ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246186

การออกแบบชั้นวางหนังสือด้วยเทคนิคฟูลิโดมะชัน

นางสาวพรรัตน์ โชคบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

b00251952

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246186

การอบแห้งข้าวเหนียวด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน

นางสาวเพชรรัตน์ ใจบุญ วท.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร. ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ศ. ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รศ. ดร. สมเกียรติ ปรัชญาวรากร)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รศ. ดร. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

..... กรรมการ
(ดร. วารุณี วารัญญานนท์)

..... กรรมการ
(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การอบแห้งข้าวเหนียวด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน
หน่วยกิต	42
ผู้เขียน	นางสาวเพชรรัตน์ ใจบุญ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ. ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์
	รศ. ดร. สมเกียรติ ปรัชญาวรากร
	รศ. ดร. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2553

บทคัดย่อ

246186

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันและการเก็บในที่อับอากาศที่มีต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 โดยใช้อากาศร้อนอุณหภูมิ 90, 110, 130 และ 150 °C ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28% (d.b.) และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 140, 150 และ 160 °C ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 52% (d.b.) ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 2.5 m/s และความสูงเบด 9.5 cm หลังจากการอบแห้งแล้วนำข้าวเปลือกเหนียวไปเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 min นำมาเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนเหลือความชื้นสุดท้าย 16 ± 0.5 % (d.b.) ทำการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งได้แก่ ร้อยละต้นข้าว สี โครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติทางความร้อน สมบัติด้านสภาพเป็นผลึก สมบัติด้านความหนืด สมบัติด้านการหุงต้ม สมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านการย่อยและดูดซึม และการทดสอบด้านประสาทสัมผัส ของข้าวเหนียวในรูปข้าวเหนียวขาว ข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว จากผลการทดลอง พบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกเหนียวด้วยอุณหภูมิสูงมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้เมล็ดข้าวเหนียวเกิดเจลาทิไนเซชันและระดับการเกิดเจลาทิไนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น โดยข้าวเหนียวขาวและข้าวเหนียวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 90-150 °C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28% (d.b.) มีระดับการเกิดเจลาทิไนเซชันอยู่ระหว่าง 4.8-35.4% และ 6.2-43.8% ตามลำดับ สำหรับในกรณีของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว (ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 52% (d.b.)) เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิ 140-160 °C มีระดับการเกิดเจลาทิไนเซชันระหว่าง 51.4-65.1% ซึ่งการเกิด

246186

เจลาทิไนเซชันในเมล็ดข้าวเหนียวทำให้ข้าวเหนียวสูญเสียระดับสภาพเป็นผลึก โดยระดับสภาพเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นและสังเกตเห็นด้วยภาพโครงสร้างระดับจุลภาคจากการทดสอบด้วยเครื่อง SEM การเกิดเจลาทิไนเซชันของข้าวเหนียวหลังผ่านการอบแห้งทำให้ร้อยละต้นข้าวลดลงในกรณีความชื้นเริ่มต้น 28% (d.b.) แต่ร้อยละต้นข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับกรณีความชื้นเริ่มต้น 52% (d.b.) สำหรับการเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลานานขึ้นไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาว สีของข้าวเหนียวหลังผ่านการอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศมีความคล้ำขึ้น และทำให้เมล็ดข้าวเหนียวโปร่งแสงประมาณ 10% ส่วนคุณภาพด้านการหุงต้มได้แก่ ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำของข้าวเหนียวขาวและข้าวเหนียวกล้องมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งของข้าวเหนียวสุกลดลง แต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลต่อความหนืดสูงสุดและ Setback มีค่าลดลง การลดลงของความแข็งในข้าวเหนียวกล้องทำให้ผู้บริโภคชอบข้าวเหนียวหลังการอบแห้งมากกว่าข้าวเหนียวกล้องอ้างอิง สำหรับข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหลังการอบแห้งให้ผลสอดคล้องกับข้าวเหนียวขาวและข้าวเหนียวกล้องในเรื่องความแข็งและความเหนียว นั่นคืออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้ความแข็งลดลง แต่ความเหนียวเพิ่มขึ้น ตัวอย่างข้าวเหนียวหลังการอบแห้งมีค่า GI เพิ่มขึ้น ค่า GI ของข้าวเหนียวขาวสุก ข้าวเหนียวกล้องสุกและข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวสุกอยู่ในระดับสูงหมายถึงเมื่อรับประทานข้าวเหนียวทำให้มีการย่อยและดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้เร็ว การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกเหนียวด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันอุณหภูมิ 90-150 °C ความชื้นเริ่มต้น 28% (d.b.) ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ความชื้นคือ $D_{\text{eff}} = 5\times10^{-5}\exp\left(\frac{-37000}{RT_{\text{p}}}\right)$ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใช้ตามสมการของ Douglas and Churchill (1956) สามารถทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง

