ± 4.52	1.065 ± 0.004	0.96 ± 0.01
3	96.34 ± 3.39	4.09 ± 0.20	185527 ± 2532	1752.84 ± 6.39	502.53 ± 5.06	489.64 ± 1.18	485.55 ± 3.36	1.066 ± 0.001	0.94 ± 0.02
3.5	94.23 ± 4.60	3.80 ± 0.05	177491 ± 1500	1709.66 ± 9.75	494.12 ± 0.81	477.00 ± 3.54	475.06 ± 2.11	1.064 ± 0.000	0.94 ± 0.00
4	86.26 ± 3.10	3.81 ± 0.00	179343 ± 787	1739.33 ± 21.53	496.26 ± 3.75	481.19 ± 4.82	477.38 ± 1.26	1.063 ± 0.003	0.92 ± 0.00
5	77.02 ± 1.49	3.45 ± 0.07	170711 ± 1594	1689.11 ± 22.31	484.82 ± 1.87	469.13 ± 2.00	465.81 ± 2.08	1.062 ± 0.003	0.93 ± 0.02
6	66.07 ± 2.01	3.19 ± 0.04	167443 ± 1640	1689.44 ± 4.64	482.02 ± 0.73	463.95 ± 5.90	461.21 ± 2.70	1.061 ± 0.003	0.92 ± 0.02
7	49.37 ± 16.52	3.08 ± 0.13	163508 ± 3582	1680.44 ± 3.32	478.69 ± 1.39	458.47 ± 10.06	455.98 ± 4.75	1.058 ± 0.001	0.92 ± 0.01
8	54.11 ± 1.82	2.92 ± 0.01	162041 ± 322	1653.55 ± 1.34	478.02 ± 1.40	453.06 ± 1.79	453.61 ± 0.49	1.058 ± 0.003	0.92 ± 0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบวางกึ่งที่ (Static) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	107.95 ± 1.37	7.67 ± 0.23	280049 ± 9782	2117.86 ± 37.69	617.85 ± 11.94	602.17 ± 9.13	597.07 ± 10.43	1.069 ± 0.013	0.99 ± 0.00
0.5	90.50 ± 1.25	7.27 ± 0.33	264060 ± 8397	2048.76 ± 39.02	599.93 ± 10.71	583.79 ± 8.57	579.77 ± 9.20	1.066 ± 0.013	0.99 ± 0.00
1	82.53 ± 1.22	6.75 ± 0.54	254263 ± 6490	2023.28 ± 17.09	590.72 ± 5.91	571.42 ± 1.25	568.92 ± 2.67	1.067 ± 0.016	0.97 ± 0.02
1.5	76.43 ± 0.43	6.62 ± 0.08	244163 ± 611	1969.24 ± 1.76	576.96 ± 9.94	561.31 ± 1.77	557.55 ± 6.05	1.068 ± 0.022	0.98 ± 0.00
2	71.73 ± 1.09	6.40 ± 0.14	246023 ± 2427	2000.80 ± 4.69	580.46 ± 4.50	562.71 ± 2.66	559.63 ± 3.54	1.070 ± 0.015	0.98 ± 0.00
2.5	66.80 ± 0.82	6.15 ± 0.01	238972 ± 328	1969.77 ± 20.34	572.02 ± 2.07	554.47 ± 4.77	551.50 ± 3.54	1.070 ± 0.018	0.98 ± 0.03
3	65.46 ± 2.28	6.17 ± 0.03	239160 ± 1204	1973.77 ± 16.86	570.55 ± 2.00	556.77 ± 1.73	551.74 ± 0.28	1.073 ± 0.025	0.97 ± 0.01
3.5	61.81 ± 1.72	5.92 ± 0.07	233435 ± 4455	1944.81 ± 23.58	563.30 ± 7.21	550.09 ± 6.03	545.06 ± 6.30	1.070 ± 0.020	0.96 ± 0.01
4	59.63 ± 0.73	5.77 ± 0.04	233485 ± 826	1946.69 ± 0.52	562.55 ± 6.33	550.56 ± 0.89	545.11 ± 3.33	1.076 ± 0.006	0.97 ± 0.00
5	55.30 ± 1.26	5.52 ± 0.08	225379 ± 199	1905.89 ± 2.39	552.88 ± 7.66	541.03 ± 5.18	535.58 ± 6.74	1.064 ± 0.009	0.97 ± 0.00
6	51.39 ± 0.45	5.47 ± 0.03	225504 ± 1951	1918.74 ± 6.91	555.91 ± 4.18	538.80 ± 3.86	535.72 ± 3.73	1.071 ± 0.007	0.96 ± 0.01
7	50.20 ± 0.32	5.29 ± 0.22	222849 ± 1042	1913.65 ± 16.70	551.25 ± 7.82	537.84 ± 3.69	532.57 ± 5.44	1.061 ± 0.019	0.97 ± 0.03
8	47.68 ± 1.58	5.17 ± 0.03	218632 ± 459	1887.32 ± 9.12	545.57 ± 2.16	532.62 ± 2.61	527.45 ± 2.94	1.065 ± 0.008	0.95 ± 0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบหมุน (Rotating) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	107.95 ± 1.37	7.67 ± 0.23	280049 ± 9782	2117.86 ± 37.69	617.85 ± 11.94	602.17 ± 9.13	597.07 ± 10.43	1.069 ± 0.013	0.99 ± 0.00
0.5	90.50 ± 1.25	7.27 ± 0.33	264060 ± 8397	2048.76 ± 39.02	599.93 ± 10.71	583.79 ± 8.57	579.77 ± 9.20	1.066 ± 0.013	0.99 ± 0.00
1	82.21 ± 4.04	6.89 ± 0.33	257670 ± 2391	2039.41 ± 6.40	594.00 ± 5.91	575.62 ± 1.25	572.74 ± 2.67	1.070 ± 0.016	0.98 ± 0.01
1.5	70.28 ± 7.49	6.44 ± 0.27	244497 ± 5293	1966.90 ± 19.10	575.44 ± 9.94	563.35 ± 1.77	557.90 ± 6.05	1.070 ± 0.016	0.97 ± 0.01
2	71.28 ± 1.84	6.29 ± 0.02	243589 ± 3101	1985.18 ± 8.53	575.55 ± 4.50	561.77 ± 2.66	556.86 ± 3.54	1.073 ± 0.018	0.97 ± 0.00
2.5	68.47 ± 3.18	6.10 ± 0.11	235226 ± 2973	1948.27 ± 4.64	564.34 ± 2.07	553.07 ± 4.77	547.17 ± 3.54	1.065 ± 0.016	0.96 ± 0.00
3	66.14 ± 2.85	6.03 ± 0.04	236577 ± 204	1963.84 ± 8.82	567.76 ± 2.00	553.55 ± 1.73	548.78 ± 0.28	1.075 ± 0.015	0.96 ± 0.01
3.5	62.40 ± 0.57	5.88 ± 0.05	232474 ± 5357	1942.20 ± 30.33	561.24 ± 7.21	550.09 ± 6.03	543.94 ± 6.30	1.071 ± 0.015	0.97 ± 0.00
4	59.94 ± 1.61	5.81 ± 0.00	240333 ± 2816	1986.46 ± 16.83	572.15 ± 6.33	558.22 ± 0.89	553.04 ± 3.33	1.075 ± 0.009	0.95 ± 0.01
