

### บทที่ 3

#### ผลและบทวิจารณ์

##### 3.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นตัวอย่าง

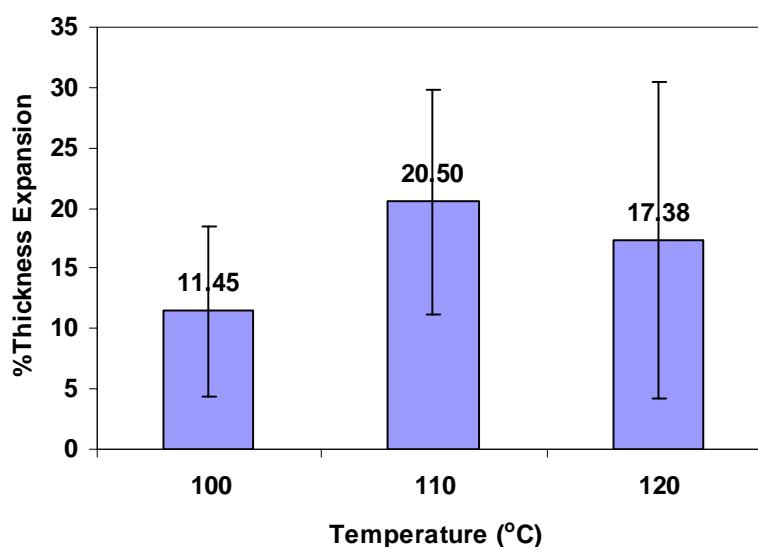
อาหารโดยทั่วไปเมื่อผ่านการทอดแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของขนาดและรูปร่าง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีมากมายอย่างเช่น อุณหภูมิในการทอด เวลาที่ใช้ในการทอด วิธีที่ใช้ในการทอด น้ำมันที่ใช้ทอด และคุณสมบัติของอาหาร เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทอด โดยให้ผลดังนี้

##### 3.1.1 ผลของเวลาที่เหมาะสมกับอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอดตัวอย่าง

เมื่อทำการทดลองโดยทอดตัวอย่างภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C เวลา 5 10 15 20 25 และ 30 นาที พบว่า ที่อุณหภูมิ 100°C เวลาที่เหมาะสมคือ 25 นาที ที่อุณหภูมิ 110°C เวลาที่เหมาะสมคือ 20 นาที และ ที่อุณหภูมิ 120°C เวลาที่เหมาะสมคือ 15 นาที

##### 3.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่างหลังการทอด

เมื่อทำการทอดตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.1.1 จะเห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านการทอดที่ 110°C มีการขยายตัวมาก

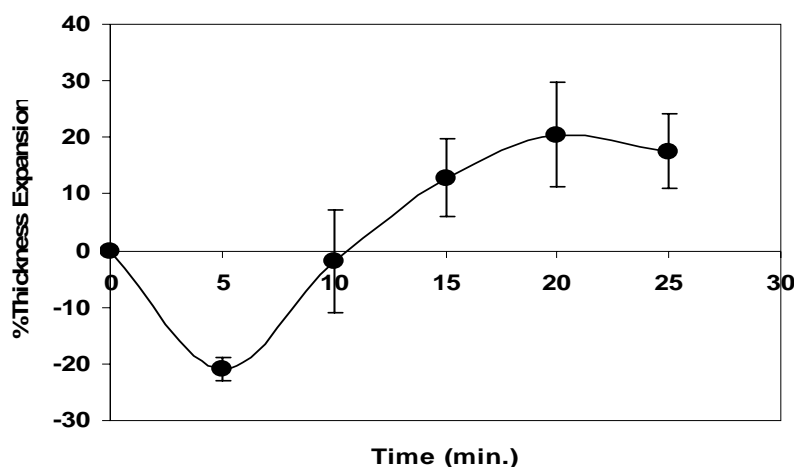


ภาพประกอบ 3.1 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของความหนาขึ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิการทอด 100 110 และ 120°C

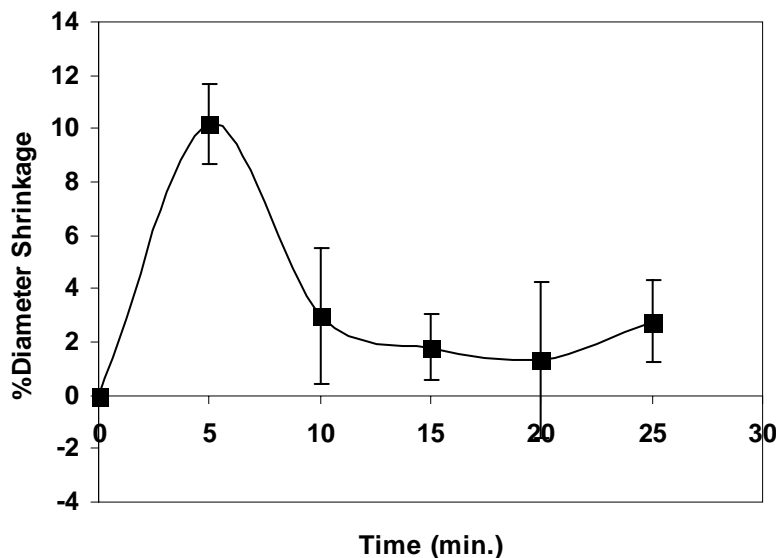
ที่สุดคือขยายตัวคิดเป็น 20.5% รองลงมาก็เป็นตัวอย่างที่ผ่านการทอดที่  $120^{\circ}\text{C}$  และ  $100^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทอดที่อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้น้ำภายในชิ้นตัวอย่างระเหยไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทอดทำให้เหลือน้ำภายในชิ้นตัวอย่างน้อยการขยายตัวหลังการเกิดเปลือกแข็ง (crust) จึงน้อยตามไปด้วย ส่วนการทอดที่อุณหภูมิต่ำเกินไปนั้น ทำให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งส่งผลให้การเกิด crust เป็นไปอย่างช้า ๆ และไม่สมบูรณ์ โดยมีผลโดยตรงต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างทำให้มีการขยายตัวน้อย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลของ Yamsaengsung และ Moreira (2002)

### 3.1.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการทอดต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่าง

การทอดชิ้นตัวอย่างกล้วยหอมสดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความหนาของชิ้นตัวอย่างจะหดตัวลงในช่วง 5 นาทีแรกของการทอด เนื่องจากชิ้นตัวอย่างสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้หดตัวลง ซึ่งหดตัวไปประมาณ 20% หลังจากนั้นก็ขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ จนถึงนาทีที่ 20 ซึ่งขยายตัวประมาณ 20.5% หลังจากนั้นชิ้นตัวอย่างก็จะหดตัวลง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2 ที่เป็นแบบนี้เนื่องจากเมื่อเวลาในการทอดผ่านไปผนังของชิ้นอาหารเริ่มเกิดชั้นเปลือกแข็งขึ้นหรือที่เรียกว่า crust ทำให้น้ำภายในชิ้นอาหารระเหยออกมาได้ยากจึงดัน crust ออกมาทำให้อาหารมีการขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำในอาหารเหลือน้อยการขยายตัวจึงหยุด ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่างจะหดตัวลงในระหว่างการทอดและหลังทอดซึ่งจะหดตัวมากในช่วง 5 นาทีแรกของการทอด หลังจากนั้นการหดตัวก็จะน้อยลงซึ่งจะสอดคล้องกับการหดตัวของความหนาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3 ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลของ Yamsaengsung และ Moreira (2002)



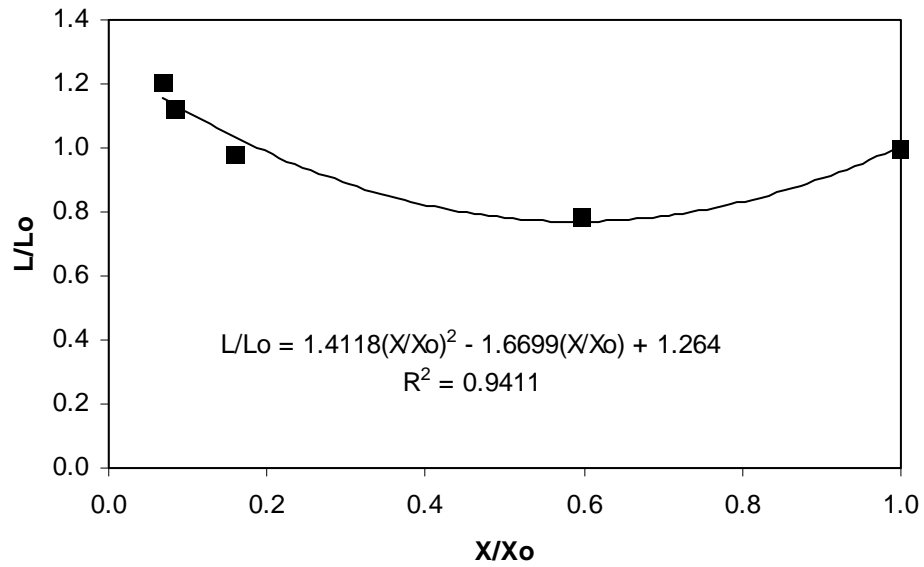
ภาพประกอบ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของความหนากับเวลาในการทอดที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$



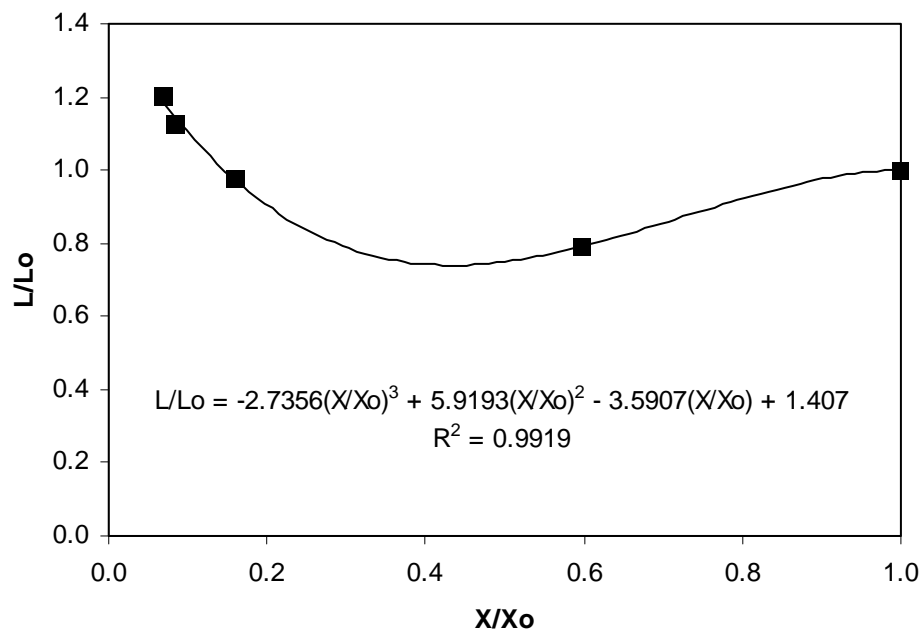
ภาพประกอบ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเส้นผ่าศูนย์กลางกับเวลาในการทอดที่อุณหภูมิ 110°C

ระดับการหดตัว (Degree of shrinkage,  $L/L_0$ ,  $D/D_0$  และ  $V/V_0$ ) ของชิ้นตัวอย่างกล้วยหอมระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทั้งอัตราส่วนขนาดความหนา อัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราส่วนปริมาตร มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้นมาตรฐานเปียกภายในชิ้นตัวอย่าง เป็นแบบสมการโพลิโนเมียลทั้งกำลังสอง และกำลังสาม ซึ่งแสดงเปรียบเทียบดังในภาพประกอบ 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 และ 3.9

