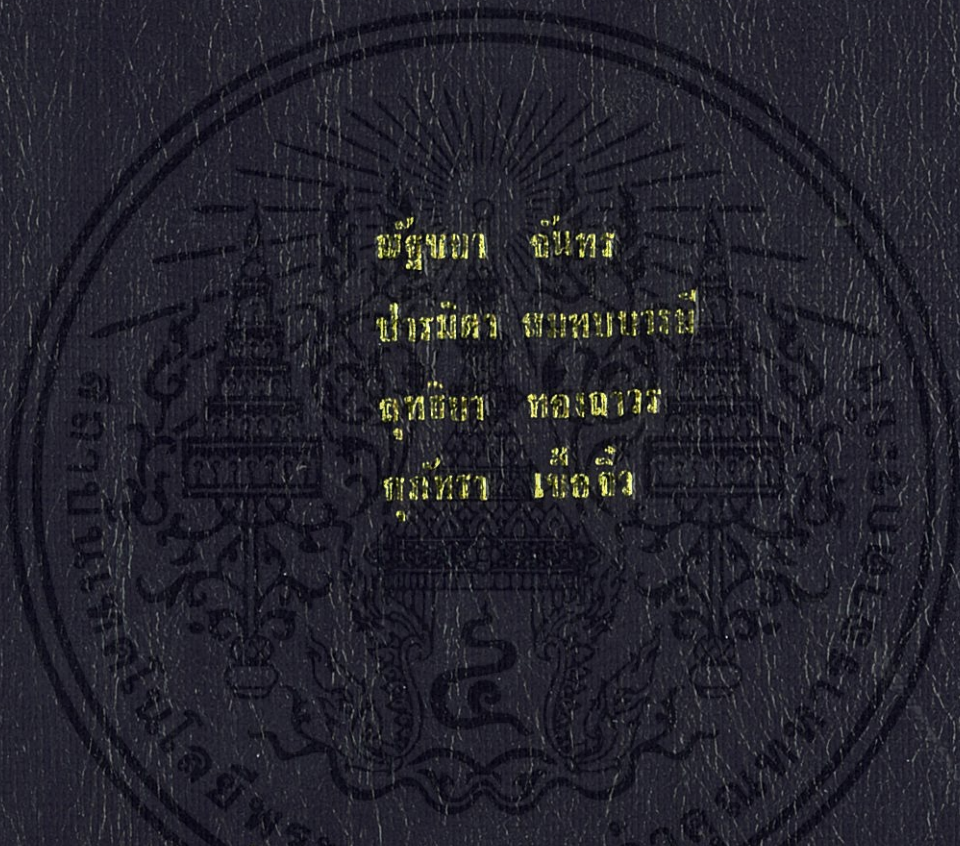


ศึกษาผลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกชนิดพันธุ์เจ้าสุพรรณ
The effect of drying methods on quality of instant
germinated brown rice



ผู้จัดทำ ฉบับที่

นำพิมพ์ ฉบับที่

ฉบับที่ ของ

ฉบับที่ ๒๕๖๖

ปริญญาโท สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

สาขาวิชาวนศาสตร์

คณะวนศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๕

อิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป

The effect of drying methods on quality of instant
germinated brown rice



ณัฐชยา จันทร
ปารมิตา สมทบบารมี
สุทธิยา ทองถาวร
สุภัทรา เชื้อจิว*

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**The effect of drying methods on quality of
instantgerminated brown rice**



**Natchaya Jantorn
Paramit Somthobbaramee
Suttiya Thongtaworn
Supattra Chuajiw**

**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTAIL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2012**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง อิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

The effect of drying methods on quality of instant germinated brown rice

นักศึกษาผู้ทำโครงการ

- | | | |
|-------------------|-----------|-----------------------|
| 1. นางสาวณัฐชยา | จันทร์ | รหัสนักศึกษา 52010316 |
| 2. นางสาวปารมิตา | สมทบบารมี | รหัสนักศึกษา 52010710 |
| 3. นางสาวสุทธิตยา | ทองถาวร | รหัสนักศึกษา 52011312 |
| 4. นางสาวสุภัทรา | เชื้อจิว | รหัสนักศึกษา 52011330 |





(ดร.เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|------------------|--|-----------|-----------------------|
| หัวข้อโครงการ | อิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป | | |
| นักศึกษา | นางสาวณัฐชยา | จันทร | รหัสนักศึกษา 52010316 |
| | นางสาวปารมิตา | สมทบบารมี | รหัสนักศึกษา 52010710 |
| | นางสาวสุทธिया | ทองถาวร | รหัสนักศึกษา 52011312 |
| | นางสาวสุภัทรา | เชื้อจิว | รหัสนักศึกษา 52011330 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ดร.เอกพงษ์ | ชิวิตโสภณ | |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต | | |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมอาหาร | | |
| ปีการศึกษา | 2555 | | |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลศาสตร์ และอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป วิธีการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วย 1) การผลิตข้าวกล้องงอก 2) การหุงสุก และ 3) การอบแห้ง ใช้ข้าวกล้องพันธุ์ปทุมธานี 1 แช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการงอกบริเวณจมูกข้าว และนึ่งข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นแช่น้ำที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 3 นาที และนึ่งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดเจลลาตินในเซชันสมบูรณ ตัวอย่างถูกอบแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้นจากเริ่มต้นประมาณ $111.59 \pm 0.72\%$ d.b. จนกระทั่งเท่ากับ 12% d.b. ด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 60 และ 80°C และด้วยวิธีการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่อุณหภูมิ 110 130 และ 150°C อธิบายจลศาสตร์การอบแห้งด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ 15 รูปแบบ พบว่า แบบจำลอง Midilli model และแบบจำลอง New model 2 สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบลมร้อน และแบบฟลูอิดไรซ์เบดได้ดีที่สุดตามลำดับ จากการวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างหลังการอบแห้งพบว่า ค่าความขาว อัตราการดูดน้ำกลับ และอัตราการเพิ่มปริมาตรของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่อุณหภูมิ 150°C มีค่ามากที่สุด แต่มีค่าความหนาแน่นรวมต่ำที่สุด เมื่อคืนรูปข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปโดยใช้วิธีไมโครเวฟพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าความแข็ง และความเหนียวลดลง แต่มีค่าเหล่านี้มากกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุก ผลลัพธ์ของการทดสอบทางประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้าน ลักษณะภายนอก สี กลิ่น การยึดติดของเมล็ดข้าว เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวมมากกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุก

คำสำคัญ: ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป, จลศาสตร์การอบแห้ง, ตู้อบลมร้อน, ฟลูอิดไรซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|------------------------|---|--|----------|
| Project Title | The effect of drying methods on quality of instant germinated brown rice | | |
| Students | Ms. Natchaya Jantorn | | 52010316 |
| | Ms. Paramita Somthobbaramee | | 52010710 |
| | Ms. Suttiya Thongtaworn | | 52011312 |
| | Ms. Supatta Cherjew | | 52011330 |
| Project Advisor | Dr.Eakkapong Cheevitsopon | | |
| Degree | Bachelor of Engineering | | |
| Program | Food Engineering | | |
| Academic Year | 2012 | | |

ABSTRACT

The objective of this research was to study the drying kinetics and the effect of drying methods on quality of instant germinated brown rice (IGBR). The processing of IGBR consists of 3 important operations: 1) production of germinated brown rice (GBR), 2) cooking, and 3) drying. Brown rice (Pathumthani 1) was soaked at 35°C for 4 h and incubated at 35°C for 20 h to facilitate germination. The GBR was steamed at 100°C for 5 min and soaked at 90°C for 7 min. The sample was re-steamed at 100°C for 5 min to achieve complete gelatinization. The GBR was dried to reduce the initial moisture content of 111.59±0.72% d.b. to the final moisture content of 12% d.b. using a hot-air oven at temperatures of 40, 60 and 80°C, and a fluidized-bed dryer at temperatures of 110, 130 and 150°C. The drying kinetics of sample was described using fifteen different mathematical models. The results indicated that the Midilli model and the New model 2 were the best models for describing the IGBR drying behaviors using a hot-air oven and a fluidized-bed dryer, respectively. Sample quality evaluation showed that the sample obtained with fluidized bed drying at 150°C had the highest values of whiteness, dehydration-ratio, and volume-increase, while the value of bulk density was lowest. When rehydrated using a microwave technique, the sample obtained at high drying temperature showed the decreasing hardness and stickiness, but these values were higher than that of the cooked GBR. From

sensory test, the average scores of appearance, color, aroma, grain separation, texture, flavor and overall acceptance for the IGBR were higher than the cooked GBR. ใช้

Keyword: instant germinated brown rice, a hot-air oven dryer, a fluidized-bed dryer

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วย จากคำแนะนำ คำปรึกษา และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ดร.เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร คณะวิจัรัฐศึกษาซึ่ง และขอขอบคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ สำหรับท่านคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาวิชาตั้งแต่เริ่มเข้าศึกษา เพื่อนำความรู้ที่ได้จากคณาจารย์ทุกท่าน นำมาประกอบในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณอำนาจ คูตะคุ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนช่วยเหลือในการออกแบบ กลไกของเครื่องฟลูอิดซ์เบด

ขอขอบพระคุณ คุณวราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ และคุณบุญนำ ผลโพธิ์ ที่จัดเตรียมอุปกรณ์การทดลองโครงการ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมอาหารและนอกภาควิชาที่ให้ความสนใจในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณของคณะผู้จัดทำทุกท่าน ผู้ที่มอบชีวิต การศึกษา และอนาคตที่ดี ตลอดจนให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และกำลังใจในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่า และประโยชน์จากปริญญาบัตรฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

| | |
|---------------|-----------|
| นางสาวณัฐชยา | จันทร์ |
| นางสาวปารมิตา | สมทบรัมย์ |
| นางสาวสุทธิดา | ทองถาวร |
| นางสาวสุภัทรา | เชื้อจิว |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

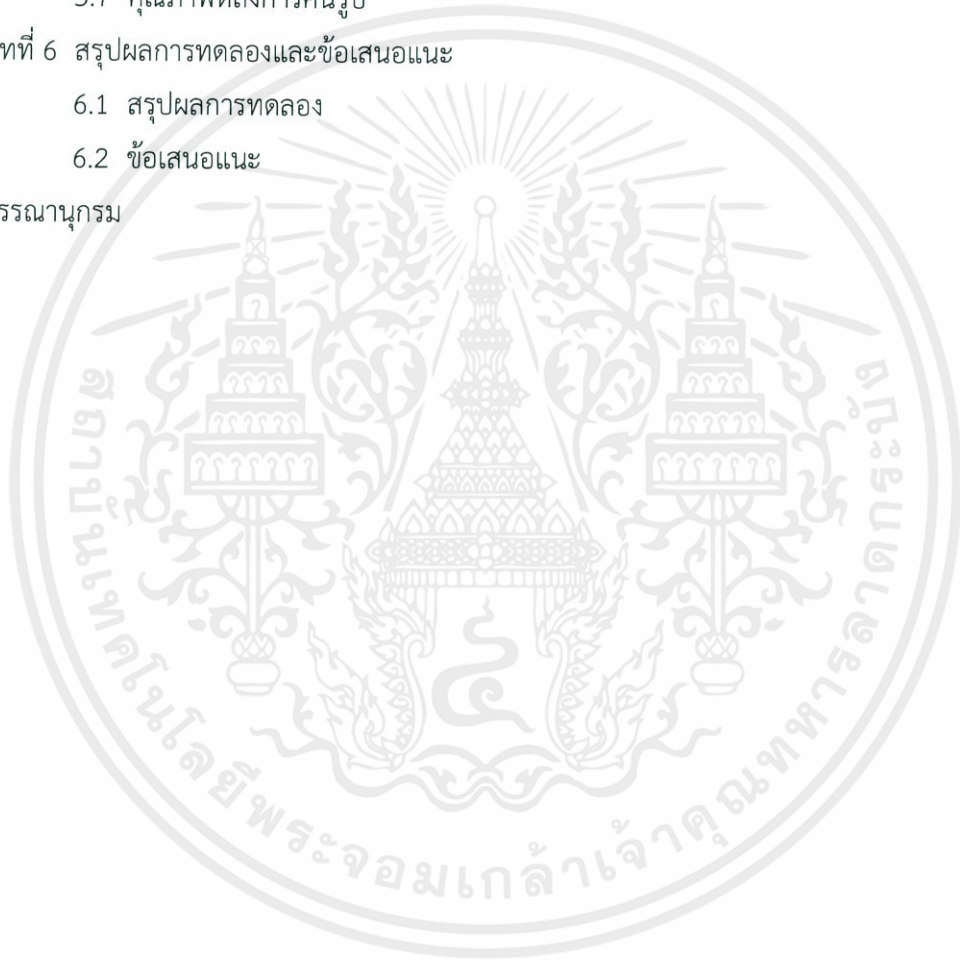
สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | I |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญรูปภาพ | VI |
| สารบัญตาราง | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 ข้าว | 3 |
| 2.2 องค์ประกอบ และคุณค่าทางโภชนาการของข้าว | 6 |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 9 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 16 |
| 3.1 พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง | 16 |
| 3.2 การอบแห้งแบบลมร้อน | 21 |
| 3.3 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพ | 26 |
| บทที่ 4 วัสดุและวิธีการทดลอง | 27 |
| 4.1 วัตถุประสงค์ | 27 |
| 4.2 การเตรียมข้าวกล้องงอก | 28 |
| 4.3 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุก | 28 |
| 4.4 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด | 29 |
| 4.5 การอบแห้งข้าวกล้องงอก | 35 |
| 4.6 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้ง | 36 |
| 4.7 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการคั่วรูป | 38 |
| บทที่ 5 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง | 41 |
| 5.1 จลศาสตร์การอบแห้ง | 41 |
| 5.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ | 44 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนำไปใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--------------------------------------|------|
| 5.3 พลังงานกระตุ้น | 45 |
| 5.4 สมการคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง | 47 |
| 5.5 คุณภาพหลังการอบแห้ง | 53 |
| 5.6 การคั้นรูป | 56 |
| 5.7 คุณภาพหลังการคั้นรูป | 57 |
| บทที่ 6 สรุปลผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 61 |
| 6.1 สรุปลผลการทดลอง | 61 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ | 62 |
| บรรณานุกรม | 63 |



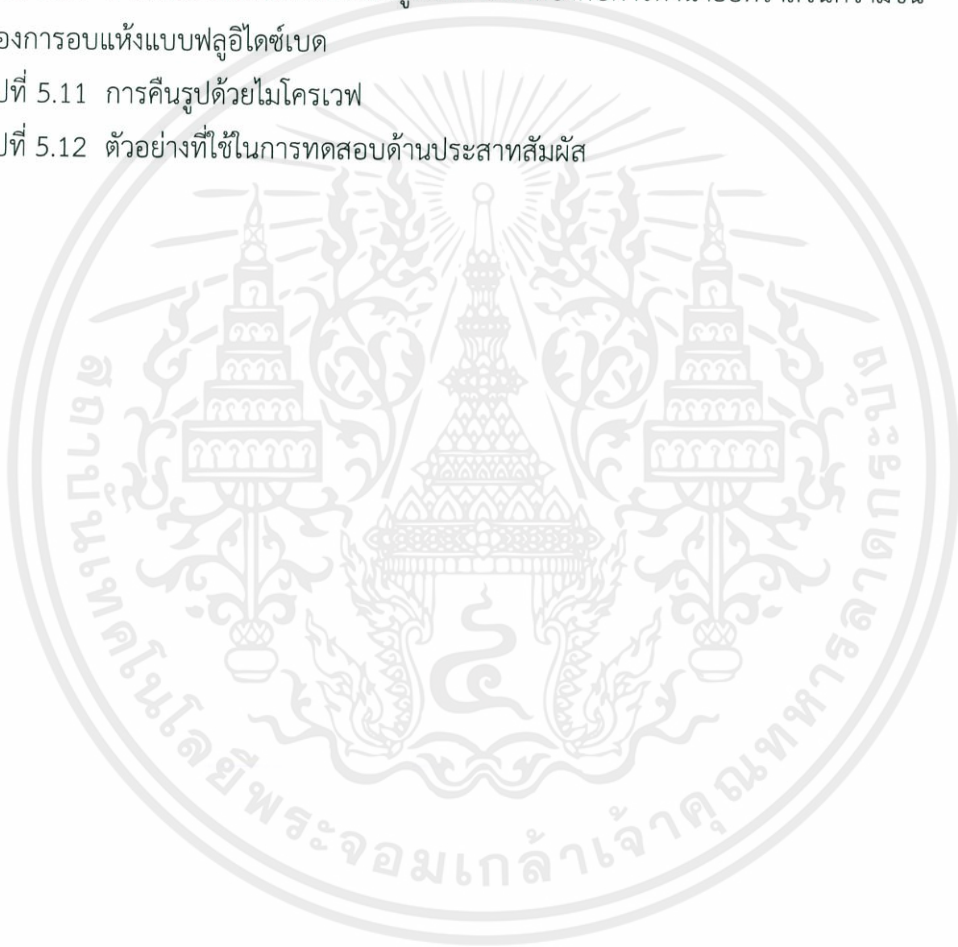
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเม็ดข้าว | 4 |
| รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้น | 16 |
| รูปที่ 3.2 แสดงการแพร่กระจายความชื้นในอนุภาคของแข็ง | 17 |
| รูปที่ 3.3 การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบถาด | 22 |
| รูปที่ 3.4 พฤติกรรมที่เกิดฟลูอิดไซเซชัน | 24 |
| รูปที่ 4.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้อง | 27 |
| รูปที่ 4.2 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก | 28 |
| รูปที่ 4.3 กระบวนการหุงสุกข้าวกล้องงอก | 29 |
| รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วลม | 30 |
| รูปที่ 4.5 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไซเซต | 31 |
| รูปที่ 4.6 พัฒนสำหรับเครื่องอบแห้งอบบฟลูอิดไซเซต | 32 |
| รูปที่ 4.7 ผู้ควบคุมอุณหภูมิ | 32 |
| รูปที่ 4.8 ส่วนต่อรวมลม | 33 |
| รูปที่ 4.9 ห้องอบแห้ง | 33 |
| รูปที่ 4.10 ช่องป้อนวัตถุดิบ | 34 |
| รูปที่ 4.11 ช่องมองวัตถุดิบ | 34 |
| รูปที่ 4.12 เครื่องอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน | 35 |
| รูปที่ 4.15 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไซเซต | 35 |
| รูปที่ 4.16 กระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอก | 36 |
| รูปที่ 4.17 เครื่องวัดสี | 36 |
| รูปที่ 4.18 กระบวนการทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป | 37 |
| รูปที่ 4.19 Texture Analysis | 38 |
| รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง กับเวลาของค่าความแข็ง และความเหนียว | 39 |
| รูปที่ 4.21 กระบวนการทดสอบคุณภาพข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป | 40 |
| รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน | 42 |
| รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นของการอบแห้งแบบฟลูอิดไซเซต | 42 |
| รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำให้แห้งกับความชื้นของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน | 43 |
| รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำให้แห้งกับความชื้นของการอบแห้งแบบฟลูอิดไซเซต | 43 |
| รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน | 44 |
| รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาของการอบแห้งแบบฟลูอิดไซเซต | 45 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ ของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน | 46 |
| รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ ของการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด | 46 |
| รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลผลการทดลองกับการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน | 47 |
| รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลผลการทดลองกับการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด | 48 |
| รูปที่ 5.11 การคืนรูปด้วยไมโครเวฟ | 56 |
| รูปที่ 5.12 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบด้านประสาทสัมผัส | 59 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารอาหารต่อข้าวดิบ 100 กรัมของข้าวขาวกับข้าวกล้อง | 8 |
| ตารางที่ 3.1 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบาง | 19 |
| ตารางที่ 5.1 อัตราการทำแห้งของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนและฟลูอิดซ์เบด | 44 |
| ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนและฟลูอิดซ์เบด | 45 |
| ตารางที่ 5.3 พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนและฟลูอิดซ์เบด | 47 |
| ตารางที่ 5.4 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน | 48 |
| ตารางที่ 5.5 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด | 50 |
| ตารางที่ 5.6 ค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Midiliของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน | 52 |
| ตารางที่ 5.7 ค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง New model 2 ของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด | 53 |
| ตารางที่ 5.8 ค่าความขาวของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนและแบบฟลูอิดซ์เบด | 53 |
| ตารางที่ 5.9 ค่าความหนาแน่นรวมของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนและแบบฟลูอิดซ์เบด | 54 |
| ตารางที่ 5.10 ค่าอัตราการดูดน้ำกลับของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนและแบบฟลูอิดซ์เบด | 55 |
| ตารางที่ 5.11 ค่าอัตราการเพิ่มปริมาตรของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนและแบบฟลูอิดซ์เบด | 56 |
| ตารางที่ 5.12 ค่าความขาวของข้าวกล้องงอกหุงสุกและข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคั้นรูป | 57 |
| ตารางที่ 5.13 เนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุกและข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคั้นรูป | 58 |
| ตารางที่ 5.14 การทดสอบทางประสาทสัมผัส | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในภูมิภาคเอเชียนิยมรับประทาน ข้าวเป็นอาหารหลักมากกว่าในภูมิภาคอื่น ๆ ของโลก การผลิต การบริโภคข้าว และการค้าข้าวส่วนใหญ่จึงอยู่ในบริเวณทวีปเอเชีย ประเทศที่มีบทบาทมากสุดในการส่งออกข้าวในปี พ.ศ.2554 คือ ประเทศไทย (กรมการข้าว, 2554) มีปริมาณส่งออกข้าวปีละประมาณ 10 ล้านตัน เป็นสัดส่วนร้อยละ 30 ของการส่งออกข้าวทั้งหมดทั่วโลก (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2554) คนไทยส่วนใหญ่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก ข้าวที่นิยมบริโภคอยู่ในรูปข้าวขาว ซึ่งเป็นข้าวที่มีสารอาหารน้อยกว่าข้าวกล้อง เพราะข้าวขาวผ่านกระบวนการขัดสีทำให้รำข้าว และจมูกข้าวซึ่งเป็นส่วนที่อุดมไปด้วยโปรตีน วิตามิน แร่ธาตุ และเส้นใยอาหารที่สำคัญที่ร่างกายต้องการสูญเสียในกระบวนการผลิตข้าวขาว ดังนั้น ผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพจึงหันมาบริโภคข้าวกล้องเพิ่มขึ้น ปัจจุบันนี้มีการพัฒนากระบวนการผลิตข้าว เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และมูลค่าทางเศรษฐกิจในรูปของข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอก (germinated brown rice) เป็นแหล่งสะสมสารต่าง ๆ ที่สำคัญ เช่น แกมมาออริซานอล (gamma-oryzanol) โทโคฟีรอล (tocopherol) โทโคไตรอีนอล (tocotrienol) และ โดยเฉพาะ สารแกมมาอะมิโนบิวทิริกแอซิด หรือที่รู้จักกันว่า สารกาบา (gamma-aminobutyric acid, GABA) ที่เพิ่มขึ้นถึงเกือบ 10 เท่า ใยอาหาร วิตามินอี ไลซีน และไนอะซินเพิ่มขึ้นเกือบ 4 เท่า อีกทั้งวิตามินบี 1 และแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า (Kayahara and Tsukahara, 2000) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวขาว ข้าวกล้องงอกเมื่อหุงแล้วมีลักษณะนุ่ม และมีรสชาติหวาน ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกเป็นนวัตกรรมหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจจากผู้ประกอบการภาคเอกชนทั้งไทย และต่างประเทศเป็นอย่างมาก สารกาบาในข้าวกล้องงอกเป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้งโดยจะทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้นซึ่งช่วยทำให้สมองเกิดการผ่อนคลาย และนอนหลับ และช่วยป้องกันโรคต่าง ๆ เช่น โรคมะเร็ง เบาหวาน และช่วยในการควบคุมน้ำหนักตัว ปริมาณกาบาที่พบในข้าวกล้องงอกจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของข้าว

ปัจจุบันนี้พฤติกรรมการใช้ชีวิตของคนในสังคมเมืองเป็นแบบเร่งรีบ ส่งผลให้พฤติกรรมในการบริโภคอาหารเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ต้องการความสะดวกรวดเร็ว การบริโภคผลิตภัณฑ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ต้องแปลงเนื้อหา และต้องพึ่งองค์ความรู้ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ สำเร็จรูป หรือก็สำเร็จรูปจึงได้รับการนิยมเพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษากระบวนการผลิต

ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป โดยเฉพาะอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งประกอบด้วยวิธีการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดไคซ์เบด ส่วนการวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ได้แก่ ความขาว ความหนาแน่นรวม อัตราการดูดน้ำกลับ อัตราการเพิ่มปริมาตร เนื้อสัมผัส และทดสอบประสาทสัมผัส