5	58.29 ± 3.89	5.56 ± 0.10	233249 ± 5745	1962.72 ± 7.28	564.10 ± 7.66	549.90 ± 5.18	544.83 ± 6.74	1.073 ± 0.012	0.95 ± 0.01
6	55.75 ± 2.21	5.57 ± 0.05	230879 ± 3182	1945.30 ± 20.94	560.97 ± 4.18	547.25 ± 3.86	542.02 ± 3.73	1.074 ± 0.008	0.96 ± 0.00
7	53.47 ± 2.21	5.51 ± 0.09	234030 ± 4646	1951.43 ± 25.42	566.10 ± 7.82	549.45 ± 3.69	545.77 ± 5.44	1.067 ± 0.016	0.96 ± 0.01
8	51.39 ± 1.03	5.21 ± 0.12	227714 ± 2380	1926.85 ± 7.49	558.49 ± 2.16	542.04 ± 2.61	538.27 ± 2.94	1.068 ± 0.006	0.95 ± 0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบพลิก (Flipping) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพถ่าย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	107.95 ± 1.37	7.67 ± 0.23	280049 ± 9782	2117.86 ± 37.69	617.85 ± 11.94	602.17 ± 9.13	597.07 ± 10.43	1.069 ± 0.013	0.99 ± 0.00
0.5	90.50 ± 1.25	7.27 ± 0.33	264060 ± 8397	2048.76 ± 39.02	599.93 ± 10.71	583.79 ± 8.57	579.77 ± 9.20	1.066 ± 0.013	0.99 ± 0.00
1	82.12 ± 2.08	6.63 ± 0.12	249742 ± 1453	1997.28 ± 12.95	583.34 ± 0.69	567.73 ± 3.78	563.88 ± 1.64	1.066 ± 0.020	0.98 ± 0.02
1.5	75.08 ± 1.47	6.59 ± 0.14	243968 ± 6807	1976.12 ± 38.69	576.33 ± 9.99	561.90 ± 6.87	557.28 ± 7.78	1.071 ± 0.018	0.98 ± 0.02
2	70.59 ± 1.96	6.30 ± 0.01	243962 ± 3267	1999.29 ± 0.65	576.65 ± 4.16	562.16 ± 3.59	557.23 ± 3.74	1.071 ± 0.020	0.97 ± 0.03
2.5	67.04 ± 1.40	6.02 ± 0.20	234961 ± 7428	1953.85 ± 31.13	564.80 ± 9.25	552.58 ± 8.24	546.84 ± 8.58	1.073 ± 0.015	0.96 ± 0.01
3	63.94 ± 1.07	6.11 ± 0.09	238926 ± 3718	1973.25 ± 0.49	573.23 ± 10.36	553.39 ± 1.15	551.46 ± 4.38	1.072 ± 0.021	0.98 ± 0.03
3.5	62.71 ± 0.92	5.87 ± 0.14	233527 ± 5813	1946.98 ± 25.19	564.79 ± 8.06	549.52 ± 5.75	545.19 ± 6.80	1.072 ± 0.018	0.97 ± 0.01
4	61.52 ± 1.81	5.83 ± 0.00	236205 ± 987	1958.13 ± 1.60	568.70 ± 3.95	551.61 ± 1.16	548.34 ± 1.17	1.066 ± 0.017	0.97 ± 0.00
5	57.55 ± 0.08	5.61 ± 0.07	231090 ± 3739	1941.17 ± 1.93	562.24 ± 3.47	546.83 ± 4.50	542.33 ± 4.44	1.068 ± 0.015	0.96 ± 0.02
6	55.57 ± 0.04	5.62 ± 0.12	234604 ± 8160	1953.90 ± 35.47	566.73 ± 10.73	550.56 ± 9.42	546.41 ± 9.53	1.063 ± 0.016	0.96 ± 0.00
7	54.78 ± 0.78	5.53 ± 0.49	234567 ± 10912	1952.94 ± 43.75	567.09 ± 18.40	549.93 ± 7.70	546.34 ± 12.74	1.068 ± 0.014	0.97 ± 0.00
8	53.05 ± 1.48	5.43 ± 0.08	234446 ± 5221	1958.70 ± 34.20	565.53 ± 8.15	552.71 ± 5.77	546.28 ± 6.12	1.067 ± 0.016	0.96 ± 0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบวางกึ่งที่ (Static) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ผาผาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	2853.58 ± 65.53	7.68 ± 0.14	283928 ± 12640	2126.81 ± 43.28	622.94 ± 16.04	605.13 ± 11.86	601.17 ± 13.38	1.063 ± 0.027	0.99 ± 0.01
0.5	2243.22 ± 196.39	5.98 ± 0.38	231647 ± 9374	1897.26 ± 28.44	566.05 ± 4.71	538.58 ± 17.31	542.82 ± 11.12	1.053 ± 0.024	0.98 ± 0.01
1	1581.29 ± 183.51	4.37 ± 0.51	190893 ± 8116	1725.06 ± 17.78	518.15 ± 2.32	482.06 ± 17.55	492.61 ± 10.63	1.041 ± 0.021	0.94 ± 0.01
1.5	1242.75 ± 176.61	3.10 ± 0.28	156867 ± 2238	1572.51 ± 2.04	471.64 ± 0.16	434.85 ± 6.03	446.58 ± 3.22	1.038 ± 0.018	0.93 ± 0.01
2	832.57 ± 243.70	2.41 ± 0.57	134075 ± 15180	1463.58 ± 43.12	437.45 ± 8.38	400.86 ± 35.58	412.29 ± 23.89	1.034 ± 0.012	0.91 ± 0.00
2.5	495.17 ± 14.86	1.51 ± 0.37	106409 ± 8689	1337.20 ± 37.55	392.09 ± 8.64	358.03 ± 19.42	367.41 ± 15.52	1.028 ± 0.012	0.90 ± 0.01
3	291.16 ± 166.59	0.86 ± 0.61	94110 ± 3560	1326.49 ± 103.64	378.50 ± 12.19	332.54 ± 15.38	345.41 ± 7.17	1.038 ± 0.016	0.83 ± 0.12
3.5	83.28 ± 6.53	0.44 ± 0.08	79578 ± 15114	1246.70 ± 147.47	355.12 ± 34.39	303.74 ± 27.33	316.35 ± 29.82	1.028 ± 0.026	0.83 ± 0.03
4	19.74 ± 1.62	0.33 ± 0.07	70000 ± 6557	1204.50 ± 99.41	329.55 ± 18.45	293.10 ± 13.43	297.78 ± 14.03	1.029 ± 0.016	0.79 ± 0.02
5	14.24 ± 4.78	0.24 ± 0.05	69461 ± 2682	1202.55 ± 35.52	337.29 ± 1.83	282.01 ± 11.91	296.65 ± 5.22	1.029 ± 0.010	0.77 ± 0.03
6	11.81 ± 0.58	0.20 ± 0.01	69720 ± 7730	1203.18 ± 76.41	334.79 ± 13.29	282.99 ± 21.30	296.96 ± 16.47	1.031 ± 0.016	0.75 ± 0.05