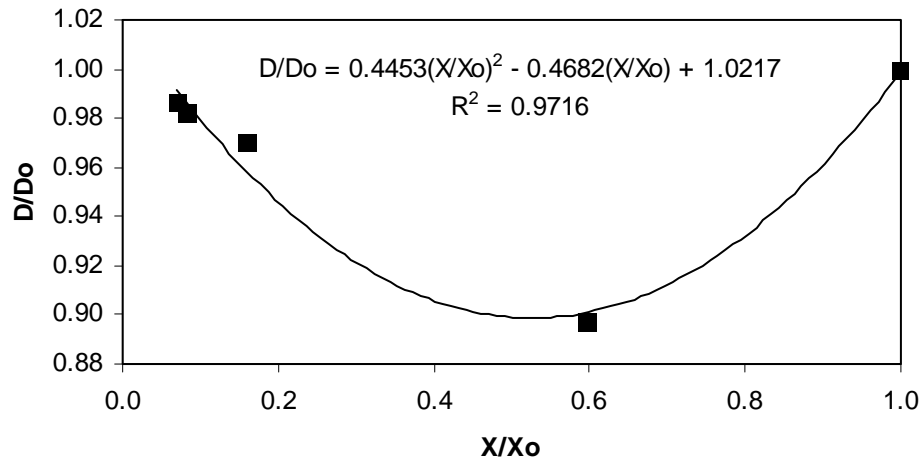
จากภาพประกอบ 3.4 และ 3.5 จะเห็นว่า ลักษณะกราฟที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อย และให้ค่า  $R^2$  ที่แตกต่างกันโดยที่ สมการโพลิโนเมียลกำลังสองให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9411 แต่สมการโพลิโนเมียลกำลังสามให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9919 สำหรับภาพประกอบ 3.6 และ 3.7 จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และให้ค่า  $R^2$  ที่แตกต่างกัน โดยที่ สมการโพลิโนเมียลกำลังสองให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9716 ส่วนสมการโพลิโนเมียลกำลังสามให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9995 ส่วนภาพประกอบ 3.8 และ 3.9 ก็ให้ผลในทำนองเดียวกันคือกราฟที่ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันแต่ให้ค่า  $R^2$  แตกต่างกัน โดยที่สมการโพลิโนเมียลกำลังสองให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9767 ส่วนสมการโพลิโนเมียลกำลังสามให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9940 ซึ่งทั้งสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง, สมการโพลิโนเมียลกำลังสาม และค่า  $R^2$  ของกราฟต่างๆ ได้รวมรวบดังแสดงในตาราง 3.1 และ 3.2



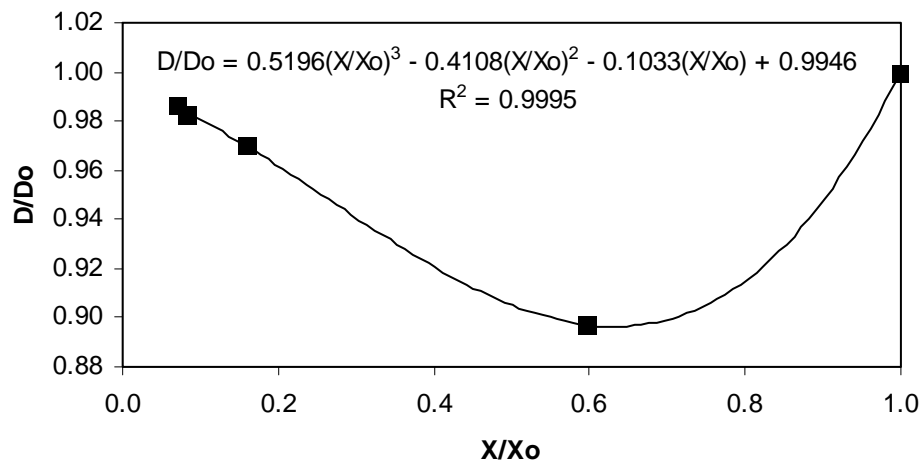
ภาพประกอบ 3.4 ความสัมพันธ์แบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง ระหว่างอัตราส่วนความหนา ( $L/L_0$ ) กับอัตราส่วนความขึ้นมาตรฐานเปียก( $X/X_0$ )



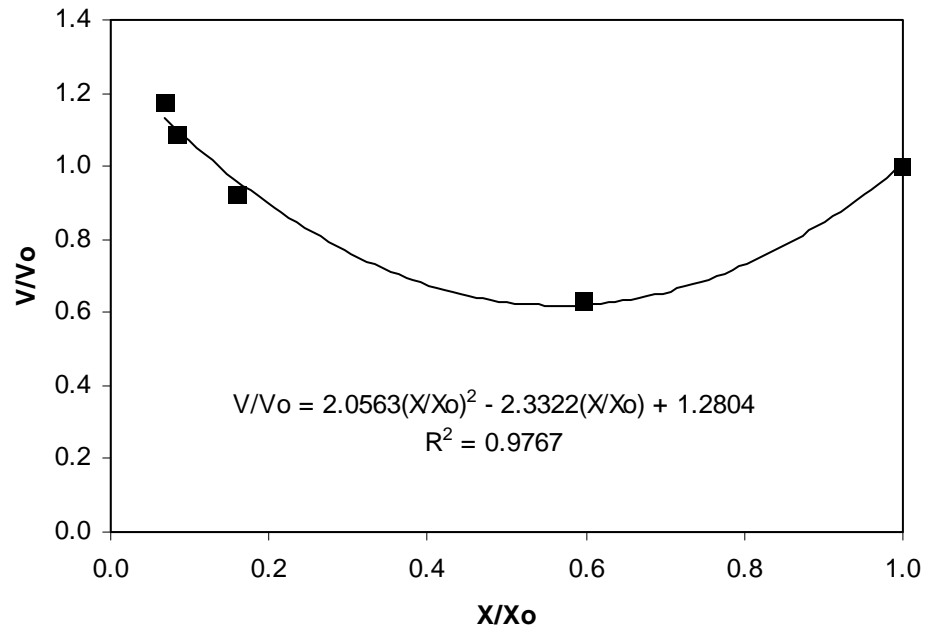
ภาพประกอบ 3.5 ความสัมพันธ์แบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสาม ระหว่างอัตราส่วนความหนา ( $L/L_0$ ) กับอัตราส่วนความขึ้นมาตรฐานเปียก( $X/X_0$ )



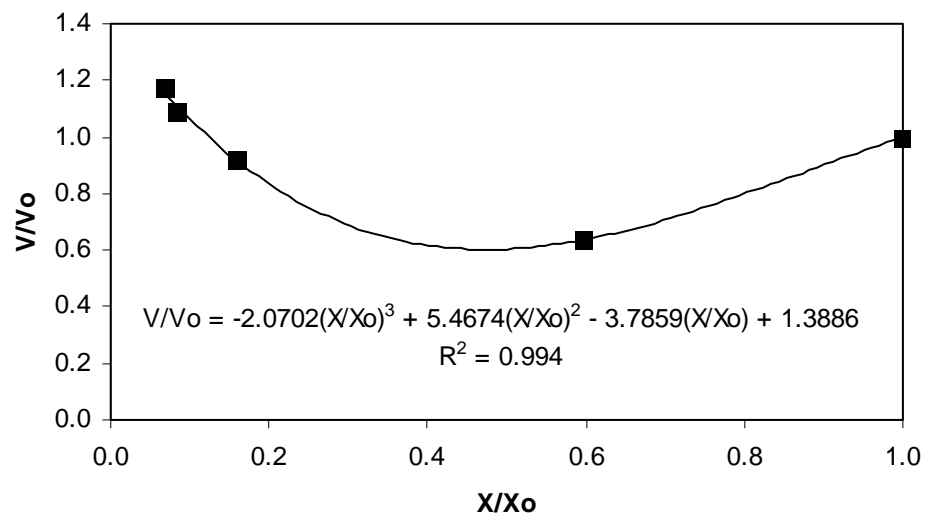
ภาพประกอบ 3.6 ความสัมพันธ์แบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง ระหว่างอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D/D_0$ ) กับอัตราส่วนความขึ้นมาตรฐานเปียก( $X/X_0$ )



ภาพประกอบ 3.7 ความสัมพันธ์แบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสาม ระหว่างอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D/D_0$ ) กับอัตราส่วนความขึ้นมาตรฐานเปียก( $X/X_0$ )



ภาพประกอบ 3.8 ความสัมพันธ์แบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง ระหว่างอัตราส่วนปริมาตร ( $V/V_0$ ) กับอัตราส่วนความเข้มข้นมาตรฐานเปียก( $X/X_0$ )



ภาพประกอบ 3.9 ความสัมพันธ์แบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสาม ระหว่างอัตราส่วนปริมาตร ( $V/V_0$ ) กับอัตราส่วนความเข้มข้นมาตรฐานเปียก( $X/X_0$ )

ตาราง 3.1 Empirical models แบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง ที่ได้จากการทดลองและค่าคงที่

Equation	a	b	c	R <sup>2</sup>
$L/L_0 = a(X/X_0)^2 - b(X/X_0) + c$	1.4118	1.6699	1.264	0.9411
$D/D_0 = a(X/X_0)^2 - b(X/X_0) + c$	0.4453	0.4682	1.0217	0.9716
$V/V_0 = a(X/X_0)^2 - b(X/X_0) + c$	2.0563	2.3322	1.2804	0.9767

โดยที่  $L$  คือความหนา (mm)  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)  $V$  คือปริมาตร (mm<sup>3</sup>)

$X$  คือความชื้นมาตรฐานเปียก และ  $a$ ,  $b$  และ  $c$  คือค่าคงที่

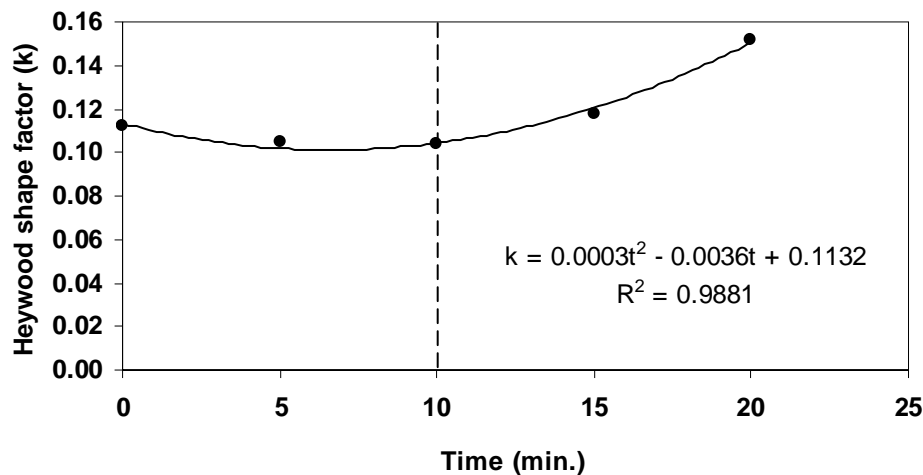
ตาราง 3.2 Empirical models แบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสาม ที่ได้จากการทดลองและค่าคงที่

Equation	a	b	c	d	R <sup>2</sup>
$L/L_0 = -a(X/X_0)^3 + b(X/X_0)^2 - c(X/X_0) + d$	2.7356	5.9193	3.5907	1.407	0.9919
$D/D_0 = a(X/X_0)^3 - b(X/X_0)^2 - c(X/X_0) + d$	0.5196	0.4108	0.1033	0.9946	0.9995
$V/V_0 = -a(X/X_0)^3 + b(X/X_0)^2 - c(X/X_0) + d$	2.0702	5.4674	3.7859	1.3886	0.994

โดยที่  $L$  คือความหนา (mm)  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)  $V$  คือปริมาตร (mm<sup>3</sup>)

$X$  คือความชื้นมาตรฐานเปียก และ  $a$ ,  $b$ ,  $c$  และ  $d$  คือค่าคงที่

รูปแบบการหดตัวของตัวอย่างกล้วยหอมในระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ แสดงโดยใช้ค่า Heywood shape factor กับเวลาในการทอด ดังแสดงในภาพประกอบ 3.10 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกค่า Heywood shape factor มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่ารูปแบบการหดตัวของชิ้นตัวอย่างในช่วง 10 นาทีแรก ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจาก การหดตัวในแนวความหนามีมากกว่าการหดตัวในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่าง สำหรับในส่วนที่ 2 ค่า Heywood shape factor ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังจากการทอดผ่านไป 10 นาที ชิ้นตัวอย่างมีการขยายตัวในแนวของความหนามากกว่าในด้านของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heywood shape factor กับเวลาแสดงในตาราง 3.3



ภาพประกอบ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heywood shape factor กับเวลา

ตาราง 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heywood shape factor กับเวลา

Equation	a	b	c	R <sup>2</sup>
$k = at^2 - bt + c$	0.0003	0.0036	0.1132	0.9881

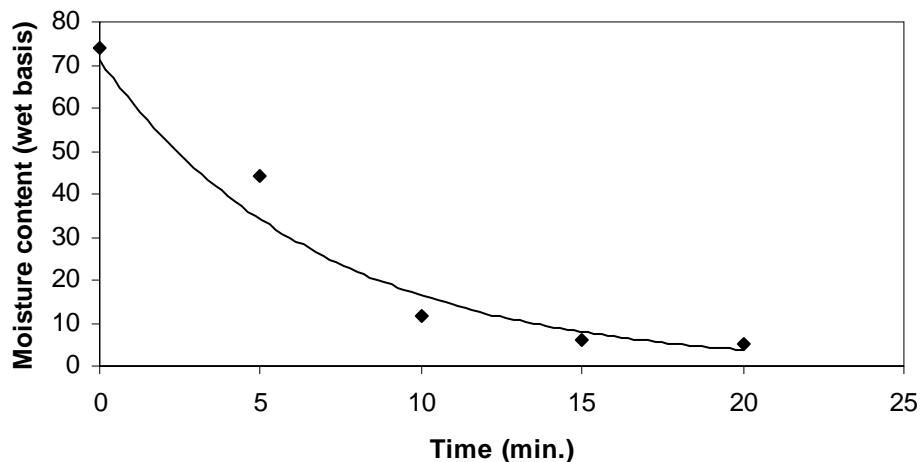
โดยที่ k คือค่า Heywood shape factor, t คือเวลา (นาที)

