

การฟังด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน

นางสาวชลดา ไร่ขาม วศ.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ (ผศ. ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล)
.....	กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (รศ. ดร.สมเกียรติ ปรัชญาวารากร)
.....	กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (ศ. ดร.สมชาติ โสภณธนฤทธิ์)
.....	กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (รศ. ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล)
.....	กรรมการ (รศ. ดร.ศักดิ์มน เทพหัสดิน ณ อยุธยา)
.....	กรรมการ (ผศ. ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพффฟงกล้วยด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน
หน่วยกิต	42
ผู้เขียน	นางสาวชลดา ไร่ขาม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ. ดร.สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ รศ. ดร.สมเกียรติ ปรัชญารากร รศ. ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

กล้วยกรอบที่มีขายตามท้องตลาด ส่วนใหญ่แปรรูปมาจากการทอด อย่างไรก็ตามน้ำมันคงเหลือในปริมาณสูงหลังการทอด ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วยอบกรอบไร้น้ำมัน จึงเหมาะที่จะเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ ซึ่งการแปรรูปผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการพффฟง ปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการพффฟง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นเริ่มต้น และเวลาพффฟง เป็นต้น ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความชื้นเริ่มต้นของกล้วยก่อนพффฟง อุณหภูมิพффฟง และเวลาพффฟง นอกจากวัตถุประสงค์ดังกล่าวแล้ว ระดับความหนาของกล้วยแผ่นการพффฟงที่พффฟง เช่น การใช้กรดซิตริก สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ การลดการเน้่ง ความสุกของกล้วยระดับ 1 (3-5 °Brix) และ 3 (17-18 °Brix) ที่มีผลต่อคุณภาพของกล้วยแผ่น ได้แก่ สมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านการหดตัว สมบัติด้านสี และระดับดัชนีน้ำตาล (Glycemic index: GI) โดยใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการพффฟงด้วยฟลูอิดเซชัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C ความเร็วลม 2 m/s เพื่อลดความชื้นของกล้วยให้เหลือ 15 25 และ 35% d.b. จากนั้นทำการพффฟงกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดเซชันที่ 140 160 และ 180°C เป็นเวลา 1 1.5 และ 2 นาทีและความเร็วลม 3.5 m/s และในขั้นตอนสุดท้ายนำกล้วยไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะเดียวกันกับขั้นตอนแรกให้เหลือความชื้นประมาณ 4% d.b. จากผลการทดลองในส่วนแรกนี้ไม่ได้นำกล้วยไปผ่านการลด พบว่า ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่นก่อนการพффฟงสูงหรือต่ำเกินไป ส่งผลต่อการหดตัวได้มากหรือน้อย

และการพффิงด้วยอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทำให้กล้วยแผ่นหดตัวน้อยลง ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยมีความแข็งน้อย และกรอบมาก แต่สีของกล้วยที่ได้เริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลมากขึ้น จากการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมโดยรวมด้านเนื้อสัมผัส และสีด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ความชื้นเริ่มต้นก่อนการพффิงประมาณ 26% d.b. ด้วยอุณหภูมิ 163°C เป็นเวลา 1 นาที ซึ่งสีของกล้วยที่ได้เป็นสีครีมอมขาวใกล้เคียงกับกล้วยที่อบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ดังนั้นเพื่อเปลี่ยนลักษณะปรากฏจากสีครีมอมขาวเป็นสีเหลืองทอง ซึ่งสีที่ได้ใกล้เคียงกับสีของกล้วยที่ได้จากการทอดสุญญากาศ สามารถทำได้ด้วยการนำกล้วยไปลวก อย่างไรก็ตาม การลวกกลับส่งผลต่อการหดตัวสูงกว่ากรณีไม่ลวก ทำให้เนื้อสัมผัสที่ได้มีความแข็งมาก และกรอบน้อย นอกจากปัจจัยของการลวกแล้ว ระดับความหนาของกล้วยแผ่นที่ 3.5 มม. ในกรณีการลวก ยังส่งผลต่อระดับการหดตัวมากกว่าที่ความหนา 2.5 มม. ขณะที่กรณีไม่ผ่านการลวกที่ความหนา 3.5 มม. มีการหดตัวน้อยกว่าที่ความหนา 2.5 มม. ส่วนการพффิตรีทเมนต์ด้วยกรดซิตริก และสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ทั้งในกรณีกล้วยที่ผ่านการลวกและไม่ลวก ส่งผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส และการหดตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่การพффิตรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ในกรณีกล้วยที่ไม่ผ่านการลวก ส่งผลต่อสีของกล้วยที่มีความสว่างมากกว่าพффิตรีทเมนต์ด้วยกรดซิตริก อย่างไรก็ตาม เมื่อพффิงกล้วยแผ่นด้วยอุณหภูมิสูง 180°C ทั้งกรณีของการลวกและไม่ลวก ส่งผลให้กล้วยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลมากขึ้นที่บริเวณแกนกลางของผิวกล้วย