7	11.64 ± 3.42	0.18 ± 0.01	65667 ± 5016	1181.13 ± 77.85	327.78 ± 27.19	275.95 ± 1.06	287.77 ± 9.66	1.027 ± 0.014	0.75 ± 0.02
8	10.88 ± 2.20	0.24 ± 0.13	70001 ± 12414	1186.83 ± 93.30	341.02 ± 50.58	278.80 ± 6.23	297.20 ± 25.82	1.033 ± 0.019	0.77 ± 0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบหมุน (Rotating) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	2853.58 ± 65.53	7.68 ± 0.14	283916 ± 12624	2126.73 ± 43.16	622.92 ± 16.02	605.12 ± 11.84	601.16 ± 13.36	1.064 ± 0.029	0.99 ± 0.02
0.5	2243.22 ± 196.39	5.98 ± 0.38	231647 ± 9374	1897.26 ± 28.44	566.05 ± 4.71	538.58 ± 17.31	542.82 ± 11.12	1.055 ± 0.027	0.99 ± 0.02
1	1692.45 ± 220.64	4.39 ± 0.70	190622 ± 13306	1722.31 ± 40.90	519.31 ± 13.46	480.61 ± 19.96	492.18 ± 17.26	1.045 ± 0.022	0.96 ± 0.01
1.5	1159.84 ± 32.05	3.32 ± 0.07	164249 ± 643	1608.80 ± 18.83	479.31 ± 1.62	447.57 ± 4.31	456.97 ± 0.92	1.039 ± 0.022	0.92 ± 0.01
2	629.53 ± 67.56	2.04 ± 0.30	121305 ± 6071	1420.64 ± 17.00	422.80 ± 1.92	378.56 ± 17.41	392.27 ± 10.61	1.030 ± 0.025	0.90 ± 0.03
2.5	479.99 ± 134.30	1.63 ± 0.22	107736 ± 919	1359.06 ± 62.86	392.65 ± 15.06	364.24 ± 6.60	369.97 ± 1.12	1.035 ± 0.024	0.89 ± 0.05
3	169.25 ± 49.59	0.93 ± 0.22	96915 ± 3096	1322.84 ± 99.48	376.43 ± 13.32	344.34 ± 5.46	350.62 ± 5.44	1.039 ± 0.022	0.86 ± 0.06
3.5	82.42 ± 9.62	0.46 ± 0.07	83127 ± 8510	1252.61 ± 126.36	356.23 ± 35.41	314.38 ± 1.59	323.94 ± 15.51	1.032 ± 0.032	0.82 ± 0.06
4	36.66 ± 7.22	0.34 ± 0.01	70879 ± 12140	1232.56 ± 156.43	342.42 ± 41.11	286.94 ± 16.80	298.96 ± 25.69	1.034 ± 0.023	0.78 ± 0.05
5	15.91 ± 2.35	0.19 ± 0.06	70232 ± 13891	1208.58 ± 130.00	339.00 ± 44.04	283.82 ± 17.21	297.19 ± 29.03	1.028 ± 0.016	0.81 ± 0.01
6	11.73 ± 1.47	0.20 ± 0.05	73132 ± 20126	1267.41261.52	344.25 ± 58.15	290.97 ± 32.48	303.16 ± 42.41	1.036 ± 0.044	0.73 ± 0.04
7	11.85 ± 0.57	0.22 ± 0.02	67753 ± 8356	1186.01 ± 90.71	330.90 ± 30.36	282.44 ± 6.69	292.59 ± 17.48	1.022 ± 0.014	0.80 ± 0.05
8	11.61 ± 2.12	0.25 ± 0.04	70277 ± 8995	1191.56 ± 101.35	336.28 ± 36.11	285.93 ± 5.79	297.71 ± 18.38	1.028 ± 0.022	0.77 ± 0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลอง ของ Agar gel ที่ไม่เติมน้ำตาลแบบพลิก (Flipping) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	2853.58 ± 65.53	7.68 ± 0.14	283928 ± 12640	2126.81 ± 43.28	622.94 ± 16.04	605.13 ± 11.86	601.17 ± 13.38	1.063 ± 0.027	0.99 ± 0.01
0.5	2243.22 ± 196.39	5.98 ± 0.38	231647 ± 9374	1897.26 ± 28.44	566.05 ± 4.71	538.58 ± 17.31	542.82 ± 11.12	1.053 ± 0.024	0.98 ± 0.01
1	1664.42 ± 182.02	4.38 ± 0.41	189475 ± 7673	1727.78 ± 32.53	514.04 ± 10.92	483.64 ± 9.61	490.96 ± 9.98	1.046 ± 0.021	0.95 ± 0.01
1.5	1155.82 ± 115.05	3.02 ± 0.04	149053 ± 2488	1554.05 ± 3.87	452.87 ± 4.35	432.93 ± 2.71	435.60 ± 3.64	1.037 ± 0.016	0.92 ± 0.00
2	677.40 ± 178.75	2.39 ± 0.62	131652 ± 15033	1497.47 ± 46.49	433.18 ± 24.22	402.62 ± 19.26	408.92 ± 23.53	1.038 ± 0.019	0.92 ± 0.01
2.5	533.27 ± 145.69	1.32 ± 0.00	103872 ± 9730	1381.56 ± 85.72	388.16 ± 18.29	360.47 ± 12.72	363.18 ± 13.57	1.032 ± 0.017	0.87 ± 0.02
3	257.77 ± 130.49	0.77 ± 0.51	95534 ± 1829	1374.81 ± 42.41	379.10 ± 8.99	344.83 ± 6.95	348.34 ± 3.44	1.032 ± 0.013	0.82 ± 0.06
3.5	61.16 ± 16.32	0.32 ± 0.04	88720 ± 9402	1354.04 ± 121.00	368.39 ± 19.63	332.75 ± 21.96	335.32 ± 17.25	1.035 ± 0.017	0.80 ± 0.04
4	19.57 ± 4.64	0.28 ± 0.06	76582 ± 7091	1287.06 ± 50.29	339.34 ± 15.95	313.39 ± 9.30	311.91 ± 14.36	1.034 ± 0.014	0.77 ± 0.00
5	13.74 ± 1.02	0.23 ± 0.02	72674 ± 16844	1263.86 ± 247.20	339.91 ± 50.63	298.38 ± 29.67	302.84 ± 35.07	1.033 ± 0.032	0.80 ± 0.07
6	10.57 ± 0.49	0.20 ± 0.01	78686 ± 2292	1290.27 ± 27.91	344.72 ± 8.49	314.86 ± 0.08	316.25 ± 4.69	1.032 ± 0.009	0.77 ± 0.01
7	11.05 ± 2.52	0.19 ± 0.06	72464 ± 12750	1255.24 ± 120.73	332.98 ± 29.96	303.28 ± 27.92	303.02 ± 26.83	1.029 ± 0.020	0.80 ± 0.02
8	10.51 ± 2.74	0.20 ± 0.04	74248 ± 8415	1261.09 ± 115.20	341.57 ± 35.21	302.66 ± 9.49	306.85 ± 17.16	1.046 ± 0.018	0.79 ± 0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตไ้หนาไปใ้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใ้