คำสำคัญ: การอบแห้ง/ฟลูอิไดเซชัน/คุณภาพของข้าว/ข้าวเหนียว

Thesis Title	Glutinous Rice Drying Using Fluidization Technique
Dissertation Credits	42
Candidate	Miss Petcharat Jaiboon
Dissertation Advisors	Prof. Dr. Somchart Soponronnarit
	Assoc. Prof. Dr. Somkiat Prachayawarakorn
	Assoc. Prof. Dr. Sakamon Devahastin
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2553

Abstract

246186

This research is to study the effect of fluidized bed drying temperature and tempering time on drying kinetics and qualities of waxy rice (RD 6). Moist paddy was dried initially by a batch-type fluidized-bed dryer from the initial moisture content of 28% (d.b.) at drying air temperatures of 90, 110, 130 and 150 °C and from the initial moisture content around 52% (d.b.) at drying air temperature of 140, 150 and 160 °C. Such conditions were performed at an air velocity of 2.5 m/s and a bed thickness of 9.5 cm. After paddy was dried to a certain moisture content, it was tempered for 0, 30, 60, 90 and 120 min. Finally, it was ventilated by an ambient airflow until its moisture content was closed to 16 ± 0.5% (d.b.). The qualities of waxy rice in terms of head rice yield, color, microstructure, thermal properties, X-ray diffraction, pasting properties, cooking properties, textural properties, starch digestibility and sensory evaluation were determinated in the form of white, brown and partially parboiled white waxy rice. The experimental results showed that drying at higher drying temperatures provided higher drying rate. Higher drying temperature gave higher degree of gelatinization and was in the ranges of 4.8-35.4% and 6.2-43.8% for white and brown waxy rice dried at 90-150 °C., respectively and initial moisture content of 28% (d.b.). While the degree of gelatinization of partially parboiled white waxy rice were 51.4-65.1% at drying temperature of 140-160 °C and initial moisture content of 52% (d.b.). An increase of degree of

246186

gelatinization melted the crystalline region within waxy rice resulted in degree of crystallinity decrease and could be seen the microstructure of the starch granules by SEM results. Head rice yield of white waxy rice after drying was relatively lower than the reference sample although the tempering time was included, excepting in the case of partially parboiled white waxy rice, higher drying temperature provided higher head rice yield of partially parboiled white waxy rice. The color of polished waxy rice was slightly darker with increase in drying air temperature and tempering time. Some of white waxy rice kernel changed to the translucent kernel around 10% with increase in drying temperature and tempering time. When the drying air temperature increased, water uptake and solid loss of white and brown waxy rice increased, resulting in lower hardness and higher stickiness of cooked waxy rice. The lower hardness of cooked brown waxy rice obtained from higher drying temperature, indicating the panelist preferred hardness of cooked dried brown waxy rice than that of reference cooked brown waxy rice. Hardness and stickiness of cooked partially parboiled white waxy rice obtained from higher drying temperature showed the similar results of hardness and stickiness of white and brown waxy rice. In addition, the peak viscosity and setback viscosity decreased with increasing drying temperature. Moreover, higher drying temperature showed higher GI of white brown and partially parboiled white waxy rice, indicating high-level starch digestion rate of waxy rice. The mathematical modeling of waxy rice dried at 90-150 °C and initial moisture content of 28% (d.b.) showed the diffusivity value was $D_{eff} = 5 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{-37000}{RT_p}\right)$ and the heat transfer coefficient from equation of Douglas and Churchill (1956) could predicted the lowering moisture content and grain temperature distribution of waxy rice.