### 3.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นภายในชิ้นตัวอย่างกล้วย อุณหภูมิ และความดันภายในหม้อทอด ระหว่างการทอด

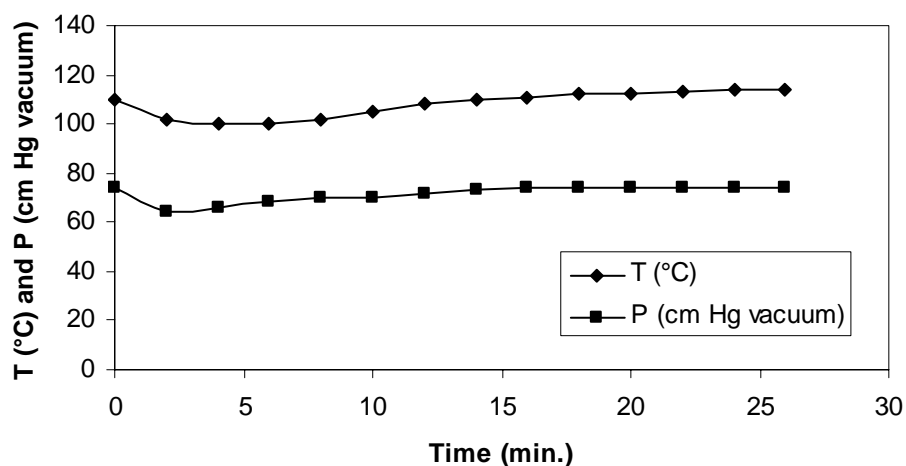
จากการทดลองทอดตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110°C พบว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรกและจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ จนปริมาณความชื้นคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาดทั้งในด้านความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่าง กล่าวคือในช่วง 10 นาทีแรกชิ้นตัวอย่างสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการหดตัว ดังแสดงในภาพประกอบ 3.11

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันภายในหม้อทอดระหว่างการทอดจะเห็นว่าทั้งอุณหภูมิและความดันลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรกของการทอด หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นและค่อนข้างคงที่ เนื่องจากการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วในชิ้นตัวอย่างทำให้ความดันสุญญากาศภายในหม้อทอดลดลงและยังพาเอาความร้อนออกไปด้วย หลังจากนั้นในชิ้นลดน้อยลงทำให้อุณหภูมิและความดันภายในหม้อทอดกลับเข้าสู่สภาวะที่ตั้งไว้ในตอนต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 3.12





ภาพประกอบ 3.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในชั้นตัวอย่างระหว่างการทอดที่อุณหภูมิ 110 °C

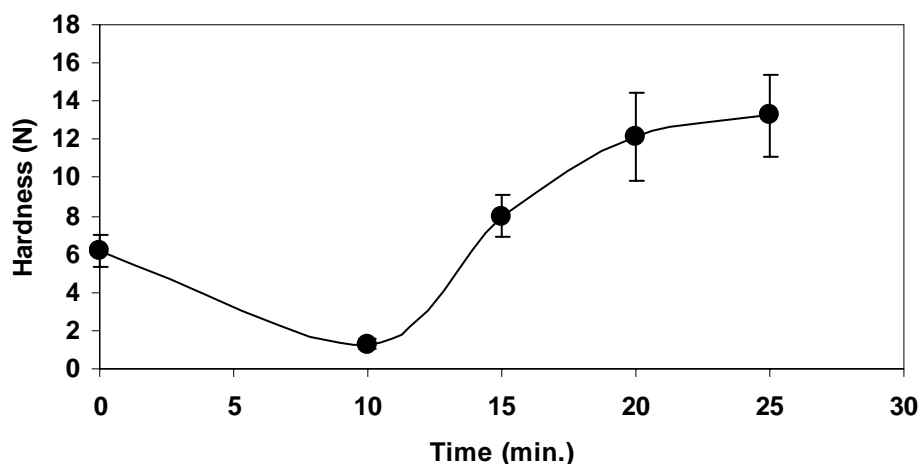


ภาพประกอบ 3.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันภายในหม้อทอดระหว่างการทอดที่อุณหภูมิ 110°C

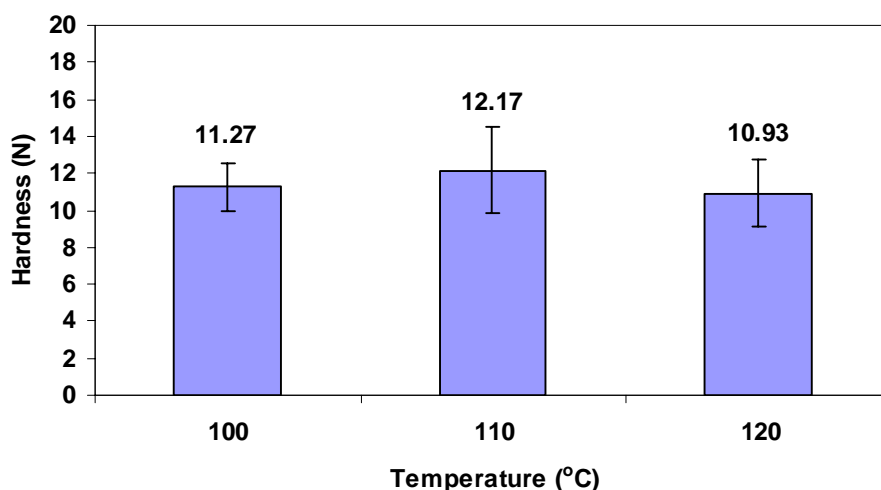
### 3.3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของชั้นตัวอย่างกล้วยหอมระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของชั้นตัวอย่างสังเกตได้จากค่าความแข็งของชั้นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการทอดซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าค่าความแข็งจะลดลงในช่วงแรกของการทอดและจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากนั้นก็ค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.13 เนื่องจากในช่วงแรกของการทอดเป็นการหดตัวของชั้นตัวอย่างสับเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วทำให้ค่าความแข็งลดลงและเมื่อให้ความร้อนต่อไปผนัง

ของชิ้นตัวอย่างเริ่มเกิดเป็นชั้นแข็ง (crust) และเกิดการขยายตัว ทำให้ค่าความแข็งของชิ้นตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยๆ คงที่ในที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทอดที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$   $110^{\circ}\text{C}$  และ  $120^{\circ}\text{C}$  จะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทอดที่  $110^{\circ}\text{C}$  จะให้ตัวอย่างที่มีค่าความแข็งมากที่สุด คือมีค่าเป็น 12.17 N รองลงมาก็เป็น  $100^{\circ}\text{C}$  และ  $120^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.14



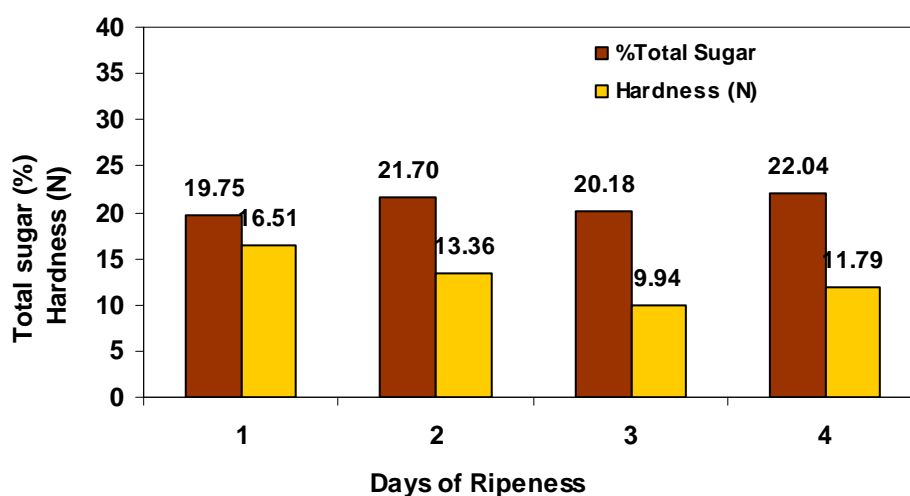
ภาพประกอบ 3.13 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของชิ้นตัวอย่างระหว่างการทอดที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$



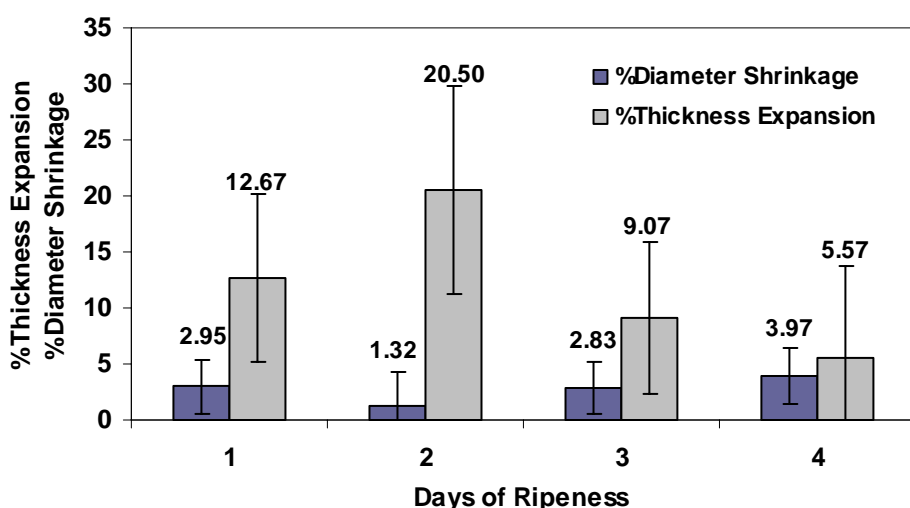
ภาพประกอบ 3.14 เปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทอดที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$   $110^{\circ}\text{C}$  และ  $120^{\circ}\text{C}$

### 3.4 ผลขององค์ประกอบเริ่มต้นของตัวอย่างกล้วยหอมสด (ความชื้น และน้ำตาล) ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวอย่างหลังการทอด

จากภาพประกอบ 3.15 จะเห็นว่าปริมาณน้ำตาลมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการสุกของตัวอย่างกล้วยโดยการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำตาล และค่าความแข็งมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากเมื่อตัวอย่างกล้วยหอมสุกมากขึ้นเรื่อยๆ แป้งที่เป็นโครงสร้างหลักก็มีปริมาณน้อยลงและเอนไซม์ย่อยผนังเซลล์เนื้อเยื่อกล้วยส่งผลให้โครงสร้างอ่อนตัวลงอีกทั้งน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่างยังซึมออกมานอกเซลล์ทำให้เนื้อสัมผัสยิ่งนิ่มมากขึ้น



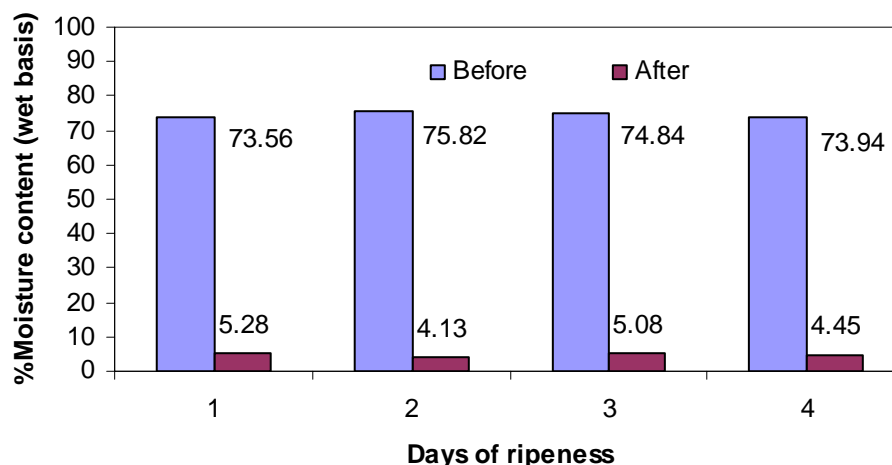
ภาพประกอบ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างวันที่บ่มกับค่า Total sugar (%) และ Hardness (N)