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การผลิตข้าวกล้องงอกจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 โดยใช้วิธีการแช่น้ำ และการบ่ม
2. วิธีการทำข้าวกล้องงอกให้สุก คือการนึ่งด้วยไอน้ำ และการแช่น้ำร้อน
3. การอบแห้งข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดไคซ์เบด
4. การคืนรูปข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยวิธีไมโครเวฟ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้ของอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป สำหรับการออกแบบ การควบคุม และการปฏิบัติที่สภาวะเหมาะสมของกระบวนการอบแห้ง
2. สมการที่เหมาะสมสำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่มีความถูกต้องและแม่นยำ
3. การเข้าใจการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปในกระบวนการอบแห้ง
4. คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการคืนรูปด้วยวิธีไมโครเวฟใกล้เคียง หรือดีกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในแถบภูมิภาคเอเชียที่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารหลักมากกว่าในภูมิภาคอื่น ๆ ของโลก การผลิต การบริโภค และการค้าข้าวส่วนใหญ่จึงอยู่ในทวีปเอเชีย ซึ่งข้าวที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะใช้ในการบริโภคภายในประเทศ สำหรับประเทศไทย ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทยเป็นทั้งอาหารหลัก และแหล่งที่มาของเงินตราต่างประเทศประเทศไทยส่งออกข้าวเป็นอันดับ 1 ของโลก ตั้งแต่ปี 2524 ถึงปัจจุบัน (สำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ) โดยในปีพ.ศ. 2554 ปริมาณการส่งออกข้าวของไทยประมาณ 10 ล้านตัน เป็นสัดส่วนของร้อยละ 30 ของการส่งออกข้าวทั้งหมดทั่วโลก (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2554) โดยประเทศที่มีบทบาทในการส่งออกข้าวรองจากประเทศไทยได้แก่ เวียดนาม สหรัฐอเมริกา ปากีสถาน อินเดีย และกัมพูชา ตามลำดับ (กรมการข้าว, 2554) คิดเป็นมูลค่าการส่งออกในปี พ.ศ. 2554 ประมาณ 190,291 ล้านบาท (กรมการค้าต่างประเทศ, 2554)

2.1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้าที่สามารถกินเมล็ดได้ ถือเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่นเดียวกับหญ้า ต้นข้าวมีลักษณะภายนอกบางอย่าง เช่น ใบ กาบใบ ลำต้น และรากคล้ายต้นหญ้า เมล็ดข้าว (rice grain) เป็นผลชนิด caryopsis เนื่องจากส่วนที่เป็นเมล็ดเดี่ยว (single seed) ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล (pericarp)

เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนใหญ่อะไร 2 ส่วนคือ

1. ส่วนที่ห่อหุ้ม เรียกว่า แกลบ (hull)
2. ส่วนที่รับประทานได้ เรียกว่า ข้าวกล้อง (brown rice)

ข้าวกล้องหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออกแล้ว ประกอบด้วย

ก. เยื่อหุ้มผล (pericarp) หรือ fruit coat ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้นด้วยกัน คือ epicarp, mesocarp และ endocarp pericarp

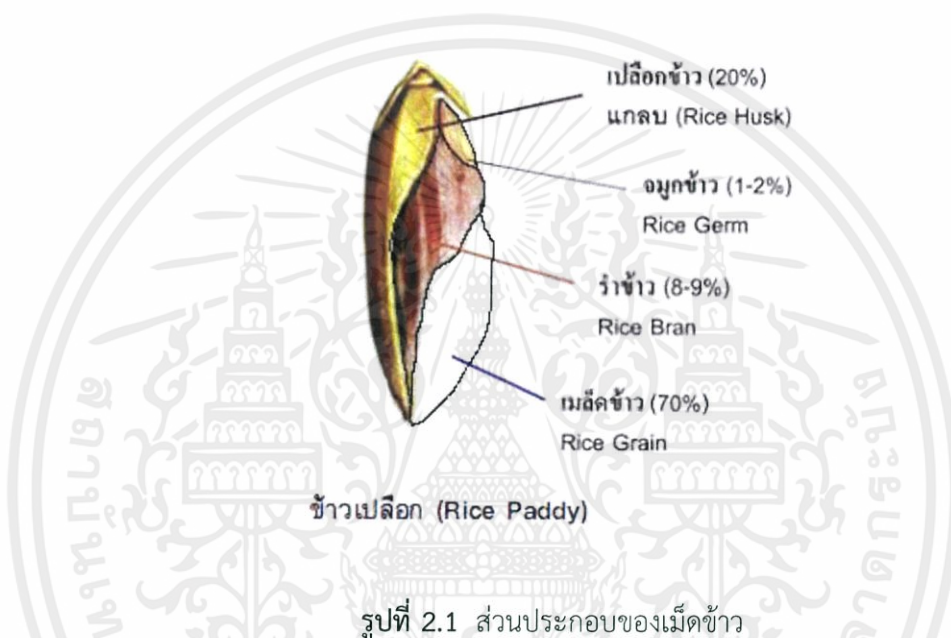
ข. เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seed coat) อยู่ถัดจาก pericarp เข้าไป ประกอบด้วย เนื้อเยื่อสองชั้นเรียงกันเป็นแถวเป็นที่อยู่ของสารประเภทไขมัน

ค. เยื่ออาลูโรน (aleurone) อยู่ต่อจากเยื่อหุ้มเมล็ดห่อหุ้ม ข้าวสาร (starchy endosperm) และคัพภะ (embryo) เยื่ออาลูโรนมีโปรตีนสูง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย น้ำมัน และเซลล์ลูโลส

ง. ส่วนที่เป็นแป้ง (starch endosperm) หรือส่วนที่เป็นข้าวสาร อยู่ชั้นในสุดของเมล็ดประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่ และมีโปรตีนอยู่บ้าง แป้งในเมล็ดข้าวมี 2 ชนิด คืออะไมโลเพกทิน (amylopectin) และ อะไมโลส (amylose)

ส่วนประกอบของแป้งทั้ง 2 ชนิด มีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามชนิดข้าว ในข้าวเหนียวจะมีอะไมโลสอยู่ประมาณ 0-2% ส่วนที่เหลือเป็นอะไมโลเพคตินข้าวเจ้ามีอะไมโลสมากกว่า คือ ประมาณ 7-33% ของน้ำหนักข้าวสาร

จ. คัพภะ (embryo) อยู่ติดกับ เอ็นโดสเปิร์ม (endosperm) ทางด้าน lemma เป็นส่วนที่จะเจริญเป็นต้นต่อไป คัพภะประกอบด้วย ต้นอ่อน (plumule) รากอ่อน (radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (coleoptile) เยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhiza) ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (scutellum) คัพภะเป็นส่วนที่มี โปรตีนและไขมันสูง



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว

2.1.2 ข้าวปทุมธานี 1

เป็นข้าวเจ้าที่มีคุณภาพใกล้เคียงข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 เมื่อสีแล้วได้ข้าวสารเมล็ดเรียวยาว หุงสุกแล้วนุ่มเหนียวเหมือนข้าวหอมมะลิ 105 แต่กลิ่นหอมจะน้อยกว่า ข้าวปทุมธานี 1 จัดเป็นข้าวที่มีอะไมโลสต่ำ คือประมาณ 15-19% ทำให้ข้าวสุกมีความอ่อนนุ่มให้แก่ผู้บริโภค

2.1.3 ข้าวกล้อง

คือ ข้าวที่สีเอาเปลือก (แกลบ) ออกโดยที่ยังมีจมูกข้าว และเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว (รำ) อยู่ ข้าวกล้องมีสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งจมูกข้าว และเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวนี้มีคุณค่าอาหารที่มีประโยชน์มาก สำหรับข้าวขาวที่นิยมรับประทาน เป็นข้าวที่เกิดจากการขัดสีหลาย ๆ ครั้ง จนเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว และจมูกข้าวหลุดออกไป จนเหลือแต่เนื้อในของข้าว ข้าวกล้องบางคนเรียกกันติดปากว่า ข้าวซ้อมมือ หรือข้าวแดง เนื่องจากในสมัยโบราณ ชาวบ้านใช้วิธีตำข้าวกินกันเอง จึงเรียกว่า ข้าวซ้อมมือ แต่ปัจจุบันใช้เครื่องจักรสีข้าวแทน จึงเรียกข้าวที่สีเอาเปลือกออกนี้ว่า ข้าวกล้อง ข้าวกล้องมีโปรตีนประมาณ 7-12% (ขึ้นอยู่กับชนิด) นักค้นคว้าชื่อ โรสเดล (Rosedale) ได้วิเคราะห์ว่า การขัดสีข้าวกล้องจนมีสีขาวไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามเด็ดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป จะทำให้โปรตีนสูญหายไปประมาณ 30%

2.1.4 ข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอก คือ ข้าวกล้องที่นำมาผ่านกระบวนการงอก โดยการนำข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกไม่นานเกิน 2 สัปดาห์ แช่น้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิ การไหลเวียนน้ำ ความดัน และความเป็นกรดต่างเป็นเวลา 48-72 ชั่วโมง น้ำจะไปกระตุ้นเอนไซม์ในเมล็ดข้าวกล้องทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอาหารในเมล็ดข้าว ได้เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง เช่น โอลิโกแซคคาไรด์ กลูโคส และฟรุคโตส จากคาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโน และเปปไทด์ จากโปรตีน รวมทั้งยังพบการการสะสมสารเคมีสำคัญต่างๆ เช่น แกมมาออริซานอล โทโคฟีรอล โทโคไตรอีนอล โดยเฉพาะสารแกมมาอะมิโนบิวทีริกแอซิด หรือที่รู้จักกันว่า สารกาบา ซึ่งพบว่าข้าวกล้องงอกมีสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 15 เท่า คือ มีปริมาณสารกาบาโดยเฉลี่ย 15-20 มิลลิกรัมต่อข้าวกล้องงอก 100 กรัม

สารกาบา เกิดจากกระบวนการดีคาร์บอกซิเดชันกรดกลูตามิก กรดนี้มีความสำคัญในการทำหน้าที่สารสื่อประสาท (neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง และสารกาบายังเป็นสารสื่อประสาทประเภท สารยับยั้ง (inhibitor) โดยจะทำหน้าที่รักษาสสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้น ช่วยให้สมองผ่อนคลาย และนอนหลับสบาย อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (anterior pituitary) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต (HGH) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อกระชับ และเกิดสารไลโปโทรปิก (lipotropic) ป้องกันการสะสมไขมัน

2.1.5 ข้าวหุงสุกไว (Quick cooking rice)

ข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยต้มในน้ำร้อน หรือไอน้ำร้อน เพื่อให้ข้าวสุกถึงระดับหนึ่ง โดยการสุกเพียงบางส่วน (partially gelatinized) แล้วทำให้แห้งโดยมีโครงสร้างที่มีรูพรุน (porous structure) เพื่อให้ดูดน้ำกลับได้ง่าย และใช้ระยะเวลาสั้นเพียง 10-15 นาที ในการเตรียมก่อนรับประทาน

2.1.6 ข้าวกึ่งสำเร็จรูป (Instant rice)

พัฒนากรรมวิธีการผลิตมาจากข้าวหุงสุกไว โดยในขั้นตอนการทำให้สุกอาจใช้น้ำร้อน ไอน้ำ หรือทั้ง 2 วิธี ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการสุกแบบสมบูรณ์ (complete gelatinized or fully gelatinized) และใช้ระยะเวลาสั้นเพียง 5 นาที ในการเตรียมก่อนรับประทานโดยการเติมน้ำเดือด ข้าวหุงสุกไว หรือข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ดีควรแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อนซึ่งขั้นตอนการแปรรูปวิธีการที่หลากหลายโดยงามซัน คองเสรี (2003) ได้รวบรวมข้อมูลไว้ดังนี้

1. การแช่น้ำ-ต้ม-นึ่ง-อบแห้ง (Soak-boil-steam-dry) แช่ข้าวให้มีความชื้น 30% ต้มในน้ำเดือดจนความชื้น 50-60% แล้วต้ม หรือนึ่งต่อไปให้มีความชื้น 60-70% แล้วจึงทำการลดความชื้นอย่างระมัดระวังเพื่อรักษาารูพรุนของเมล็ดไว้

2. การทำให้ข้าวขยายตัว (Expanded and pregelatinize rice) แช่ข้าวสารแล้วนึ่ง หรือต้มที่ความดันสูงจนข้าวสุกแล้วจึงลดความชื้นจะได้เมล็ดใสแก่หลังจากนั้นจึงทำให้เมล็ดพอง (Puffed) โดยใช้ความร้อนสูง

3. การเตรียมข้าวด้วยการรีด หรือตำ (Rodling or bumping treatment) ต้มข้าวให้สุกแล้วตำ หรือผ่านลูกกลิ้งให้เมล็ดแบนก่อนลดความชื้น
4. การเตรียมข้าวด้วยการผ่านลมร้อนขณะแห้ง (Dryheat treatment) ใช้ลมร้อนเป่าข้าวที่ $65-82^{\circ}\text{C}$ นาน 10-13 นาที หรือ 272°C เวลา 18 วินาที เพื่อให้เมล็ดข้าวเกิดรอยร้าว และขยายตัวเพื่อช่วยลดระยะเวลาแห้ง
5. การเตรียมข้าวด้วยการแช่แข็งแล้วละลายน้ำแข็ง (Freeze-thaw process) ต้มข้าวให้สุกแล้วนำไปแช่แข็งละลายน้ำแข็งแล้วจึงลดความชื้น
6. การทำให้ข้าวพองตัว (Gun puffing) เพิ่มความชื้นเมล็ดข้าวให้อยู่ในระดับ 20-22% แล้วนึ่งในหม้อความดันสูง (Retort) ที่ 3.5-5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร นาน 5-10 นาที แล้วทำให้เมล็ดข้าวพองโดยลดความดันลงอยู่ในระดับบรรยากาศ หรือต่ำกว่าสภาพที่เหมาะสม คือที่อุณหภูมิ 165°C ที่ระดับความชื้น 20-25%
7. การทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying) แช่แข็งข้าวสุกแล้วทำให้น้ำระเหิดหายไปในสภาพอุณหภูมิต่ำ (Freeze-dry)
8. การเตรียมข้าวด้วยการใช้สารเคมี (Chemical treatment) ก่อนผ่านขบวนการต่างๆ ลดการเกาะตัวระหว่างเมล็ดข้าวสุกโดยแช่ในสารละลาย เช่น Sodium chloride disodium phosphate หรือสาร Surfactant ที่อยู่ในระดับ Food grade

2.2 องค์ประกอบ และคุณค่าทางโภชนาการของข้าว

จากลักษณะทั่วไปของข้าวซึ่งเป็นพืชเมล็ดที่มีเปลือกหุ้มอยู่เรียกว่า ข้าวเปลือก โดยก่อนที่จะเป็นข้าวสารต้องผ่านกรรมวิธีแยกเปลือกออกเรียกว่า กรรมวิธีสีข้าว

ข้าวกล้อง (Brown rice) เป็นข้าวที่ผ่านกรรมวิธีขัดสีข้างต้น คือ เปลือกจะถูกแกะเทาะแตก และหลุดออกไป แต่ยังคงมีจมูกข้าว และเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวติดอยู่ สีผิวของเมล็ดข้าวมีสีน้ำตาลปนแดงข้าวชนิดนี้จึงอุดมด้วยสารอาหารต่าง ๆ อยู่มาก

ข้าวซ้อมมือ คือ ข้าวกล้องประเภทหนึ่งที่มีการแกะเปลือกด้วยวิธีการตำด้วยครกกระเดื่องของชาวบ้าน ข้าวซ้อมมือจึงอาจมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์มากนัก รำบางส่วนอาจหลุดออกไปเนื่องจากการตำ แต่ข้าวซ้อมมือยังคงอุดมด้วยสารอาหารนานาชนิดเช่นกัน บางคนเรียกข้าวซ้อมมือว่าข้าวอนามัย

ข้าวขัดสีหรือข้าวขาว (polished or milled rice) เป็นข้าวที่ผ่านกรรมวิธีขัดสีหลายครั้ง ทำให้เยื่อหุ้มเมล็ด และจมูกข้าวหลุดออกไปเหลือเฉพาะเมล็ดสีขาวจึงมีคุณค่าทางโภชนาการลดลงคุณค่าทางโภชนาการของข้าวแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2.1 โดยมีส่วนประกอบหลักดังนี้

1. คาร์โบไฮเดรต ข้าวทุกชนิดมีคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบร้อยละ 70-80 ซึ่งเป็นแป้งเกือบทั้งหมด มีน้ำตาลซูโครส และเดกซ์ตริน เล็กน้อย เมื่อคาร์โบไฮเดรตถูกเผาผลาญจะให้พลังงานแก่ร่างกายซึ่งถ้ามีมากเกินไปความต้องการของร่างกายจะถูกเปลี่ยนไปสะสมในรูปของไขมัน

2. โปรตีน ธัญพืชส่วนมากจะมีโปรตีนไม่มาก คือ ข้าวเจ้ามีร้อยละ 7-8 ข้าวสาลีมีร้อยละ 11-12 โปรตีนจากพืชเป็นโปรตีนที่ไม่สมบูรณ์ เพราะมีกรดอะมิโนชนิดจำเป็นไม่เพียงพอ จึงควรรับประทานโปรตีนจากอาหารชั้นดีจำพวกเนื้อสัตว์ ไข่ นม และถั่วต่างๆ
3. ไขมัน ข้าวกล้องมีปริมาณไขมันสูงกว่าข้าวขาว เพราะข้าวกล้องยังมีส่วนของรำข้าวอยู่ แต่เมื่อเทียบกับอาหารชนิดอื่นๆ ข้าวไม่ใช่แหล่งที่อุดมด้วยสารอาหารจำพวกไขมัน แต่ไขมันในข้าวกล้องเป็นไขมันชนิดที่ดี เพราะไม่มีโคเลสเตอรอลเหมือนไขมันจากสัตว์
4. โยอาหาร ข้าวกล้องมีใยอาหารสูงกว่าข้าวขาว โยอาหารมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายโดยมีสมบัติอุ้มน้ำจึงช่วยเพิ่มเนื้ออุจจาระ และทำให้อุจจาระนิ่ม ถ่ายง่าย นอกจากนี้การรับประทานข้าวกล้องจะช่วยให้อิ่มเร็ว และอิ่มนาน เพราะใยอาหารจะเข้าไปแทนที่ในกระเพาะ และต้องใช้เวลาในการย่อยนานกว่าจึงทำให้อยู่ท้องไม่ค่อยหิว ข้าวกล้องจึงเหมาะกับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนักด้วย
5. วิตามิน และแร่ธาตุ ข้าวกล้องมีวิตามิน และแร่ธาตุสูงกว่าข้าวขาวที่เห็นชัดเจน คือ โทอะมิน ไนอะซิน ฟอสฟอรัส และโปแทสเซียม

2.2.1 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้อง

วิตามินบีรวมช่วยป้องกัน และบรรเทาอาการอ่อนเพลีย แขน ขาไม่มีแรง ปวดกล้ามเนื้อ โรคผิวหนังบางชนิด บำรุงสมองทำให้เจริญอาหาร วิตามินบี 1 ซึ่งถ้ากินเป็นประจำจะช่วยป้องกันโรคเหน็บชาได้ วิตามินบี 2 ป้องกันโรคปากนกกระจอก ฟอสฟอรัส ช่วยในการเจริญเติบโตของกระดูก และฟัน แคลเซียม ทำให้กระดูกแข็งแรง ช่วยป้องกันไม่ให้เป็นตะคริว ทองแดง สร้างเม็ดโลหิต และเฮโมโกลบิน ธาตุเหล็ก ช่วยป้องกันโรคโลหิตจาง โปรตีน ช่วยเสริมสร้างส่วนที่สึกหรอ ไขมัน ให้พลังงานแก่ร่างกาย ไขมันในข้าวกล้องเป็นไขมันที่ดี ไม่มีโคเลสเตอรอล ไนอะซิน ช่วยระบบผิวหนังและเส้นประสาท และป้องกันโรคเพลลากรา (โรคที่เกิดจากการขาดไนอะซิน จะมีอาการท้องเสีย ประสาทไหว โรคผิวหนัง) คาร์โบไฮเดรต ให้พลังงานแก่ร่างกาย กากอาหาร ข้าวกล้องมีกากอาหารมาก ซึ่งจะทำให้ท้องไม่ผูก และช่วยป้องกันมะเร็งในลำไส้อีกด้วย วิตามิน และเกลือแร่ต่าง ๆ ในข้าวกล้องจะช่วยให้ส่วนต่าง ๆ ของร่างกายทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารอาหารต่อข้าวดิบ 100 กรัมของข้าวขาวกับข้าวกล้อง

| ปริมาณสารอาหารต่อข้าวดิบ 100 กรัม | ข้าวขาว | ข้าวกล้อง |
|-----------------------------------|---------|-----------|
| พลังงาน (กิโลแคลอรี) | 351 | 347 |
| โปรตีน (กรัม) | 6.7 | 7.1 |
| ไขมัน (กรัม) | 0.8 | 2.0 |
| คาร์โบไฮเดรต (กรัม) | 79.4 | 75.1 |
| ใยอาหาร (กรัม) | 0.7 | 2.1 |
| วิตามินบี 1 (มก.) | 0.07 | 0.26 |
| วิตามินบี 2 (มก.) | 0.02 | 0.04 |
| ไนอาซิน (มก.) | 1.79 | 5.40 |
| โซเดียม (มก.) | 79 | 84 |
| โพแทสเซียม (มก.) | 121 | 144 |
| แคลเซียม (มก.) | 6 | 9 |
| ฟอสฟอรัส (มก.) | 195 | 267 |
| แมกนีเซียม (มก.) | 27 | 60 |
| เหล็ก (มก.) | 1.2 | 1.3 |
| สังกะสี (มก.) | 0.48 | 0.49 |
| ทองแดง (มก.) | 0.14 | 0.11 |

ที่มา: สถาบันวิจัยโภชนาการมหาวิทยาลัยมหิดล

2.2.2 ผลดีของการรับประทานข้าวกล้องเป็นประจำ

โรค และอาการต่างๆ ต่อไปนี้ จะลดลงมาก หรือป้องกันได้ ถ้ากิน ข้าวกล้อง เป็นประจำ และกินอาหารเพียงพอ และถูกหลัก

1. โรคเหน็บชา เพราะขาดวิตามิน-บี 1 ข้าวกล้องมีวิตามิน-บี 1 มากกว่าข้าวขาว 385% (พบมากในประเทศที่กินข้าวขาวเป็นอาหารหลัก)
2. โรคปากนกกระจอก เพราะขาดวิตามิน-บี 2 ข้าวกล้องมีวิตามิน-บี 2 มากกว่าข้าวขาว 66% (ตามชนบทมีเด็กเป็นโรคปากนกกระจอก 60%)
3. โรคโลหิตจาง เพราะขาดธาตุเหล็ก เนื่องจากข้าวกล้องมีธาตุเหล็กมากกว่าข้าวขาว 2 เท่า (ประชากรไทยเป็นโรคโลหิตจาง 40%)
4. โรคผิวหนังกระเพาะปัสสาวะ (พบมากทางภาคเหนือ และภาคอีสาน โดยเฉพาะในเด็กอายุต่ำกว่า 6 ปี) เกี่ยวเนื่องจากการขาดธาตุฟอสฟอรัส และอื่นๆ ซึ่งมีในข้าวกล้อง นอกจากนั้นฟอสฟอรัส ยังช่วยในการเจริญเติบโตของกระดูก และฟันอีกด้วย
5. โรคท้องผูก เพราะมีกากอาหารน้อย ข้าวกล้องมีกากอาหารมากกว่า 133% (ข้าวกล้องช่วยป้องกัน

ท้องผูก และมะเร็งลำไส้ใหญ่)

6. โรคทางระบบประสาทบางชนิด และโรคปลายประสาทอักเสบ เพราะขาดวิตามินบีรวม ซึ่งมีมากในข้าวกล้อง (วิตามินบีรวม ช่วยบำรุงสมอง ทำให้เรียนเก่งขึ้น และเจริญอาหาร)
7. อารมณ์เสี้ง่ายกว่า หงุดหงิด เพราะขาดวิตามินบีรวม ซึ่งเป็นวิตามินที่เสริมสร้างระบบประสาทของร่างกาย และถ้าระบบประสาทของเราไม่ดี ทำให้เราควบคุมอารมณ์ได้ไม่ตึง
8. เบื่ออาหาร เพราะขาดวิตามินบีรวม ซึ่งข้าวกล้องมีมากกว่าข้าวขาว
9. โรคขาดโปรตีน ข้าวกล้องมีโปรตีน ร้อยละ 7-12 (เด็กไทยประมาณร้อยละ 40-60 เป็นโรคขาดโปรตีน และพลังงาน) ข้าวกล้องมีโปรตีนมากกว่าข้าวขาว 20-30%
10. โรคผิวหนังบางชนิด ขาดวิตามินบีบางตัว
11. อ่อนเพลีย รู้สึกเหนื่อยกว่าปกติ ปวดเมื่อยตามตัว และชา เพราะขาดวิตามินบีรวม
12. โรคซั๊ก เนื่องจากขาดวิตามิน บี 6 ซึ่งมีมากในข้าวกล้อง
13. ข้าวขาวมีแป้ง (คาร์โบไฮเดรต) พอ ๆ กับข้าวกล้อง แต่มีเกลือแร่ และวิตามินต่าง ๆ น้อยกว่าข้าวกล้อง
14. (ในข้าวกล้องจะมีวิตามินรวมกัน 20 กว่าชนิด) ที่ทำให้ส่วนต่างๆ ของร่างกายทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และเสริมสร้างร่างกายให้สมบูรณ์