Keywords: Drying/Fluidization/Rice qualities/Waxy rice

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศ. ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบโอกาสทางการศึกษาโดยให้ได้รับทุนการศึกษาของกลุ่มวิจัย อีกทั้งยังคอยกระตุ้น ผลักดัน สร้างแรงบันดาลใจโดยทำให้เห็นเป็นแบบอย่าง เช่นความมีระเบียบวินัย ตรงต่อเวลา ขยัน ประหยัด ซื่อสัตย์ สะอาด กล้าหาญ มีสัมมาคารวะ ฝึกการทำงานเป็นกลุ่มอย่างมีระบบ ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือด้านภาษาอังกฤษ ให้คำแนะนำในการส่งผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการ ฝึกความละเอียดในการเขียนผลงานทางวิชาการ และขอขอบพระคุณ รศ. ดร. สมเกียรติ ปรัชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษา แนวคิด ผลักดัน กระตุ้น อดทน ฝึกวิธีคิดและแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ รวมทั้งคอยชี้แนะแนวทางและร่วมแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณ ดร. ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดร.วารุณี วารัญญานนท์ ผู้เชี่ยวชาญจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ผศ. ดร. ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำชี้แนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณ อาจารย์พัชรี ตั้งตระกูล ผู้อำนวยการสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ รวมทั้งช่วยวิเคราะห์ข้อมูลงานวิจัย ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดความหนืดของแป้ง

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) แหล่งเงินอุดหนุนโดยให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยการเรียนระดับปริญญาเอกตลอดระยะเวลา 4 ปี ขอขอบพระคุณ พี่หนอสำหรับความช่วยเหลือ และความห่วงใยในการเดินทางไปสัมมนายังต่างประเทศครั้งแรก ขอขอบคุณ พี่หนุ่ม พี่เอ๋ และพี่นก สำหรับประสบการณ์ชีวิตที่อินเดีย ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องนะ น้องแมน ที่ให้กำลังใจตลอดมา คอยช่วยเหลือ กระตุ้น ให้มีความมานะพยายาม อดทนไม่ย่อท้อต่ออุปสรรค ขอขอบคุณพี่เล็ก เจ้าหน้าที่ห้องวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งที่อำนวยความสะดวกสำหรับการใช้คอมพิวเตอร์และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล รวมทั้ง พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ นักศึกษาในห้องอบแห้งทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ปรึกษาหารือแลกเปลี่ยนประสบการณ์ในการทำงานทุกด้าน รู้สึกเป็นเหมือนครอบครัวเดียวกัน ตลอดจนคุณครู อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่เล็กจนโต จนสามารถนำเอาความรู้มาช่วยให้การทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
รายการตาราง	ฎ
รายการรูปประกอบ	ฑ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ด

บทที่

1. บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 เค้าโครงเรื่อง	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**5**
2.1 ข้าว	5
2.1.1 ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6	6
2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของเมล็ดข้าว	7
2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าว	9
2.2 การอบแห้ง	13
2.2.1 พื้นฐานการอบแห้งวัสดุ	13
2.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	17
2.2.3 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชัน (Fluidization Technique)	22
2.2.4 การเก็บในที่อับอากาศ (Tempering)	24
2.2.5 การเป่าด้วยอากาศแวดล้อม	25

2.3 การเกิดเจลาทิไนเซชันและรีโทรกราเดชัน 25
2.4 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล 27
2.4.1 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้อง 27
2.4.2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอ็นไซม์เกี่ยวข้อง 28
2.5 คุณภาพของข้าวเหนียว 29
2.5.1 การวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าวเหนียว 29
2.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพแป้งข้าวเหนียว 36

3. ผลของอุณหภูมิอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศต่อคุณภาพของข้าวเหนียวและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 45