เมื่อเปรียบเทียบระดับการสุกที่ 1 และ 3 ภายใต้เงื่อนไขการนิ่งเป็นเวลา 30 วินาทีจนถึง 2 นาที พบว่ากล้วยระยะความสุกที่ 1 ในกรณีที่ผ่านการนิ่งมีระดับการหดตัวมากกว่าเงื่อนไขการนิ่งที่เวลาต่างๆ แต่เนื้อสัมผัสที่ได้มีความแข็งน้อยกว่ากล้วยที่ผ่านการนิ่งทุกเงื่อนไข ขณะที่กล้วยที่ผ่านการนิ่งเป็นเวลานานขึ้น ส่งผลต่อการหดตัวน้อยลง จึงทำให้เนื้อสัมผัสมีความกรอบมากขึ้น ส่วนลักษณะสีของกล้วยที่ยังไม่ผ่านการนิ่งมีลักษณะเป็นสีขาว และเมื่อเพิ่มเวลานิ่งเป็น 1-2 นาที สีของกล้วยที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองอ่อน ส่วนผลการทดสอบค่าไกลซิมิก พบว่า กล้วยระยะที่ 1 ที่ไม่ผ่านการนิ่งมีค่าไกลซิมิกต่ำกว่าเงื่อนไขการนิ่งที่เวลาต่างๆ และเมื่อเพิ่มเวลาในการนิ่งนานขึ้น ค่าไกลซิมิกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่กล้วยระยะ 3 ทั้งกรณีผ่านการนิ่งและไม่ผ่านการนิ่งมีค่าไกลซิมิกสูงกว่ากล้วยระยะ 1

คำสำคัญ: กล้วย/ฟลูอิดเซชัน/เนื้อสัมผัส/การหดตัว/การพффิตรีทเมนต์

Dissertation Title	Puffing of Bananas Using Fluidization Technique
Dissertation Credits	42
Candidate	Miss Chonlada Raikham
Dissertation Advisors	Prof. Dr. Somchart Soponronnarit Assoc. Prof. Dr. Somkiat Prachayawarakorn Assoc. Prof. Dr. Adisak Nathakaranakule
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
Academic year	2013

Abstract

Crispy banana chips are a common product that can be produced by frying. However, fried banana remain high oil content which may affect the health of consumers. The oil-free crispy banana snack can be produced alternatively by a puffing technique. By this technique, the intermediate moisture content, puffing temperature and puffing time are important factors that affect textural and physical properties of crispy foods. This research is to study the effects of intermediate moisture content, puffing temperature and puffing time. Moreover, the effects of thickness of sample, blanching, steaming time, various pretreatments i.e., citric acid and sodium metabisulfite, ripening stage at 1: (3-5°Brix) and 3: (17-18°Brix) on qualities of banana slices such as the shrinkage, textural properties, color and Glycemic index using puffing technique were investigated. The puffing process was consisted of three main steps. The banana slices were first dried at a temperature of 90°C using the superficial velocity of 2 m/s in hot air dryer until the sample moisture content was decreased to the required values 15, 25 and 35 % dry basis and then puffed in fluidized bed dryer at 140, 160 and 180°C for 1, 1.5 and 2 min and the superficial velocity of 3.5 m/s. Finally, it was dried again at the same temperature as the first-stage drying until the sample moisture content was reduced to 4% dry basis. From experimental results in first case without blanching banana, the high or low of intermediate moisture content of sample lead to higher or lower degree of shrinkage. In addition, high puffing temperature and long puffing time resulted in decreasing in degree of shrinkage. As a result, the hardness of sample decreased and the crispness increased. However,

the bananas puffed at high puffing temperature were relatively brown. The suitable condition for each quality, i.e. texture and color may be obtained under different operating conditions. The response surface methodology (RSM) is used for optimizing complex process. The result showed that the intermediate moisture content of 26% d.b., puffing temperature of 163°C and puffing time of 1 min should be established for puffing the banana by fluidized bed technique. The color of unblanched banana had creamy white, which was similar to the color of freeze dried product.