2.2.3 ประโยชน์ของข้าวกล้องงอก

1. มีสารต้านอนุมูลอิสระกลุ่มฟีนอลิก ช่วยยับยั้งการเกิดฝ้า ชะลอความแก่
2. สารออริซานอล ช่วยควบคุมระดับอาการผิดปกติของวัยทอง
3. สารกาบา ช่วยป้องกันโรคอัลไซเมอร์ (ความจำเสื่อม) ช่วยผ่อนคลาย ทำให้จิตใจสงบ หลับสบาย ลดความเครียดวิตกกังวล ลดความดันโลหิต
4. กากใยอาหาร (food fiber) ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันมะเร็งลำไส้ และลดอาการท้องผูก
5. วิตามินอี (vitamin E) ลดการเหี่ยวย่นของผิว

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

Seigo (2007) นำข้าวเปลือกมาแกะเทาะเปลือกได้เป็นข้าวกล้องหลังจากนั้นแช่น้ำที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 ชั่วโมง ข้าวกล้องจะมีรากงอกขึ้นมา

ดรุณี ปันคำ และคณะ (2009) ข้าวเปลือกพันธุ์หอมมะลิพันธุ์ 105 ไปสีเป็นข้าวกล้องจากนั้นนำข้าวกล้องมาแช่น้ำเป็นเวลา 12-48 ชั่วโมง ที่ระดับ pH 4-8 ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ข้าวมีความชื้นไม่ต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ จนข้าวกล้องมีรากงอกประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร

ไม่ว่ากรณีใด นฤบดี ศรีสังข์ และคณะ (2009) ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (KMDL-105) นำมาแกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องแกะเทาะเปลือก ได้ข้าวกล้องหอมมะลิ 105 นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา

36 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 ชั่วโมง ข้าวกล้องภายหลังจากแช่น้ำจะเกิดการงอกบริเวณจุกข้าวขนาดเล็กประมาณ 0.5-2 มิลลิเมตร

สมเกียรติ ปรัชญาวารากร และคณะ (2009) ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (KMDL-105) นำมาแกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องแกะเปลือก ได้ข้าวกล้องหอมมะลิ 105 นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 ชั่วโมง ข้าวกล้องภายหลังจากแช่น้ำจะเกิดการงอกบริเวณจุกข้าวขนาดเล็กประมาณ 0.5-2 มิลลิเมตร

ชาญวิทย์ รัตนาศรี (2009) เริ่มกระบวนการโดยนำข้าวเปลือกที่เตรียมไว้มาแช่น้ำในอุณหภูมิ 40°C ทำการแช่ข้าวเปลือกนาน 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำมาที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% อุณหภูมิ 40°C ทำการเพาะข้าวเปลือกให้งอกนาน 24 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นรากงอกออกมาจากเมล็ดข้าวเปลือกประมาณ 2 เซนติเมตร

วารุณี วารัญญานนท์ และคณะ (2010) ข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 ถูกนำมาแกะเทาะเป็นข้าวกล้อง จากนั้นนำข้าวกล้องไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง และมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 ชั่วโมง ข้าวกล้องภายหลังจากแช่น้ำจะเกิดการงอกบริเวณจุกข้าวขนาดเล็กประมาณ 0.5-2 มิลลิเมตร

Anuchita Tungtrakul (2010) ข้าวกล้องแช่น้ำที่อุณหภูมิ 28-30°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำข้าวกล้องไปกระจายบนผ้าขาวบาง และวางไว้ในตะกร้าพลาสติกที่มีผ้าขาวบางปิดอีกชั้นทิ้งให้งอกเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 28-30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90-95%

เทวีกา กิรติบุรณะ และวรนุช ศรีเจษฎารักษ์ (2011) โดยนำข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 มาผ่านการแช่น้ำ Reverse osmosis ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำคือ 1:2 จากนั้นนำไปเพาะงอกที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 25 ชั่วโมง

Ekkapong Cheevitsopona and Athapol Noomhorm (2011) โดยนำข้าวหอมมะลิ 105 มาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บ่มที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 ชั่วโมง

Swati Suwannaporn (2011) ข้าวกล้องมาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 21 ชั่วโมง และมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 3 ชั่วโมง

กันทรီ ฤทธิ์เรืองเดช และคณะ (2011) นำข้าวกล้องพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนข้าวมีรากงอกประมาณ 0.5-1 มิลลิเมตร

2.3.2 กระบวนการผลิตข้าวหุงสุก

วารากรณ์ ประเสริฐ และคณะ (2003) ได้ศึกษาผลของกระบวนการผลิตต่อสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูปซึ่งใช้ข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 มาแช่น้ำให้ได้ความชื้น 35-60% (w.b.) หลังจากนั้นแช่ข้าวที่ความดัน 11.6-28.4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วนำมาอบแห้ง

พรทิพย์ ศิริสุนทรลักษณ์ และคณะ (2009) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องหุงสุกเร็วด้วยวิธีการแช่น้ำโดยใช้ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มาแช่น้ำด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:2 (w/w) วางในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง ($30\pm 2^{\circ}\text{C}$) นาน 3 ชั่วโมง 40°C นาน 1 ชั่วโมง และ 60°C น้อยกว่า 1 ชั่วโมง จนข้าวมีความชื้น 30% จากนั้นเทข้าวที่ผ่านการแช่น้ำแล้วลงบนตะแกรง สะเด็ดน้ำ 5 นาที แล้วนำไปต้มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C โดยใช้อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำเป็น 1:5 (w/w) จนข้าวสุก 80% นำข้าวสุกมาล้างด้วยน้ำเย็นทันที จากนั้นนำไปทำแห้ง

วรรณดี วารัญญานนท์ และคณะ (2009) นำข้าวผ่านการให้ความร้อนขั้นต้น (pre-heat) โดยอบข้าวหอมมะลิ ในตู้อบลมร้อนที่ 120°C นาน 15 นาที จากนั้นนำข้าวมาแช่ (soak) ในน้ำร้อนปริมาณ 5-6 เท่าของน้ำหนักข้าวเริ่มต้นที่อุณหภูมิ $85-90^{\circ}\text{C}$ นาน 15 นาที การให้ความร้อนขั้นต้นเป็นการอบข้าวให้เกิดรอยร้าวเล็ก ซึ่งจะทำให้ข้าวดูดซึมน้ำได้ดีใน จากนั้นแช่ข้าวในน้ำร้อนปริมาณ 5-6 เท่าของน้ำหนักข้าวเริ่มต้นที่อุณหภูมิ $85-90^{\circ}\text{C}$ นาน 15 นาที เพื่อให้ข้าวเกิดเจล เมล็ดข้าวเกิดการสุกบางส่วน (partial gelatinized) นำมาหุงสุก (Cooking) ด้วยวิธีการนึ่ง (steam) ใช้เวลานึ่งประมาณ 8-10 นาที จากนั้น ลดอุณหภูมิโดยแช่ข้าวในน้ำที่เย็นจัดที่อุณหภูมิ $0-2^{\circ}\text{C}$ นาน 30 วินาที และนำไปอบแห้ง

Jiraporn Sripinyowanich (2010) ได้ศึกษาการประยุกต์การอบแห้งไมโครเวฟ-ไวโบริ-ฟลูอิดซ์เบดในการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปโดยใช้ข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 แช่น้ำที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นจะมี 3 วิธี คือ 1. การต้มในน้ำเดือด 15 นาที 2. การหุงในหม้อหุงข้าวอัตโนมัติโดยล้างน้ำ 3 ครั้ง 3. ใช้วิธีการแช่ไอน้ำสองรอบโดยข้าวที่ผ่านการแช่น้ำมานึ่งในหม้อไอน้ำ 5 นาที แล้วแช่น้ำอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 5 นาที และนึ่งเป็นเวลา 10 นาที เมื่อทำทั้ง 3 วิธีแล้วนำไปอบแห้ง

Orrawan Rewthong และคณะ (2011) ได้ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการพuffing ต่อลักษณะคุณภาพของข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูปโดยใช้ข้าวกล้องจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นวัตถุดิบในการทดลอง โดยในขั้นแรกนำข้าวกล้องแช่ในน้ำอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำไปหุง จากนั้นทำการหุงโดยวิธีการต้มแบบใส่น้ำพอดี เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการหุงแล้วนำข้าวกล้องหุงสุกที่ได้มาอบแห้ง

2.3.3 กระบวนการกึ่งสำเร็จรูป

นฤบดี ศรีสังข์ และคณะ (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของตัวกลางการอบแห้ง และอุณหภูมิมอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดแบบอากาศร้อน (HA) โดยใช้ข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 ตัวอย่างของข้าวกล้องงอกประมาณ 1.5 กิโลกรัม อบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 130 และ 150°C ด้วยความเร็วอากาศ 3.5 เมตรต่อวินาที ที่ความสูงเบด 10 เซนติเมตร ตัวอย่างข้าวภายหลังการอบแห้งถูกนำมาเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลาประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นตัวอย่างข้าวถูกนำมาเป่าลมด้วยอากาศแวดล้อม เป็นเวลา 30 นาที จนกระทั่งมีความชื้นลดลงมาเหลือ 13-15% (d.b.) จากนั้นนำตัวอย่างข้าวไปเก็บที่อุณหภูมิ $4-6^{\circ}\text{C}$ เพื่อรอการทดสอบคุณภาพ โดยข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบอากาศร้อนจะมีลักษณะแตกร้าวมาก ปริมาณมาก ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก

ดารุณี ปันคำ และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการผลิตข้าวกล้องหุงสุกเร็ว โดยการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไบท เป็นการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิร้อนถึง 180°C เป่าขึ้นมาจากตัวเครื่องสัมผัสกับข้าวที่อยู่ในโถแก้วระบอบแบบเปิด ทำให้ความชื้นในข้าวระเหยได้ดี ซึ่งจะใช้เวลาในการระเหยน้าเร็วกว่าใช้เครื่องอบแห้งแบบถาด ระยะเวลาที่ใช้ในการอบข้าวจะขึ้นกับปริมาณข้าวที่อบแห้งด้วย และมีความชื้นสุดท้ายอยู่ระหว่าง 8-12% และมีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.3-0.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนข้าวกล้องปกติจะมีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งข้าวที่มีค่าความหนาแน่นต่ำแสดงว่ามีความพรุนมากสามารถคืนรูปได้ดีกว่าข้าวที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งเมื่อนำข้าวมาคืนรูปจะใช้เวลาในการคืนรูปประมาณ 5-8 นาที ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวจะมีความเหนียวนุ่ม

งามชื่น คงเสรี และคณะ (2009) ศึกษาการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูป โดยการอบแห้งข้าวด้วยเครื่องฟลูอิดไบทมาใช้ในการลดความชื้น เป็นเทคนิคการลดความชื้นที่มีลมเป่าจากด้านล่างทำให้ผลิตภัณฑ์ลอยตัวขึ้นเป็นอิสระช่วยให้การลดความชื้นที่มีลมเป่าจากด้านล่างทำให้ผลิตภัณฑ์ลอยตัวขึ้นเป็นอิสระช่วยให้การลดความชื้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และรวดเร็ว จากการลดความชื้นที่ 180°C พบว่า ข้าวดอกมะลิ 105 จะได้ผลผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูป 96.2% ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีความเหนียวมากเมื่อเป็นผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณข้าวหักมากถึง (44.3%) เนื่องจากเมล็ดข้าวสุกเหนียวเกาะติดกัน การพลิกกลับข้าวในระหว่างขบวนการผลิต เมล็ดข้าวเกิดการแตกหักมาก ข้าวดอกมะลิ 105 มีปริมาตร 225 มล./100 กก. แสดงว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวอัมัยโลสดำ เมื่อนำมาทำข้าวกล้องสำเร็จรูปจะมีการขยายปริมาตรน้อย การขึ้นฟูของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัมัยโลสของเมล็ดข้าว ทั้งนี้ อาจเนื่องจากปริมาณอัมัยโลสในเมล็ดข้าวมีผลให้ข้าวสุกร่วนซุย เมื่อทำการคืนรูปโดยแช่น้ำร้อนจัด ระยะเวลาในการคืนรูปที่เหมาะสมจนได้ข้าวสุกพร้อมรับประทาน โดยพิจารณาจากลักษณะ และความนุ่มของเมล็ด คือ 5 นาที

พรทิพย์ ศิริสุนทรลักษณ์ และคณะ (2009) ได้ศึกษาคูณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องหุงสุกเร็วด้วยวิธีการแช่น้ำโดยใช้ข้าวกล้องพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 การทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 90°C จะมีความชื้นภายหลังการทำแห้งอยู่ในช่วง 7-8% และมีค่าความหนาแน่น อยู่ในช่วง 0.87-0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าข้าวขาวหุงสุกเร็ว ข้าวกล้องหุงสุกเร็วที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องใช้เวลาคืนรูป 12 นาที ซึ่งนานกว่าเวลาคืนรูป 10 นาทีของข้าวกล้องหุงสุกเร็วที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิสูง (40 และ 60°C) ทั้งนี้เวลาคืนรูปของข้าวกล้องหุงสุกเร็วจากวิธีแช่น้ำน้อยกว่าข้าวกล้อง 1.7-2.0 เท่า และอุณหภูมิในการแช่น้ำไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองของข้าวกล้องหุงสุกเร็วก่อนคืนรูป และไม่พบความแตกต่างระหว่างค่าความเป็นสีเหลืองของข้าวกล้องหุงสุกเร็วหลังคืนรูป และข้าวกล้องสุก แม้ว่าข้าวกล้องหุงสุกเร็วมีอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงสุกไม่แตกต่างจากข้าวกล้องที่นำมาหุงสุกสภาวะเดียวกันแต่เช่นเดียวกับข้าวขาวหุงสุกเร็วที่ผ่านการแช่น้ำ ปริมาณของแข็งในน้ำที่เหลือจากการหุงต้มข้าวกล้องหุงสุกเร็วน้อยกว่าข้าวกล้องโดยเฉพาะเมื่อแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อนำข้าวกล้องหุงสุกเร็วมาคืนรูปด้วยการต้มในน้ำเดือด พบว่าความแข็งของข้าวกล้องหุงสุกเร็ว

จากวิธีการแช่น้ำมากกว่าข้าวกล้องสุกโดยความแข็งของข้าวกล้องหลังคั้นรูปเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการแช่น้ำ

นฤปดี ศรีสังข์ และคณะ (2009) ศึกษาการการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศร้อน ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการลดความชื้นอย่างรวดเร็วด้วยเวลาการอบแห้งที่สั้น นอกจากระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นลง วิธีการอบแห้งจะพิจารณาในเรื่องของสาร GABA ปริมาณของจุลินทรีย์ สมบัติของข้าวหุงสุก และการร้าวของเมล็ด เมล็ดข้าวกล้องหลังการอบแห้งจะลดความชื้นลงมาเหลือ 18-20% (d.b.) โดยใช้อุณหภูมิการอบอยู่ในช่วง 90-150°C หลังจากนั้นจึงนำมาเก็บในที่อับอากาศ และเป่าลมด้วยอากาศแวดล้อม จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 13-15% (d.b.) ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกมีการลดลงของความชื้นแบบ exponential ปริมาณสาร GABA ในข้าวกล้องงอกไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150°C เมล็ดข้าวจะมีการแตกร้าวอย่างรุนแรงซึ่งจะส่งผลต่อความแข็ง และการคงรูปของเมล็ดภายหลังการหุง

เทวีกา กิริติบุรณะ และคณะ (2011) ได้ศึกษาผลของการอบแห้งแบบถาดของข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 งอกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพโดยศึกษาผลของการทำแห้งข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60°C เป็นเวลา 10 12 และ 14 ชั่วโมงต่อปริมาณความชื้น และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิ และเวลามีผลต่อปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่อิทธิพลร่วมของอุณหภูมิ เวลา และปัจจัยที่เวลาไม่มีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เป็นที่น่าสังเกตว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณ GABA และ γ -tocopherol การอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 40°C เวลา 14 ชั่วโมงจะทำให้ข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณ GABA และ γ -tocopherol สูงสุด คือ 15.83 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 123.27 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมตามลำดับ ส่วนสภาวะที่มีกิจกรรมต้านออกซิเดชันที่วัดด้วยวิธี DPPH สูงที่สุด คือ อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

2.3.4 กระบวนการคั้นรูปข้าวกล้องสำเร็จรูป

วุฒิชัย นาครักษา (2003) ทำการศึกษาข้าวกล้องที่ได้สามารถคั้นรูปด้วยการเติมน้ำร้อน (ประมาณ 95°C) หรือเติมน้ำ แล้วนำเข้าเตาไมโครเวฟในระดับครัวเรือนได้เป็นข้าวกล้องพร้อมรับประทานด้วยระยะเวลาสั้นๆ (5-8 นาที)

งามชื่น คงเสรี และคณะ (2007) การผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปโดยการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 180°C จะมีความเหนียวมาก มีปริมาณข้าวหักมาก เนื่องจากเมล็ดข้าวสุกจะเหนียวติดกัน เมล็ดมีสีขาวขุ่นเล็กน้อย เมล็ดข้าวมีรูพรุนน้อย และมีปริมาตร 225 มิลลิลิตรต่อ 100 กิโลกรัม มีอัตราการดูดน้ำกลับ 2.10 เท่าของน้ำหนัก อัตราการขยายปริมาตร 1.2 เท่า การคั้นรูปด้วยน้ำร้อนจัดใช้

เอกสารนี้ เวลาคั้นรูป 5 นาที ทำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ดร.ณิ ปันคำ และคณะ (2009) กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกเร็วโดยการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 180°C จนกระทั่งความชื้นของข้าวเหลือประมาณ 8-12% ระยะเวลาที่ใช้ในการ

อบข้าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณข้าวที่อบแห้งด้วยข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีสีออกเหลืองเล็กน้อย มีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.3–0.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งข้าวที่มีค่าความหนาแน่นต่ำ แสดงว่ามีความพรุนมากสามารถคั้นรูปได้ดีกว่าข้าวที่มีค่าความหนาแน่นสูง และข้าวกล้องงอกหุงสุกเร็วมีค่าอัตราส่วนการดูดน้ำกลับประมาณ 3-3.5 เท่า เมื่อนำข้าวมาคั้นรูปจะใช้เวลาในการคั้นรูป ประมาณ 5-8 นาที ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวจะมีความเหนียวนุ่ม

พรทิพย์ ศิริสุนทรลักษณ์ และคณะ (2009) การพัฒนากระบวนการผลิตข้าวหุงสุกเร็วด้วยวิธีการ แช่น้ำ ซึ่งใช้การอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C จนข้าวมีปริมาณความชื้นสุดท้าย 7-10% (w.b.) ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.84-0.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมล็ดข้าวมีสีเหลืองเล็กน้อย และค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการแช่น้ำ ใช้เวลาในการคั้นรูป 5 นาที

2.3.5 กระบวนการวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

Tamaisuk (2003) พบว่าคุณภาพหลังการคั้นรูปของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้ง แบบตูบลมร้อน และแบบฟลูอิดไคซ์เบด มีค่าความขาวน้อยกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุก ส่วนข้าวกล้องที่ ผ่านการอบแห้งด้วยตูบลมร้อนมีค่าความขาวน้อยกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด

วิภาวดี สัจฉกิจ (2004) ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้จาก กระบวนการอบแห้ง 3 วิธี คือ การอบแห้งโดยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ การอบแห้งด้วยแผ่น ร้อนร่วมกับสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยลมร้อน จากการศึกษาในส่วนคุณภาพของข้าวกึ่ง สำเร็จรูปทั้งก่อนคั้นรูป และหลังคั้นรูปที่ได้จากการอบแห้งทั้ง 3 กรรมวิธีพบว่า ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้ จากข้าวที่ผ่านการหุงเป็นเวลานานมีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (ΔL^*) มาก และมีค่าอัตราการ ดูดน้ำคั้นสูง ขณะเดียวกันจะให้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเหลือง (Δb^*) น้อย และมีค่าความหนาแน่นโดยรวมน้อย เนื่องไขในการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปจากทั้ง 3 กรรมวิธีที่ให้ ข้าวหลังการคั้นรูปมีคุณภาพใกล้เคียงกับข้าวสุกทั่วไป พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนพบว่าได้คุณภาพ ของข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ดีกว่า เช่น คุณภาพด้านสีมีการเปลี่ยนแปลงน้อย มีความหนาแน่นโดยรวมน้อย และให้ข้าวที่มีอัตราการดูดน้ำคั้นที่สูง

วรารภรณ์ ประเสริฐ และปริศนาสุวรรณภรณ์ (2008) ศึกษาคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่ง สำเร็จรูปกับความชื้น เมื่อความชื้น และอุณหภูมิของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความ แข็ง และค่า chewiness ลดลงในขณะที่ความชื้นต่ำการเพิ่มความดันส่งผลให้ค่าดัชนีความขาว เพิ่มขึ้นในทางกลับกันเมื่อข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีความชื้นที่สูงการเพิ่มความดันทำให้ค่าดัชนี ความขาวลดลงความหนาแน่นอัตราการคั้นรูป และปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากความชื้น และ ความดันที่ใช้การผลิตเพราะทำให้เกิดรูพรุนในเมล็ดข้าว

B. Koc et al. (2008) ทำการศึกษาผลของวิธีการอบแห้ง เมื่อความหนาแน่นรวม ความหนาแน่น ของเนื้อสาร ความพรุน และการหดตัวของมะตูมที่ความชื้นต่างๆด้วยการอบแห้งวิธีที่แตกต่างกัน การอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด การอบแห้งถาดการอบแห้งแบบอินฟราเรด การอบแห้งแบบออสโมติกและ การอบแห้งเยือกแข็ง แล้วทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการมีความสัมพันธ์

คุณสมบัติข้างต้นด้วยความชื้นวัสดุ สำหรับความหนาแน่นของสารเป็นสมการไม่เชิงเส้นให้คาดการณ์ถูกต้องโดยไม่คำนึงถึงวิธีการของการอบแห้ง

Srisang et al. (2009) ทำการวิจัยการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยฟลูอิดซ์เบดแบบอากาศร้อน พบว่าตัวอย่างของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าความขาวมากกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

Prasert and Suwannaporn (2009) พบว่าตัวอย่างของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีอัตราการเพิ่มปริมาตรมากกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มปริมาตรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวในเมล็ดข้าว การดูดซึมน้ำมากขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการเพิ่มปริมาตรมาก

พรทิพย์ ศิริสุนทรลักษณ์ และคณะ (2009) ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยประเมินด้วยผู้ชิมกึ่งฝึกฝนซึ่งเป็นนิสิตสาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร และโภชนาการมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจำนวน 30 คน โดยใช้การประเมินความชอบแบบแบ่งสเกล 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) (1 หมายถึงชอบน้อยที่สุด 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) โดยคุณภาพข้าวกล้องหุงสุกเร็วก่อนคั้นรูปที่ประเมิน ได้แก่ ลักษณะปรากฏสีกลิ่น และการยอมรับโดยรวม และคุณภาพข้าวกล้องหุงสุกเร็วหลังคั้นรูปที่ประเมิน ได้แก่ สี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม

จารุวรรณ บางแว และคณะ (2010) ศึกษาสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline:2AP ในข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 โดยเทคนิค NIR Spectroscopy พบว่าเมื่อได้รับความร้อน หรือเก็บไว้เป็นเวลานานความหอมจะสูญเสียได้ง่าย

Jiraporn Sripinyowanich (2011) ทำการศึกษาอัตราการดูดน้ำกลับกับการอบแห้งข้าวขาวหุงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ช่วงอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าตัวอย่างของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีอัตราการดูดน้ำกลับมากกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการดูดน้ำกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวในเมล็ดข้าวส่งผลให้มีอัตราการดูดน้ำกลับมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

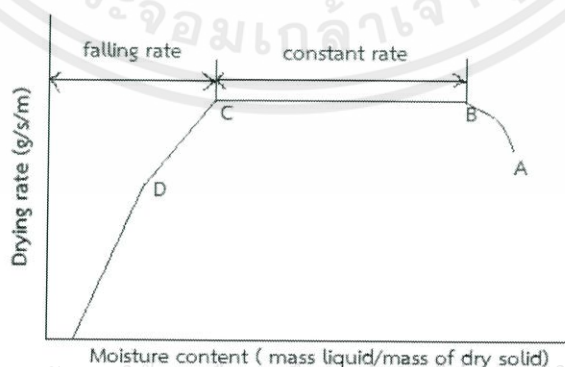
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย เนื่องจากกระบวนการอบแห้งอาหารเกี่ยวข้องกับทั้งการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อน มวลที่ถ่ายเทระหว่างการทำให้แห้งอาหารส่วนใหญ่ คือ น้ำที่มีอยู่ในอาหาร ระหว่างการอบแห้งอาหารจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆขึ้นมากมายทั้งที่ต้องการ และที่ไม่ต้องการ การทำให้แห้งอาหารที่มีประสิทธิภาพสูงต้องคำนึงถึงคุณภาพของอาหารที่ได้หลังจากการทำให้แห้ง เช่น การนำมาคืนตัว (rehydration) ด้วยการดูดน้ำกลับเข้าไปใหม่ คุณค่าทางโภชนาการ สี กลิ่นรส รสชาติเนื้อสัมผัส รูปทรง อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น