3.1 บทนำ 45
3.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 47
3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยอากาศร้อน 47
3.2.2 การเตรียมข้าวเปลือกเหนียวชื้น 48
3.2.3 การอบแห้งข้าวเปลือกเหนียว 48
3.2.4 การหาความชื้นของข้าวเปลือกเหนียว 48
3.2.5 การหาร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวขาว 49
3.2.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาว 49
3.2.7 การทดสอบสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวขาว 50
3.2.8 การวัดสีของเมล็ดข้าวเหนียวขาว 50
3.2.9 การหาเมล็ดข้าวเหนียวขาวที่เกิดโปร่งแสง 51
3.2.10 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวเหนียวขาว 51
3.2.11 การหาปริมาณการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวเหนียวขาว 51
3.2.12 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ 51
3.2.13 การทดสอบสมบัติด้านการหุงต้ม 52
3.2.14 การทดสอบสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวขาวสุก 52
3.2.15 การทดสอบสมบัติด้านการย่อยและดูดซึมแป้งข้าวเหนียวขาวสุก 52
3.2.16 การทดสอบสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวขาว 53
3.2.17 การวิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพคตินในข้าวเหนียว 54
3.2.18 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวขาวสุก 54
3.2.19 การวิเคราะห์ทางสถิติ 55
3.2.20 การพัฒนาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกเหนียว 55

3.3 ผลการทดลองและวิจารณ์ 56
3.3.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง 56
3.3.2 ผลของความชื้นและอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนต้นข้าว 56
3.3.3 ความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวระหว่างการเก็บในที่อับอากาศ 58
3.3.4 ผลของระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศต่ออัตราส่วนต้นข้าวของข้าวเหนียวขาว 59
3.3.5 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาว 60
3.3.6 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวขาว 61
3.3.7 สีของข้าวเหนียวขาว 63
3.3.8 เมล็ดโปร่งแสงของข้าวเหนียวขาว 64
3.3.9 โครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวเหนียวขาว 65
3.3.10 การกระจายสายโซ่อะมิโลเพคตินภายในสตาร์ชข้าวเหนียว 66
3.3.11 ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำของเมล็ดข้าวเหนียวขาว 67
3.3.12 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวเหนียวสุก 69
3.3.13 สมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของแป้งข้าวเหนียวสุก 69
3.3.14 สมบัติด้านสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียว 71
3.3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลาทิไนเซชัน GI และระดับสภาพเป็นผลึกของข้าวเหนียวขาว 72
3.3.16 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวขาวสุก 73
3.3.17 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 74

4. ผลของฟลูอิไดเซชันอุณหภูมิสูงที่มีต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านความหนืดและสมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวขาว 88
4.1 บทนำ 88
4.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 90
4.2.1 การเตรียมตัวอย่าง 90
4.2.2 การทดสอบคุณภาพข้าวเหนียวหลังการอบแห้ง 90
4.2.3 การหาปริมาณโปรตีนของแป้งข้าวเหนียว 91
4.2.4 การหาปริมาณไขมันทั้งหมดของแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ Soxtec 92
4.2.5 การหาปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวขาว 92
4.2.6 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำของข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวขาว 93
4.2.7 วิธีการหุงต้มข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวขาว 93
4.2.8 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวกล้องสุกและข้าวเหนียวขาวสุก 93

4.2.9 การหารูพรุนในเมล็ดข้าวเหนียวจากภาพ SEM โดยใช้โปรแกรม Image J 94
4.2.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ 94
4.3 ผลการทดลองและวิจารณ์ 94
4.3.1 องค์ประกอบของโปรตีนและไขมันของแป้งข้าวเหนียวกล้อง 94
4.3.2 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวกล้องและแป้งข้าวเหนียวขาว 95
4.3.3 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และระดับสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวกล้องและแป้งข้าวเหนียวขาว 97
4.3.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวขาว 99
4.3.5 ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำของเมล็ดข้าวเหนียวกล้องและเมล็ดข้าวเหนียวขาว 101
4.3.6 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวกล้องสุกและข้าวเหนียวขาวสุก 103
4.3.7 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวกล้องและแป้งข้าวเหนียวขาว 105
4.3.8 สมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของข้าวเหนียวกล้องสุกและข้าวเหนียวขาวสุก 106
4.3.9 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวกล้องสุกและข้าวเหนียวขาวสุก 108

5. ผลของฟลูอิไดเซชันอุณหภูมิสูงที่มีต่อคุณภาพของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว 111
5.1 บทนำ 111
5.2 วัสดุและวิธีการทดลอง 112
5.2.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง 112
5.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพ 112
5.2.3 การทดสอบสมบัติด้านการหุงต้ม 112
5.3 ผลการทดลองและวิจารณ์ 113
5.3.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง 113
5.3.2 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว 113
5.3.3 สมบัติด้านสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว 115
5.3.4 ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว 117
5.3.5 สีของเมล็ดข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาว 119
5.3.6 สมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุก 120
5.3.7 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวหุงสุก 121