To change the appearance of creamy white to golden yellow for banana which was similar to the color of vacuum fried product can be done by blanching. However, blanching strongly affected the high degree of shrinkage which related to textural qualities, increase of hardness and decrease of crispness. In addition the effect of blanching, the 3.5 mm thickness in the case of blanching had higher the shrinkage than of 2.5 mm thickness while the unblanched sample with 3.5 mm thickness had lower the shrinkage than of 2.5 mm thickness. For the effects of pretreatment between citric acid and sodium metabisulfite, it was found that the various pretreatments had no significant effects on qualities in terms of the shrinkage and textural properties for both blanching and unblanching case. Pretreatment with sodium metabisulfite in the case of unblanching had more lightness than of citric acid in the final product. However, when the banana was puffed at 180°C, the samples were relatively brown in both blanched and unblanched samples.

When compared between ripening stage 1 and 3 of banana undergoing the steaming time conditions in a range of 30 s to 2 min, the ripening stage 1 without steaming had higher shrinkage than of steamed sample in all case but it had the lower hardness than of steamed sample in all case. However, the steamed sample in a long time decreased in shrinkage resulting in increasing crisp. Color of sample without steaming was whiteness in final product. When the samples in ripening stage 1 and 3 were steamed in a range of 1-2 min, it can improve the appearance and color which was yellowness in final product. The glycemic index (GI) value of without steaming in ripening stage 1 was lower than of all of steaming time. When the samples were steamed in a range of 1-2 min, the GI value slightly increased. The GI value of ripening stage 3 in both steaming and without steaming was higher than of the ripening stage 3.

Keywords: Banana/Fluidization/Texture properties/Shrinkage/Pretreatments

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ. ดร.สมเกียรติ ปรัชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และการแก้ไขปัญหาในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งคอยชี้แนะแนวทางและร่วมแก้ไข ปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบพระคุณ ศ. ดร.สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะ และคอยกระตุ้นผลักดัน ทำให้การทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และสำเร็จด้วยดี และขอขอบพระคุณ รศ. ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้ความช่วยเหลือแก้ไขงานด้านภาษาอังกฤษและให้คำแนะนำต่างๆ และขอขอบพระคุณ รศ. ดร.ศักดิ์มน เทพหัสดิน ณ อยุธยา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และแนวทางการทำการทดลอง ระหว่างการประชุมกลุ่มวิจัย และขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ผศ. ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำชี้แนะ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบคุณ คุณสิทธิชัย อินจันทร์ เจ้าหน้าที่ห้องวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้ง ที่อำนวยความสะดวกสำหรับการใช้เครื่องมือต่างๆ ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาในห้องอบแห้งทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาทั้งทางด้านการเรียน ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การอุปการะ สนับสนุนในทุกๆ ด้าน และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๑๑
สารบัญ	๗
รายการตาราง	๑๑
รายการรูปประกอบ	๑๓
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	๑๔
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกล้วย	4
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกล้วยหอม	5
2.1.2 การสุกของกล้วย	5
2.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมขบเคี้ยว	8
2.3 วิธีการแปรรูปขนมขบเคี้ยว	10
2.4 การพuffing โดยใช้อุณหภูมิสูงในระยะเวลาสั้นด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน	12
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการพuffing โดยใช้อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้น	14
2.4.1.1 การพรีทรีทเมนต์ด้วยการลวก	14
2.4.1.2 อุณหภูมิและเวลาในการพuffing	17
2.5 ผลของการพuffing ที่มีต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์	20
2.5.1 ผลของการพuffing ด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นด้วยลมร้อน	
ต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์	20