3.1.1 หลักการอบแห้ง

เป็นกระบวนการลดความชื้นวัสดุจนถึงระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เพื่อให้วัสดุมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาด้วยการถ่ายเทความร้อน และมวลสารไปพร้อมๆ กัน โดยทั่วไปแล้วการทำให้แห้งมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง (Drying medium) ในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุ ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออัตราการทำให้แห้งจึง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศร้อนด้วยเหตุนี้ ปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นกับ การทำให้แห้งด้วยลมร้อน คือ การถ่ายเทความร้อน และมวลสารระหว่างวัสดุ และของไหลโดยอาศัยแรงขับเคลื่อนจากความต่างศักย์ของอุณหภูมิ และความชื้น กล่าวคือ ความร้อนสัมผัสจากของไหลจะถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยออกไปกับอากาศในขณะเดียวกันไอน้ำก็จะเคลื่อนที่จากผิวหน้าวัสดุไปยังอากาศด้วยความเข้มข้นของความชื้นด้วย



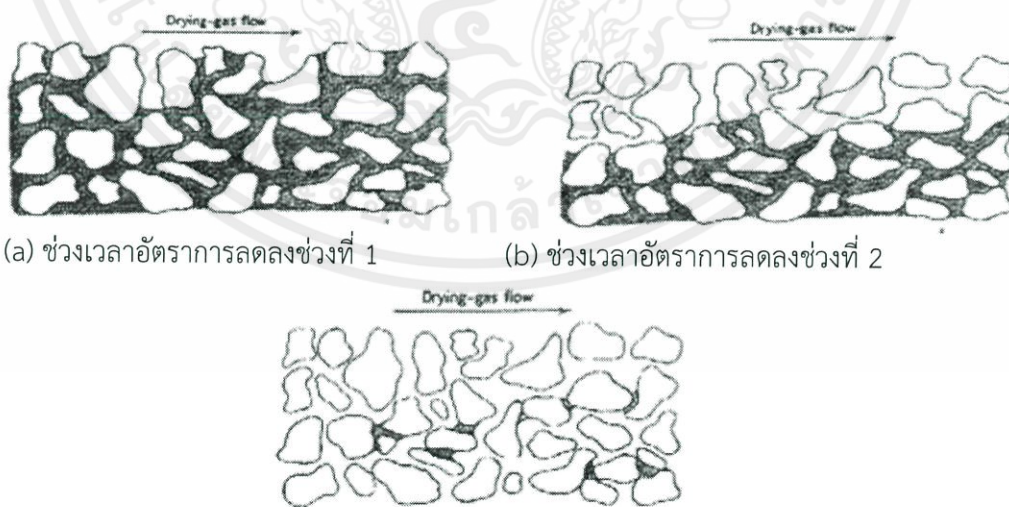
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงกับคุณเอกสารที่มมีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง กับปริมาณความชื้น

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial Adjustment Period -AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหารทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหารมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเกาะเปียก (wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางอัตราการทำให้แห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำให้แห้งคงที่ (constant rate)
2. ช่วงอัตราการทำให้แห้งคงที่ (Constant Rate Period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้งจุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุ ณ เวลานั้น เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content)
3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period -CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่องผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้งทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อยๆอัตราการอบแห้งจะลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆจนถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุดภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการทำให้แห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

3.1.2 กลไกการทำให้แห้ง

เมื่ออากาศร้อน หรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียกความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอไอน้ำจะแพร่ผ่านอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่



(a) ช่วงเวลาอัตราการลดลงช่วงที่ 1

(b) ช่วงเวลาอัตราการลดลงช่วงที่ 2

(c) ช่วงเวลาสิ้นสุดการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 3.2 แสดงการแพร่กระจายความชื้นในอนุภาคของแข็ง (Foust et.al., 1980)

จากสภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอขึ้น อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสูง และค่อย ๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วยกลไกดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของเหลวโดยแรงคาปิลารี (Capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลโปรง มีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบ ๆ เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ การเคลื่อนที่ที่สะดวกรวดเร็ว แต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบ ๆ นั้นขาดตอนลง
2. การแพร่ของของเหลว ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวทำละลายในอาหารส่วนต่าง ๆ
3. การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในอาหาร
4. ความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของอาหาร

3.1.3 สมการการอบแห้ง

พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาคืออัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้งโดยให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) มากที่สุด และ χ^2 , RMSE และ EMD น้อยที่สุด

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยคำนวณจากสมการที่ (3.1) และอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) จากสมการที่ (3.2)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \tag{3.1}$$

| | | | |
|-------|-------|-----|---|
| เมื่อ | M_i | คือ | ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) |
| | M_t | คือ | ความชื้นที่เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) |
| | M_e | คือ | ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) |

$$DR = \frac{M_i - M_{i+1}}{T_{i+1} - T_i} \tag{3.2}$$

| | | | |
|-------|-----------|-----|--|
| เมื่อ | M_i | คือ | ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (กรัมต่อกรัมมวลแห้ง) |
| | M_{i+1} | คือ | ปริมาณความชื้นที่เวลา T (กรัมต่อกรัมมวลแห้ง) |
| | T_{i+1} | คือ | เวลาใด ๆ ที่ใช้ในการอบแห้ง (นาทื) |
| | T_i | คือ | เวลาความชื้นเริ่มต้น (นาทื) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสม ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear regression) ซึ่งดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R²), ค่าไคสแควร์ (the reduced chi-square), ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean relative percent deviation)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{n - z} \tag{3.3}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \tag{3.4}$$

$$EMD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_{exp,i} - MR_{pre,i}|}{MR_{exp,i}} \tag{3.5}$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด
 Z คือ จำนวนตัวแปรในสมการ

ตารางที่ 3.1 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบาง

| รูปแบบสมการ | ชื่อสมการ | อ้างอิง |
|--|------------------------------|------------------|
| MR = exp (-kt) | Newton | Lui, 1997 |
| MR = exp (-kt ⁿ) | Page | Sharma, 2001 |
| MR = a exp (-kt) | Henderson and Pabis | Doymaz, 2004 |
| MR = 1 + at + bt ² | Wang and Singh | Ozdemir, 1999 |
| MR = a exp (-kt) + (1-a) exp (-kat) | Two term exponential | Ruiz, 2008 |
| MR = exp (-(-kt) ⁿ) | Modified Page I | Diamante, 1993 |
| MR = a exp (-kt) + c | Logarithmic | Togrul, 2002 |
| MR = a exp (-kt) + (1-a) exp (-kbt) | Approximation of diffusion | Yaldiz, 2001 |
| MR = a exp (-kt) + (1-a) exp (-gt) | Verma et al. | Verma, 1985 |
| MR = a exp (-kt ⁿ) + bt | Midilli | Midilli, 2002 |
| MR = a exp (-k ₀ t) + b exp (-k ₁ t) | Two term | Rahman, 1998 |
| MR = a exp (-kt) + b exp (-gt)+c exp (-ht) | Modified Henderson and Pabis | Karathanos, 1999 |
| MR = exp(-kt ⁿ) + bt ² + c | New model 1 | |
| MR = exp(-kt ⁿ) + bt ² + ct + d | New model 2 | |
| MR = exp(-kt ⁿ) + bt ² + ct | New model 3 | |

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม กรุณาแจ้งให้มหาวิทยาลัยทราบเพื่อที่จะดำเนินการฟ้องร้องดำเนินคดีตามกฎหมายต่อไป

3.1.4 สัมประสิทธิ์การแพร่และพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในตัวอย่างคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของ Fick ในสมการ (3.6) โดยสมมติให้ตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกเป็นทรงกลม

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} \pi^2}{R_e^2} t\right) \quad (3.6)$$

| | | | |
|-------|-----------|-----|---------------------------------|
| เมื่อ | D_{eff} | คือ | สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s) |
| | t | คือ | เวลาในการอบแห้ง |
| | R_e | คือ | รัศมี (m) |

การคำนวณหา D_{eff} สามารถหาได้จากความชันของสมการเชิงเส้นแบบถดถอยของ $\ln(MR)$ กับเวลาในการอบแห้ง

พลังงานกระตุ้นจะได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในตัวอย่าง และอุณหภูมิซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Arrhenius ดังสมการที่ (3.7)

$$D_{eff} = D_{\infty} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (3.7)$$

| | | | |
|-------|--------------|-----|---|
| เมื่อ | D_{∞} | คือ | ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s) |
| | E_a | คือ | พลังงานการกระตุ้น (J/mol) |
| | R | คือ | ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol·K) |
| | T_a | คือ | อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) |

3.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ การเคลื่อนย้ายน้ำออกจากอาหาร ปัจจัยใด ๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายนี้จึงมีผลต่ออัตราเร็วการอบแห้ง ได้แก่

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารเนื้อโปร่งมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวหนะหนะกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า อาหารที่มีการลวกทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขนาด และรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น รูปร่างเหมือนกัน ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ ถ้าชิ้นเล็กมากทั่วมกกัน การระเหยเกิดได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสกับอากาศ จึงเกิดการแห้งได้ช้าทั้งๆที่พื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักมาก
3. ตำแหน่งของอาหารในเตา น้ำในอาหารที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่า หรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำอมระเหยได้ดีกว่า
4. ปริมาณอาหารต่อถาด ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไปอาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อน หรือได้รับความร้อนจากถาดแล้ว แต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า
5. ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากจะรับไอน้ำเพิ่มได้น้อยจึงมีผลในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
6. อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่อการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นจึงมีผลต่อการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงด้วย
7. ความเร็วของลมร้อน ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายได้ดีขึ้นนอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตาอากาศจึงสัมผัสกับอาหารได้ดีขึ้น

3.2 การอบแห้งแบบลมร้อน

ทำได้โดยใช้ตู้อบขนาดใหญ่ที่มีลมร้อนที่ผ่านการให้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อน (heater) เป่าผ่านอาหารทำให้น้ำระเหยไปกับลมร้อนโดยทางช่องระบายลมภายในตู้อบ โดยนิยมใช้อุณหภูมิอบแห้งประมาณ 45-65°C (Ahmed et al., 2001) โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง มีดังนี้

1. ลักษณะธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีความพรุน (porosity) มาก จะมีอัตราการอบแห้งเร็วเนื่องจากน้ำในอาหารสามารถเคลื่อนจากภายในออกมามากมายได้ง่าย นอกจากนี้ อาหารที่มีพื้นที่ผิวมากอัตราการอบแห้งสามารถเกิดได้เร็วเช่นกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากพื้นที่การระเหยของน้ำในวัสดุเพิ่มขึ้นมากนั่นเอง
2. ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของอาหาร เป็นสมบัติทางกายภาพของอาหารที่มีผลต่อการทำแห้ง อาหารที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากมีพื้นที่ระเหยน้ำมากมีอัตราการทำแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นการอาหารที่มีความหนามากอัตราการอบแห้งจะช้ากว่าอาหารที่หนาน้อยกว่าเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

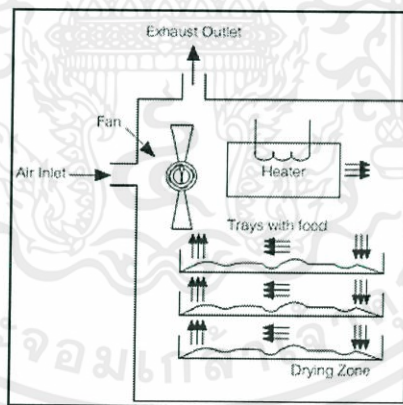
3. ปริมาณของอาหารที่นำมาอบแห้ง อาหารที่นำมาอบแห้งในปริมาณมาก ๆ มีอัตราการอบแห้งที่ช้า เนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอาหารที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึงจึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารได้จึงทำให้อัตราอบแห้งช้าลง

4. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ (specific humidity) ของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจะทำได้ดี หรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศต้องมีค่าต่ำ เพื่อที่จะสามารถรับเอาไอน้ำที่ระเหยจากอาหารไปได้ปริมาณมาก และความเร็วลมโดยความเร็วลมที่เหมาะสมในการทำแห้งชาสมุนไพรมีเท่ากับ 1.5 เมตรต่อวินาที (Akpinar et al., 2003)

5 ความดัน เกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำเนื่องจากในที่ความดันต่ำ ๆ ลงมา น้ำก็เดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น

3.2.1 ตู้อบลมร้อนแบบถาด

เป็นเครื่องอบแห้งที่ประกอบด้วยถาดเดี่ยว ๆ ที่มีช่องตาข่ายอยู่ด้านล่าง และบุเครื่องด้วยฉนวนในแต่ละถาดจะบรรจุอาหารชิ้นบาง ๆ ขนาด 2-6 เซนติเมตร อากาศร้อนจะไหลหมุนเวียนอยู่ในตู้ที่ความเร็วลม 0.5-5 เมตรต่อวินาที ของพื้นที่ผิวของถาดมีระบบท่อ หรือแบบเฟิลเพื่อนำลมร้อนขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาดเพื่อให้ลมร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ อาจมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพิ่มขึ้นด้านบน หรือด้านข้างของถาดเพื่อเพิ่มอัตราการทำแห้ง นิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดในการผลิตอาหารในปริมาณต่ำ (1-20 ตันต่อวัน)



รูปที่ 3.3 การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบถาด

ข้อดี

ใช้เงินลงทุน และค่าดูแลรักษาต่ำรวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ

ข้อเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ เครื่องมือชนิดนี้จะใช้อบอาหารที่มีปริมาณน้อย สำหรับงานทดลอง หรือสำหรับใช้ในโรงงานต้นแบบ

และ ควบคุมดูแลยาก

3.2.2 การอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด

1. นิยามฟลูอิดเซชัน คำว่า ฟลูอิดเซชัน เป็นคำที่ใช้อธิบายกระบวนการที่ของแข็งซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหลทั้งนี้เม็ดหรือชิ้นของแข็ง ตอนเริ่มแรกถูกวางอยู่ในตะแกรงในหอตลอดที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกในปัจจุบันมีการดัดแปลงให้อยู่ในรูปร่างในแนวนอนก็มี ของไหลที่ใช้ อาจเป็นก๊าซ หรือของเหลวปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งแล้วไหลออกทางส่วนบนของหอตลอด เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนเม็ดของแข็งขยับตัว และลอยตัวเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล คือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบด หรือภายในหอตลอดจึงเรียกของแข็งในลักษณะนี้ว่าฟลูอิดเซชัน

2. ประเภทของฟลูอิดเซชัน งานของฟลูอิดเซชัน ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปได้เป็นสองแบบด้วยกัน คือ

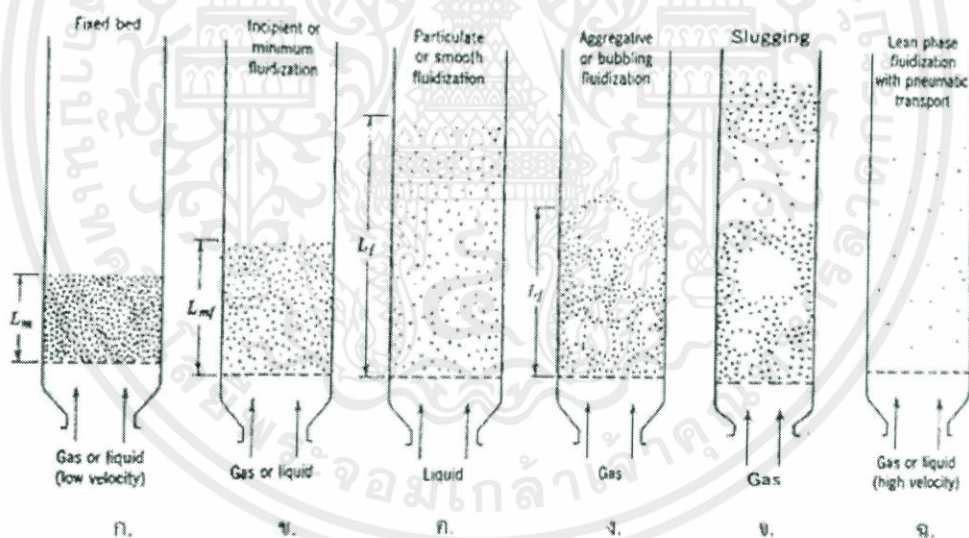
2.1 ฟลูอิดเซชันสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายความว่าในหอตลอดหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยของสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ประเภท คือ ก๊าซฟลูอิดเซชันและฟลูอิดเซชันของเหลว

2.2 ฟลูอิดเซชันสามสถานะ (Three- phases fluidization) หมายความว่า ภายในหอตลอดหรือเบดจะประกอบไปด้วยของสามสถานะอยู่ด้วยกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

3. ลักษณะของฟลูอิดไธซ์เบด เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตลอดที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอตลอด จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับ หรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอตลอด เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตลอดเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตลอดอย่างช้าๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลยเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดเซชัน หลังจากนั้นไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมาก และยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน

เบด ลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidization bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอตลอดอยู่แล้ว เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไธซ์เบดเจือจาง (Diluted-phase fluidized bed) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วของ

ของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็หลุดลอยออกจากหอดทดลองไป ฟลูอิด์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัว และหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เรียกเบดนี้ว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Particulated bed of homogeneously bed or smoothly fluidized bed or liquid fluidized bed) ดังรูปที่ 3.4 ค. ฟลูอิด์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิด์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบด และแตกตัวเองในที่สุดขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมานี้จะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองก๊าซลงมาถึงส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนหลังคาฟองก๊าซลงมาถึงส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดจามฟองก๊าซขึ้นไปด้วย ภายในเบดจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวายเบดชนิดนี้ เรียกว่าฟลูอิด์เบดวุ่นวาย ดังรูปที่ 3.4 ง.



รูปที่ 3.4 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิด์เบดเซชัน(Daizo Kunii,1991)

4. ข้อดีของฟลูอิด์เบด

4.1 เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมออุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอดเวลา ซึ่งต่างจากเบดนิ่งที่อุณหภูมิไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด

4.2 มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็งโดยเม็ดของแข็งที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก

4.3 จากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือ ปล่อยให้ของไหลไหลออกจากเบต และไหลเติมเข้าไปในเบตได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย

4.4 พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบตหนึ่งที่ใช้จำพวกเม็ดของแข็งเท่านั้น จึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลสาร

4.5 สามารถใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

5. ข้อเสียของฟลูอิดเซชัน

5.1 เวลาของของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบตสูง ๆ หรือเบตหลายชั้นซึ่งสิ้นเปลืองเงินลงทุนมาก

5.2 มักเกิดฟองก๊าซในเบตเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่เกิดการสูญเสียเปล่า ยิ่งถ้าเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และต้องใช้ตัวเร่งแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง

5.3 การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกจากเบตไปพร้อมกับของไหล

5.4 ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปื่อยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่ และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบต

6. ปรากฏการณ์ของฟลูอิดเซชัน เมื่อผ่านของไหลด้วยอัตราการไหลที่ต่ำๆ เข้าไปยังเบตของอนุภาคละเอียดจากด้านล่างขึ้นด้านบน ของไหลจะเพียงเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของอนุภาคที่อยู่นิ่งซึ่งจะเรียกว่าเบตนิ่ง (Fixed bed) การสั่นสะเทือนของอนุภาคซึ่งจะเคลื่อนที่ในพื้นที่จำกัด ซึ่งเรียกว่า เบตขยาย และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้สูงขึ้นอีก จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่อนุภาคทั้งหมดแขวนลอยอยู่ในกระแสไหลของของไหลที่เคลื่อนที่ขึ้น ณ จุดนี้สัดส่วนของแรงระหว่างอนุภาคกับของไหลจะสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาค แรงกดในแนวตั้งระหว่างอนุภาคที่ติดอยู่จะหมดไปและความดันลดลงทุก ๆ ส่วนของเบตจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคในส่วนนั้น ในฟลูอิดเซชันระบบของแข็ง-ก๊าซ โดยทั่วไปจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหลจนสูงกว่าฟลูอิดเซชันต่ำสุด (Minimum fluidization) จะเกิดความไม่เสถียรมากของฟองก๊าซและ

ไม่มีการเกิด channeling ของก๊าซ พบว่าที่อัตราการไหลสูงขึ้นความปั่นป่วนจะเริ่มรุนแรงมากขึ้น และการใช้

เคลื่อนที่ของของแข็งจะรุนแรงขึ้น แต่เบตยังไม่ขยายตัวเกินปริมาตรของฟลูอิดเซชันต่ำสุด (Minimum fluidization) เรียกว่า aggregative fluidized หรือ gas fluidized bed

7. ฟลูอิดเซชันความเร็วของไหลต่ำสุด หมายถึง ฟลูอิดเซชันในช่วงความเร็วของไหลแคบมากๆ คือ ช่วงระหว่างความเร็วต่ำสุดทำให้เกิดฟลูอิดเซชันเบต และความเร็วที่สูงกว่าเล็กน้อย ลักษณะของเบตที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเบต (Uniform and homogeneous) ผิวหน้าของเบตราบเรียบไม่ว่าของไหลนั้นจะเป็นของเหลวหรือก๊าซ เม็ดของแข็งเริ่มลอยอยู่ในกระแสของไหล ระยะห่างระหว่างเม็ดน้อยมาก เม็ดต่อเม็ดเกือบติดกัน การเคลื่อนไหวน้อยมาก เพราะอยู่ในวงจำกัด ในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลอง มักใช้ความเร็วของไหลสูงสูงกว่าความเร็วต่ำสุดอย่างน้อย 1.5 เท่า

3.3 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพ

3.3.1 ความชื้นและความชื้นสมมูล

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้งความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

ความชื้นฐานเปียก (M_w) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุ โดยทั่วไปมักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ และนิยมใช้ในทางการค้าในการบอกค่าความชื้นของวัสดุนั้นๆ

$$M_w = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (3.8)$$

ความชื้นฐานแห้ง (M_d) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ ค่าน้ำหนักแห้งของวัสดุจะมีค่าคงที่ หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญของสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น

$$M_d = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100 \quad (3.9)$$

เมื่อ W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้น
 W_f คือ น้ำหนักสุดท้าย

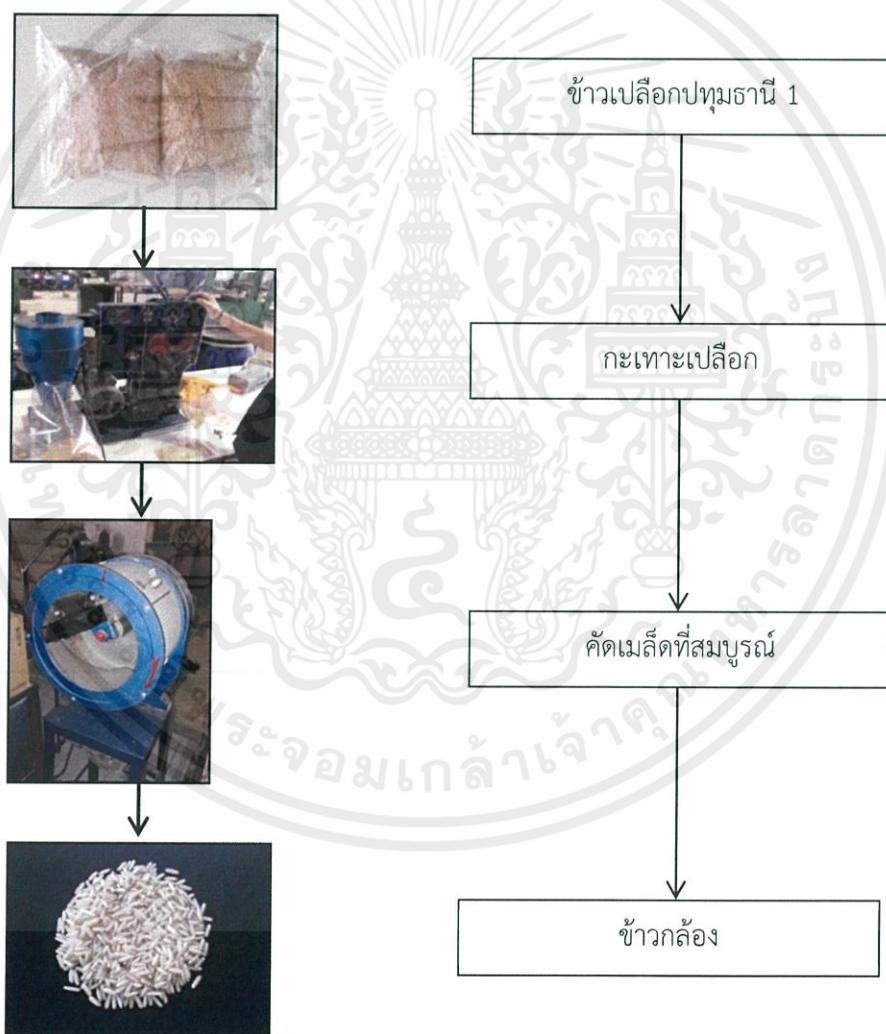
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาปัญหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วัสดุ และวิธีการทดลอง