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ 124
6.1 สรุปผล 124

6.2 ข้อเสนอแนะ 126

เอกสารอ้างอิง **127**

ภาคผนวก **138**

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 138

ประวัติผู้วิจัย **156**

รายการตาราง

ตาราง หน้า

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือกและส่วนต่างๆ 9
2.2 ค่าคงที่ *a* และ *b* สำหรับคำนวณหาค่าความหนาแน่นปรากฏและสัดส่วนช่องว่างอากาศ 18
3.1 ระดับสเกลความชอบและคุณภาพที่ทดสอบของข้าวเหนียวขาวสุก 55
3.2 ความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดของข้าวเหนียวที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ 59
3.3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศต่อสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาว 61
3.4 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศต่างๆ 62
3.5 สีของข้าวเหนียวที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศต่างๆ 63
3.6 ร้อยละของข้าวเหนียวที่มีเมล็ดโปร่งแสงที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศต่างๆ 65
3.7 สมบัติด้านการหุงต้มและสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวสุกที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ 68
3.8 อัตราการย่อยและดูดซึมของแป้งข้าวเหนียวขาวที่เงื่อนไขต่างๆ 71
3.9 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสต่อความชอบของข้าวเหนียวภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ 74
3.10 ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างๆ 78
3.11 สมการของการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งอ้างอิงต่างๆ 80
3.12 ค่า R^2 ของการทำนายผลการลดลงของความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 และ 150 °C 83
4.1 องค์ประกอบของโปรตีนและไขมันของแป้งข้าวเหนียวกล้องอ้างอิง แป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง และแป้งข้าวเหนียวกล้องที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ 95
4.2 สมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวกล้องและแป้งข้าวเหนียวขาวที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ 96
4.3 ระดับสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวกล้องและแป้งข้าวเหนียวขาวที่เงื่อนไขต่างๆ 98
4.4 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวขาวสุกที่เงื่อนไขต่างๆ 104
4.5 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวกล้องและแป้งข้าวเหนียวขาวที่เงื่อนไขต่างๆ 105

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

4.6 ค่าดัชนีไกลซีมิกของข้าวเหนียวกล้องสุกและข้าวเหนียวขาวสุกที่เงื่อนไขต่างๆ 108
4.7 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวขาวสุกที่เงื่อนไขต่างๆ 109
4.8 การทดสอบด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวกล้องสุกที่เงื่อนไขต่างๆ 109
5.1 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง แป้งข้าวเหนียวขาวหลังการแช่และแป้งข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 140-160 °C 115
5.2 ระดับสภาพเป็นผลึกของข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังการแช่ และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C 117
5.3 ร้อยละต้นข้าว ร้อยละรำที่ขจัดออก และร้อยละเมล็ดที่มีสีผิดปกติของข้าวเหนียวขาวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่ ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C 118
5.4 สีของข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่ ข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C 119
5.5 ค่าดัชนีไกลซีมิค (GI) ของตัวอย่างข้าวเหนียวขาวอ้างอิงหุงสุก ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140-160 °C 121

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

2.1 ลักษณะของข้าวเหนียวพันธ์ กข 6 7

2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว 8

2.3 โครงสร้างของอะมิโลพลาสท์ 10

2.4 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชภายในอะมิโลพลาสท์ 10

2.5 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในสตาร์ช 11

2.6 ชั้นอลูโรน ชั้นเอนโดสเปิร์ม และองค์ประกอบของโปรตีนและไขมันในเมล็ดข้าวเหนียว 12