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบวงกบที่ (Static) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	255.9 ± 97.60	7.67 ± 0.08	281351 ± 7627	2126.90 ± 26.33	618.11 ± 8.46	604.34 ± 8.53	598.47 ± 8.10	1.066 ± 0.032	0.98 ± 0.02
0.5	194.01 ± 6.45	6.13 ± 0.17	233983 ± 3703	1922.46 ± 22.54	564.37 ± 5.17	547.93 ± 4.53	545.74 ± 4.36	1.059 ± 0.021	0.99 ± 0.01
1	133.30 ± 7.78	4.74 ± 0.17	201927 ± 6152	1800.02 ± 21.26	523.14 ± 7.25	510.32 ± 8.66	506.87 ± 7.77	1.055 ± 0.025	0.96 ± 0.01
1.5	108.27 ± 2.04	4.08 ± 0.08	184580 ± 3993	1731.48 ± 24.64	502.85 ± 5.08	486.30 ± 6.82	484.38 ± 5.22	1.049 ± 0.024	0.96 ± 0.01
2	96.33 ± 0.34	3.92 ± 0.07	177422 ± 2204	1706.49 ± 4.67	494.14 ± 0.30	476.48 ± 5.78	475.00 ± 3.04	1.046 ± 0.017	0.96 ± 0.01
2.5	77.94 ± 6.76	3.57 ± 0.21	171957 ± 4765	1686.00 ± 41.25	486.56 ± 10.48	469.78 ± 3.08	467.67 ± 6.43	1.046 ± 0.019	0.93 ± 0.03
3	73.75 ± 4.37	3.22 ± 0.06	162196 ± 2121	1635.89 ± 20.62	474.46 ± 3.01	454.20 ± 4.07	453.96 ± 2.96	1.040 ± 0.024	0.94 ± 0.00
3.5	62.19 ± 2.43	3.07 ± 0.06	157502 ± 2092	1617.90 ± 21.47	468.52 ± 7.80	447.98 ± 1.13	447.48 ± 2.85	1.038 ± 0.017	0.95 ± 0.01
4	55.56 ± 5.46	3.15 ± 0.03	156812 ± 9140	1610.09 ± 49.58	464.03 ± 10.63	449.71 ± 15.20	446.47 ± 13.02	1.041 ± 0.024	0.94 ± 0.02
5	45.51 ± 1.41	2.67 ± 0.03	152736 ± 4690	1600.98 ± 36.90	461.00 ± 9.76	441.42 ± 5.70	440.55 ± 6.68	1.039 ± 0.023	0.92 ± 0.00
6	45.40 ± 2.09	2.60 ± 0.05	150143 ± 2901	1590.80 ± 15.02	461.70 ± 6.67	434.31 ± 1.23	436.83 ± 4.25	1.040 ± 0.018	0.95 ± 0.01
7	36.85 ± 0.16	2.60 ± 0.20	148943 ± 3385	1584.63 ± 9.52	455.47 ± 4.06	437.35 ± 5.64	435.17 ± 5.06	1.042 ± 0.024	0.93 ± 0.00
8	33.66 ± 1.48	2.49 ± 0.06	151290 ± 5944	1592.82 ± 48.25	461.57 ± 11.11	437.24 ± 6.82	438.56 ± 8.62	1.041 ± 0.025	0.92 ± 0.02