หน้า

2.5.2 ผลของการพффฟงด้วยไมโครเวฟต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์	23
2.5.3 ผลของการแปรรูปด้วยการทอดสุญญากาศต่อเนื้อสัมผัส	24
2.6 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านอัสฐานวิทยาหลังการพффฟง	25
2.6.1 ผลของการพффฟงด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้น	
ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านอัสฐานวิทยา	26
2.6.2 ผลของการพффฟงด้วยไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านอัสฐานวิทยา	28
2.6.3 ผลของการแปรรูปด้วยการทอดสุญญากาศต่อการเปลี่ยนแปลง	
สมบัติด้านอัสฐานวิทยา	29
2.7 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านสี	30
2.7.1 ปฏิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์	31
2.7.2 ปฏิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์	31
2.8 การควบคุมการเกิดปฏิริยาสีน้ำตาล	32
2.8.1 สารละลายกรด	32
2.8.2 สารประกอบซัลไฟด์	32
2.8.3 ผลของการพффฟงด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นต่อการเปลี่ยนแปลงสี	34
2.8.4 ผลของการพффฟงด้วยไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงสี	36
2.8.5 ผลของการแปรรูปด้วยการทอดต่อการเปลี่ยนแปลงสี	37
2.9 ค่าดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index: GI)	39
2.10 การออกแบบการทดลอง	43
2.10.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Experiment of Factorial Design)	44
2.10.2 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD)	45
2.11 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธี Response surface methodology	46
2.12 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ	48
2.13 การหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimum condition)	49
2.14 สรุป	51
3. การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการพффฟงกล้วยแผ่นอบกรอบ	
ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง	52
3.1 บทนำ	52
3.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	53
3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อน	54

3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง	54
3.2.3 กระบวนการพฟฟิง	54
3.2.4 การหาความชื้นของกล้วย	55
3.2.5 การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว	55
3.2.6 การทดสอบคุณภาพด้านสี	56
3.2.7 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	57
3.2.8 การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์สถิติ	57
3.2.9 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม	59
3.3 ผลการทดลองและวิจารณ์	61
3.3.1 การวิเคราะห์สถิติ	61
3.3.2 การหดตัว	63
3.3.3 ความแข็ง	67
3.3.4 ความชื้นเริ่มต้นและจำนวนยอด	69
3.3.5 คุณภาพด้านสี	73
3.3.6 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกล้วยแผ่นอบกรอบ	76
4. ศึกษาการพฟฟิตที่เม้นต์ร่วมกับการพฟฟิงที่มีต่อคุณภาพของกล้วยแผ่น	78
4.1 บทนำ	78
4.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	79
4.2.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อน	79
4.2.2 การเตรียมตัวอย่าง	80
4.2.3 กระบวนการพฟฟิง	80
4.2.4 การหาน้ำหนักแห้ง	80
4.2.5 การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว	80
4.2.6 การทดสอบคุณภาพด้านสี	81
4.2.7 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	81
4.2.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ	81
4.3 ผลการทดลองและวิจารณ์	81
4.3.1 อิทธิพลของกระบวนการพฟฟิงที่มีต่อการลดความชื้นของกล้วยแผ่น	81
4.3.2 อิทธิพลของการลวก ความหนา และอุณหภูมิพฟฟิงที่มีต่อระดับการหดตัว	84