2.7 การแพร่ของมวลระหว่างผิวของแข็งและของไหล 14

2.8 การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด 22

2.9 เครื่องเป่าอากาศแวดล้อม 25

2.10 การเกิดเจลาทิไนเซชันและการรีโทรกราเดชันของเม็ดแป้ง 27

2.11 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO 28

2.12 การเกิด Pigment สีน้ำตาลในปฏิกิริยาเมลลาร์ด 28

2.13 แผนภาพสีระบบ Hunter 31

2.14 การคำนวณกำลังขยายของ SEM 32

2.15 กราฟความแข็งและความเหนียวของข้าวสุกโดยใช้เครื่อง texture analyzer 34

2.16 การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้ง 37

2.17 กราฟความหนืดของแป้งข้าวโดยใช้เครื่อง RVA 38

2.18 หลักการวัดด้วยเครื่อง DSC 39

2.19 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของแป้ง 40

2.20 โครงสร้างของเม็ดแป้ง 41

2.21 ผลึกของสตาร์ชแบบ A และ B 42

2.22 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน 43

2.23 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A และ B 44

3.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยอากาศร้อน 47

3.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเหนียวกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอุณหภูมิ 90, 110 และ 130 °C 56

รูป (ต่อ) **หน้า**

3.3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งและความชื้นของข้าวเหนียวหลังจากอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดต่อร้อยละต้นข้าวโดยไม่ผ่านการเก็บในที่อับอากาศ (no tempering), (ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวอ้างอิงมีค่า 48.5%, ความชื้นเริ่มต้น = 28.8% (d.b.)) 57
3.4 ร้อยละต้นข้าวของข้าวเหนียวหลังจากอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศ 60
3.5 โครงสร้างเม็ดแป้งของข้าวเหนียวอ้างอิง ข้าวเหนียวเมล็ดขาวขุ่นและเมล็ดโปร่งแสงจากเงื่อนไขการอบแห้งและระยะเวลาเก็บในที่อับอากาศต่างๆ 66
3.6 การกระจายสายโซ่อะมิโลเพคตินภายในสตาร์ชข้าวเหนียว 67
3.7 *In vitro* starch hydrolysis ของข้าวเหนียวอ้างอิงและข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งเงื่อนไขต่างๆ 70
3.8 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และระดับสภาพเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียว 72
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลาทิไนเซชัน ค่า GI และระดับสภาพเป็นผลึกของข้าวเหนียวขาว 73
3.10 การแบ่ง mesh ของเมล็ดข้าวเหนียวตามแนวแกน x, y, z 76
3.11 ผลการทดสอบจำนวน element ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 °C 77
3.12 ผลการทำนายเทียบกับผลการทดลองการลดลงความชื้นของเมล็ดข้าวเหนียวที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ 79
3.13 ผลการทำนายการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 °C โดยใช้สมการตามตารางที่ 3.11 81
3.14 ผลการทำนายอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 °C โดยใช้สมการตามตารางที่ 3.11 82
3.15 ผลการทำนายการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 °C โดยใช้สมการตามตารางที่ 3.11 82
3.16 ผลการทำนายอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150 °C โดยใช้สมการตามตารางที่ 3.11 83
3.17 ผลการทำนายการลดลงของความชื้นเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-150 °C ตามสมการของ Saravacos and Maroulis (2001) 85
3.18 ผลการทำนายอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-150 °C ตามสมการของ Saravacos and Maroulis (2001) 86
3.19 ผลการทำนายการลดลงของความชื้นเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-150 °C ตามสมการของ Douglas and Churchill (1956) 86

รูป (ต่อ) **หน้า**

3.20 ผลการทำนายอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกเหนียวเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90-150 °C ตามสมการของ Douglas and Churchill (1956) 87
4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแป้งข้าวเหนียว 98
4.2 ภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวเหนียว 99
4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวขาวที่เงื่อนไขต่างๆ 100
4.4 (a) ปริมาณการดูดซับน้ำและ (b) ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำของข้าวเหนียวกล้องอ้างอิงและข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวกล้องและข้าวเหนียวขาวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ 102
4.5 อัตราการย่อยและดูดซึมน้ำตาลของข้าวเหนียวกล้องสุกและข้าวเหนียวขาวสุกที่เงื่อนไขต่างๆ 107
5.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอุณหภูมิ 140-160 °C 113
5.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแป้งข้าวเหนียว 116
5.3 การไฮโดรไลซีสโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวขาวอ้างอิง ข้าวเหนียวขาวหลังการแช่และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิ 140-160 °C 120
5.4 (a) ความแข็ง และ (b) ความเหนียวของข้าวเหนียวขาวอ้างอิงหุงสุก ข้าวเหนียวขาวหลังผ่านการแช่หุงสุก และข้าวเหนียวกึ่งนึ่งขาวที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิ 140-160 °C หุงสุก 122