ภาพประกอบ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างวันที่บ่มกับค่า %Diameter Shrinkage และ %Thickness Expansion

จากภาพประกอบ 3.16 จะเห็นว่าตัวอย่างที่บ่ม 2 วัน จะให้ค่าการพองตัวในส่วนของความหนามากที่สุดและให้ค่าการหดตัวในส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุด ซึ่งตัวอย่างบ่ม 2 วัน นี้เมื่อผ่านการทอดแล้วจะให้ค่าการขยายตัวมากที่สุดคือ 20.5% ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนขององค์ประกอบภายในของชิ้นตัวอย่างมีความเหมาะสมพอดีซึ่งเอื้ออำนวยในการพองตัวระหว่างการทอด ส่วนตัวอย่างบ่ม 4 วัน มีการขยายตัวของความหนาน้อยที่สุดและมีการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด ดังแสดงในตาราง 3.4 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแป้งที่ลดน้อยลงเนื่องจากการสุกและการไหลซึมออกมาของน้ำภายในเซลล์ของตัวอย่างทำให้มีโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมและไม่เอื้ออำนวยต่อการพองตัวในระหว่างการทอด

จากภาพประกอบ 3.17 จะเห็นว่าปริมาณความชื้นภายในชิ้นตัวอย่างทั้งก่อนทอดและหลังทอดของตัวอย่างกล้วยที่บ่มที่วันต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ซึ่งตัวอย่างกล้วยบ่ม 2 วัน มีความชื้นภายในเริ่มต้นก่อนการทอดมากที่สุด และยังมีปริมาณความชื้นภายในชิ้นตัวอย่างหลังการทอดที่น้อยที่สุดอีกด้วย



ภาพประกอบ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างวันที่บ่มตัวอย่างกล้วยกับค่าความชื้นภายในชิ้นตัวอย่างก่อนทอด และหลังทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

ตาราง 3.4 สรุป ปริมาณน้ำตาล ค่าความแข็ง % Thickness Expansion และ % Diameter Shrinkage ของตัวอย่างที่บ่มระยะเวลาต่างๆ

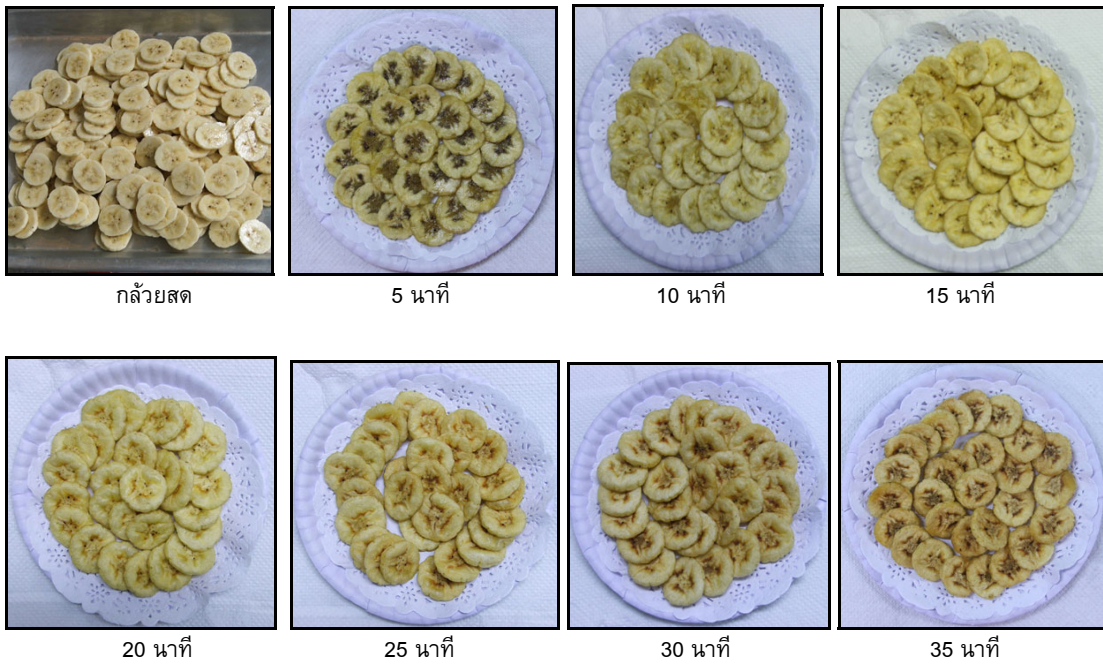
Samples	% Total Sugar	Hardness (N)	% Thickness Expansion	% Diameter Shrinkage
บ่ม 1 วัน	19.75	16.51	12.67	2.95
บ่ม 2 วัน	21.70	13.36	20.50	1.32
บ่ม 3 วัน	20.18	9.94	9.07	2.83
บ่ม 4 วัน	22.04	11.79	5.57	3.97

### 3.5 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างกล้วยหอมระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

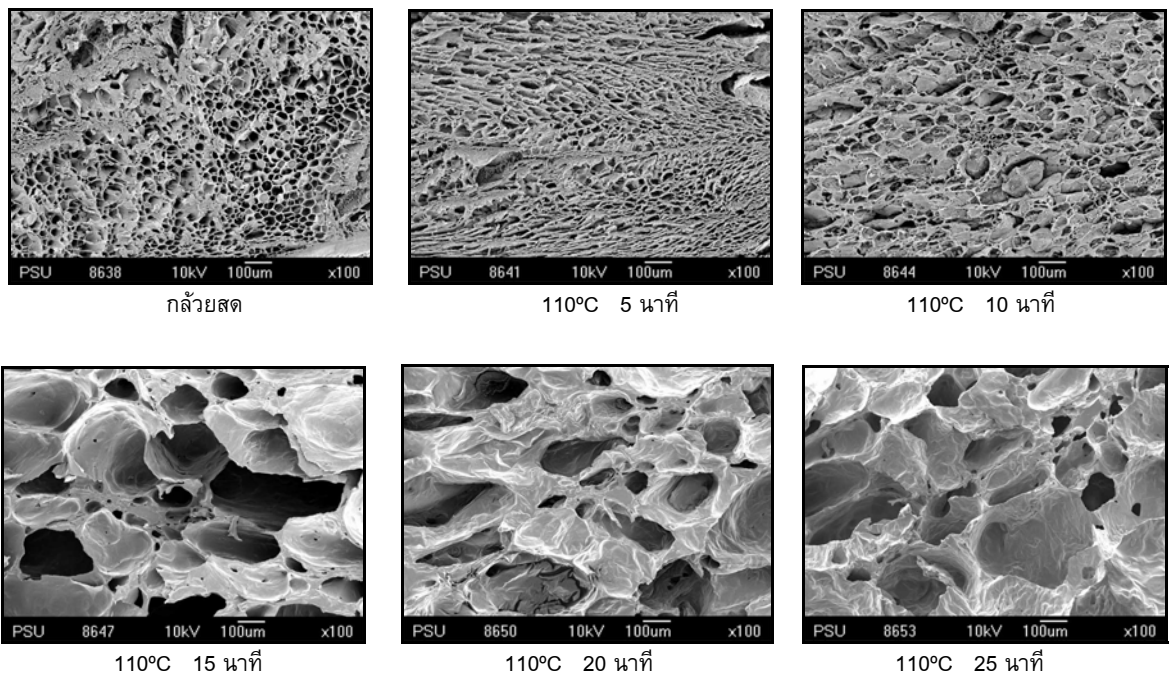
การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างระหว่างการทอดจะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในด้านขนาด และสี ซึ่งในด้านขนาดก็ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่วนในด้านสีก็จะเห็นว่าสีของชิ้นตัวอย่างจะเข้มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.18 ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างที่ให้สีและลักษณะปรากฏที่ดี นำรับประทาน คือตัวอย่างที่ผ่านการทอด 20 นาที สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทอด 5 นาที เป็นตัวอย่างที่มีการหดตัวมากที่สุด และสำหรับตัวอย่างที่ทอดนาน 25 นาที ขึ้นไปตัวอย่างจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล อันเนื่องมาจากการให้ความร้อนที่มากเกินไป หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไมลล์ลาร์ด (Maillard reaction)

### 3.6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

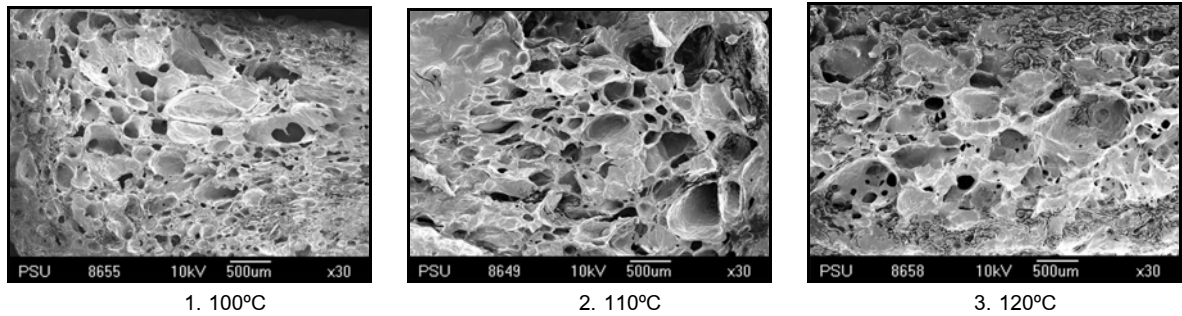
จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความพรุนของตัวอย่างในระหว่างการทอดที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าขนาดรูพรุนของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทอดที่เวลา 5 และ 10 นาที เล็กกว่าตัวอย่างกล้วยสดเนื่องจากในช่วงแรกของการทอดชิ้นตัวอย่างจะหดตัวลงดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นหลังจากนั้นชิ้นตัวอย่างก็ขยายตัวสังเกตได้จากขนาดรูพรุนขยายใหญ่ขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 3.19 เมื่อเปรียบเทียบรูพรุนของตัวอย่างที่ผ่านการทอดที่  $100^{\circ}\text{C}$   $110^{\circ}\text{C}$  และ  $120^{\circ}\text{C}$  จะเห็นว่าตัวอย่างที่ทอดที่  $110^{\circ}\text{C}$  มีการขยายตัวที่สมบูรณ์กว่าตัวอย่างที่ทอดที่  $100^{\circ}\text{C}$  และ  $120^{\circ}\text{C}$  สังเกตได้จากตัวอย่างที่  $110^{\circ}\text{C}$  มีการขยายตัวทั่วชิ้นแต่ตัวอย่างที่  $100^{\circ}\text{C}$  และ  $120^{\circ}\text{C}$  มีการขยายตัวเฉพาะตรงกลางชิ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 3.20



ภาพประกอบ 3.18 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างกล้วยหอมระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบ 3.19 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่เวลาต่างๆ ที่  $110^{\circ}\text{C}$  (ขยาย 100 เท่า)

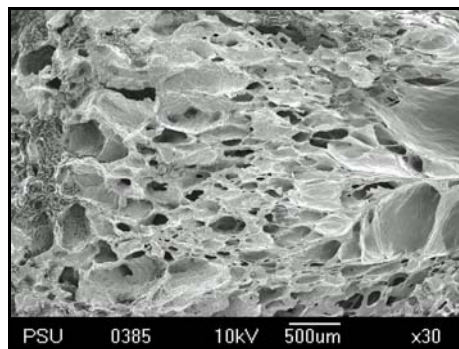


1. 100°C

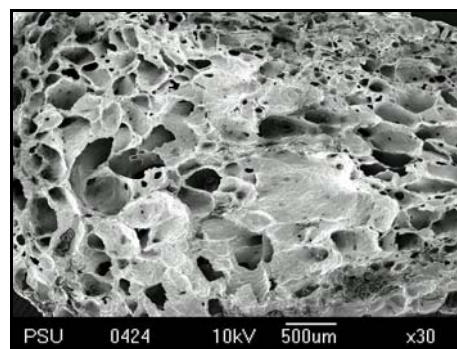
2. 110°C

3. 120°C

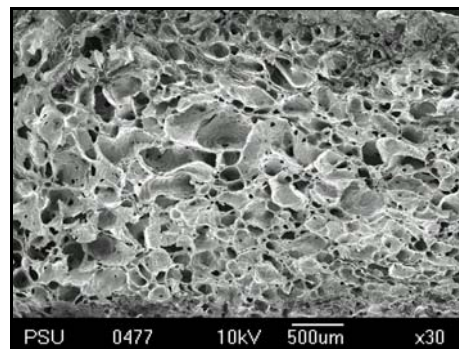
ภาพประกอบ 3.20 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ 100°C 110°C และ 120°C (ขยาย 30 เท่า)