4.1 วัตถุดิบ

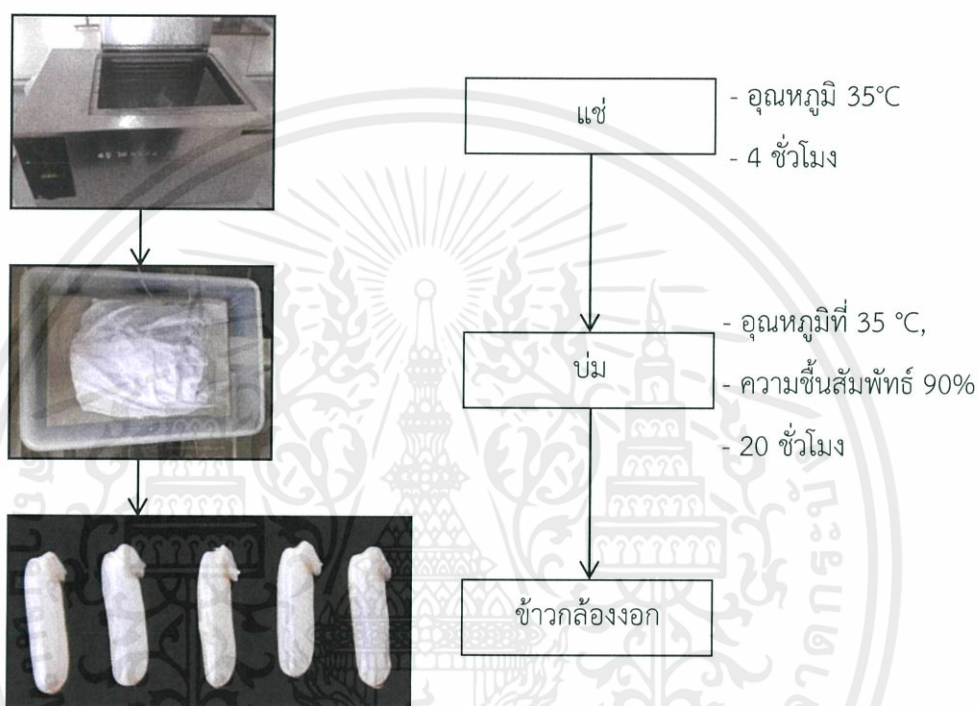
ข้าวเปลือกปทุมธานี 1 ที่เก็บเกี่ยวในเดือน เมษายน ปี พ.ศ. 2555 (ได้รับจากศูนย์วิจัยข้าวจังหวัด ฉะเชิงเทรา) นำมาแบ่งบรรจุถุงซีปล็อค และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 6°C เมื่อมีการทดลอง นำ ข้าวเปลือกจำนวน 1 กิโลกรัมมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก รุ่น P-1 มอเตอร์ขนาด 373 วัตต์ ได้ข้าวกล้องจำนวน 500 กรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.1 ที่กระบวนการผลิตข้าวกล้อง กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเตรียมข้าวกล้องงอก

นำข้าวกล้องจำนวน 500 กรัม แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเพาะงอกโดยการบ่มที่อุณหภูมิที่ 35°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุกๆ 5 ชั่วโมง ข้าวกล้องภายหลังการบ่มจะเกิดการงอกบริเวณจมูกข้าวเป็นตุ่มเล็ก ๆ ได้เป็นข้าวกล้องงอก (Cheevitsopon and Noomhorm, 2011)

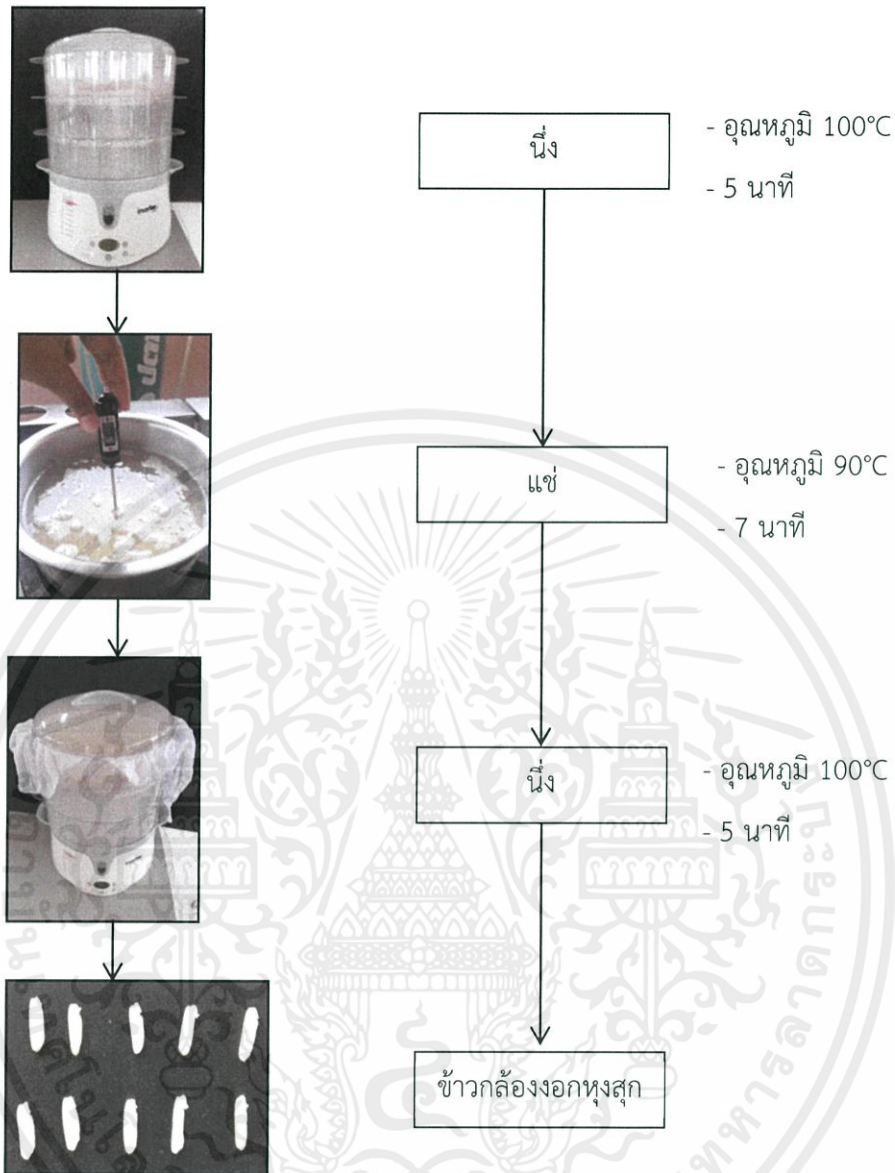


รูปที่ 4.2 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

4.3 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุก

นำข้าวกล้องงอกมาหุงสุก ด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าโดยการนำข้าวกล้องงอกจำนวน 500 กรัม นึ่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาทีทำให้เกิดเจลที่ผิวของเมล็ดข้าวบางส่วน จากนั้นนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 7 นาที จนข้าวกล้องงอกมีปริมาณความชื้นที่ 55-60% ความชื้นฐานเปียก. จึงนำมานึ่งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาที จนข้าวกล้องงอกมีปริมาณความชื้นที่ 60-62% ความชื้นฐานเปียก จะทำให้ข้าวสุกเต็มเมล็ด (ดัดแปลงจาก Jiraporn Sripinyowanich, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กระบวนการหุงสุกข้าวกล้องงอก

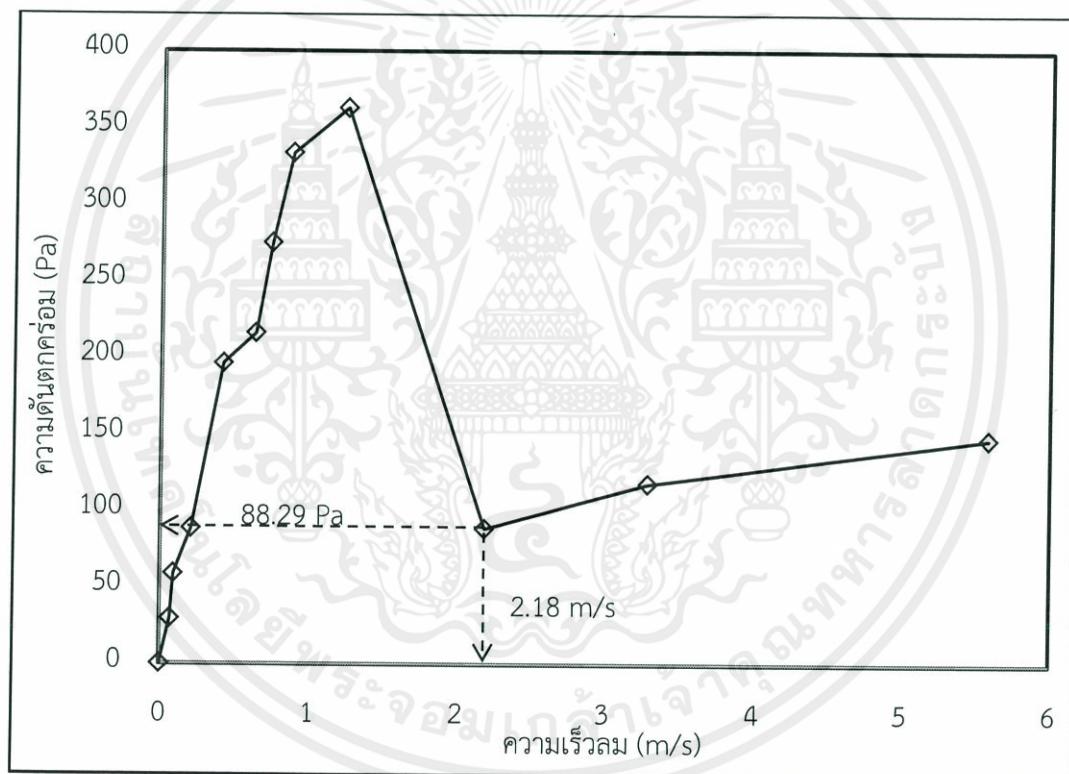
4.4 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด

ในการออกแบบ และสร้างเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบ Lab scale จำเป็นต้องมีการทดลองเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบ โดยได้ทำการทดลองเพื่อหาคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูปและหาทดสอบหาความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการลอยตัวของตัวอย่างแบบฟลูอิดไคซ์เซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 การหาความเร็วเบื้องต้นในการเกิดฟลูอิดซ์เซชันของข้าวกล้องงอก

ตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุก 200 กรัม ซึ่งมีความหนาเบต 8 เซนติเมตร คุมความเร็วรอบพัดลมด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยการปรับความถี่ที่ 0 ถึง 60 เฮิร์ต วัดค่าความเร็วลมที่อ่านได้จากเครื่องวัดความเร็วลม สังกะสี และบันทึกค่าความดันสถของมานอมิเตอร์ อากาศที่เข้าเครื่องฟลูอิดซ์เบตถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดความร้อนขนาด 27.25 กิโลวัตต์ ควบคุมอุณหภูมิด้วย PID Controller (proportional-integral-derivative Controller) พัดลมแบบใบพัดโค้งหน้าทำงานด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ จากการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกรวม (Pa) กับความเร็วลม (เมตรต่อวินาที) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยใช้การลอยตัวของข้าวกล้องงอกเป็นแบบอ้างอิงถึงการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน โดยความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดซ์เซชันหาได้จากจุดที่ความดันตกรวมเริ่มคงที่ ประมาณ 2.18 เมตรต่อวินาที

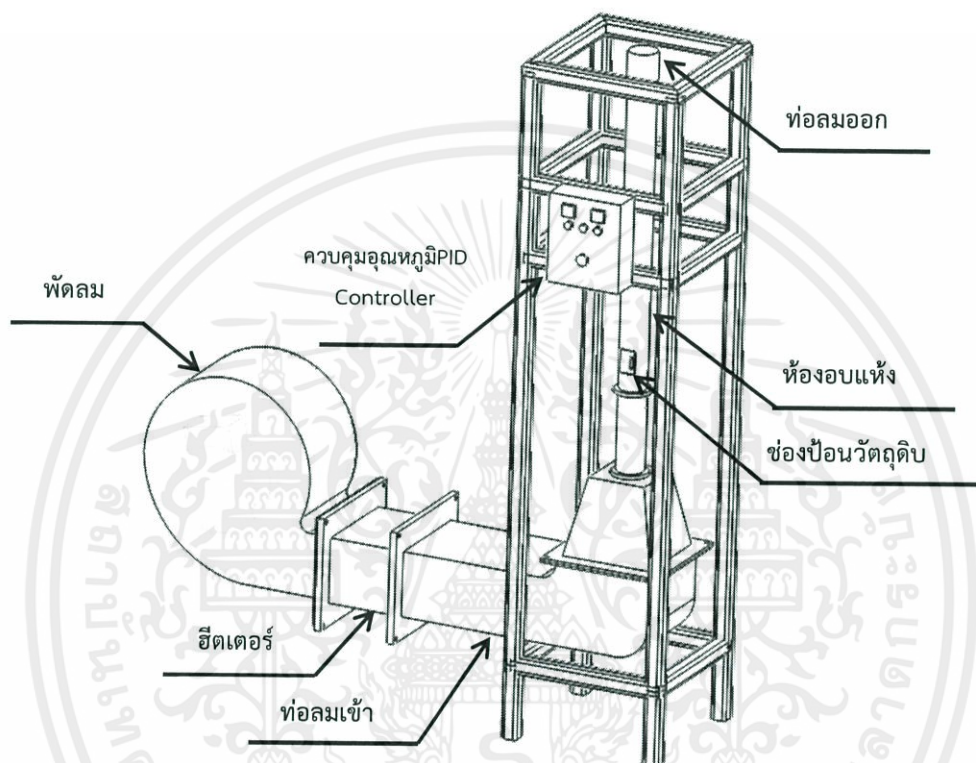


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกรวม กับความเร็วลม

4.4.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบต

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดซ์เซชันเริ่มจากนำข้าวกล้องงอกใส่ลงสู่ห้องอบแห้ง ใช้ลมร้อนเป่าผ่านตะแกรงทางด้านใต้ของห้องอบแห้ง เป่าต้นให้เมล็ดลอยตัวขึ้นเสมือนหนึ่งเป็นของไหล ทำให้พื้นที่ผิวของเมล็ดสัมผัสคลุกเคล้ากับลมร้อนอย่างทั่วถึง เมล็ดที่มีความชื้นต่ำมีน้ำหนักเบาจะลอยตัวสูงกว่า และใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าความชื้นของเมล็ดในห้องอบแห้งจะ

ลดลงอย่างรวดเร็ว และต่อเนื่อง จนกระทั่งเมล็ดถูกเป่าตันให้ลอยข้ามแผ่นกัน ผ่านชุดบ่อนเมล็ดออก ออกจากห้องอบแห้งไป ส่วนลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจะถูกบังคับให้ไหลออกทางท่อทางออกลม ร้อนร้อนด้านบน เทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อน และพาความชื้นออกจากอาหารเนื่องจากความร้อนสัมผัสกันขึ้นอาหารโดยตรงเหมาะสมกับวัสดุที่เป็น เม็ดเล็กที่มีรูปทรงและขนาดสม่ำเสมอ เช่น เมล็ดธัญพืช (cereal grain) ถั่ว (legume) เป็นต้น



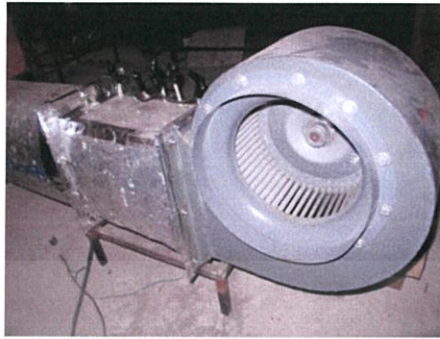
รูปที่ 4.5 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด

ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดมีดังนี้

1. พัดลม

พัดลมลักษณะใบพัดโค้งหน้าทำงานด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ลักษณะใบพัดโค้งหน้าตามทิศทางการหมุนของใบพัด และมุมใบพัดมากกว่า 90 องศา จำนวนใบพัดมากสามารถผลิตลมได้ในปริมาณมากขณะที่ความดันสถิตของระบบมีค่าต่ำ มีราคาถูก ช่วงการใช้งานกว้าง ต้นทุนค่าการดำเนินการต่ำ (เพลลา และแบริ่งมีขนาดเล็ก) ไม่เหมาะสำหรับใช้งานในระบบที่มีค่าความดันสถิตสูงเกินไป มอเตอร์เกิดการ Overload ได้ง่ายเมื่อความดันสถิตในระบบต่ำเกินไป การใช้งานเหมาะกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



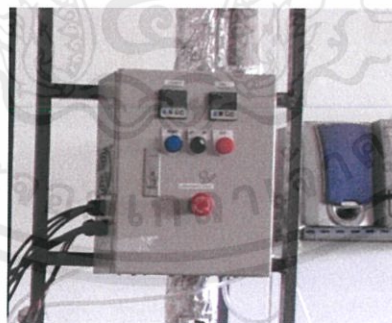
รูปที่ 4.6 พัดลมสำหรับเครื่องอบแห้งอบฟลูอิดซ์เบด

2. ฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์ครีบ ทำจาก Tubular Heater ที่ตัดเป็นรูปต่างๆ และเพิ่มแผ่นครีบบ้วนติด กับท่อฮีตเตอร์อย่างต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ส่วนของแผ่นครีบที่เพิ่มขึ้นมาจะทำให้ฮีตเตอร์สามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น

3. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ PLD Controller

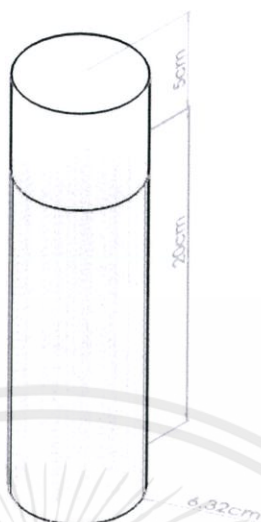
เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวางตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถแก้ปัญหาที่ร้อยละ 90 ในการควบคุมระบบโดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้



รูปที่ 4.7 ตัวควบคุมอุณหภูมิ

4. ส่วนต่อรวมลม

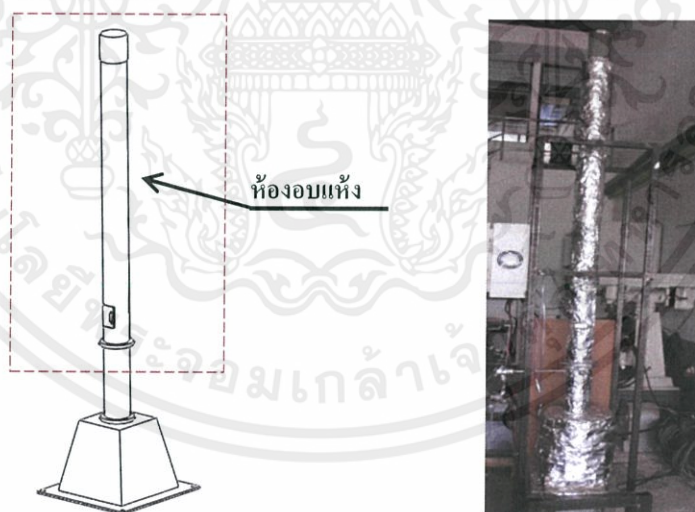
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ทำการออกแบบโดยใช้ท่ออลูมิเนียมจำนวน 19 ท่อ เพื่อให้ทิศทางลมกระจายออกสู่ห้องอบแห้งได้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 สะดวก ไม่มีการอันสม และถูกสวมด้วยท่อเหล็ก ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ส่วนท่อรวมลม

5. ห้องอบแห้ง

ห้องอบแห้ง เป็นพื้นที่สำหรับอบแห้งทรงกระบอก วัสดุที่ใช้ในการผลิต คือ ท่อเหล็กกลวง สูง 160 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ห้องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ช่องป้อนวัตถุดิบ

ช่องสำหรับป้อนวัตถุดิบอยู่ด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง มีขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ซึ่งออกแบบให้สามารถเปิดปิดได้ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ช่องป้อนวัตถุดิบ

7. ช่องมองวัตถุดิบ

วัสดุที่ใช้ในการผลิต คือ แผ่นอะคริลิกใส ขนาด กว้าง 2 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4.11 ช่องมองวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงผู้จัดทำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การอบแห้งข้าวกล้องงอก

4.5.1 การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบตู้อบลมร้อน

นำข้าวกล้องงอกหุงสุก 300 กรัม มาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนด้วยความเร็วลม 3.7 เมตรต่อวินาที โดยใช้อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 40, 60 และ 80°C (ดัดแปลงจาก เทวีกา กิริติบุรณะ และคณะ, 2011) ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งจนข้าวกล้องงอกมีความชื้น 12% ความชื้นฐานแห้ง



รูปที่ 4.12 เครื่องอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน

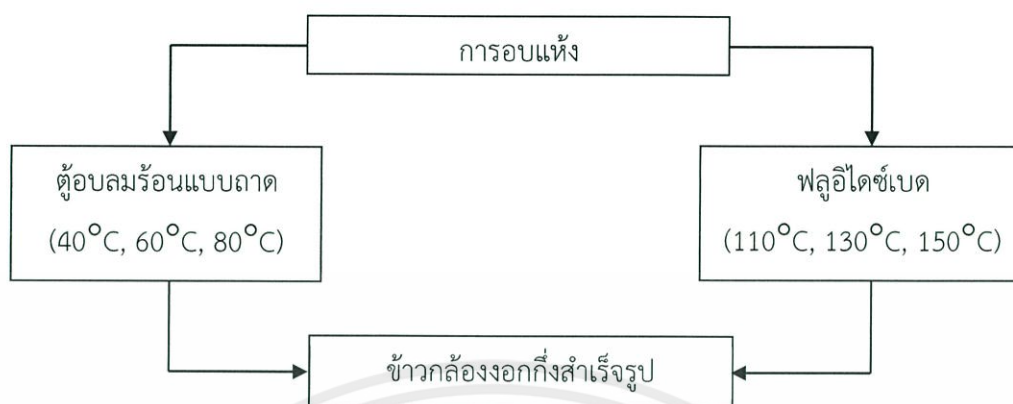
4.5.2 การอบแห้งแบบฟลูอิดไชเบต

นำข้าวกล้องงอกหุงสุก 200 กรัม มีความหนาเบตเป็น 8 cm มาอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชเบตด้วยความเร็วลม 2.18 เมตรต่อวินาที โดยใช้อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 110, 130 และ 150°C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งจนข้าวกล้องงอกมีความชื้น 12% ความชื้นฐานแห้ง



รูปที่ 4.15 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชเบต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอก

4.6 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้ง

4.6.1 การทดสอบวัดค่าสี

นำข้าวที่ผ่านการอบแห้งมาวัดสีด้วยเครื่องวัดสี Colormeter รุ่น JC 801 (บริษัท สิทธิพรแอสโซซิเอตส์ จำกัด) เป็นการวัดค่าสีในระบบ Hunter (L^* , a^* , b^*) แสดงค่า L^* (100-0 หมายถึง ค่าความสว่าง), a^* (ค่า+ หมายถึง สีแดง, ค่า- หมายถึง สีเขียว), b^* (ค่า+ หมายถึง สีเหลือง, ค่า- หมายถึง สีน้ำเงิน) ค่าที่ได้จากเครื่องจะนำไปคำนวณค่าความขาว (Whiteness Index, WI)

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (4.1)$$

| | | | |
|-------|-------|---|-----------------------------------|
| เมื่อ | WI | = | ค่าดัชนีความขาว |
| | L^* | = | ค่าความสว่าง |
| | a^* | = | ค่าความเป็นสีแดง หรือสีเขียว |
| | b^* | = | ค่าความเป็นสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก... ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.17 เครื่องวัดสี

4.6.2 ความหนาแน่นรวม

ชั่งน้ำหนักกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร นำข้าวที่ผ่านการอบแห้งใส่ในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร เคาะกับโต๊ะ 30 ครั้ง เพื่อลดช่องว่างภายในกระบอก จากนั้นเติมข้าวให้เต็ม 100 มิลลิลิตร ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อหามวลของข้าวที่แท้จริง หาความหนาแน่นรวมของข้าว โดยคำนวณจากมวลของวัสดุหารด้วยปริมาตรรวมของวัสดุ ซึ่งปริมาตรนั้นรวมปริมาตรของช่องว่างระหว่างวัสดุเอง และวัสดุกับภาชนะที่บรรจุ

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \text{มวลของวัสดุ/ปริมาตรรวมของวัสดุ} \quad (4.2)$$