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล, m^2
A_a	=	บริเวณอสัณฐาน, mm^2
A_c	=	พื้นที่บริเวณชั้นผลึก, mm^2
C	=	ร้อยละของอัตราการย่อยแป้งข้าวเหนียวที่เวลา t, %
C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ใช้อบแห้ง, kJ/kg K
C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A, kg/m^3
C_{AS}	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว, kg/m^3
C_P	=	ความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือก, J/kg K
C_∞	=	ร้อยละของอัตราการย่อยแป้งข้าวเหนียวที่เวลา 180 min, %
D_{AB}	=	สัมประสิทธิ์ของการฟุ้งกระจาย, m^2/h
D_{eff}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่เวลาใดๆ, m^2/s
D_0	=	ค่าคงที่, m^2/s
D_w	=	Binary diffusion coefficient, m^2/s
D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดข้าวเปลือก, m
d	=	มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), g
E_a	=	พลังงานกระตุ้น, kJ/kmol
h_c	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m^2 K
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของเมล็ดข้าวเปลือก, J/kg
h_m	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, m/s
ΔH	=	เอนทาลปีของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้ง (J/g (dry matter))
ΔH_c	=	เอนทาลปีของแป้งข้าวเหนียวอ้างอิง (J/g (dry matter))
k_a	=	การนำความร้อนของอากาศอบแห้ง, W/m K
k_p	=	ค่าการนำความร้อนของข้าวเปลือก, W/m K
L	=	ความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก, m
M_d	=	ความชื้นวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_p	=	ความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือก, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_w	=	ความชื้นวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานเปียก
N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายเท, kg/m^3
Nu	=	ตัวเลขนัสเซ็ล, ไร้หน่วย

Nu_o = ค่าของตัวเลขนัสเซ็ลที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการนำเพียงอย่างเดียว,ไร้หน่วย

Pr = ตัวเลขพรันเทิล, ไร้หน่วย

q = อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

R = ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 kJ/kmol

Re = ตัวเลขเรย์โนลด์, ไร้หน่วย

Sc = ตัวเลขชมิด, ไร้หน่วย

SG = ระดับการเกิดเจลาทิไนเซชัน (degree of gelatinization), %

Sh = ตัวเลขเชอร์วูด, ไร้หน่วย

Sh_o = ค่าของตัวเลขเชอร์วูดที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุลอย่างเดียว, ไร้หน่วย

T = อุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้ง, °C

T_{abs} = อุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งสัมบูรณ์, K

T_p = อุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือก, °C

T_s = อุณหภูมิที่ผิวของเม็ดของแข็ง, °C

T_∞ = อุณหภูมิของกระแสของไหล, °C

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min

v_a = ความเร็วของอากาศอบแห้ง, m/s

v_1 = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ไตเตรทตัวอย่าง, m^3

v_2 = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ไตเตรท blank, m^3

W = น้ำหนักตัวอย่าง, g

W_1 = น้ำหนักของ round bottom flask, g

W_2 = น้ำหนักของ round bottom flask และตัวอย่าง, g

w = มวลของวัสดุ, g

x = ระยะที่มวลสารเคลื่อนที่ไป, m

X_c = ระดับสภาพเป็นผลึก, %

สัญลักษณ์ภาษากรีก

ρ = ความหนาแน่น, kg/m^3

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศอบแห้ง, kg/m^3

ρ_b = ความหนาแน่นปรากฏ, kg/m^3

ρ_t = ความหนาแน่นจริง, kg/m^3

ε	=	สัดส่วนช่องว่างอากาศ, เศษส่วน
μ_a	=	ความหนืดของอากาศอบแห้ง, kg/m s

สัญลักษณ์กำกับล่าง

a	=	อากาศแห้ง
A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล
AB	=	ฟุ้งกระจาย
AS	=	อิ่มตัว
b	=	bulk
c	=	อ้างอิง
d	=	วัสดุแห้ง
eff	=	ประสิทธิภาพ
fg	=	การกลายเป็นไอ
m	=	มวล
o	=	เริ่มต้น
p	=	วัสดุ
P	=	เมล็ดข้าวเปลือก
t	=	ถาด
w	=	น้ำ
∞	=	กระแสการไหลอิสระ