4.3.3	อิทธิพลของการลวก ความหนา และอุณหภูมิพัฟฟิงที่มีต่อเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง ความชื้นเริ่มต้นและจำนวนยอด	86
4.3.4	โครงสร้างระดับจุลภาคภายใน และการกระจายตัวของรูพรุน	91
4.3.5	คุณภาพทางด้านสี	94
5.	ศึกษาระดับความสุกของกล้วยและการนึ่งร่วมกับกระบวนการพัฟฟิง ที่มีต่อคุณภาพของกล้วยแผ่น	97
5.1	บทนำ	97
5.2	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	99
5.2.1	เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อน	99
5.2.2	การเตรียมตัวอย่าง	99
5.2.3	กระบวนการพัฟฟิง	99
5.2.4	การหาน้ำหนักแห้ง	99
5.2.5	การทดสอบคุณภาพด้านการหดรัด	100
5.2.6	การทดสอบคุณภาพด้านสี	100
5.2.7	การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	100
5.2.8	การทดสอบการย่อยและการดูดซึมแป้งกล้วย	100
5.2.9	การทดสอบการปริมาณไขมัน	101
5.2.10	การทดสอบการปริมาณแป้ง	102
5.2.11	การทดสอบการน้ำตาลกลูโคส ซูโครสและฟรุกโตส	103
5.2.12	การทดสอบปริมาณเถ้า	103
5.2.13	การทดสอบปริมาณโปรตีน	103
5.2.14	การทดสอบปริมาณไขมัน	104
5.2.15	การทดสอบ DSC	105
5.2.16	การวิเคราะห์โครงสร้าง XRD	105
5.2.17	การวิเคราะห์ทางสถิติ	106
5.3	ผลการทดลองและวิจารณ์	106
5.3.1	องค์ประกอบทางเคมีของกล้วยหอมทอง	106
5.3.2	สมบัติทางความร้อน	107
5.3.3	อิทธิพลของกระบวนการพัฟฟิงที่มีต่อการลดความชื้นของกล้วยแผ่น	110

หน้า

5.3.4	อิทธิพลของการนั่งกล้วยที่ระยะเวลาต่างๆและระดับการสุขของกล้วย ที่มีต่อระดับการหดตัว	112
5.3.5	อิทธิพลของการนั่งกล้วยที่ระยะเวลาต่างๆและระดับความสุขของกล้วย ที่มีต่อเนื้อสัมผัส	113
5.3.6	โครงสร้างระดับจุลภาคและการกระจายตัวของรูพรุน	115
5.3.7	อิทธิพลของการนั่งกล้วยที่ระยะเวลาต่างๆและระดับความสุขของกล้วย ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสี	118
5.3.8	อิทธิพลของการนั่งกล้วยด้วยเวลาต่างๆและระดับความสุขของกล้วย ที่มีต่อระดับ Glycemic index	120
6.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	122
6.1	สรุปผลการทดลอง	122
6.2	ข้อเสนอแนะ	125
	เอกสารอ้างอิง	126
	ภาคผนวก	137
	ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติ	138
	ประวัติผู้วิจัย	152

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกล้วยที่ระยะการสุกต่างๆแสดงการเปลี่ยนแปลง ส่วนประกอบต่างๆของกล้วย (หน่วย: ร้อยละ)	7
2.2 รูปถ่ายมันฝรั่งทอดกรอบที่ความแตกต่างของสายพันธุ์ภายใต้การทอดด้วยสุญญากาศ และการทอดที่ความดันบรรยากาศ	38
2.3 ค่า GI ของอาหารแต่ละประเภท	41
2.4 ปริมาณ Moisture, Drying time และ Resistant starch ที่เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ	42
3.1 ตัวแปรอิสระสำหรับการศึกษากระบวนการพuffing โดยกำหนดเป็น 3 ปัจจัย 3 ระดับ	58
3.2 ความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดของข้าวเหนียวที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ	58
3.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับเงื่อนไขการพuffing ในเทอมของ linear, quadratic และ interaction ของแต่ละผลตอบสนอง	62
3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยโพลิโนเมียล โดยแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม (กรณีเลือกใช้รหัสในการวิเคราะห์)	63
3.5 การกำหนดค่าความสำคัญของแต่ละผลตอบสนอง	77
3.6 คุณภาพของกล้วยแผ่นอบกรอบที่ได้จากการทดลองที่เงื่อนไขที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับค่าที่มาจากการทำนายและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด	77
4.1 แสดงเวลาการอบแห้งตลอดกระบวนการพuffing	83
4.2 ผลของความหนาของตัวอย่าง อุณหภูมิพuffing และความแตกต่างของการพuffing ที่เริ่มต้น ด้วยกรดและสารละลายที่ระดับความหนา 3.5 มิลลิเมตร ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยแผ่น	96
5.1 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีภายในผลกล้วยที่ระดับความสุก 1 ซึ่งมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้อยู่ในช่วง 3-5 °Brix และกล้วยระดับความสุกที่ 3 ซึ่งมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้อยู่ในช่วง 17-18 °Brix (หน่วย: g/100g)	106
5.2 สมบัติทางความร้อนของแป้งกล้วยที่ระดับความสุกที่ 1 และ 3 และผ่านการนึ่งที่เวลาต่างๆ	108