4.6.3 อัตราการดูดน้ำกลับ

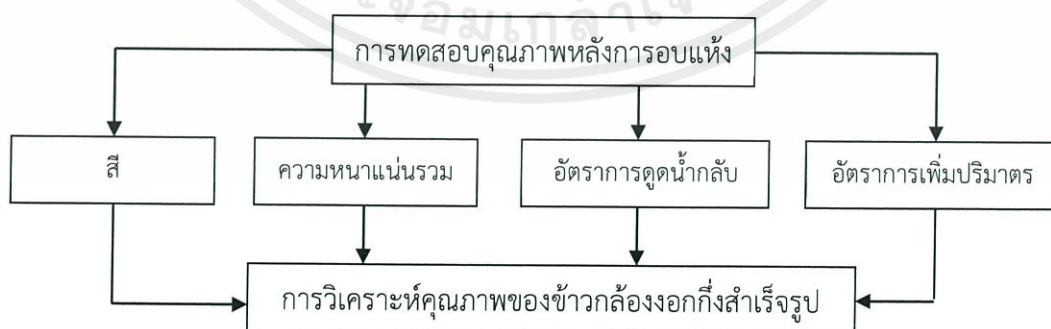
ชั่งน้ำหนักข้าวที่ผ่านการอบแห้ง 20 กรัม แช่ในน้ำอุณหภูมิ 97°C เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นวางให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก (ดัดแปลงจาก Waraporn and Prisana, 2009) คำนวณหาอัตราการดูดน้ำกลับจากสูตร

$$\text{อัตราการดูดน้ำกลับ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวหลังการคืนรูป}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \quad (4.3)$$

4.6.4 อัตราการเพิ่มปริมาตร

ชั่งน้ำหนักข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้ง 20 กรัม ใส่ในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร เคาะกับโต๊ะ 30 ครั้ง อ่านค่าปริมาตร หลังจากนั้นแช่ในน้ำอุณหภูมิ 97°C เป็นเวลา 10 นาที วางให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมาใส่กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร เคาะกับโต๊ะ 30 ครั้ง แล้วอ่านค่าปริมาตร (ดัดแปลงจาก Waraporn and Prisana, 2009) คำนวณหาอัตราการเพิ่มปริมาตรจากสูตร

$$\text{อัตราการขยายปริมาตร} = \frac{\text{ปริมาตรของข้าวคืนรูป}}{\text{ปริมาตรเริ่มต้น}} \quad (4.4)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีก รูปที่ 4.18 กระบวนการทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูปที่มีการนำไปใช้

4.7 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการคั่วรูป

คั่วรูปข้าวกล้องงอกหุงสุกที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้วิธีไมโครเวฟ ใช้ตัวอย่าง 30 กรัม ต่อน้ำ 120 กรัม (1:4) ใส่ในถ้วยแล้วปิดฝา และใส่ไมโครเวฟกำลังไฟสูงสุด 800 วัตต์ เป็นเวลา 8 นาทีหลังจากนั้นวางไว้ 5 นาที

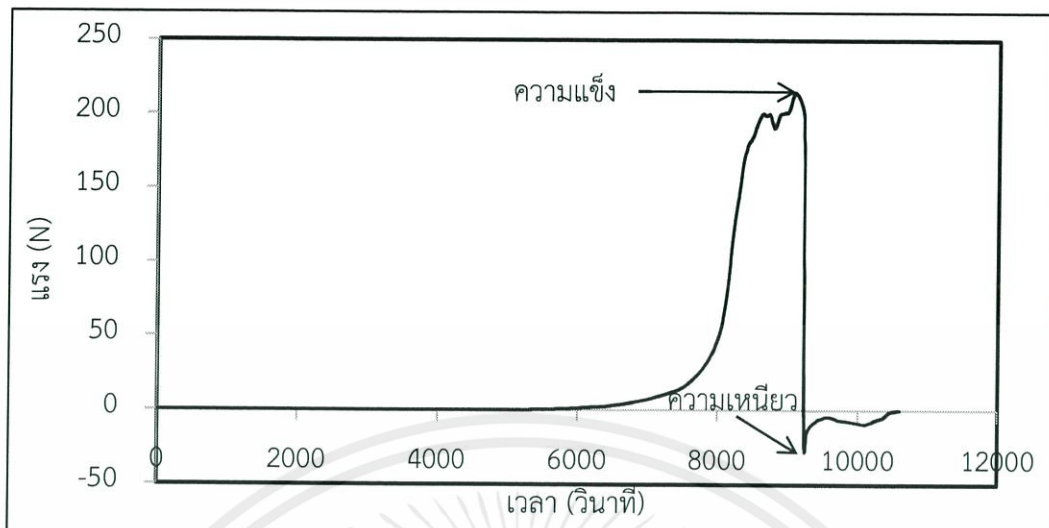
4.7.1 การทดสอบเนื้อสัมผัส

ใช้วิธีการทดสอบแบบ Back Extrusion ด้วยเครื่อง Texture Analysis รุ่น XT.plus (บริษัท จาร์พา เทคโนโลยี จำกัด) ประกอบด้วยชุดเครื่องมือทดลองเป็นทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และหัวกดรูปทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตรโดยตั้งระยะความสูงของหัวกด 80 มิลลิเมตรเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที ระยะกด 69 มิลลิเมตรใช้ตัวอย่างข้าวในการวัดครั้งละ 3 กรัม นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติค่าที่ได้จากการวัด ได้แก่ ความแข็ง ความเหนียว



รูปที่ 4.19 Texture Analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง กับเวลาของค่าความแข็ง และความเหนียว

4.7.2 การทดสอบวัดค่าสี

นำข้าวที่ผ่านการอบแห้งมาวัดสีด้วยเครื่องวัดสี Colormeter รุ่น JC 801 (บริษัท สิทธิพรแอสโซซิเอต จำกัด) เป็นการวัดค่าสีในระบบ Hunter (L^* , a^* , b^*) แสดงค่า L^* (100-0 หมายถึง ค่าความสว่าง), a^* (ค่า+ หมายถึง สีแดง, ค่า- หมายถึง สีเขียว), b^* (ค่า+ หมายถึง สีเหลือง, ค่า- หมายถึง สีน้ำเงิน) ค่าที่ได้จากเครื่องจะนำไปคำนวณค่าความขาว (Whiteness Index, WI) ดังสมการที่ 4.1

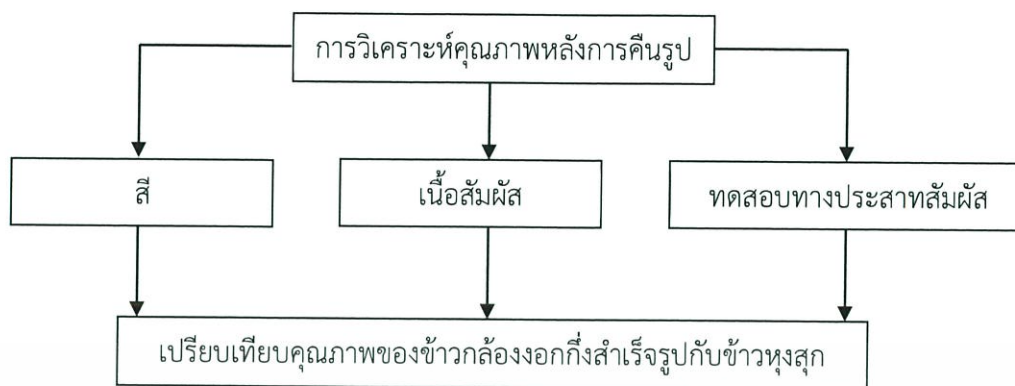
4.7.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยผู้ทดสอบจำนวน 30 คน ใช้วิธีการให้คะแนนความชอบ (9 point hedonic scaling test) โดยเปรียบเทียบข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่มีคุณภาพที่ดีที่สุด กับข้าวกล้องงอกหุงสุก ทดสอบลักษณะดังนี้ ลักษณะภายนอก, สี, เนื้อสัมผัส, กลิ่น, การยึดติดกันของเมล็ด, รสชาติ และความชอบโดยรวม

4.7.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์โดยแสดงข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวน วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างปัจจัยด้วยวิธี Duncan (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS ซึ่งแต่ละการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กระบวนการทดสอบคุณภาพข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

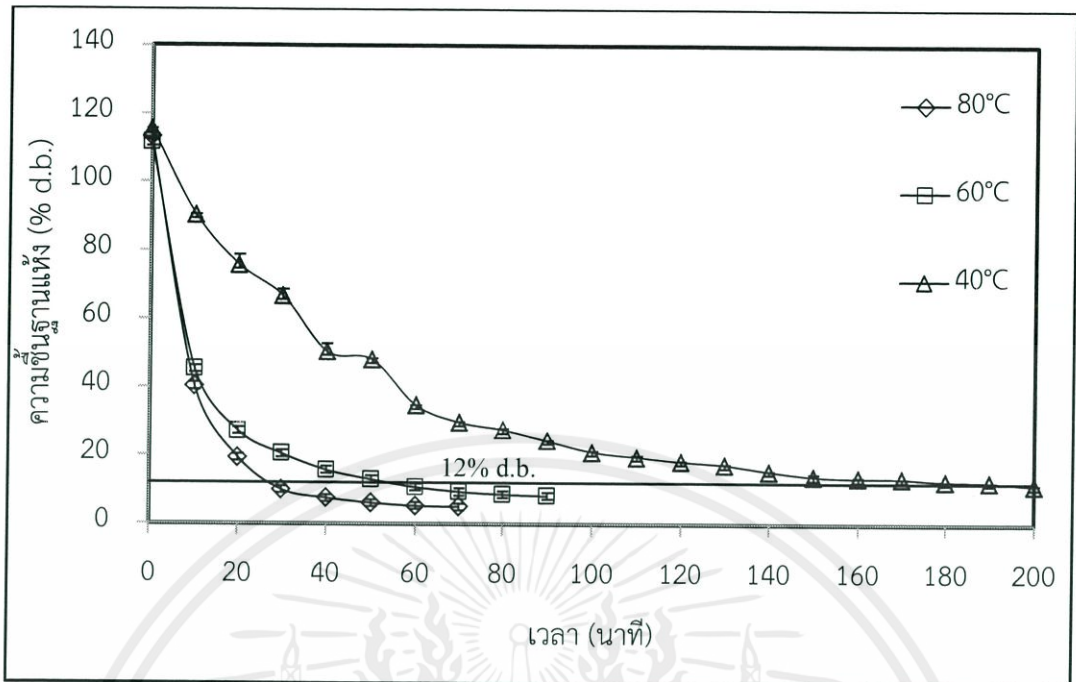
5.1 จลศาสตร์การอบแห้ง

ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความชื้นเริ่มต้น $111.59 \pm 0.72\%$ ความชื้นฐานแห้ง ถูกอบแห้งด้วยตู้อบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80°C และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไช้เบดที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150°C การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น กับเวลาของการอบแห้งแสดงอยู่ในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 กราฟทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาของการอบแห้ง เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นจนถึง 12 % ความชื้นฐานแห้ง มีค่าเป็น 160, 50 และ 30 นาที สำหรับการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80°C ตามลำดับ และมีค่าเป็น 10, 7 และ 5 นาที สำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดไช้เบดที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150°C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการอบแห้งลดลงสอดคล้อง กับงานวิจัยการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยฟลูอิดไช้เบดแบบอากาศร้อน (Srisang et al., 2009)

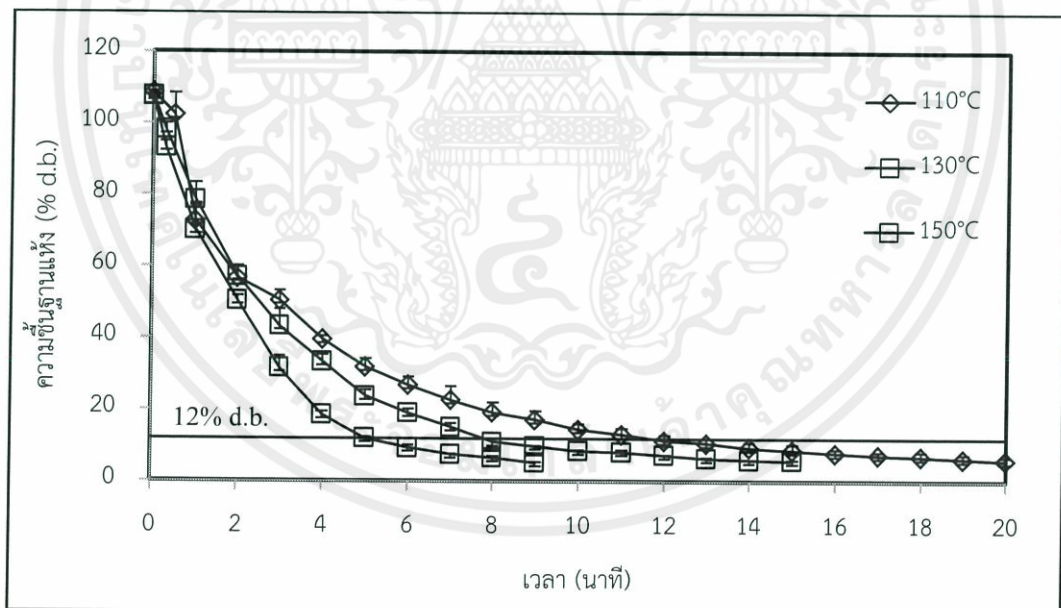
ในรูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้ง กับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และฟลูอิดไช้เบด แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น, ช่วงอัตราการแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งในช่วงการปรับสภาวะนั้นเป็นช่วงเริ่มต้นที่ตัวอย่างในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้นสูง ผิวของอาหารมีลักษณะเปียกชื้นมาก ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับตัวอย่าง ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวตัวอย่าง มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภาวะเปียกของกระแสมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ช่วงอัตราแห้งคงที่ที่เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุ อย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุ ลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานั้นเรียกว่า ความชื้นวิกฤต และในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เป็นช่วงที่ความชื้นในตัวอย่างเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าของตัวอย่างได้ไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของตัวอย่างเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นลดลงจนถึงค่าความชื้นสมดุล อัตราการแห้งเฉลี่ยประมาณ 0.5205 ± 0.6881 , 1.1478 ± 2.1250 และ 1.5458 ± 2.6381 กรัม/น้ำต่อกรัมของแห้งแห้ง·นาท ในการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80°C ตามลำดับ และอัตราการแห้งเฉลี่ยประมาณ 6.5954 ± 12.8846 , 8.1947 ± 10.7368 และ 13.9650 ± 14.7972 กรัม/น้ำต่อกรัมของแห้งแห้ง·นาท ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไช้เบดที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150°C ดังตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

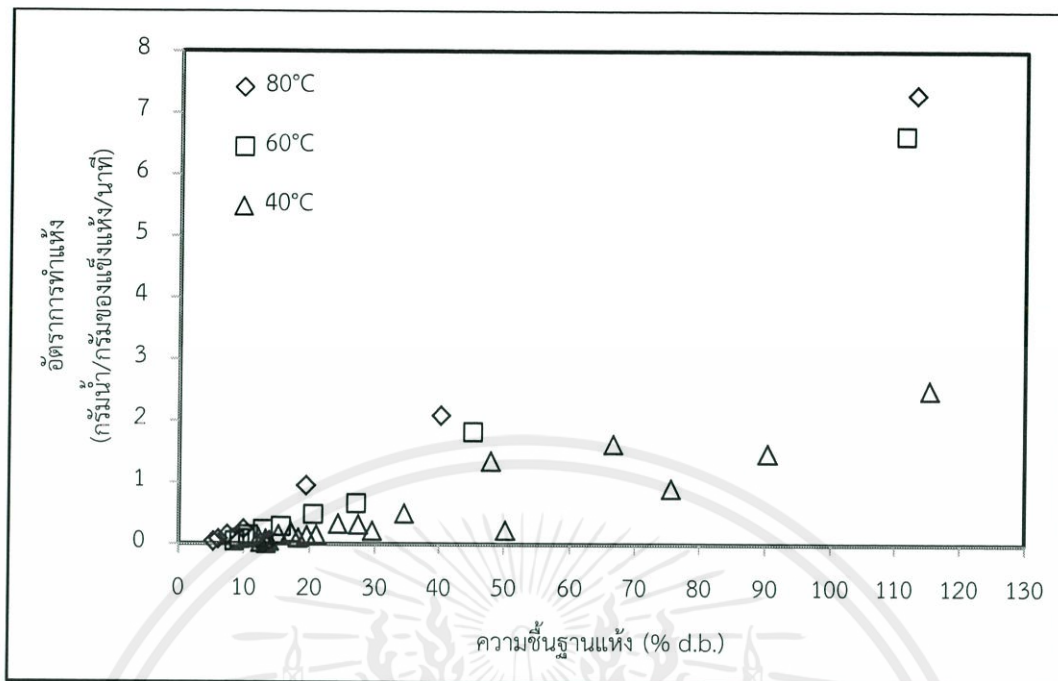


รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน

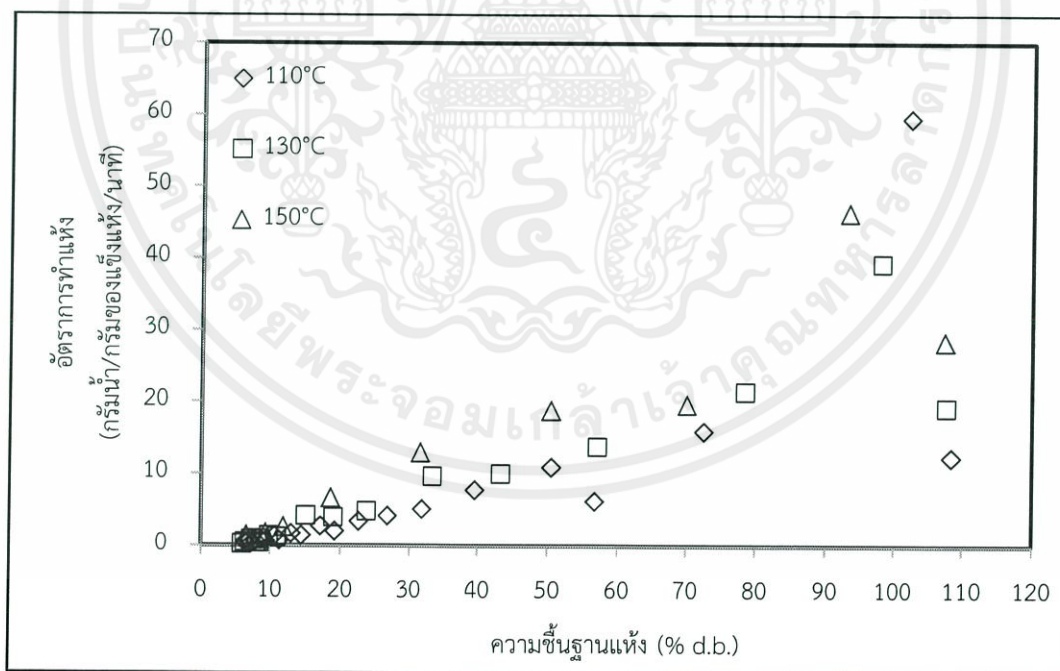


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้ง กับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้ง กับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิดเบด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

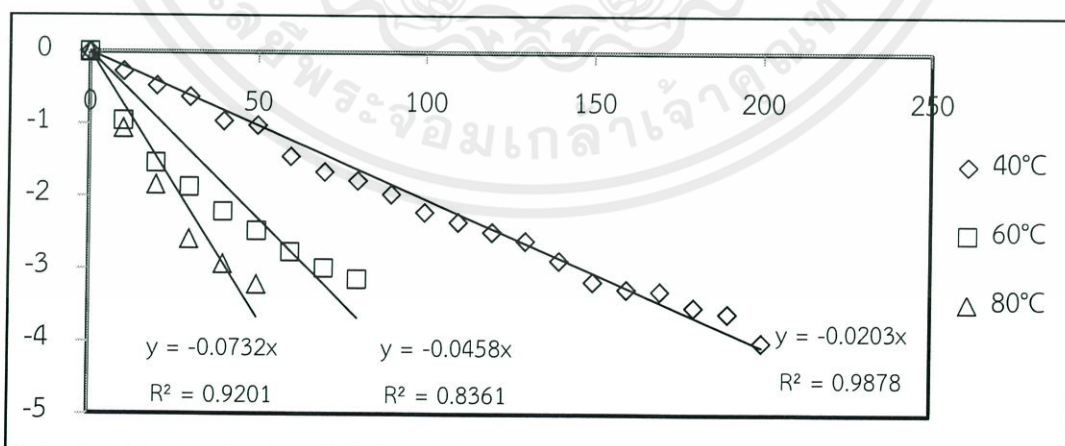
ตารางที่ 5.1 อัตราการทำแห้งของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และฟลูอิดซ์เบด

| วิธีการอบแห้ง | อุณหภูมิ (°C) | เวลาการอบแห้ง (นาที) | อัตราการทำแห้ง (กรัมน้ำต่อกรัมของแข็งแห้งต่อนาที) |
|---------------|------------------|-------------------------|--|
| ตู้อบลมร้อน | 40 | 160 | 0.5205 ± 0.6881^b |
| | 60 | 50 | 1.1478 ± 2.1250^b |
| | 80 | 30 | 1.5458 ± 2.6381^b |
| ฟลูอิดซ์เบด | 110 | 10 | 6.5954 ± 12.8846^{ab} |
| | 130 | 7 | 8.1947 ± 10.7368^{ab} |
| | 150 | 5 | 13.9650 ± 14.7972^a |

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.2 สัมประสิทธิ์การแพร่

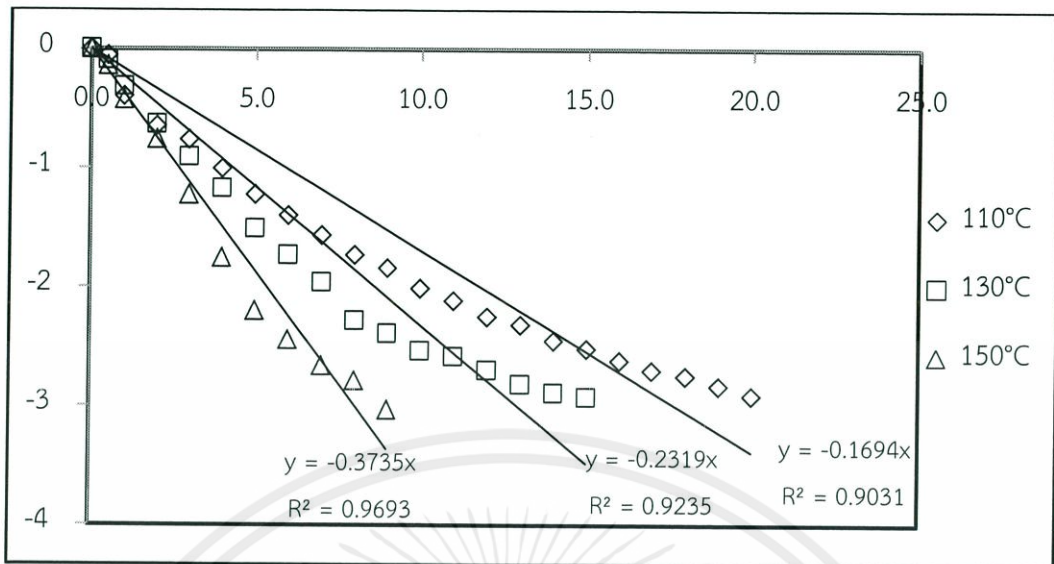
ความรู้เกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การแพร่ และพลังงานกระตุ้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบ และการสร้างแบบจำลองของการอบแห้งจากกฎข้อที่สองของ Fick โดยสมมติให้ตัวอย่างข้าวกล้องงอกแห้งสูงเป็นทรงกลม จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 คำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาในการอบแห้ง ในตารางที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดซ์เบด ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มากที่สุดที่อุณหภูมิ 150°C ของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้น กับอุณหภูมิของการอบแห้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้ทั้งก่อนและหลังการแก้ไข และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