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบหมุน (Rotating) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	255.9 ± 97.60	7.67 ± 0.08	281399 ± 7695	2126.90 ± 26.33	618.11 ± 8.46	604.34 ± 8.53	598.47 ± 8.10	1.066 ± 0.032	0.98 ± 0.02
0.5	194.01 ± 6.45	6.13 ± 0.17	234017 ± 3752	1922.46 ± 22.54	564.37 ± 5.17	547.93 ± 4.53	545.74 ± 4.36	1.059 ± 0.021	0.99 ± 0.01
1	139.79 ± 0.55	5.03 ± 0.28	208020 ± 739	1826.27 ± 13.21	529.36 ± 1.02	519.42 ± 3.33	514.42 ± 0.71	1.052 ± 0.025	0.95 ± 0.01
1.5	107.58 ± 3.24	4.34 ± 0.18	187750 ± 3930	1745.79 ± 28.61	506.55 ± 8.80	490.67 ± 1.18	488.66 ± 5.07	1.047 ± 0.018	0.94 ± 0.05
2	95.67 ± 0.47	3.83 ± 0.00	179156 ± 1120	1711.50 ± 0.04	495.41 ± 0.18	479.99 ± 2.36	477.36 ± 1.41	1.049 ± 0.021	0.95 ± 0.02
2.5	84.29 ± 2.09	3.58 ± 0.26	170412 ± 3156	1669.54 ± 17.87	484.46 ± 3.30	467.54 ± 5.28	465.54 ± 4.37	1.042 ± 0.018	0.96 ± 0.00
3	70.38 ± 4.43	3.27 ± 0.05	165154 ± 1407	1649.60 ± 11.50	478.87 ± 2.10	459.19 ± 6.02	458.29 ± 2.07	1.042 ± 0.023	0.95 ± 0.00
3.5	63.45 ± 2.22	3.10 ± 0.07	163829 ± 3079	1657.54 ± 16.03	477.96 ± 3.58	457.33 ± 5.21	456.33 ± 4.39	1.044 ± 0.024	0.92 ± 0.02
4	58.77 ± 0.87	3.15 ± 0.04	163527 ± 1205	1654.91 ± 4.43	474.96 ± 1.43	460.12 ± 1.73	456.07 ± 1.77	1.045 ± 0.020	0.94 ± 0.02
5	47.16 ± 2.36	2.80 ± 0.06	161557 ± 3045	1657.91 ± 3.38	473.98 ± 2.42	456.60 ± 6.12	453.11 ± 4.43	1.046 ± 0.014	0.94 ± 0.01
6	44.39 ± 0.17	2.66 ± 0.02	161354 ± 5734	1656.67 ± 33.58	477.72 ± 4.41	451.92 ± 12.21	452.68 ± 8.22	1.042 ± 0.025	0.92 ± 0.00
7	39.24 ± 0.57	2.58 ± 0.01	156829 ± 4095	1629.46 ± 7.64	469.89 ± 3.22	447.13 ± 7.89	446.51 ± 5.87	1.041 ± 0.023	0.91 ± 0.04
8	33.33 ± 1.82	2.64 ± 0.05	155242 ± 4126	1638.64 ± 13.37	468.95 ± 5.13	444.88 ± 6.66	444.06 ± 5.90	1.047 ± 0.021	0.91 ± 0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนเวลาหรบการเซงานเพอการศกษาแทนน ไมอนุญาตให้นำไปใชประยอชนดานการคา
ไมวากรณใตฯ ทังสิน อักทังหามมิใหัดัดแปลงเนือหาและตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคร้งที่ม่การนำไปใช