ตาราง (ต่อ)	หน้า
5.3 กล้วยระดับความสุขที่ 1 และ 3 ที่ผ่านการนั่งด้วยเวลาต่างๆร่วมกับการพับฟิง ที่มีผลต่อระดับโครงสร้างความเป็นผลึก	109
5.4 แสดงเวลาการอบแห้งตลอดกระบวนการพับฟิง	112
5.5 กล้วยผ่านการนั่งที่เวลาต่างๆร่วมกับการพับฟิงที่มีผลต่อระดับการหดตัวของกล้วยแผ่น	113
5.6 กล้วยผ่านการนั่งที่เวลาต่างๆร่วมกับการพับฟิงที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่น	114
5.7 กล้วยผ่านการนั่งที่เวลาต่างๆและระดับความสุขร่วมกับการพับฟิง ที่มีผลต่อสีของกล้วยแผ่น	119
5.8 กล้วยผ่านการนั่งที่เวลาต่างๆร่วมกับการพับฟิงที่มีผลต่อระดับ GI	121

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ระยะการสุกของผลกล้วย	6
2.2 กราฟการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงกดกับระยะทาง	9
2.3 การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชัน	13
2.4 กลไกแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ระหว่างการฟัฟฟิง	14
2.5 ระดับการเกิด gelatinization ของมันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ ที่ลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C และนำมาอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 40 นาที โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวหลังจากฟัฟฟิง ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 40 วินาที	15
2.6 ผลของการลวกและเวลาในการอบแห้งที่แตกต่างกันที่มีผลต่อแรงต้าน บริเวณผิวของมันฝรั่งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 90°C	16
2.7 ผลของการลวกและเวลาในการอบแห้งที่มีผลต่อปริมาตรของมันฝรั่ง ที่ผ่านการลวกและนำตัวอย่างมาอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 60-90 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปฟัฟฟิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 50 วินาที	16
2.8 อิทธิพลของ Pre – drying time ที่มีผลต่อการขยายตัวของมันฝรั่ง ระหว่างการฟัฟฟิงที่อุณหภูมิ 130°C	17
2.9 อิทธิพลของเวลาฟัฟฟิง (Pt) อุณหภูมิฟัฟฟิง (PT) ที่มีต่อ potato snack	18
2.10 อิทธิพลขนาดของมันฝรั่งที่มีผลต่อการขยายตัว ระหว่างการฟัฟฟิงที่อุณหภูมิ 130°C	19
2.11 อิทธิพลขนาดความหนาของตัวอย่างที่มีต่อการขยายตัว	19
2.12 อิทธิพลของเวลาฟัฟฟิง (Pt), อุณหภูมิฟัฟฟิง (PT) ที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของ potato snack ด้านความแข็งโดยวิเคราะห์ด้วย RSM	21
2.13 อิทธิพลของ เวลาฟัฟฟิง (Pt), อุณหภูมิฟัฟฟิง (PT) ที่มีผลต่อ potato snack ด้านการทดสอบประสาทสัมผัสโดยวิเคราะห์ด้วย RSM	22
2.14 (a) อิทธิพลของเวลาลวกน้ำร้อน (Blanching) เวลาการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 90°C และ (b) อิทธิพลของเวลาการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และเวลาฟัฟฟิงต่อความแข็งของมันฝรั่ง	22

รูป (ต่อ)