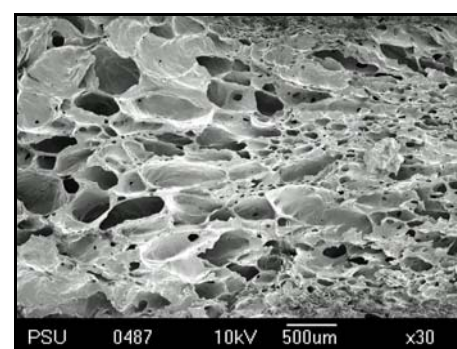
บ่ม 1 วัน



บ่ม 2 วัน



บ่ม 3 วัน



บ่ม 4 วัน

ภาพประกอบ 3.21 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตัวอย่างที่บ่มที่เวลาต่าง ๆ (ขยาย 30 เท่า)

จากภาพประกอบ 3.21 เป็นภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหลังการทอดของตัวอย่างที่บ่มที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างบ่ม 2 วัน จะมีโครงสร้างที่สมบูรณ์ที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ และยังมี การขยายตัวของรูพรุนมากที่สุดอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างบ่ม 2 วัน มีองค์ประกอบ(แป้ง น้ำตาล และ น้ำ) ในสัดส่วนที่เหมาะสมจึงมีโครงสร้างที่เอื้ออำนวยในการขยายหรือฟองตัวในระหว่างการทอดซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลังการทอดที่มีลักษณะเนื้อสัมผัส โครงสร้างโดยรวมที่ดี

### 3.7 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน วิธี 7 Point Hedonic scale (7 ระดับคะแนน, 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบเล็กน้อย 4 = เฉยๆ 5 = ชอบน้อยที่สุด 6 = ชอบมาก และ 7 = ชอบมากที่สุด) ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นตัวอย่างกล้วยหอมที่บ่มที่เวลาต่างๆ ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งจากผลที่ได้ตามตาราง 3.5 ตัวอย่างบ่ม 2 วัน มีคะแนนรสชาติ (5.93) ความกรอบ (6.03) และการยอมรับรวม (5.97) มากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่บ่มวันอื่นๆ

เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่าการยอมรับผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 ผลิตภัณฑ์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) ทั้งในด้านสี ผิวสัมผัส รสชาติ ความกรอบ และการยอมรับรวม

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าวัตถุดิบกล้วยหอมสดที่ใช้ในการทอดที่สภาวะสุญญากาศมีช่วงระยะเวลาการเก็บและนำมาใช้งานที่นานหลายวัน ซึ่งเมื่อนำมาทอดที่สภาวะสุญญากาศก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการยอมรับไม่แตกต่างกัน

ตาราง 3.5 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กล้วยหอมทอดที่สภาวะสุญญากาศ

ระยะเวลา บ่ม (วัน)	การยอมรับ				
	สี	ผิวสัมผัส	รสชาติ	ความกรอบ	รวม
1	5.07 <sup>a</sup> ± 1.26	5.27 <sup>a</sup> ± 1.05	5.40 <sup>a</sup> ± 1.16	5.60 <sup>a</sup> ± 1.59	5.68 <sup>a</sup> ± 1.21
2	5.27 <sup>a</sup> ± 1.14	5.03 <sup>a</sup> ± 1.07	5.93 <sup>a</sup> ± 0.64	6.03 <sup>a</sup> ± 0.81	5.97 <sup>a</sup> ± 0.72
3	5.37 <sup>a</sup> ± 1.07	4.87 <sup>a</sup> ± 1.14	5.83 <sup>a</sup> ± 0.99	5.57 <sup>a</sup> ± 1.17	5.50 <sup>a</sup> ± 0.97
4	5.37 <sup>a</sup> ± 1.10	4.90 <sup>a</sup> ± 0.99	5.87 <sup>a</sup> ± 1.11	5.80 <sup>a</sup> ± 0.85	5.80 <sup>a</sup> ± 0.96

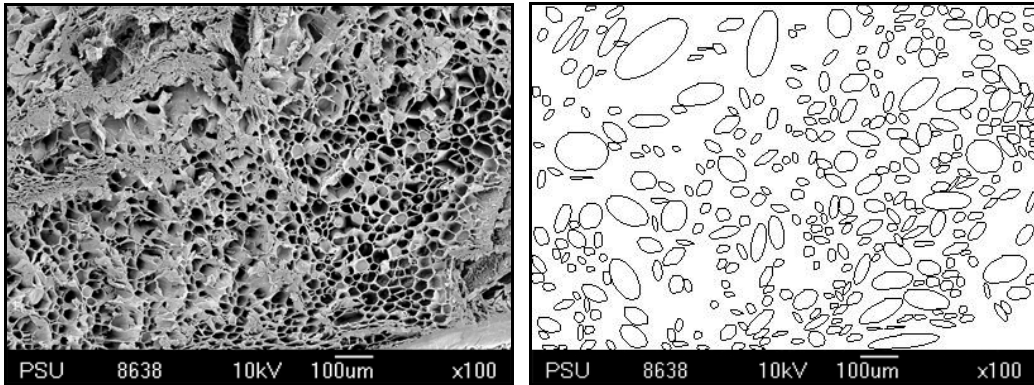
หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันสำหรับแต่ละการทดสอบในแนวตั้งหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P \leq 0.05$ )

### 3.8 ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในชั้นตัวอย่าง (Pore Size Distribution)

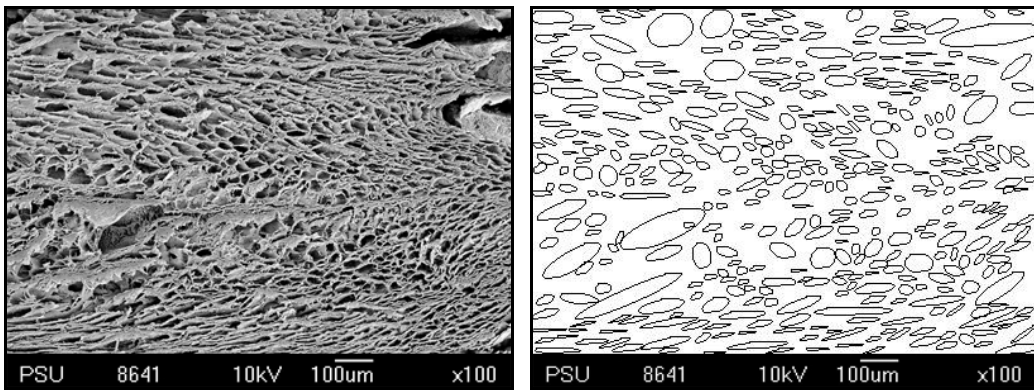
การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในชั้นตัวอย่างกล้วยทอดสุญญากาศ โดยการนำภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ต้องการวิเคราะห์มาทำการร่วมกับโปรแกรม ImageJ (วิธีการใช้โปรแกรม ImageJ ในภาคผนวก ก.) ซึ่งจะได้ภาพ Drawing (ดังภาพประกอบ 3.22) และขนาดรูพรุนแต่ละรู ซึ่งขนาดที่ได้จะเป็นพื้นที่ ( $\mu\text{m}^2$ ) สำหรับงานวิจัยนี้ตั้งสมมุติฐานว่ารูพรุนแต่ละรูเป็นวงกลมจึงสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนแต่ละรูออกมาได้ และนำขนาดของรูพรุนมาวิเคราะห์การกระจายตัว



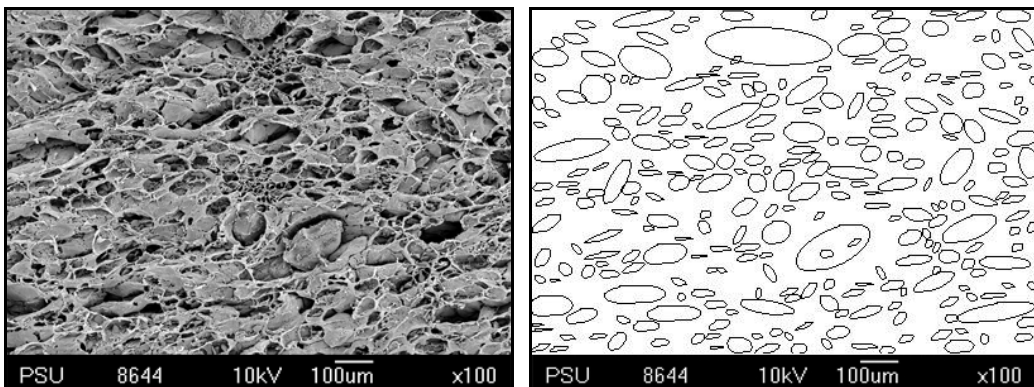
ตัวอย่างกล้วยสด



ตัวอย่างทอดที่ 110°C 5 นาที

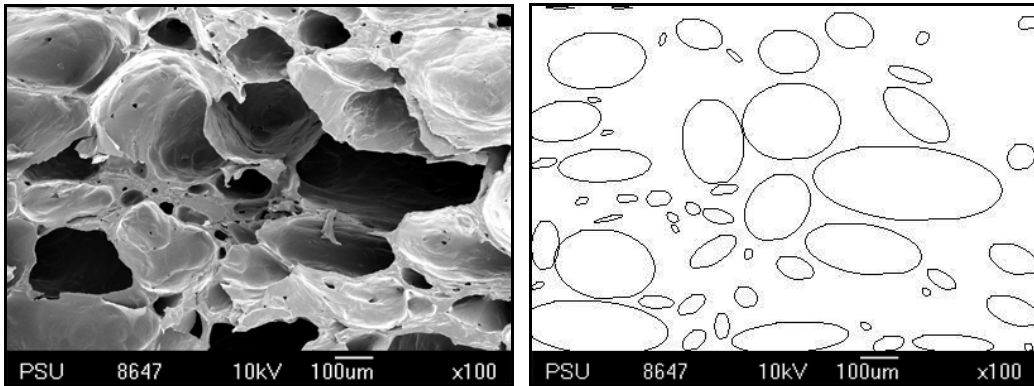


ตัวอย่างทอดที่ 110°C 10 นาที

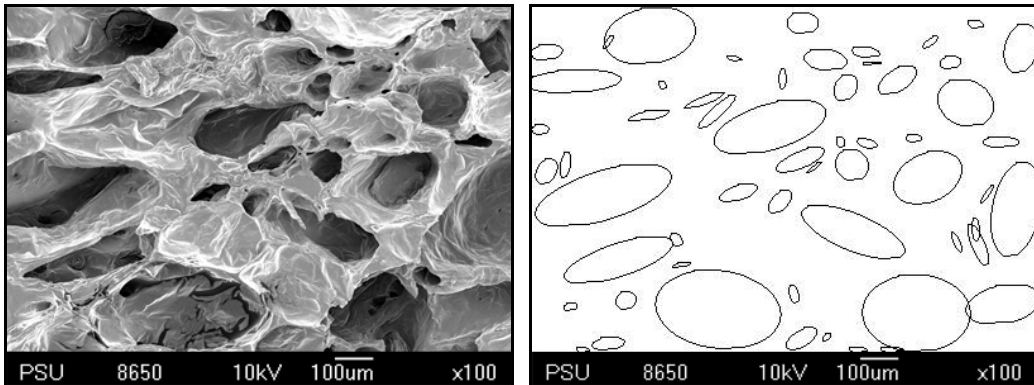


ภาพประกอบ 3.22 ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างกล้วยหอมทอดสุญญากาศที่ 110°C ที่เวลาต่างๆ