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 20 เปอร์เซ็นต์แบบพลิก (Flipping) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	255.9 ± 97.60	7.67 ± 0.08	281399 ± 7695	2126.90 ± 26.33	618.11 ± 8.46	604.34 ± 8.53	598.47 ± 8.10	1.066 ± 0.032	0.98 ± 0.02
0.5	194.01 ± 6.45	6.13 ± 0.17	234017 ± 3752	1922.46 ± 22.54	564.37 ± 5.17	547.93 ± 4.53	545.74 ± 4.36	1.059 ± 0.021	0.99 ± 0.01
1	135.81 ± 1.54	4.83 ± 0.04	201971 ± 1927	1805.34 ± 16.97	524.01 ± 0.12	510.21 ± 5.35	506.96 ± 2.38	1.051 ± 0.024	0.97 ± 0.01
1.5	114.65 ± 3.22	4.48 ± 0.04	192144 ± 4393	1761.98 ± 35.68	512.29 ± 4.98	496.57 ± 6.76	494.49 ± 5.61	1.047 ± 0.022	0.95 ± 0.03
2	92.90 ± 5.31	4.11 ± 0.11	181451 ± 1430	1718.68 ± 9.37	500.03 ± 2.12	481.74 ± 1.50	480.56 ± 1.91	1.048 ± 0.021	0.96 ± 0.03
2.5	81.79 ± 2.81	3.53 ± 0.34	172647 ± 3895	1692.41 ± 12.25	484.89 ± 6.00	473.84 ± 4.38	468.64 ± 5.34	1.048 ± 0.017	0.95 ± 0.02
3	69.77 ± 1.14	3.30 ± 0.03	164705 ± 2495	1656.51 ± 26.05	474.61 ± 5.48	462.53 ± 1.46	457.75 ± 3.36	1.047 ± 0.027	0.95 ± 0.01
3.5	62.87 ± 3.57	3.26 ± 0.07	169487 ± 1543	1689.22 ± 5.78	483.74 ± 3.49	468.01 ± 1.39	464.26 ± 1.97	1.049 ± 0.022	0.94 ± 0.00
4	57.20 ± 5.15	3.13 ± 0.01	165261 ± 2624	1667.93 ± 7.53	477.44 ± 8.24	461.97 ± 1.35	458.42 ± 3.91	1.046 ± 0.020	0.91 ± 0.01
5	51.45 ± 3.50	2.61 ± 0.28	162950 ± 592	1667.38 ± 12.48	472.99 ± 0.62	460.91 ± 2.13	455.20 ± 0.76	1.046 ± 0.019	0.92 ± 0.01
6	43.80 ± 6.00	2.57 ± 0.01	155862 ± 741	1627.69 ± 4.31	467.28 ± 2.18	447.27 ± 3.11	445.19 ± 1.12	1.041 ± 0.023	0.94 ± 0.01
7	39.01 ± 0.58	2.57 ± 0.05	157576 ± 3539	1651.25 ± 26.04	469.02 ± 4.06	451.93 ± 6.56	447.56 ± 5.07	1.045 ± 0.020	0.94 ± 0.00
8	33.67 ± 2.45	2.55 ± 0.05	156503 ± 434	1643.95 ± 8.44	465.62 ± 1.60	451.40 ± 0.37	446.04 ± 0.41	1.044 ± 0.022	0.91 ± 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบวางกับที่ (Static) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	103.33 ± 12.16	7.64 ± 0.04	279472 ± 637	2121.93 ± 9.01	616.73 ± 0.76	602.21 ± 0.17	596.51 ± 0.68	1.065 ± 0.028	0.98 ± 0.01
0.5	81.53 ± 7.80	6.89 ± 0.01	257917 ± 924	2042.49 ± 19.37	592.78 ± 4.40	577.99 ± 6.31	573.02 ± 5.48	1.065 ± 0.025	0.98 ± 0.03
1	72.64 ± 7.74	6.42 ± 0.22	246627 ± 8277	1993.58 ± 42.40	579.91 ± 12.72	564.79 ± 7.14	560.32 ± 9.40	1.059 ± 0.022	0.97 ± 0.01
1.5	63.78 ± 4.58	6.21 ± 0.28	239409 ± 9338	1967.10 ± 42.59	571.17 ± 11.32	556.99 ± 11.24	552.04 ± 10.79	1.054 ± 0.019	0.98 ± 0.02
2	60.78 ± 5.39	5.87 ± 0.02	232261 ± 3328	1945.03 ± 12.74	564.67 ± 0.79	546.70 ± 8.38	543.75 ± 3.87	1.059 ± 0.021	0.97 ± 0.01
2.5	55.10 ± 3.55	5.65 ± 0.39	227989 ± 5815	1923.74 ± 11.66	557.06 ± 8.25	543.48 ± 5.20	538.72 ± 6.90	1.055 ± 0.019	0.97 ± 0.01
3	51.56 ± 2.27	5.44 ± 0.10	219714 ± 350	1887.95 ± 5.68	546.87 ± 3.11	533.84 ± 1.95	528.86 ± 0.40	1.050 ± 0.023	0.98 ± 0.00
3.5	51.07 ± 2.67	5.50 ± 0.41	219217 ± 7665	1883.37 ± 31.76	545.46 ± 8.85	533.84 ± 10.26	528.25 ± 9.22	1.052 ± 0.023	0.97 ± 0.01
4	47.94 ± 2.31	5.44 ± 0.30	219327 ± 3658	1884.96 ± 22.83	546.68 ± 3.57	533.03 ± 5.11	528.41 ± 4.41	1.049 ± 0.020	0.96 ± 0.01
5	44.36 ± 2.44	5.27 ± 0.31	222032 ± 4634	1899.93 ± 4.47	551.01 ± 2.14	535.15 ± 8.19	531.64 ± 5.57	1.053 ± 0.027	0.96 ± 0.03
6	40.53 ± 1.22	5.06 ± 0.24	216447 ± 2173	1874.94 ± 2.90	543.46 ± 4.53	529.54 ± 0.05	524.89 ± 2.64	1.055 ± 0.022	0.96 ± 0.03
7	39.32 ± 17.86	4.99 ± 0.35	218969 ± 6646	1887.38 ± 18.42	546.53 ± 8.39	533.02 ± 7.59	527.93 ± 8.06	1.052 ± 0.019	0.98 ± 0.01
8	39.98 ± 18.78	4.93 ± 0.24	218742 ± 2884	1892.97 ± 11.40	549.37 ± 1.95	529.94 ± 4.95	527.68 ± 3.46	1.055 ± 0.025	0.95 ± 0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบหมุน (Rotating) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพฉาย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต์ (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	103.33 ± 12.16	7.64 ± 0.04	279472 ± 637	2121.93 ± 9.01	616.73 ± 0.76	602.21 ± 0.17	596.51 ± 0.68	1.065 ± 0.028	0.98 ± 0.01
0.5	81.53 ± 7.80	6.89 ± 0.01	257917 ± 924	2042.49 ± 19.37	592.78 ± 4.40	577.99 ± 6.31	573.02 ± 5.48	1.065 ± 0.025	0.98 ± 0.03
1	69.54 ± 4.03	6.30 ± 0.05	243351 ± 1118	1986.30 ± 5.78	575.00 ± 1.80	561.67 ± 4.38	556.62 ± 1.29	1.062 ± 0.027	0.98 ± 0.01
1.5	66.72 ± 7.02	6.41 ± 0.37	244827 ± 9602	1996.96 ± 27.09	583.63 ± 18.63	557.39 ± 2.56	558.23 ± 10.91	1.064 ± 0.025	0.98 ± 0.03
2	59.67 ± 3.43	5.93 ± 0.33	232681 ± 12512	1941.22 ± 55.15	561.68 ± 16.83	549.83 ± 12.23	544.18 ± 14.65	1.055 ± 0.017	0.96 ± 0.01
2.5	56.26 ± 1.53	5.61 ± 0.34	229959 ± 10027	1931.89 ± 39.41	560.55 ± 13.06	545.47 ± 11.35	541.00 ± 11.84	1.059 ± 0.016	0.97 ± 0.00
3	54.90 ± 4.78	5.56 ± 0.12	227375 ± 5645	1926.05 ± 31.59	556.31 ± 8.24	543.34 ± 6.14	537.97 ± 6.66	1.055 ± 0.024	0.95 ± 0.03
3.5	51.74 ± 1.73	5.54 ± 0.18	225282 ± 3280	1909.48 ± 15.43	552.66 ± 2.80	541.39 ± 5.15	535.53 ± 3.90	1.052 ± 0.030	0.97 ± 0.00
4	48.83 ± 0.60	5.62 ± 0.29	228795 ± 1199	1917.77 ± 9.90	558.12 ± 0.03	544.58 ± 2.97	539.71 ± 1.42	1.054 ± 0.026	0.98 ± 0.01
5	47.05 ± 1.10	5.44 ± 0.52	225441 ± 6124	1911.92 ± 20.52	553.53 ± 6.62	541.78 ± 7.79	535.69 ± 7.31	1.055 ± 0.022	0.97 ± 0.02
6	47.07 ± 4.89	5.32 ± 0.30	228419 ± 3784	1923.54 ± 0.85	559.25 ± 0.96	543.56 ± 6.53	539.27 ± 4.48	1.058 ± 0.026	0.97 ± 0.01
7	42.95 ± 21.70	5.11 ± 0.27	227753 ± 5177	1935.22 ± 15.65	558.46 ± 4.16	543.70 ± 8.13	538.45 ± 6.13	1.052 ± 0.022	0.97 ± 0.00
8	40.51 ± 0.84	5.11 ± 0.41	231567 ± 11797	1949.13 ± 45.21	563.71 ± 14.49	546.73 ± 12.68	542.84 ± 13.88	1.061 ± 0.019	1.00 ± 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองของ Agar gel ที่เติมน้ำตาล 40 เปอร์เซ็นต์แบบพลิก (Flipping) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตัวแปร เวลา	ความชื้น (kg H ₂ O/kg dry matter)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ภาพถ่าย (pixel ²)	เส้นรอบรูป (pixel)	แกนหลัก (pixel)	แกนรอง (pixel)	รัศมีเฟอร์เรต (pixel)	มิติแฟร็กทัล	ค่าความ เป็น สี่เหลี่ยม
เริ่มต้น	103.33 ± 12.16	7.64 ± 0.04	279472 ± 637	2121.93 ± 9.01	616.73 ± 0.76	602.21 ± 0.17	596.51 ± 0.68	1.065 ± 0.028	0.98 ± 0.01
0.5	81.53 ± 7.80	6.89 ± 0.01	257917 ± 924	2042.49 ± 19.37	592.78 ± 4.40	577.99 ± 6.31	573.02 ± 5.48	1.065 ± 0.025	0.98 ± 0.03
1	70.89 ± 5.98	6.51 ± 0.17	247350 ± 2949	1993.32 ± 12.86	581.58 ± 7.66	563.94 ± 1.15	561.14 ± 3.35	1.064 ± 0.028	0.98 ± 0.02
1.5	65.45 ± 4.28	6.04 ± 0.01	235330 ± 3016	1947.83 ± 20.98	566.46 ± 3.18	551.46 ± 4.24	547.22 ± 3.31	1.065 ± 0.024	0.98 ± 0.00
2	58.06 ± 1.28	5.93 ± 0.19	231762 ± 7193	1929.91 ± 32.52	562.23 ± 9.39	547.38 ± 8.40	543.34 ± 8.68	1.059 ± 0.022	0.98 ± 0.01
2.5	54.00 ± 0.00	5.77 ± 0.41	233475 ± 10025	1941.05 ± 35.36	565.19 ± 11.58	549.07 ± 11.55	544.96 ± 11.55	1.057 ± 0.013	0.98 ± 0.01
3	53.84 ± 3.14	5.63 ± 0.40	227903 ± 8113	1916.79 ± 23.56	557.95 ± 10.98	542.64 ± 8.08	538.54 ± 9.55	1.057 ± 0.015	0.97 ± 0.01
3.5	50.86 ± 2.38	5.54 ± 0.24	228621 ± 5995	1921.35 ± 19.54	558.17 ± 9.82	544.67 ± 5.83	539.57 ± 7.24	1.063 ± 0.020	0.99 ± 0.02
4	50.58 ± 1.78	5.60 ± 0.32	229674 ± 5029	1927.25 ± 11.65	559.76 ± 7.92	546.03 ± 2.84	540.69 ± 5.93	1.053 ± 0.023	0.98 ± 0.00
5	48.63 ± 2.21	5.61 ± 0.53	230421 ± 5733	1931.85 ± 18.56	560.94 ± 6.55	546.37 ± 6.69	541.56 ± 6.69	1.055 ± 0.026	0.97 ± 0.00
6	44.64 ± 0.97	5.19 ± 0.47	225405 ± 5516	1908.31 ± 14.99	554.64 ± 4.07	540.14 ± 8.48	535.48 ± 6.39	1.054 ± 0.024	0.98 ± 0.00
7	42.80 ± 3.57	5.06 ± 0.36	225487 ± 10570	1934.72 ± 52.82	554.73 ± 14.86	542.60 ± 12.41	535.79 ± 12.72	1.053 ± 0.022	0.97 ± 0.01
8	40.70 ± 1.05	5.14 ± 0.34	226679 ± 6057	1927.56 ± 20.42	556.05 ± 8.12	543.43 ± 6.50	537.11 ± 7.14	1.055 ± 0.022	0.96 ± 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น