หน้า

2.15	ความเป็นรูปพรุนและความแข็งแรงของ Raspberry snack ระหว่างกระบวนการ การพuffing ด้วยสุญญากาศภายใต้เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 2.68 kW และระดับสุญญากาศ 70 kPa และความชื้นเริ่มต้น 20 % w.b.	24
2.16	ค่าความแข็งแรงของกล้วยแผ่นที่ผ่านการทอดด้วยสุญญากาศที่อุณหภูมิ 110 °C ที่ความดัน 8 kPa และทอดด้วยเวลาต่างๆ	25
2.17	ภาพจาก SEM ของ potato snack ก่อนการพuffing	26
2.18	ภาพจาก SEM ของ potato snack หลังการพuffing เป็นเวลา 20 วินาทีที่อุณหภูมิ 230 °C	27
2.19	ภาพจาก SEM ของ potato snack หลังการพuffing เป็นเวลา 30 วินาทีที่อุณหภูมิ 230 °C	27
2.20	ภาพจาก SEM ของมันฝรั่ง	29
2.21	ภาพจาก SEM ของกล้วยแผ่นที่ผ่านการทอดที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 110 °C ที่ความดัน 8 kPa	29
2.22	แผนภาพสี่ระบบ Hunter	30
2.23	(a) ปัจจัยของเวลาในการลวกและเวลาในการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (b) ปัจจัยของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C และพuffing ด้วยอุณหภูมิ 200 °C ที่มีผลต่อค่า L*	35
2.24	(a) ปัจจัยของเวลาในการลวกและเวลาในการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (b) ปัจจัยของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C และพuffing ด้วยอุณหภูมิ 200 °C ที่มีผลต่อค่า a*	35
2.25	(a) ปัจจัยของเวลาในการลวกและเวลาในการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (b) ปัจจัยของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C และพuffing ด้วยอุณหภูมิ 200 °C ที่มีผลต่อค่า b*	35
2.26	อิทธิพลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่เงื่อนไขต่างๆที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสี ในทอมของ L*, a* และ b*	37
2.27	แสดงลักษณะการออกแบบการทดลอง Central Composite Design (CCD)	46
2.28	พื้นผิวตอบสนอง	47
2.29	เส้นระดับของพื้นผิวตอบสนอง	48
3.1	เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อน	54
3.2	(a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพuffing อุณหภูมิ และเวลาพuffing ที่มีต่อการหดตัวของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)	66

รูป (ต่อ)

หน้า

3.3	ภาคตัดขวางของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการพффฟฟที่ระดับความชื้นของกล้วยก่อนการพффฟฟต่างๆ ด้วยอุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 2 นาที	66
3.4	(a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพффฟฟ อุณหภูมิและเวลาพффฟฟ Muj, n ต่อความแข็งของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)	68
3.5	(a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพффฟฟ อุณหภูมิและเวลาพффฟฟ ที่มีต่อความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)	71
3.6	(a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพффฟฟ อุณหภูมิและเวลาพффฟฟ ที่มีต่อจำนวนยอดของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)	72
3.7	(a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพффฟฟ อุณหภูมิและเวลาพффฟฟ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L ของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)	74
3.8	(a-b) ผลของความชื้นของกล้วยก่อนการพффฟฟ อุณหภูมิและเวลาพффฟฟ ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Hue angle ของกล้วยแผ่น (รหัสอ้างอิงจากตารางที่ 1)	75
4.1	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาของกล้วยแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เหลือความชื้นประมาณ 25% d.b. ด้วยเงื่อนไขของการลวกและไม่ลวกที่ระดับความหนาที่แตกต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขการพффฟฟด้วยอุณหภูมิ 160°C	81
4.2	ผลของการลวก ความหนาและอุณหภูมิพффฟฟต่อการหดตัวของกล้วยแผ่น ภายใต้ความแตกต่างของการพรีทรีทเมนต์	85
4.3	ผลของการลวก ความหนาและอุณหภูมิพффฟฟต่อน้ำสัมผัสด้านความแข็งของกล้วยแผ่น ภายใต้ความแตกต่างของการพรีทรีทเมนต์	89
4.4	ผลของการลวก ความหนาและอุณหภูมิพффฟฟต่อความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่น ภายใต้ความแตกต่างของการพรีทรีทเมนต์	90
4.5	ผลของการลวก ความหนาและอุณหภูมิพффฟฟต่อจำนวนยอดของกล้วยแผ่น ภายใต้ความแตกต่างของการพรีทรีทเมนต์	90
4.6	ภาคตัดขวางของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการพффฟฟ ภายใต้เงื่อนไขของการลวกและไม่ลวกที่อุณหภูมิในการพффฟฟ 160 °C และระดับความหนาต่างๆ (B: blanching, UB: unblanching)	92
4.7	การกระจายตัวของรูพรุนในโครงสร้างของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการพффฟฟด้วยอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที	94