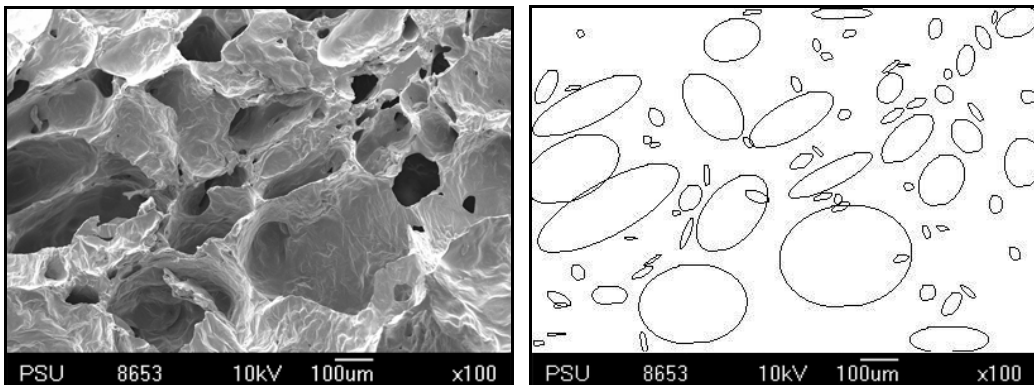
ตัวอย่างทอดที่ 110°C 15 นาที



ตัวอย่างทอดที่ 110°C 20 นาที

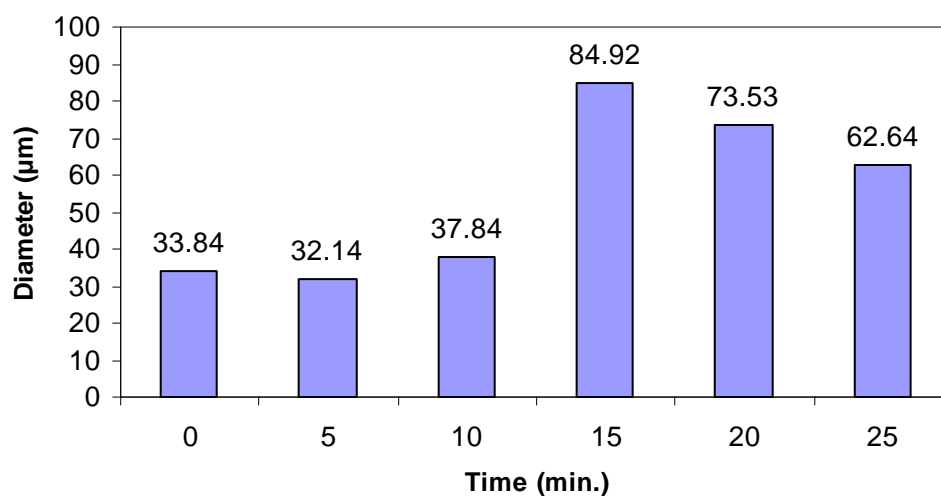


ตัวอย่างทอดที่ 110°C 25 นาที



ภาพประกอบ 3.22 (ต่อ) ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างกล้วยทอดสุญญากาศที่ 110°C ที่เวลาต่างๆ

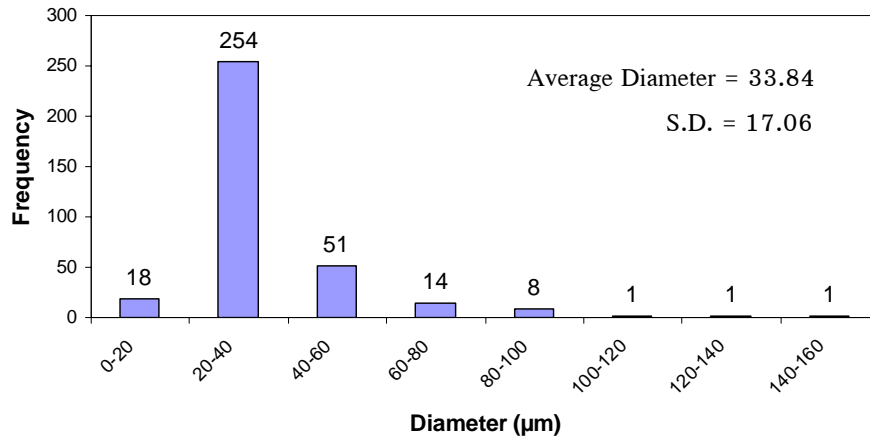
ขนาดรูพรุนของชั้นตัวอย่างกล้วยทอดสุญญากาศจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการทอด โดยที่ในช่วงแรกของการทอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักและเมื่อเวลาในการทอดเพิ่มขึ้นจาก 10 นาที เป็น 15 นาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 37.84  $\mu\text{m}$  ไปเป็น 84.92  $\mu\text{m}$  และเมื่อเวลาในการทอดเพิ่มมากขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยก็จะลดลงตามลำดับ ดังภาพประกอบ 3.23



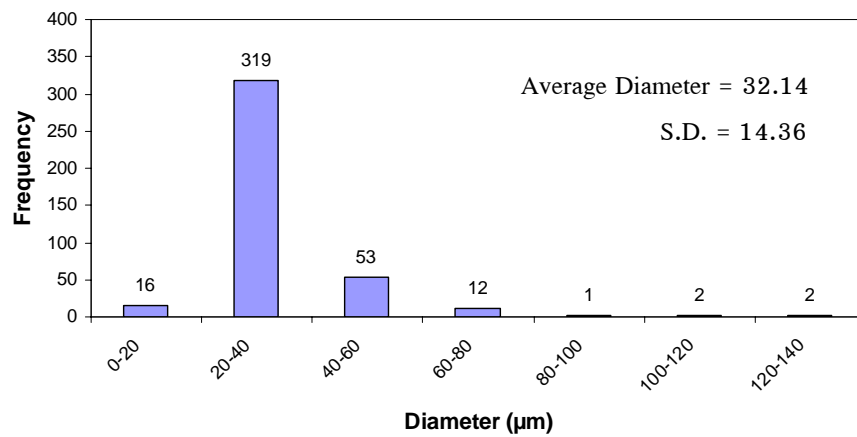
ภาพประกอบ 3.23 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชั้นตัวอย่าง ทอดที่  $110^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาต่างๆ

การกระจายตัวของรูพรุนในชั้นตัวอย่างกล้วยทอดสุญญากาศที่  $110^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาต่างๆ โดยแบ่งช่วงการกระจายเป็นช่วงละ 20  $\mu\text{m}$  ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงแรกของการทอดคือที่ตัวอย่างกล้วยสด 5 และ 10 นาที จะมีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก (0–40  $\mu\text{m}$ ) เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ 15 20 และ 25 นาที และสำหรับจำนวนรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ (> 200  $\mu\text{m}$ ) จะมีในชั้นตัวอย่างที่ 15 นาทีขึ้นไป ดังภาพประกอบ 3.24

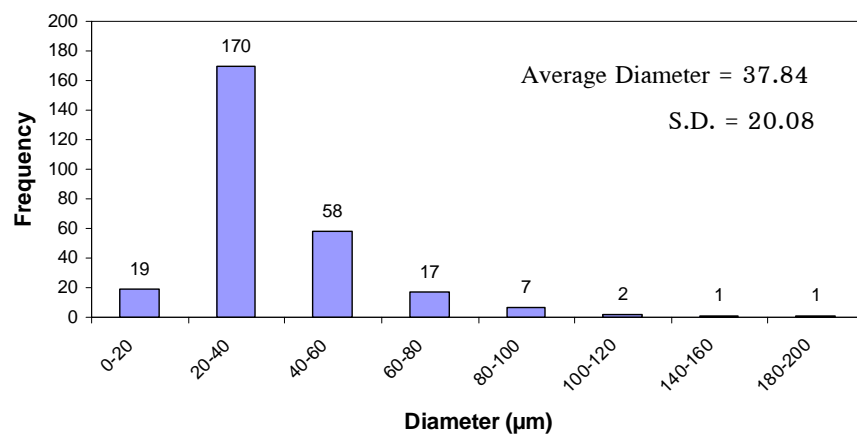
ตัวอย่างกล้วยสด



ตัวอย่างทอดที่ 110°C 5 นาที

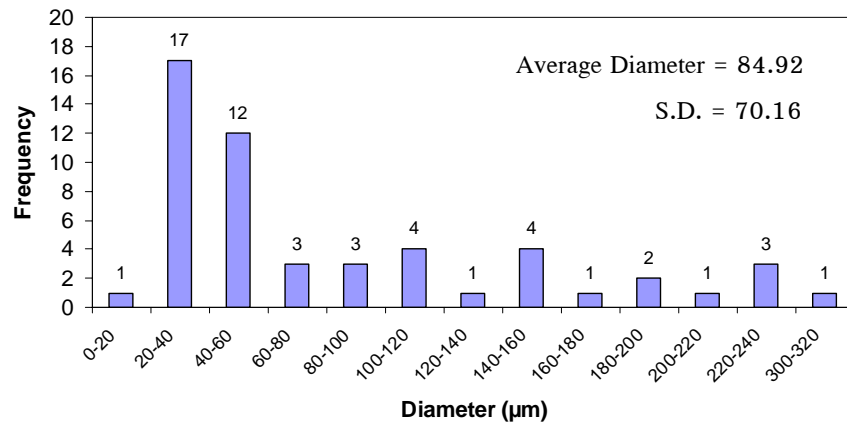


ตัวอย่างทอดที่ 110°C 10 นาที

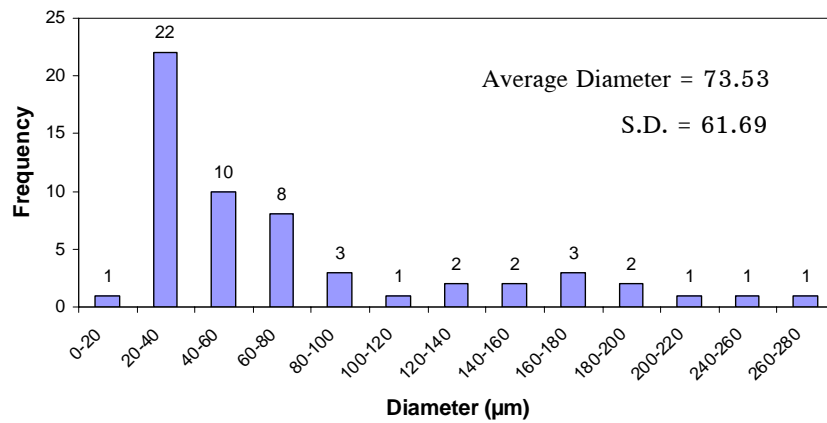


ภาพประกอบ 3.24 การกระจายตัวของรูปพรุนในตัวอย่างกล้วยหอมทอดสุญญากาศที่ 110°C ที่เวลาต่างๆ

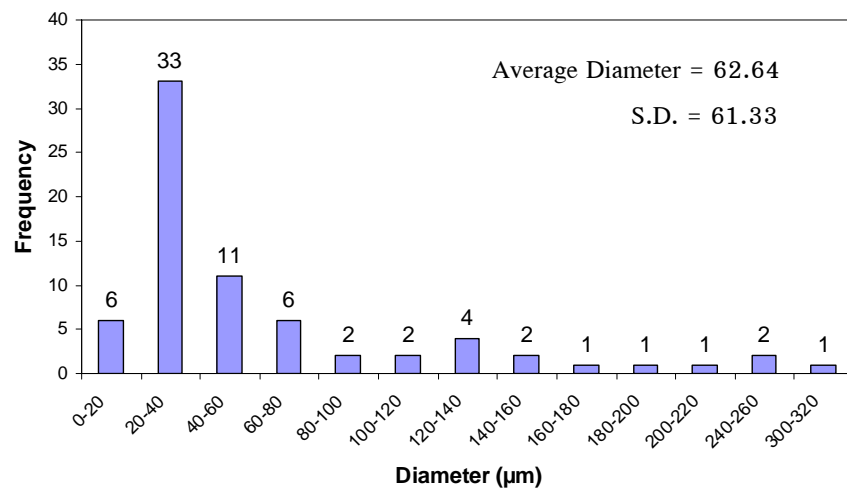
ตัวอย่างทอดที่ 110°C 15 นาที



ตัวอย่างทอดที่ 110°C 20 นาที

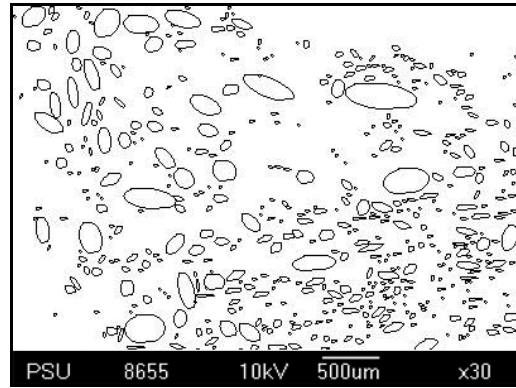
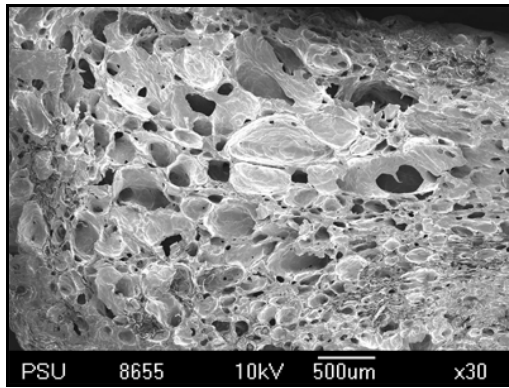