รหัสคำสั่ง: SegFood

```
function [R,E,J] = SegFood(I)
t = graythresh(I);
J = im2bw(I,t);
[R,E] = MorphoFood(J);
```

รหัสคำสั่ง: MorphoFood

```
function [R,E] = MorphoFood(J)
A = bwareaopen(J,fix(length(J(:))/100));
C = imclose(A,strel('disk',7));
R = imfill(C,6,'holes');
E = bwperim(R);
```

รหัสคำสั่ง: box_counting

```
function [df] = box_countings(I)

[row col] = size(I);
ssize = 0;

%Find size of box in pixels
%s is 1/scale
for counter = 1:row-1
    if row/counter == round(row/counter)
        ssize = ssize+1;
        sizepix(ssize) = row/counter;
        s(ssize) = counter;
    end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end
```

```
%Find how many box that have white spot
```

```
a = 0;
```

```
boxcount = 0;
```

```
for counter = 1:size
```

```
    for startx = 1:sizepix(counter):row
```

```
        for starty = 1:sizepix(counter):col
```

```
            for countx = 1:sizepix(counter)
```

```
                for county = 1:sizepix(counter)
```

```
                    if l(startx+countx-1,starty+county-1) == 1
```

```
                        boxcount = boxcount+1;
```

```
                        a = 1;
```

```
                        break
```

```
                    end
```

```
                end
```

```
            if a == 1
```

```
                a = 0;
```

```
                break
```

```
            end
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
box(counter) = boxcount;
```

```
boxcount = 0;
```

```
end
```

```
f = fit(log10(s'),log10(box'),'poly1');
```

```
df=f.p1;
```

```
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสคำสั่ง: Extract_Agar

```
clear all
```

```
clc
```

```
rrow = 0;
```

```
for hour = [0,0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,5,6,7,8]
```

```
    rrow = rrow + 1;
```

```
    for face = 1:6
```

```
        for count = 1:3
```

```
            Num1 = num2str(hour); %Number of hour
```

```
            Num2 = num2str(face); %Number of face 1-6
```

```
            Num3 = num2str(count); %Number of repeat 1-3
```

```
            Name = strcat(Num1,'-',Num2,'-',Num3,'.JPG');
```

```
            I = imread(Name); %Save image as I
```

```
            I = imcrop(I,[1100 620 899 899]); %Crop image in size 750x750
```

```
            [R,E,J]=SegFood(I); %Edging and Treshoulding
```

```
            [row col]=size(R);
```

```
            n=1;
```

```
            for i=1:row
```

```
                for j=1:col
```

```
                    if R(i,j)==1
```

```
                        area_x(n)=i;
```

```
                        area_y(n)=j;
```

```
                        n=n+1;
```

```
                    end
```

```
                end
```

```
            end
```

```
        switch face
```

```
            case 1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

area_top(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Area'));
perimeter_top(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Perimeter'));
majoraxis_top(rrow,count)= struct2cell(regionprops(R,'MajorAxisLength'));
minoraxis_top(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MinorAxisLength'));
diameter_top(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'EquivDiameter'));
boundingbox_top(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'BoundingBox'));
df_top(rrow,count) = boxcount(E);

```

case 2

```

area_front(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Area'));
perimeter_front(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Perimeter'));
majoraxis_front(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MajorAxisLength'));
minoraxis_front(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MinorAxisLength'));
diameter_front(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'EquivDiameter'));
boundingbox_front(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'BoundingBox'));
df_front(rrow,count) = boxcount(E);

```

case 3

```

area_left(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Area'));
perimeter_left(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Perimeter'));
majoraxis_left(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MajorAxisLength'));
minoraxis_left(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MinorAxisLength'));
diameter_left(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'EquivDiameter'));
boundingbox_left(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'BoundingBox'));
df_left(rrow,count) = boxcount(E);

```

case 4