รูป (ต่อ)	หน้า
5.1 ลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งกล้วยของแป้งกล้วยดิบและกล้วยสุกที่เงื่อนไขต่างๆ	109
5.2 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาของกล้วยแผ่นที่ผ่านการอบแห้ง ด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เหลือความชื้นประมาณ 25% d.b. เงื่อนไขของการนึ่งด้วยเวลาต่างๆ ที่ระดับความหนา 2.5 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไขการพффฟงด้วยอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที	111
5.3 ภาคตัดขวางของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการพффฟง ภายใต้เงื่อนไขของการนึ่งที่เวลาต่างๆ ด้วยเงื่อนไขของอุณหภูมิในการพффฟง 160°C เป็นเวลา 2 นาที	116
5.4 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนภายในโครงสร้างของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยร้อน ร่วมกับการพффฟงภายใต้เงื่อนไขของกล้วยที่ระยะ 1 ซึ่งพффฟงด้วยอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที	118
5.5 กล้วยแผ่นที่ระดับความสุกที่ 1 ระดับความหนา 2.5 มม. หลังการอบแห้งด้วยลมร้อน ร่วมกับการพффฟงด้วยอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที	119
5.6 อัตราการย่อยของกล้วยดิบที่เงื่อนไขต่างๆ	121

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

A_a	=	บริเวณอ้วนฐาน, mm^2
A_c	=	พื้นที่บริเวณชั้นเปลือก, mm^2
C	=	ร้อยละของอัตราการย่อยแป้งกล้วยที่เวลา t , %
C_∞	=	ร้อยละของอัตราการย่อยแป้งกล้วยที่เวลา 180 min, %
D	=	ค่าความพึงพอใจรวม
DG	=	degree of gelatinization, %
d_k	=	ค่าเป้าหมายของผลตอบสนอง
d	=	มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), g
GI	=	Glycemic Index
ΔH	=	เอนทาลปีของแป้งกล้วยที่ผ่านการอบแห้ง (J/g (dry matter))
ΔH_c	=	เอนทาลปีของแป้งกล้วยอ้างอิง (J/g (dry matter))
I	=	ค่าความสำคัญระหว่างผลตอบ
k	=	ค่าคงที่ของอัตราการย่อย
M_d	=	ความชื้นวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_b	=	น้ำหนักของ Glass Beads ในกระบอกตวง, g
M_{s+b}	=	น้ำหนักของกระบอกตวงและน้ำหนักของ Glass Beads, g
M_v	=	น้ำหนักของกระบอกตวง, g
M_s	=	น้ำหนักของตัวอย่างกล้วยที่เงื่อนไขต่างๆ, g
n	=	จำนวนตัวแปรอิสระ
t	=	เวลาที่ใช้ในการย่อย, min
T_0	=	อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุ, $^{\circ}\text{C}$
T_p	=	อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุ, $^{\circ}\text{C}$
T_c	=	อุณหภูมิสุดท้ายของวัสดุ, $^{\circ}\text{C}$
V_b	=	ปริมาตรของกระบอกตวง, cm^3
V_o	=	ปริมาตรของกล้วยแผ่นสด, cm^3
V	=	ปริมาตรของกล้วยหลังจากการอบแห้ง, cm^3
w_i	=	ค่าน้ำหนักของเป้าหมายแต่ละผลตอบสนอง
w	=	น้ำหนักตัวอย่าง, g
x	=	ตัวแปรอิสระในการทดลอง
y	=	ผลตอบสนอง

$y_{\min}$	=	ผลตอบสนองที่ระดับต่ำสุด
$y_{\max}$	=	ผลตอบสนองที่ระดับสูงสุด
X_c	=	ระดับสภาพเป็นผลึก, %

สัญลักษณ์ภาษากรีก

α	=	ระดับนัยสำคัญทางสถิติ
β	=	สัมประสิทธิ์ถดถอย (regression coefficient)

สัญลักษณ์กำกับล่าง

c	=	อ้างอิง
min	=	ค่าต่ำสุด
max	=	ค่าสูงสุด
target	=	ค่าเป้าหมาย
t	=	เวลาใดๆ
d	=	วัสดุแห้ง
m	=	มวล
o	=	เริ่มต้น