ตัวอย่างทอดที่ 110°C 25 นาที

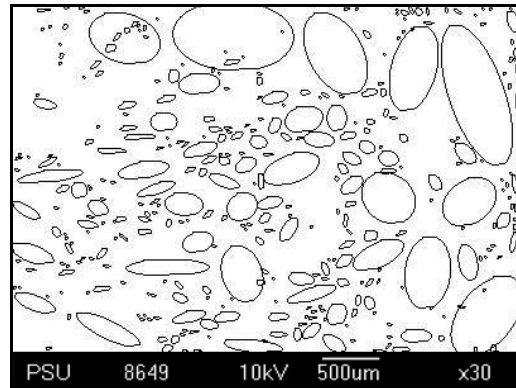
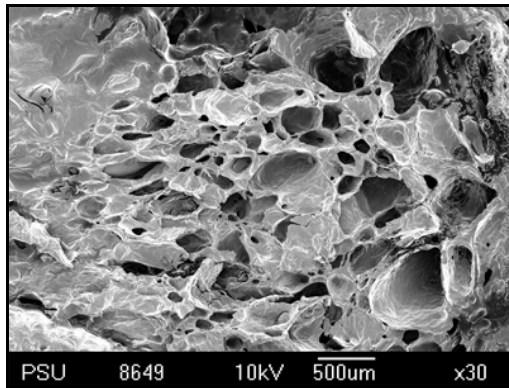


ภาพประกอบ 3.24 (ต่อ) การกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างกล้วยหอมทอดสุญญากาศที่ 110°C ที่เวลาต่างๆ

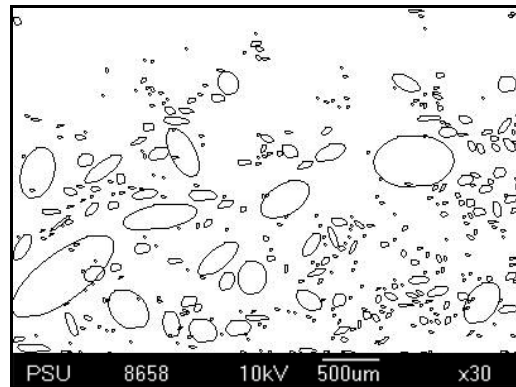
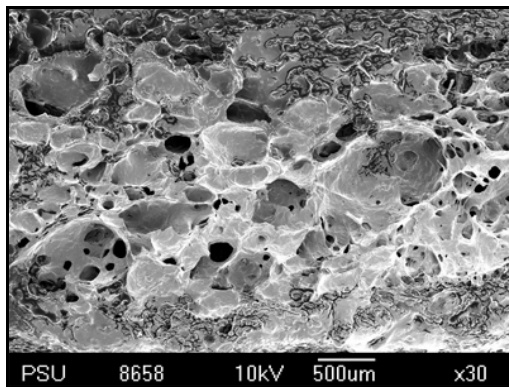
ตัวอย่างทอดที่ 100°C



ตัวอย่างทอดที่ 110°C



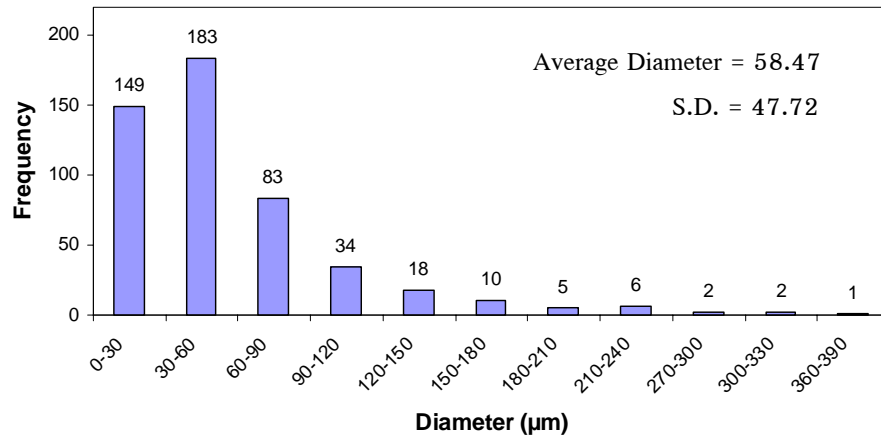
ตัวอย่างทอดที่ 120°C



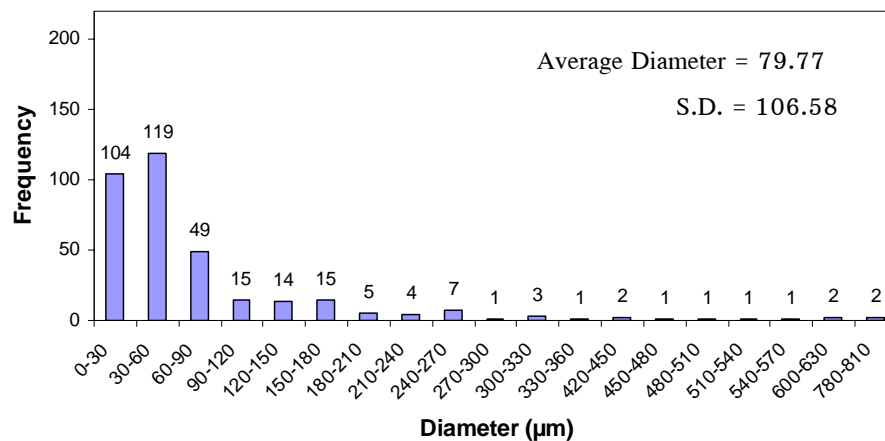
ภาพประกอบ 3.25 ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างกล้วยทอดสุญญากาศที่ 100°C 110°C และ 120°C

ขนาดรูพรุนของชั้นตัวอย่างกล้วยทอดสุญญากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะเห็นว่าตัวอย่างที่  $110^{\circ}\text{C}$  มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากกว่าตัวอย่างที่  $100^{\circ}\text{C}$  และ  $120^{\circ}\text{C}$  และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่าอีกด้วย ดังภาพประกอบ 3.25

ตัวอย่างทอดที่  $100^{\circ}\text{C}$

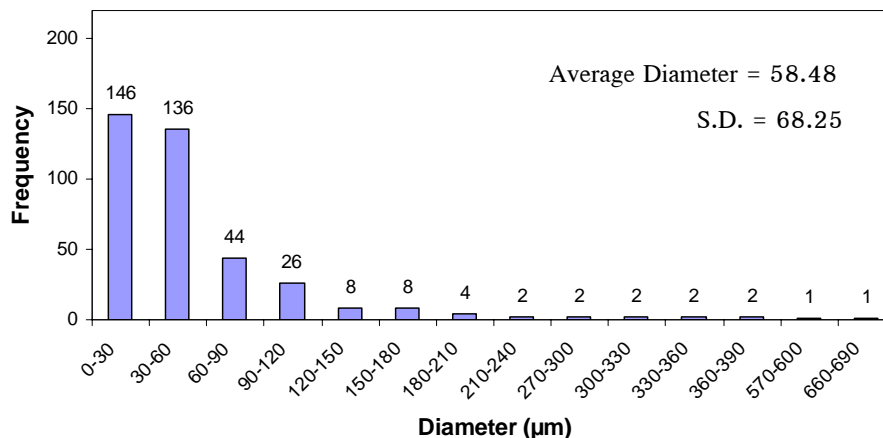


ตัวอย่างทอดที่  $110^{\circ}\text{C}$

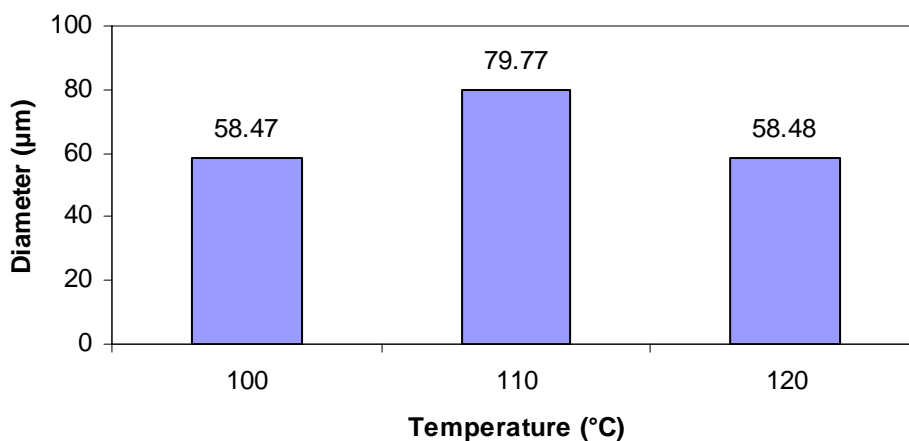


ภาพประกอบ 3.26 การกระจายตัวของรูพรุนตัวอย่างกล้วยหอมทอดสุญญากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตัวอย่างทอดที่ 120°C



ภาพประกอบ 3.26 (ต่อ) การกระจายตัวของรูพรุนตัวอย่างกล้วยหอมทอดสุญญากาศที่อุณหภูมิต่างๆ

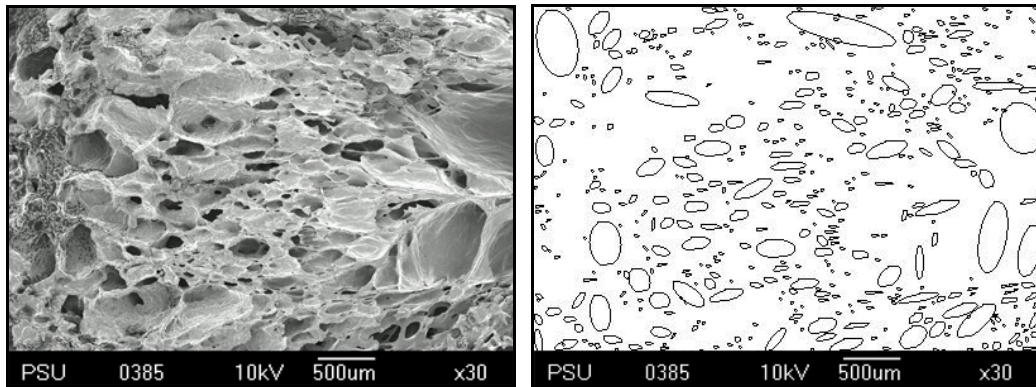


ภาพประกอบ 3.27 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชั้นตัวอย่างกล้วยหอมทอดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

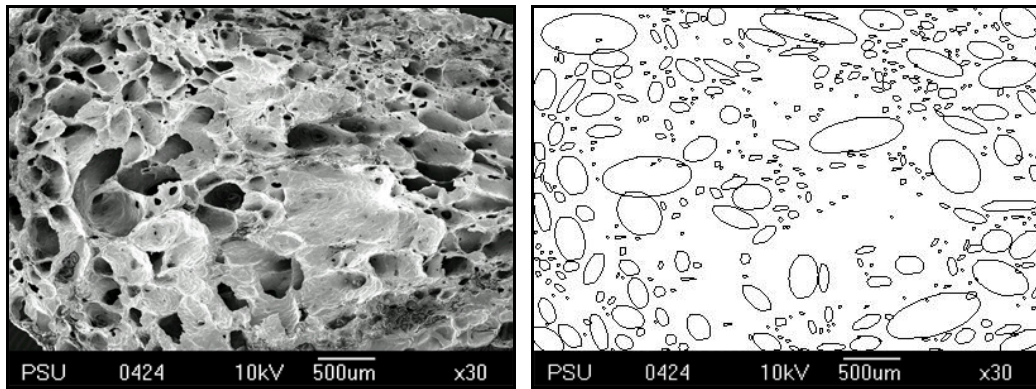
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนภายในชั้นตัวอย่างกล้วยหอมทอดสุญญากาศที่อุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C ดังแสดงในภาพประกอบ 3.26 และ 3.27 จะเห็นว่า จำนวนรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 60 µm ในตัวอย่างที่ 100°C และ 120°C จะมีมากกว่า ในตัวอย่างที่ 110°C และในตัวอย่างที่ 110°C มีจำนวนรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 400 µm เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ 120°C ส่วนตัวอย่างที่ 100°C ไม่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 400 µm สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่างที่ 110°C มีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างที่ 120°C และ 100°C โดยมีขนาด 79.77 58.48 และ 58.47 µm ตามลำดับ