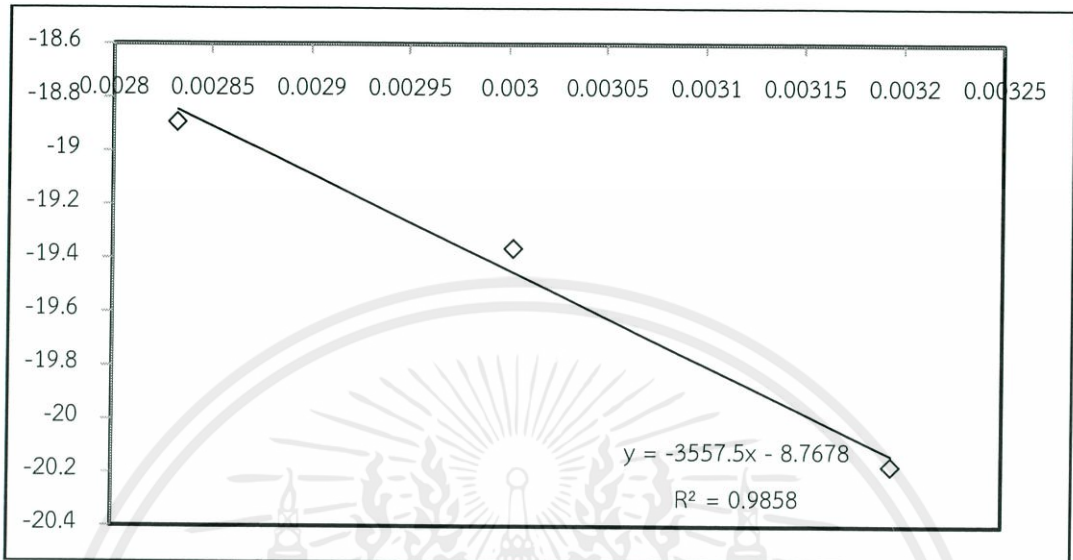
ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และฟลูอิดซ์เบด

| วิธีการอบแห้ง | อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) | สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s) |
|---------------|--------------------------|---------------------------------|
| ตู้อบลมร้อน | 40 | 1.7291×10^{-9} |
| | 60 | 3.9010×10^{-9} |
| | 80 | 6.2348×10^{-9} |
| ฟลูอิดซ์เบด | 110 | 1.4429×10^{-8} |
| | 130 | 1.9752×10^{-8} |
| | 150 | 3.1813×10^{-8} |

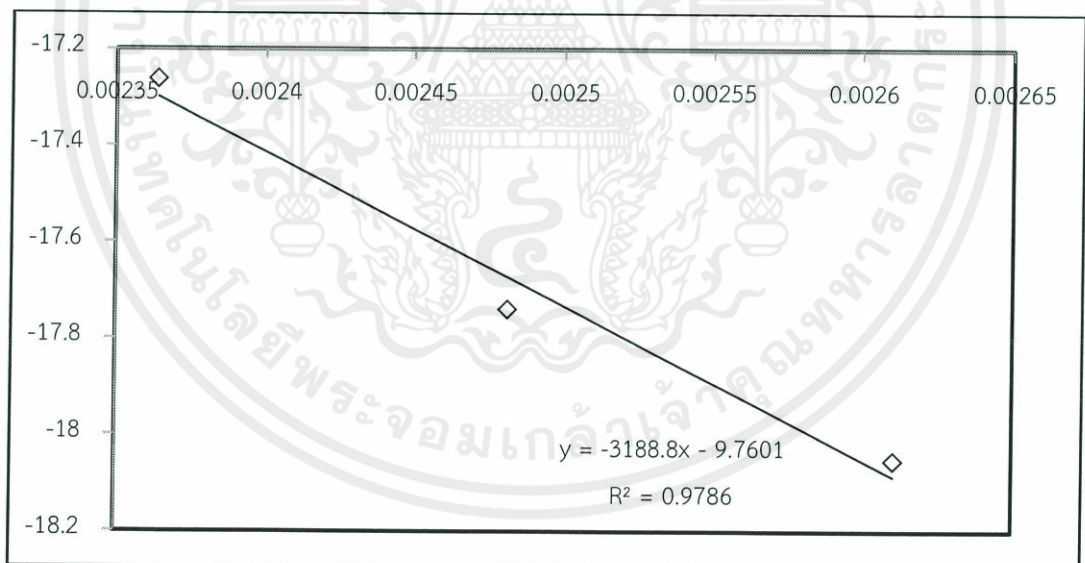
5.3 พลังงานกระตุ้น

ค่าพลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 พบว่าความชันของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีค่า 3,557.5 และ 3,188.8 ของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด ซึ่งความชันของเส้นตรงสามารถหาพลังงานกระตุ้นได้จาก E_a/R ในตารางที่ 5.3 การอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่ 0.0002 ตารางเมตรต่อวินาที และ พลังงานกระตุ้น 29.577 กิโลจูลต่อโมล รวมถึงการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่ 5.7709×10^{-5} ตารางเมตรต่อวินาที และ พลังงานกระตุ้น 26.511 กิโลจูลต่อโมล เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งสองรูปแบบ พบว่า การอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าพลังงาน

กระตุ้นมากกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ทำให้ต้องใช้พลังงานการกระตุ้นให้น้ำในตัวอย่างมีการระเหยเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ ของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ ของการอบแห้งแบบฟลูอิด์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

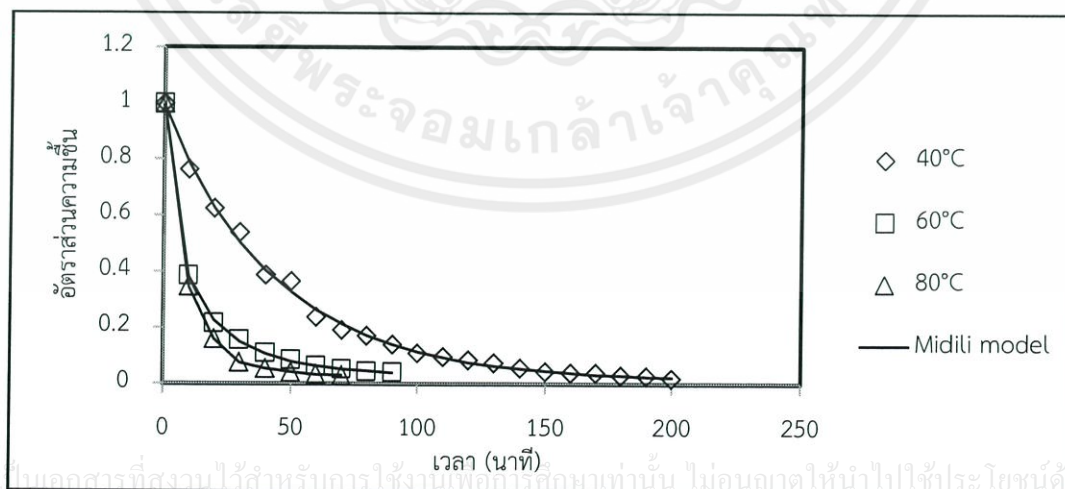
ตารางที่ 5.3 พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และฟลูอิดซ์เบด

| วิธีการอบแห้ง | ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s) | พลังงานกระตุ้น (KJ/mol) |
|---------------|--|-------------------------|
| ตู้อบลมร้อน | 0.0002 | 29.577 |
| ฟลูอิดซ์เบด | 5.7709×10^{-5} | 26.511 |

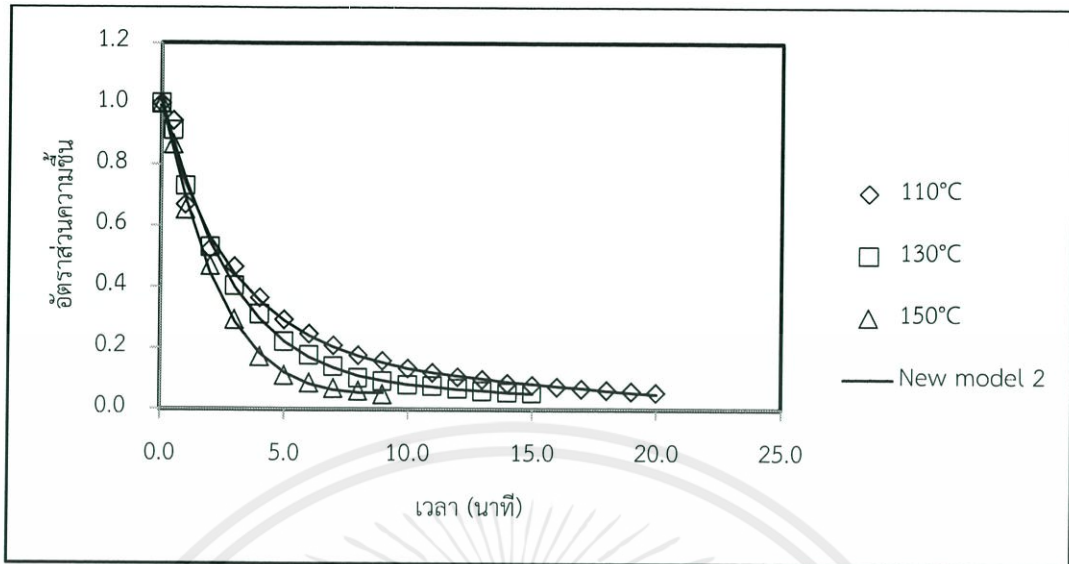
5.4 สมการคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ข้อมูลของปริมาณความชื้นจากการทดลองการอบแห้งข้าวกล้องงอกโดยใช้ตู้อบลมร้อน และฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จากสมการการอบแห้งทั้ง 15 รูปแบบในการหาสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งแต่ละแบบ ซึ่งจะพิจารณาจากสมการที่มีค่า R^2 มากที่สุด รวมถึงมีค่า χ^2 , RMSE และ %EMD น้อยที่สุด จากตารางที่ 5.4 พบว่าสมการของ Midili เหมาะสำหรับการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9967 ถึง 0.9999 มีค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 2.00×10^{-5} ถึง 2.98×10^{-4} มีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.0029 ถึง 0.0155 และ มีค่า %EMD อยู่ระหว่าง 2.7276 ถึง 6.4025 และจากตารางที่ 5.5 สมการ New model 2 เหมาะสำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9907 ถึง 0.9984 มีค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 2.10×10^{-4} ถึง 9.07×10^{-4} มีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.0122 ถึง 0.0265 และ มีค่า %EMD อยู่ระหว่าง 3.06855 ถึง 6.973

ในการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการ Midili model และ New model 2 จากรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการทำนายของอัตราส่วนความชื้นของสมการของ Midili และ New model 2 พบว่า การทำนายอัตราส่วนความชื้นสอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองตลอดกระบวนการอบแห้ง เป็นสิ่งยืนยันได้ว่าสมการของ Midili และ New model 2 เป็นสมการที่ดีที่สุดของพฤติกรรมกระบวนการอบแห้งครั้งนี้



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลผลการทดลองกับการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลผลการทดลอง กับการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

ตารางที่ 5.4 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบตู้อบสมร่อน

| No. | T(°C) | Model constants and coefficients | R ² | χ ² | RMSE | %EMD |
|-----|-------|------------------------------------|----------------|-----------------------|--------|---------|
| 1 | 40 | k = 0.0220 | 0.9955 | 3.43x10 ⁻⁴ | 0.0181 | 14.4537 |
| | 60 | k = 0.0760 | 0.968 | 2.79x10 ⁻³ | 0.0502 | 50.1906 |
| | 80 | k = 0.0969 | 0.9928 | 8.05x10 ⁻⁴ | 0.0265 | 46.8939 |
| 2 | 40 | k = 0.0279; n = 0.9427 | 0.9965 | 1.84x10 ⁻⁴ | 0.0131 | 5.81477 |
| | 60 | k = 0.2596; n = 0.5786 | 0.9994 | 5.86x10 ⁻⁵ | 0.0068 | 5.7004 |
| | 80 | k = 0.2049; n = 0.7227 | 0.9987 | 1.66x10 ⁻⁴ | 0.0112 | 19.4151 |
| 3 | 40 | k = 0.0225; n = 0.9427 | 0.9965 | 4.77x10 ⁻⁴ | 0.0208 | 11.5133 |
| | 60 | k = 0.0972; n = 0.5786 | 0.9994 | 6.49x10 ⁻⁴ | 0.072 | 41.6762 |
| | 80 | k = 0.1115; n = 0.7228 | 0.9987 | 2.31x10 ⁻⁴ | 0.0416 | 39.8259 |
| 4 | 40 | a = 0.9804; k = 0.0218 | 0.996 | 3.22x10 ⁻⁴ | 0.0171 | 13.8382 |
| | 60 | a = 0.9704; k = 0.0736 | 0.9691 | 3.04x10 ⁻³ | 0.0493 | 54.2778 |
| | 80 | a = 0.9919; k = 0.0962 | 0.9928 | 9.28x10 ⁻⁴ | 0.0264 | 46.5868 |
| 5 | 40 | a = 0.9739; k = 0.0229; c = 0.0143 | 0.9967 | 2.86x10 ⁻⁴ | 0.0157 | 6.5173 |
| | 60 | a = 0.9277; k = 0.0961; c = 0.0640 | 0.9937 | 7.18x10 ⁻⁴ | 0.0224 | 22.679 |
| | 80 | a = 0.9611; k = 0.1096; c = 0.0369 | 0.9994 | 9.51x10 ⁻⁵ | 0.0077 | 8.0896 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ) ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน

| No. | T(°C) | Model constants and coefficients | R ² | χ^2 | RMSE | %EMD |
|-----|-------|--|----------------|-----------------------|--------|----------|
| 6 | 40 | a = 0.9657; k ₀ = 0.0231; b = 0.0232 k ₁ = 0.0025 | 0.9967 | 3.02×10 ⁻⁴ | 0.0156 | 6.2823 |
| | 60 | a = 0.7004; k ₀ = 0.1532; b = 0.2995 k ₁ = 0.0249 | 0.9999 | 2.11×10 ⁻⁵ | 0.0036 | 4.5358 |
| | 80 | a = 0.8935; k ₀ = 0.1221; b = 0.1059 k ₁ = 0.0196 | 0.9997 | 4.58×10 ⁻⁵ | 0.0048 | 4.219 |
| 7 | 40 | a = 0.9657; k = 0.0231; b = 0.0085 g = 0.0025; c = 0.0147; h = 0.0025 | 0.9967 | 3.43×10 ⁻⁴ | 0.2511 | 6.2823 |
| | 60 | a = 0.6589; k = 0.1647; b = 6.18×10 ⁻⁵ g = -0.0599; c = 0.3411; h = 0.0285 | 0.9999 | 5.89×10 ⁻⁶ | 0.0015 | 1.0517 |
| | 80 | a = 0.1714; k = 2.1931; b = 0.7949 g = 0.0929; c = 0.0336; h = 0.0017 | 0.9999 | 2.83×10 ⁻⁵ | 0.0027 | 2.8914 |
| 8 | 40 | a = 0.9366; k = 0.0242; g = 0.0071 | 0.9965 | 2.95×10 ⁻⁴ | 0.0159 | 6.0666 |
| | 60 | a = -0.7384; k = 0.0760; g = 0.0760 | 0.968 | 3.59×10 ⁻³ | 0.0502 | 55.2261 |
| | 80 | a = -0.7228; k = 0.0969; g = 0.0969 | 0.9928 | 1.13×10 ⁻⁴ | 0.0265 | 46.8943 |
| 9 | 40 | a = 0.5561; k = 0.0294 | 0.9965 | 2.84×10 ⁻⁴ | 0.016 | 6.3895 |
| | 60 | a = 0.2931; k = 0.1934 | 0.9836 | 1.62×10 ⁻³ | 0.0359 | 43.0536 |
| | 80 | a = 0.3323; k = 0.2186 | 0.9971 | 3.80×10 ⁻⁴ | 0.0169 | 31.7744 |
| 10 | 40 | a = 0.0469; k = 3.8571; b = 0.0055 | 0.9966 | 2.88×10 ⁻⁴ | 0.0157 | 11.5327 |
| | 60 | a = 0.7005; k = 0.1532; b = 0.1625 | 0.9997 | 3.18×10 ⁻⁵ | 0.0044 | 4.5354 |
| | 80 | a = 0.3365; k = 3.1684; b = 0.0212 | 0.9977 | 3.67×10 ⁻⁴ | 0.0151 | 28.8775 |
| 11 | 40 | a = 0.9929; k = 0.0249; n = 0.9729 b = 5.21×10 ⁻⁵ | 0.9967 | 2.98×10 ⁻⁴ | 0.0155 | 6.4025 |
| | 60 | a = 1.0002; k = 0.2297; n = 0.6273 b = 0.0002 | 0.9999 | 1.81×10 ⁻⁵ | 0.0036 | 2.4093 |
| | 80 | a = 1.0000; k = 0.1581; n = 0.8306 b = 0.0004 | 0.9999 | 2.00×10 ⁻⁵ | 0.0029 | 2.7276 |
| 12 | 40 | a = -0.0141; b = 4.87×10 ⁻⁵ | 0.9309 | 5.56×10 ⁻³ | 0.0709 | 84.8747 |
| | 60 | a = -0.0345; b = 0.0003 | 0.7597 | 2.36×10 ⁻² | 0.1375 | 109.5435 |
| | 80 | a = -0.0450; b = 0.0005 | 0.8468 | 1.99×10 ⁻² | 0.1222 | 146.3611 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ) ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน

| No. | T(°C) | Model constants and coefficients | R ² | χ ² | RMSE | %EMD |
|-----|-------|---|----------------|-----------------------|--------|--------|
| 13 | 40 | k = 0.0257; n = 0.9612; b = 3.9598×10 ⁻⁷ c = -0.0060 | 0.9967 | 2.98×10 ⁻⁴ | 0.0155 | 6.7054 |
| | 60 | k = 0.2374; n = 0.6134; b = 1.9203×10 ⁻⁶ c = 0.0014 | 0.9997 | 3.61×10 ⁻⁵ | 0.0047 | 2.3968 |
| | 80 | k = 0.1676; n = 0.8041; b = 5.3942×10 ⁻⁶ | 0.9999 | 2.89×10 ⁻⁵ | 0.0038 | 5.9992 |
| 14 | 40 | k = 0.0251; n = 0.9697; b = -9.1×10 ⁻¹⁰ c = 8.16×10 ⁻⁵ ; d = -0.0072 | 0.9967 | 3.16×10 ⁻⁴ | 0.0155 | 6.4814 |
| | 60 | k = 0.2122; n = 0.6664; b = -6.3×10 ⁻⁶ c = 0.0008; d = 0.0002 | 0.9997 | 3.04×10 ⁻⁵ | 0.0039 | 3.4327 |
| | 80 | k = 0.1504; n = 0.8552; b = -5.2×10 ⁻⁶ c = 0.0008; d = -0.0001 | 0.9999 | 2.26×10 ⁻⁵ | 0.0032 | 4.3525 |
| 15 | 40 | k = 0.0266; n = 0.9558; b = 4.01×10 ⁻⁷ c = -3.2×10 ⁻⁵ | 0.9967 | 3.00×10 ⁻⁴ | 0.0156 | 6.5877 |
| | 60 | k = 0.2120; n = 0.6664; b = -6.3×10 ⁻⁶ c = 0.0008 | 0.9997 | 2.53×10 ⁻⁵ | 0.0039 | 3.4317 |
| | 80 | k = 0.1504; n = 0.8551; b = -5.2×10 ⁻⁶ c = 0.0008 | 0.9999 | 1.69×10 ⁻⁵ | 0.0029 | 2.7264 |

ตารางที่ 5.5 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

| No. | T(°C) | Model constants and coefficients | R ² | χ ² | RMSE | %EMD |
|-----|-------|------------------------------------|----------------|-----------------------|--------|-------|
| 1 | 110 | k = 0.2325 | 0.9661 | 2.69×10 ⁻³ | 0.0507 | 34.24 |
| | 130 | k = 0.2873 | 0.9924 | 7.35×10 ⁻⁴ | 0.0263 | 22.46 |
| | 150 | k = 0.4017 | 0.9954 | 5.56×10 ⁻⁴ | 0.0225 | 13.47 |
| 2 | 110 | k = 0.3393; n = 0.7682 | 0.9869 | 1.09×10 ⁻³ | 0.0315 | 11.51 |
| | 130 | k = 0.3178; n = 0.9267 | 0.9938 | 6.36×10 ⁻⁴ | 0.0237 | 17.27 |
| | 150 | k = 0.3834; n = 1.0460 | 0.9959 | 5.55×10 ⁻⁴ | 0.0213 | 15.34 |
| 3 | 110 | k = 0.2449; n = 0.7682 | 0.9869 | 1.09×10 ⁻³ | 0.0315 | 11.51 |
| | 130 | k = 0.2903; n = 0.9267 | 0.9938 | 6.36×10 ⁻⁴ | 0.0237 | 17.27 |
| | 150 | k = 0.3999; n = 1.0460 | 0.9959 | 5.55×10 ⁻⁴ | 0.0213 | 15.34 |
| 4 | 110 | a = 0.9421; k = 0.2159 | 0.9703 | 2.47×10 ⁻³ | 0.0474 | 29.99 |
| | 130 | a = 0.9917; k = 0.2870 | 0.9925 | 7.95×10 ⁻⁴ | 0.0265 | 22.46 |
| | 150 | a = 1.0184; k = 0.4101 | 0.9959 | 5.55×10 ⁻⁴ | 0.0213 | 13.69 |
| 5 | 110 | a = 0.9160; k = 0.2913; c = 0.0712 | 0.9877 | 1.08×10 ⁻³ | 0.0306 | 10.26 |
| | 130 | a = 0.9672; k = 0.3375; c = 0.0465 | 0.9983 | 2.11×10 ⁻⁴ | 0.0132 | 2.91 |
| | 150 | a = 1.0079; k = 0.4293; c = 0.0157 | 0.9962 | 5.70×10 ⁻⁴ | 0.0204 | 9.78 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

| No. | T(°C) | Model constants and coefficients | R ² | χ ² | RMSE | %EMD |
|-----|-------|---|----------------|-----------------------|--------|-------|
| 6 | 110 | a = 0.5827; k ₀ = 0.5286; b = 0.4394 k ₁ = 0.1143 | 0.9914 | 7.93×10 ⁻⁴ | 0.0255 | 5.79 |
| | 130 | a = 0.0333; k ₀ = -0.0248; b = 0.9791 k ₁ = 0.3308 | 0.9983 | 2.25×10 ⁻⁴ | 0.0131 | 2.92 |
| | 150 | a = 1.0220; k ₀ = 0.4170; b = 0.0001 k ₁ = -0.6338 | 0.9968 | 5.63×10 ⁻⁴ | 0.0189 | 7.42 |
| 7 | 110 | a = 0.6327; k = 0.1761; b = 0.3747 g = 0.7504; c = 0.0208; h = -0.0304 | 0.9922 | 8.44×10 ⁻⁴ | 0.0248 | 2.87 |
| | 130 | a = 0.0338; k = -0.0244; b = 0.5274 g = 0.3310; c = 0.4588; h = 0.3309 | 0.9982 | 2.51×10 ⁻⁴ | 0.0128 | 2.93 |
| | 150 | a = -0.3176; k = 0.4101; b = -0.3176 g = 0.4101; c = 1.6535; h = 0.4101 | 0.9959 | 1.00×10 ⁻³ | 0.0213 | 13.69 |
| 8 | 110 | a = 0.6077; k = 0.4663; g = 0.1062 | 0.991 | 7.83×10 ⁻⁴ | 0.026 | 4.73 |
| | 130 | a = 0.9773; k = 0.3199; g = -0.0503 | 0.9981 | 2.48×10 ⁻⁴ | 0.0143 | 3.23 |
| | 150 | a = 1.0000; k = 0.4057; g = -0.7592 | 0.9961 | 5.90×10 ⁻⁴ | 0.0207 | 7.80 |
| 9 | 110 | a = 0.2632; k = 0.6758 | 0.9845 | 1.29×10 ⁻⁴ | 0.0343 | 20.20 |
| | 130 | a = 0.4323; k = 0.4837 | 0.9959 | 4.60×10 ⁻⁴ | 0.0201 | 13.65 |
| | 150 | a = 1.4267; k = 0.4596 | 0.9956 | 5.89×10 ⁻⁴ | 0.0219 | 15.63 |
| 10 | 110 | a = 0.3923; k = 0.1062; b = 4.3885 | 0.991 | 7.83×10 ⁻⁴ | 0.026 | 4.73 |
| | 130 | a = 0.9773; k = 0.3198; b = -0.1573 | 0.9981 | 2.48×10 ⁻⁴ | 0.0143 | 3.23 |
| | 150 | a = 1.0000; k = 0.4057; b = -1.8716 | 0.9961 | 5.90×10 ⁻⁴ | 0.0207 | 7.80 |
| 11 | 110 | a = 1.0262; k = 0.3442; n = 0.8147 b = 0.0022 | 0.9902 | 9.08×10 ⁻⁴ | 0.0273 | 4.49 |
| | 130 | a = 1.0077; k = 0.3124; n = 1.0092 b = 0.0035 | 0.9982 | 2.30×10 ⁻⁴ | 0.0133 | 4.32 |
| | 150 | a = 1.0034; k = 0.3811; n = 1.1206 b = 0.0045 | 0.9977 | 4.01×10 ⁻⁴ | 0.016 | 5.08 |
| 12 | 110 | a = -0.1432; b = 0.0051; | 0.8728 | 1.06×10 ⁻² | 0.0981 | 55.68 |
| | 130 | a = -0.1879; b = 0.0088; | 0.9441 | 5.6×10 ⁻³ | 0.0701 | 48.81 |
| | 150 | a = -0.2858; b = 0.0208; | 0.9831 | 2.27×10 ⁻³ | 0.0431 | 32.43 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

| No. | T(°C) | Model constants and coefficients | R ² | χ ² | RMSE | %EMD |
|-----|-------|---|----------------|-----------------------|--------|--------|
| 13 | 110 | k = 0.3629; n = 0.8134; b = 2.39×10 ⁻⁵ c = 0.0347 | 0.9903 | 8.99×10 ⁻⁴ | 0.0271 | 3.6889 |
| | 130 | k = 0.3225; n = 0.9961; b = 0.0001 c = 0.0213 | 0.9982 | 2.25×10 ⁻⁴ | 0.0131 | 4.3791 |
| | 150 | k = 0.3784; n = 1.1081; b = 0.0005 c = 0.0041 | 0.9977 | 3.99×10 ⁻⁴ | 0.0159 | 5.7660 |
| 14 | 110 | k = 0.3499; n = 0.8738; b = -0.0003 c = 0.0069; d = 0.0235 | 0.9907 | 9.07×10 ⁻⁴ | 0.0265 | 3.0685 |
| | 130 | k = 0.3147; n = 1.0515; b = -0.0035 c = 0.0076; d = 0.0123 | 0.9984 | 2.10×10 ⁻⁴ | 0.0122 | 3.007 |
| | 150 | k = 0.3787; n = 1.1096; b = 0.0004 c = 0.0004; d = 0.0039 | 0.9977 | 4.66×10 ⁻⁴ | 0.0159 | 5.6973 |
| 15 | 110 | k = 0.3224; n = 0.9050; b = -0.0004 c = 0.0099 | 0.9903 | 8.92×10 ⁻⁴ | 0.027 | 4.1445 |
| | 130 | k = 0.3011; n = 1.0748; b = -0.0004 c = 0.0101 | 0.9982 | 2.07×10 ⁻⁴ | 0.0126 | 3.0294 |
| | 150 | k = 0.3745; n = 1.1189; b = 0.0003 c = 0.0019 | 0.9977 | 4.02×10 ⁻⁴ | 0.016 | 5.5683 |