```

area_back(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Area'));
perimeter_back(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Perimeter'));
majoraxis_back(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MajorAxisLength'));
minoraxis_back(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MinorAxisLength'));
diameter_back(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'EquivDiameter'));
boundingbox_back(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'BoundingBox'));
df_back(rrow,count) = boxcount(E);

```

case 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

area_right(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Area'));
perimeter_right(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Perimeter'));
majoraxis_right(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MajorAxisLength'));
minoraxis_right(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MinorAxisLength'));
diameter_right(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'EquivDiameter'));
boundingbox_right(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'BoundingBox'));
df_right(rrow,count) = boxcount(E);

```

case 6

```

area_bottom(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Area'));
perimeter_bottom(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'Perimeter'));
majoraxis_bottom(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MajorAxisLength'));
minoraxis_bottom(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'MinorAxisLength'));
diameter_bottom(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'EquivDiameter'));
boundingbox_bottom(rrow,count) = struct2cell(regionprops(R,'BoundingBox'));
df_bottom(rrow,count) = boxcount(E);

```

end

```

set(fig1,'visible','off');
subplot(2,2,[1 3]);subimage(I);title('Original Image');
subplot(2,2,2);subimage(E);title('Edege Detection');
subplot(2,2,4);subimage(R);title('Treshould Image');

```

```

FileName1 = strcat(Num1,'-',Num2,'-',Num3,'_Result','.jpg');
saveas(fig1,FileName1);

```

end

end

end

```
m = 1;
```

```
n = 1;
```

```
for m = 1:row
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for n = 1:count
    Aef_top(m,n) =
((22/7)/4)*(cell2mat(majoraxis_top(m,n)))*(cell2mat(minoraxis_top(m,n)));
    Aef_front(m,n) =
((22/7)/4)*(cell2mat(majoraxis_front(m,n)))*(cell2mat(minoraxis_front(m,n)));
    Aef_left(m,n) =
((22/7)/4)*(cell2mat(majoraxis_left(m,n)))*(cell2mat(minoraxis_left(m,n)));
    Aef_back(m,n) =
((22/7)/4)*(cell2mat(majoraxis_back(m,n)))*(cell2mat(minoraxis_back(m,n)));
    Aef_right(m,n) =
((22/7)/4)*(cell2mat(majoraxis_right(m,n)))*(cell2mat(minoraxis_right(m,n)));
    Aef_bottom(m,n) =
((22/7)/4)*(cell2mat(majoraxis_bottom(m,n)))*(cell2mat(minoraxis_bottom(m,n)));
end
end

xlswrite('Result.xlsx','area_top','Area','D4:F17');
xlswrite('Result.xlsx','area_front','Area','I4:K17');
xlswrite('Result.xlsx','area_right','Area','N4:P17');
xlswrite('Result.xlsx','area_bottom','Area','D22:F35');
xlswrite('Result.xlsx','area_back','Area','I22:K35');
xlswrite('Result.xlsx','area_left','Area','N22:P35');

xlswrite('Result.xlsx',hours,'Area_ef','B4:B17');
xlswrite('Result.xlsx',hours,'Area_ef','B22:B35');
xlswrite('Result.xlsx','Top','Area_ef','D2');
xlswrite('Result.xlsx','Front','Area_ef','I2');
xlswrite('Result.xlsx','Right','Area_ef','N2');
xlswrite('Result.xlsx','Bottom','Area_ef','D20');
xlswrite('Result.xlsx','Back','Area_ef','I20');
xlswrite('Result.xlsx','Left','Area_ef','N20');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

xlswrite('Result.xlsx',cell2mat(boundingBox_top),'boundingbox','D5:O18');
xlswrite('Result.xlsx',cell2mat(boundingBox_front),'boundingbox','D24:O37');
xlswrite('Result.xlsx',cell2mat(boundingBox_right),'boundingbox','D43:O56');
xlswrite('Result.xlsx',cell2mat(boundingBox_bottom),'boundingbox','D62:O75');
xlswrite('Result.xlsx',cell2mat(boundingBox_back),'boundingbox','D81:O94');
xlswrite('Result.xlsx',cell2mat(boundingBox_left),'boundingbox','D100:O113');

```

```

xlswrite('Result.xlsx',perimeter_top,'Perimeter','D4:F17');
xlswrite('Result.xlsx',perimeter_front,'Perimeter','I4:K17');
xlswrite('Result.xlsx',perimeter_right,'Perimeter','N4:P17');
xlswrite('Result.xlsx',perimeter_bottom,'Perimeter','D22:F35');
xlswrite('Result.xlsx',perimeter_back,'Perimeter','I22:K35');
xlswrite('Result.xlsx',perimeter_left,'Perimeter','N22:P35');
xlswrite('Result.xlsx',majoraxis_top,'MajorAxis','D4:F17');
xlswrite('Result.xlsx',majoraxis_front,'MajorAxis','I4:K17');
xlswrite('Result.xlsx',majoraxis_right,'MajorAxis','N4:P17');
xlswrite('Result.xlsx',majoraxis_bottom,'MajorAxis','D22:F35');
xlswrite('Result.xlsx',majoraxis_back,'MajorAxis','I22:K35');
xlswrite('Result.xlsx',majoraxis_left,'MajorAxis','N22:P35');

```

```

xlswrite('Result.xlsx',minoraxis_top,'MinorAxis','D4:F17');
xlswrite('Result.xlsx',minoraxis_front,'MinorAxis','I4:K17');
xlswrite('Result.xlsx',minoraxis_right,'MinorAxis','N4:P17');
xlswrite('Result.xlsx',minoraxis_bottom,'MinorAxis','D22:F35');
xlswrite('Result.xlsx',minoraxis_back,'MinorAxis','I22:K35');
xlswrite('Result.xlsx',minoraxis_left,'MinorAxis','N22:P35');

```

```

xlswrite('Result.xlsx',diameter_top,'FerretDimension','D4:F17');
xlswrite('Result.xlsx',diameter_front,'FerretDimension','I4:K17');
xlswrite('Result.xlsx',diameter_right,'FerretDimension','N4:P17');
xlswrite('Result.xlsx',diameter_bottom,'FerretDimension','D22:F35');
xlswrite('Result.xlsx',diameter_back,'FerretDimension','I22:K35');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
xlswrite('Result.xlsx',diameter_left,'FerretDimension','N22:P35');
```

```
xlswrite('Result.xlsx',df_top,'Fractal','D4:F17');  
xlswrite('Result.xlsx',df_front,'Fractal','I4:K17');  
xlswrite('Result.xlsx',df_right,'Fractal','N4:P17');  
xlswrite('Result.xlsx',df_bottom,'Fractal','D22:F35');  
xlswrite('Result.xlsx',df_back,'Fractal','I22:K35');  
xlswrite('Result.xlsx',df_left,'Fractal','N22:P35');
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้