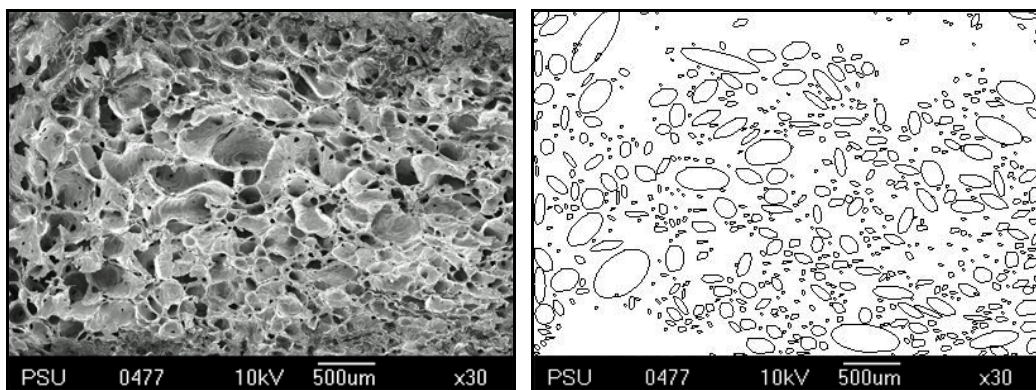
ตัวอย่างบ่ม 1 วัน



ตัวอย่างบ่ม 2 วัน

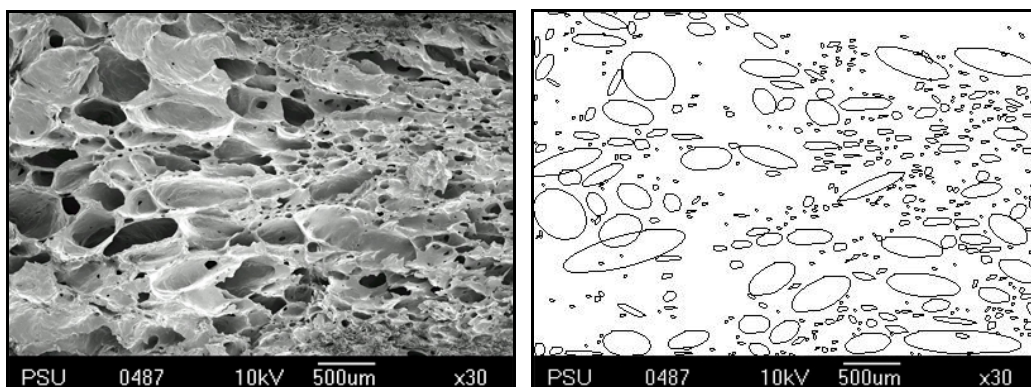


ตัวอย่างบ่ม 3 วัน



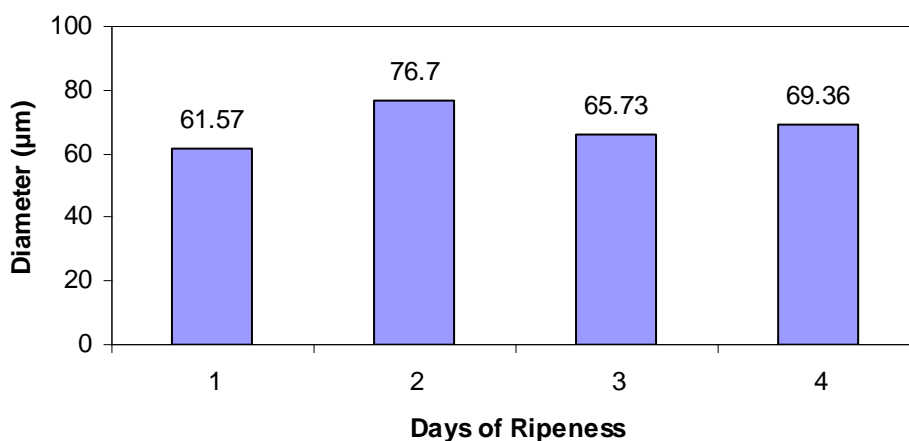
ภาพประกอบ 3.28 ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างกล้วยหอมที่บ่มที่ระยะเวลาต่าง ๆ ทอดสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$

ตัวอย่างบ่ม 4 วัน



ภาพประกอบ 3.28 (ต่อ) ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างกล้วยหอมที่บ่มที่เวลาต่างๆ ทอดสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$

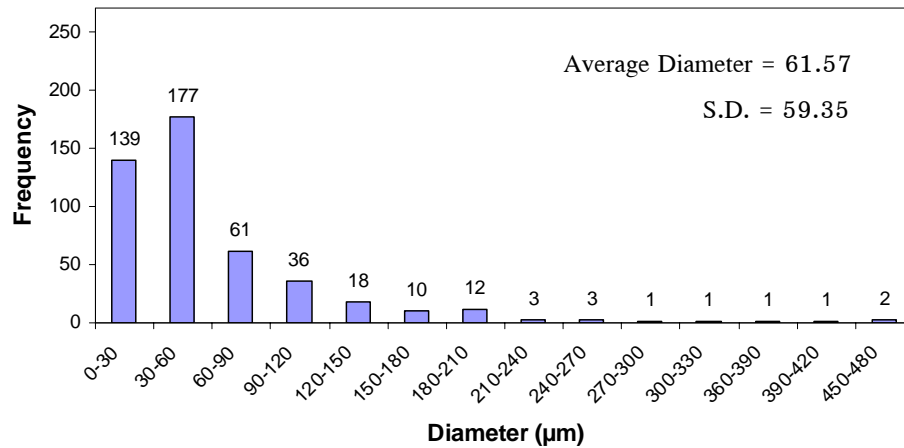
จากภาพประกอบ 3.28 เป็นการแสดงขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนภายในตัวอย่างกล้วยหอมที่บ่มที่เวลาต่างๆ (1-4 วัน) ทอดที่สุญญากาศ จะเห็นว่ารูพรุนในตัวอย่างบ่ม 2 วัน มีขนาดใหญ่กว่าและกระจายตัวดีกว่าตัวอย่างบ่มวันอื่นๆ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่างบ่ม 2 วัน ก็มีขนาดใหญ่ที่สุดคือ  $76.7\ \mu\text{m}$  ส่วนตัวอย่างบ่ม 1 3 และ 4 วัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ  $61.57\ 65.73$  และ  $69.36\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 3.29



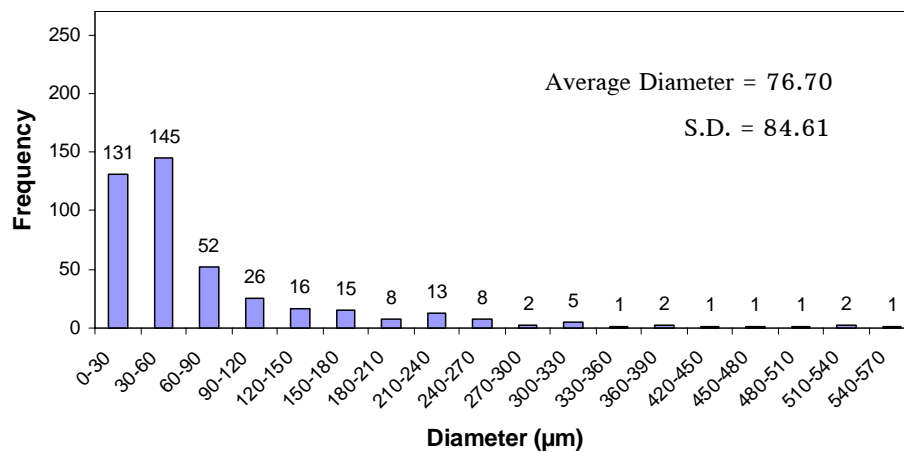
ภาพประกอบ 3.29 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชั้นตัวอย่างกล้วยหอมที่บ่มที่ระยะเวลาต่างๆ ทอดสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$

สำหรับการกระจายตัวของรูพรุนภายในชั้นตัวอย่างก๊วยฮอมที่บ่มที่เวลาต่าง ๆ ทอด  
 สูญญากาศ ที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในภาพประกอบ 3.30 ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างบ่ม 2 วัน มี  
 จำนวนรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า  $500\ \mu\text{m}$  อยู่มากที่สุด

ตัวอย่างบ่ม 1 วัน

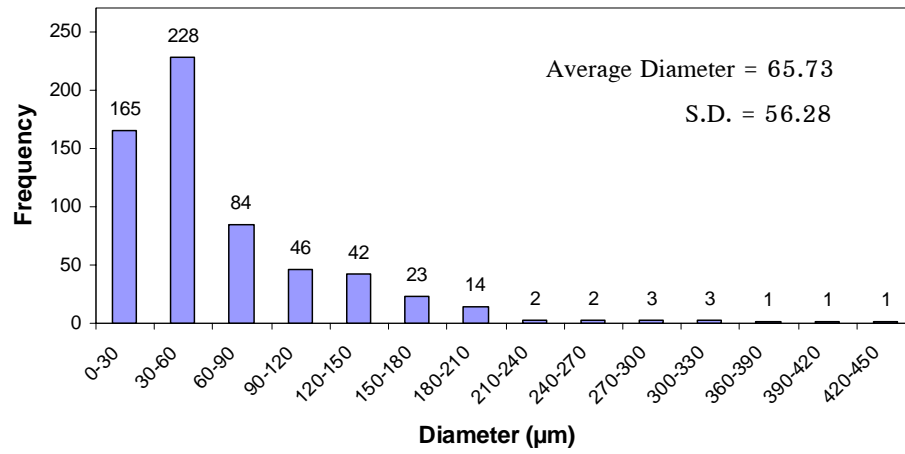


ตัวอย่างบ่ม 2 วัน

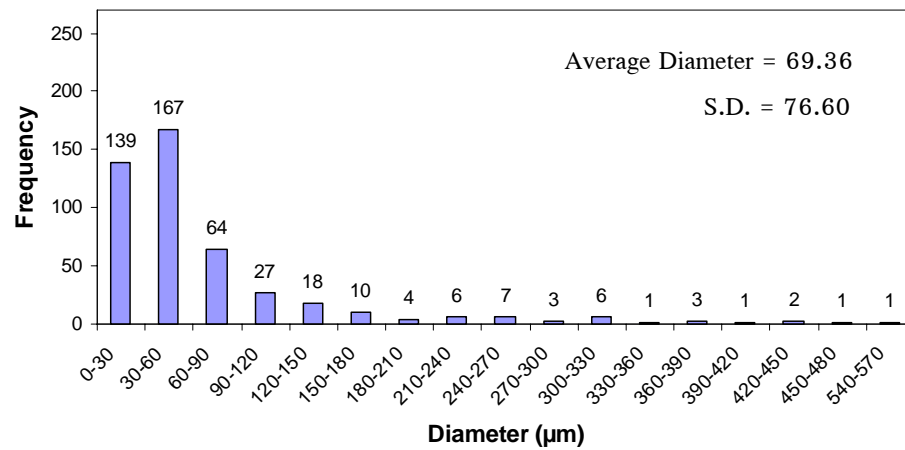


ภาพประกอบ 3.30 การกระจายตัวของรูพรุนตัวอย่างก๊วยฮอมที่บ่มที่ระยะเวลาต่าง ๆ ทอด  
 สูญญากาศ ที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$

## ตัวอย่างบ่ม 3 วัน



## ตัวอย่างบ่ม 4 วัน



ภาพประกอบ 3.30 (ต่อ) การกระจายตัวของรูพรุนตัวอย่างกล้วยหอมที่บ่มที่ระยะเวลาต่าง ๆ  
 ทอดสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 110°C

ตาราง 3.6 จำนวนรูพรุนในภาพถ่าย SEM และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนของตัวอย่างต่างๆ

Samples	Count	Average			
		Diameter ( $\mu\text{m}$ )	S.D. ( $\mu\text{m}$ )	Min( $\mu\text{m}$ )	Max( $\mu\text{m}$ )
กล้วยสด	348	33.84	17.06	19.54	148.46
110°C 5 นาที	405	32.14	14.36	19.54	129.09
110°C 10 นาที	275	37.84	20.08	19.54	181.01
110°C 15 นาที	53	84.92	70.16	19.90	312.84
110°C 20 นาที	57	73.53	61.69	19.90	260.78
110°C 25 นาที	72	62.64	61.33	19.54	307.27
100°C	493	58.47	47.72	21.72	378.21
110°C	347	79.77	106.58	21.72	809.91
120°C	384	58.48	68.25	21.72	666.26
บ่ม 1 วัน	465	61.57	59.35	21.72	464.90
บ่ม 2 วัน	430	76.70	84.61	21.72	549.22
บ่ม 3 วัน	615	65.73	56.28	21.72	431.23
บ่ม 4 วัน	460	69.36	76.60	21.72	549.94

สำหรับตาราง 3.6 เป็นตารางสรุปจำนวนรูพรุนในภาพถ่าย SEM และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนของตัวอย่างต่างๆ รวมไปถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ขนาดรูพรุนที่เล็กที่สุด (min) และขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด (max)