5.4.1 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ดีที่สุด

ค่าคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของ Midili คือ a, k, n และ b รวมถึงแบบจำลอง New model 2 คือ k, n, b, c และ d ถูกตรวจสอบโดยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ ผลลัพธ์ของแบบจำลองแสดงในตารางที่ 5.6 และ 5.7 แบบจำลองและความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่, ค่าสัมประสิทธิ์ และอุณหภูมิการอบแห้ง ที่มีค่า R² มากที่สุด ซึ่งค่าเหล่านี้จะสามารถใช้ในการประมาณหาค่าอัตราส่วนความชื้นของข้าวกล้องงอกในเวลาใด ๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้ง

ตารางที่ 5.6 ค่าคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Midili ของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน

| ตัวแปร | แบบจำลองการทำนาย | R ² |
|--------|--|----------------|
| a | $0.8978 + 0.0029T - 2.088 \times 10^{-5}T^2$ | 1 |
| k | $-0.4350 + 0.0157T - 0.0001T^2$ | 1 |
| n | $1.7953 - 0.0303T + 0.0002T^2$ | 1 |
| b | $0.0002 - 1.446 \times 10^{-5}T + 2.819 \times 10^{-7}T^2$ | 1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ค่าคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง New model 2 ของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

| ตัวแปร | แบบจำลองการทำนาย | R ² |
|--------|---|----------------|
| k | $2.3167 - 0.0315T + 0.0001T^2$ | 1 |
| n | $-2.2414 + 0.0448T - 0.0001T^2$ | 1 |
| b | $0.1442 - 0.0023T + 8.875 \times 10^{-6}T^2$ | 1 |
| c | $-0.1382 + 0.0024T - 9.875 \times 10^{-6}T^2$ | 1 |
| d | $0.1352 - 0.0014T + 3.500 \times 10^{-6}T^2$ | 1 |

5.5 คุณภาพหลังการอบแห้ง

5.5.1 ความขาว

ในขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพสีเปรียบเทียบความขาวของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบเตาอบลมร้อน และแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ โดยมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 12% ความชื้นฐานแห้ง ดังตารางที่ 5.8 ตัวอย่างของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าความขาวมากกว่าข้าวกล้องงอกที่ผ่านอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เนื่องจากอุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศร้อน (Srisang et al., 2009) เพราะเมื่ออุณหภูมิของการอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาของการอบแห้งลดลง เมื่อเปรียบเทียบความขาวในแต่ละวิธีการอบแห้งพบว่า การอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C มีค่าความขาวต่ำสุดคือ 42.73 ± 0.31 ส่วนที่ 60°C และ 80°C มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 110°C มีค่าความขาวต่ำสุดคือ 42.73 ± 0.31 และที่อุณหภูมิ 130°C และ 150°C มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5.8 ค่าความขาวของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดไดซ์เบด

| ชนิดของการอบแห้ง | อุณหภูมิอบแห้ง (°C) | ระยะเวลาในการอบแห้ง (min) | ความขาว (%WI) |
|------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|
| ตู้อบลมร้อน | 40 | 160 | 42.73 ± 0.31^d |
| ตู้อบลมร้อน | 60 | 50 | 44.45 ± 0.21^c |
| ตู้อบลมร้อน | 80 | 30 | 44.74 ± 0.23^c |
| ฟลูอิดไดซ์เบด | 110 | 10 | 42.73 ± 0.31^d |
| ฟลูอิดไดซ์เบด | 130 | 7 | 49.12 ± 0.33^a |
| ฟลูอิดไดซ์เบด | 150 | 5 | 49.54 ± 0.23^a |

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.5.2 ความหนาแน่นรวม

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนและแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีความชื้นสุดท้ายเป็น 12% ความชื้นฐานแห้ง ดังตารางที่ 5.9 ตัวอย่างของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีค่าความหนาแน่นรวมมากกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดโดยค่าที่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อค่าความหนาแน่นรวม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง เพราะที่อุณหภูมิต่ำใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเมล็ดข้าวมากกว่าการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาสั้น หากเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมในแต่ละวิธีการอบแห้งพบว่า การอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีค่าความหนาแน่นรวมมากที่สุด คือ 0.59 ± 0.01 ที่อุณหภูมิต่ำ 40°C ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิ 60°C และ 80°C อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าความหนาแน่นรวมมากที่สุด คือ 0.52 ± 0.01 ที่อุณหภูมิต่ำ 110°C โดยที่อุณหภูมิ 130°C มีค่าความหนาแน่นรวมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิ 110°C และ 150°C

ตารางที่ 5.9 ค่าความหนาแน่นรวมของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดซ์เบด

| ชนิดของการอบแห้ง | อุณหภูมิต่ำ ($^{\circ}\text{C}$) | ระยะเวลาในการอบแห้ง (min) | ความหนาแน่นรวม (g/cm^3) |
|------------------|------------------------------------|---------------------------|---|
| ตู้อบลมร้อน | 40 | 160 | 0.59 ± 0.01^a |
| ตู้อบลมร้อน | 60 | 50 | 0.56 ± 0.01^b |
| ตู้อบลมร้อน | 80 | 30 | 0.53 ± 0.02^c |
| ฟลูอิดซ์เบด | 110 | 10 | 0.52 ± 0.01^c |
| ฟลูอิดซ์เบด | 130 | 7 | 0.51 ± 0.01^{cd} |
| ฟลูอิดซ์เบด | 150 | 5 | 0.50 ± 0.01^d |

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.5.3 อัตราการดูดน้ำกลับ

ในขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราการดูดน้ำกลับเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบเตาอบลมร้อนและแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีความชื้นสุดท้ายที่ 12% ความชื้นฐานแห้ง ดังตารางที่ 5.10 ตัวอย่างของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีอัตราการดูดน้ำกลับมากกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการดูดน้ำกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวในเมล็ดข้าวมากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำส่งผลให้อัตราการดูดน้ำกลับมาก เพราะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเมล็ดข้าวจะช่วยในการดูดซับน้ำได้มากสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งข้าวขาวหุงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ช่วงอุณหภูมิเดียวกัน (Sripinyowanich, 2011) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C มีอัตรา

การดูดน้ำกลับเท่ากับ 1.88 ± 0.06 มากสุด ซึ่งแตกต่างกับที่อุณหภูมิ 40°C อย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิ 60°C ส่วนการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิอบแห้ง 110°C 130°C และ 150°C มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าอัตราการดูดน้ำกลับมาสุดเท่ากับ 1.96 ± 0.02

ตารางที่ 5.10 ค่าอัตราการดูดน้ำกลับของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดซ์เบด

| ชนิดของการอบแห้ง | อุณหภูมิอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$) | ระยะเวลาในการอบแห้ง (min) | อัตราการดูดน้ำกลับ (%) |
|------------------|--|------------------------------|-----------------------------|
| ตู้อบลมร้อน | 40 | 160 | $1.79 \pm 0.03^{\text{d}}$ |
| ตู้อบลมร้อน | 60 | 50 | $1.84 \pm 0.02^{\text{c}}$ |
| ตู้อบลมร้อน | 80 | 30 | $1.88 \pm 0.06^{\text{bc}}$ |
| ฟลูอิดซ์เบด | 110 | 10 | $1.92 \pm 0.03^{\text{ab}}$ |
| ฟลูอิดซ์เบด | 130 | 7 | $1.93 \pm 0.03^{\text{a}}$ |
| ฟลูอิดซ์เบด | 150 | 5 | $1.96 \pm 0.02^{\text{a}}$ |

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.5.4 อัตราการเพิ่มปริมาตร

ในขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราการดูดน้ำกลับเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดซ์เบดโดยความชื้นสุดท้ายเป็น 12% ความชื้นฐานแห้ง ดังตารางที่ 5.11 ตัวอย่างของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีอัตราการเพิ่มปริมาตรมากกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เนื่องจากอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดรอยแตกร้าวในข้าวเป็นมากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำซึ่งส่งผลให้ข้าวสามารถดูดซับน้ำเป็นจำนวนมาก อัตราการเพิ่มปริมาตรจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วยสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Prasert and Suwannaporn, 2009) โดยในการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนพบว่าอัตราการเพิ่มปริมาตรที่อุณหภูมิ 40°C 60°C และ 80°C มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 110°C 130°C และ 150°C ซึ่งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงสุด 150°C มีค่าอัตราการเพิ่มปริมาตรมากที่สุด คือ 1.26 ± 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 ค่าอัตราการเพิ่มปริมาตรของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดซ์เบด

| ชนิดของการอบแห้ง | อุณหภูมิอบแห้ง (°C) | ระยะเวลาในการอบแห้ง (min) | อัตราการเพิ่มปริมาตร (%) |
|------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| ตู้อบลมร้อน | 40 | 160 | 1.15±0.01 ^b |
| ตู้อบลมร้อน | 60 | 50 | 1.16±0.04 ^b |
| ตู้อบลมร้อน | 80 | 30 | 1.19±0.08 ^{ab} |
| ฟลูอิดซ์เบด | 110 | 10 | 1.21±0.04 ^{ab} |
| ฟลูอิดซ์เบด | 130 | 7 | 1.22±0.06 ^{ab} |
| ฟลูอิดซ์เบด | 150 | 5 | 1.26±0.05 ^a |

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.6 การคั้นรูป

ในขั้นตอนการคั้นรูปใช้วิธีคั้นรูปด้วยไมโครเวฟ โดยจากการคำนวณสัดส่วนของข้าวต่อน้ำ และระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการคั้นรูปเพื่อให้คุณภาพใกล้เคียงกับข้าวกล้องงอกหุงสุก พบว่าสัดส่วนของข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการคั้นรูปคือ 1:4 โดยน้ำหนัก กล่าวคือ ข้าว 30 กรัม ต่อน้ำ 120 กรัม ใส่ในถ้วยคนให้เมล็ดข้าวจมน้ำทุกเมล็ดแล้วปิดฝาน้ำใสในไมโครเวฟกำลังไฟสูงสุด 800 วัตต์ ดังรูปที่ 5.11 ใช้ระยะเวลาในการคั้นรูปนาน 8 นาที และวางพักไว้ 5 นาทีเพื่อให้ข้าวดูดซึมน้ำมากขึ้นรวมระยะเวลา 13 นาทีจึงสามารถรับประทานได้โดยเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวนั้นใช้ระยะเวลาในการหุง 40 นาที จึงสามารถรับประทานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.11 การคั้นรูปด้วยไมโครเวฟ

5.7 คุณภาพหลังการคั้นรูป

5.7.1 ความขาว

ในขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพสีเปรียบเทียบความสว่างของข้าวกล้องงอกหุงสุกกับข้าวกล้องงอกที่ผ่านการคั้นรูปด้วยไมโครเวฟดัง ตารางที่ 5.12 คุณภาพสีหลังการคั้นรูปของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และแบบฟลูอิดซ์เบดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวกล้องงอกหุงสุก โดยมีค่าความขาวน้อยกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุก อาจเป็นเพราะว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกใช้ระยะเวลาในการหุงนานถึง 40 นาที ซึ่งมากกว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคั้นรูปเพียง 13 นาที เม็ดสีเหลืองที่อยู่บนชั้นผิวของข้าวกล้องอาจจะถูกทำลายโดยความร้อนจึงทำให้ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความขาวมากกว่า ส่วนข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดเมื่อนำมาวัดค่าความขาวหลังการคั้นรูปพบว่ามีความขาวมากกว่าข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนซึ่งค่าความขาวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง หากอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าความก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเพราะระยะเวลาในการอบแห้งลดลง (Tamaisuk, 2003)

ตารางที่ 5.12 ค่าความขาวของข้าวกล้องงอกหุงสุกและข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคั้นรูป

| ชนิดของตัวอย่าง | อุณหภูมิอบแห้ง (°C) | เวลาในการทำให้สุก (min) | ค่าความขาว (%WI) |
|--------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|
| ข้าวกล้องงอกหุงสุก | - | 40 | 50.69±0.26 ^a |
| ตู้อบลมร้อน | 40 | 13 | 44.31±0.52 ^g |
| ตู้อบลมร้อน | 60 | 13 | 46.11±0.31 ^f |
| ตู้อบลมร้อน | 80 | 13 | 46.61±0.18 ^e |
| ฟลูอิดซ์เบด | 110 | 13 | 47.67±0.11 ^d |
| ฟลูอิดซ์เบด | 130 | 13 | 48.25±0.07 ^c |
| ฟลูอิดซ์เบด | 150 | 13 | 48.51±0.22 ^b |

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.7.2 เนื้อสัมผัส

ในขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพเนื้อสัมผัสโดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งค่าที่ได้จากการวัด ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Stickiness) ดังตารางที่ 5.13 ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความแข็ง และความเหนียวน้อยสุด เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปโดยข้าวกล้องงอกหุงสุกมีค่าความแข็งเท่ากับ 64.00 ± 4.16 และค่าความเหนียว 18.56 ± 2.01 แต่ค่าความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ กับข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 150°C และเมื่อนำข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน

เปรียบเทียบกับแบบฟลูอิดซ์เบด ซึ่งเห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพเนื้อสัมผัส เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีทำให้ค่าความแข็ง และความเหนียวลดลง (Srisang et al., 2009) โดยตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C กับแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 110 °C และตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C กับแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 130 °C มีค่าความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความเหนียวของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C และ 80 °C กับแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 110 °C และ 130 °C มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5.13 เนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุกและข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคินรูป

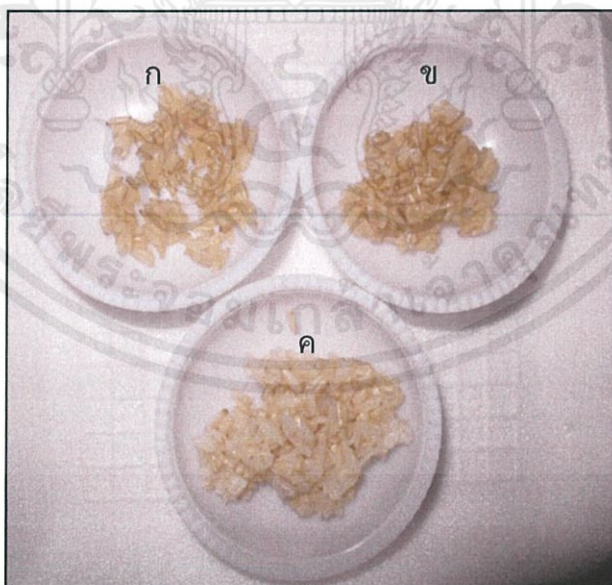
| ชนิดของตัวอย่าง | อุณหภูมิอบแห้ง (°C) | เวลาในการทำให้สุก (min) | ค่าความแข็ง (N) | ค่าความเหนียว (N) |
|--------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| ข้าวกล้องงอกหุงสุก | - | 40 | 64.00±4.16 ^c | 18.56±2.01 ^a |
| ตู้อบลมร้อน | 40 | 13 | 247.80±32.73 ^a | 29.45±4.04 ^c |
| ตู้อบลมร้อน | 60 | 13 | 189.92±12.55 ^b | 25.94±1.56 ^b |
| ตู้อบลมร้อน | 80 | 13 | 158.71±10.30 ^c | 24.63±2.08 ^b |
| ฟลูอิดซ์เบด | 110 | 13 | 181.62±11.00 ^b | 25.37±1.08 ^b |
| ฟลูอิดซ์เบด | 130 | 13 | 145.70±12.83 ^c | 24.14±3.31 ^b |
| ฟลูอิดซ์เบด | 150 | 13 | 103.84±7.57 ^d | 20.75±2.50 ^a |

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

5.7.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

จากการทดสอบคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทำการเลือกตัวอย่างข้าวกล้องงอกของการอบแห้งที่ดีที่สุดมาอย่างละ 1 ตัวอย่างโดยลักษณะของตัวอย่างที่เลือก คือ ต้องมีความสามารถในการดูดน้ำกลับดีที่สุด และมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มที่สุด สำหรับการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนเลือกตัวอย่างที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 80°C และที่อุณหภูมิ 150°C สำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอกหุงสุก ดังรูปที่ 5.12 เพราะมีลักษณะคุณภาพตามที่ต้องการมากที่สุด ในการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการคินรูปเปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอกหุงสุกพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีคะแนนเฉลี่ยด้าน ลักษณะภายนอก สี กลิ่น การยึดติดของเมล็ดข้าว เนื้อสัมผัส รสชาติ ความชอบโดยรวม มากกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุก ดังตารางที่ 5.14 โดยในด้านลักษณะภายนอก ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนกับแบบฟลูอิดซ์เบด มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญซึ่งมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอกหุงสุก เนื่องจากผู้ทดสอบส่วนใหญ่ชอบข้าวที่มีลักษณะเป็นเมล็ดสมบูรณ์มากกว่าเมล็ดข้าวที่ปริหรือบาน ในด้านสีข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้ง

แบบตู้อบลมร้อน แบบฟลูอิดซ์เบด และข้าวกล้องงอกหุงสุกมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าผู้ทดสอบชอบข้าวที่มีคอนข้างขาวมากกว่าข้าวที่มีสีคล้ำ อาจเป็นเพราะว่าข้าวที่มีสีขาว ดูน่ารับประทานมากกว่า ในด้านกลิ่นข้าวกล้องงอกหุงสุกกับข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีคะแนนมากที่สุดทั้งนี้ เนื่องจากกลิ่นหอมของ 2-acetyl-1-pyrroline 2AP ในตัวอย่างลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น (จารุวรรณ, 2553) ในด้านการยึดติดของเมล็ดข้าว ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับกับข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด และข้าวกล้องงอกหุงสุก แต่ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีคะแนนเฉลี่ยมากที่สุด ในด้านเนื้อสัมผัสข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด และข้าวกล้องงอกหุงสุก แต่ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีคะแนนเฉลี่ยมากที่สุด อาจเป็นเพราะผู้ทดสอบส่วนใหญ่ชอบข้าวที่มีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มมากกว่าข้าวที่แข็งโดยจากการทดสอบคุณภาพเนื้อสัมผัสพบว่าข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 150 °C มีค่าความแข็ง และความเหนียวต่ำสุด ในด้านรสชาติข้าวกล้องงอกหุงสุก ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลม และข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับในด้านความชอบโดยรวมที่ข้าวกล้องงอกหุงสุก ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลม และข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



เอกสารนี้
รูปที่ 5.12 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบด้านประสาทสัมผัส ก) ตัวอย่างที่อบแห้งด้วยฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 150 °C ข) ตัวอย่างที่อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C และ ค) ข้าวหุงสุก การนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

| ชนิดของตัวอย่าง | ลักษณะภายนอก | สี | กลิ่น | การยี้ดติตของเมล็ดข้าว | เนื้อสัมผัส | รสชาติ | ความชอบโดยรวม |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| ข้าวกล้องงอกหุงสุก | 4.57±1.30 ^b | 5.60±1.57 ^a | 5.70±1.26 ^b | 5.37±1.10 ^b | 5.50±1.61 ^b | 5.70±1.39 ^a | 5.90±1.12 ^a |
| ตู้อบลมร้อน 80°C | 5.80±1.21 ^a | 6.07±1.08 ^a | 6.30±0.84 ^a | 5.63±1.63 ^{ab} | 5.80±1.49 ^{ab} | 6.20±1.06 ^a | 6.23±0.90 ^a |
| ฟลูอิดซ์เบต150°C | 6.10±1.4 ^a | 6.17±0.91 ^a | 5.73±1.01 ^b | 6.13±1.22 ^a | 6.37±1.19 ^a | 6.30±1.09 ^a | 6.43±1.04 ^a |

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีกระบวนการที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ 1) การผลิตของกล้องงอก 2) การหุงสุก และ 3) การอบแห้ง ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งวิธีการอบแห้งที่ศึกษาได้แก่ การอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 °C และการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 °C แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมด 15 รูปแบบถูกใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้ง ตัวอย่าง และวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่างข้าวหลังการอบแห้ง และหลังการคั้นรูป ดังนั้นสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สภาพที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุกคือ การนึ่งข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดเจลลาตินในบางส่วนที่ผิวของเมล็ดข้าว หลังจากนั้นแช่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 7 นาที เมล็ดข้าวเกิดการพองตัวจนเห็นได้ชัด ความกว้าง และความยาวเพิ่มขึ้น และเกิดเจลในเมล็ดข้าว แล้วการนึ่งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เมล็ดข้าวเกิดเจลลาตินสมบูรณ์

2. ความเร็วลมต่ำสุดของการอบแห้งข้าวกล้องงอกหุงสุกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดซ์เซชันในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าประมาณ 2.18 เมตรต่อวินาที

3. ในระหว่างการอบแห้ง ปริมาณความชื้นจึงลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาของการอบแห้ง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นจนถึง 12 % ความชื้นฐานแห้ง มีค่าเป็น 160 50 และ 30 นาที สำหรับการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 60 และ 80 °C ตามลำดับ และใช้เวลา 10 7 และ 5 นาที สำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 110 130 และ 150 °C ตามลำดับ

7. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในตัวอย่างมีค่าระหว่าง 1.7291×10^{-9} ถึง 6.2348×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40 ถึง 80 °C ของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน และมีค่าระหว่าง 1.4429×10^{-8} ถึง 3.1813×10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 110 ถึง 150 °C ของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิของการอบแห้งแบบสมการ

เอกสารนี้ของ Arrhenius สามารถใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด 8. พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนเท่ากับ 29.577 กิโลจูลต่อโมล และพลังงานใช้กระตุ้นของการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดเท่ากับ 26.511 กิโลจูลต่อโมล

9. แบบจำลอง Midilli model สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบตู้อบลมร้อนได้ดีที่สุด แต่แบบจำลอง New model 2 สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดได้ดีที่สุด

10. คุณภาพตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าความขาว อัตราการดูดน้ำกลับ และอัตราการเพิ่มปริมาตรมากกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เพราะใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง แต่ตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีค่าความหนาแน่นรวมมากกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด เพราะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่า

13. หลังการคืนรูปด้วยวิธีไมโครเวฟ ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีค่าความขาวน้อยกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุก และข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าความขาวมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน

14. ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีค่าความแข็ง และความเหนียวน้อยกว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป และข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดมีค่าความแข็ง และความเหนียวน้อยกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน

15. ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งมีคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะภายนอก สี กลิ่น การยึดติดของเมล็ดข้าว เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม มากกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุก

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาอิทธิพลของความสูงเบด และความเร็วลมของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดต่ออัตราการทำแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์
2. ควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และอายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปในสภาวะต่าง ๆ และบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภท
3. ควรมีการศึกษาการใช้พลังงานสำหรับกระบวนการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

งามชื่น คงเสรี. (2547). ข้าว และผลิตภัณฑ์ข้าว. พิมพ์ครั้งที่2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

จารุวรรณ บางแกว, อรวรรณ จิตต์ธรรม และอรณิชา สุวรรณโณม. การประเมินสารหอม 2-

Acetyl-1-Pyrroline:2APในข้าวกล้องพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 โดยเทคนิค NIR

Spectroscopy วารสารวิชาการเกษตร,ปี ที่ 28,ฉบับที่ 1

ดารุณี ปนคำ, ผศ.เบ็ญจรัก วายูภาพ และผศ.ดร.วราพร ลักษณะมลาย. (2552). กระบวนการผลิต

ข้าวกล้องงอกหุงสุกเร็ว. การประชุมนำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยรังสิต

เทวีกา กิรติบุรณะ และวรรณุช ศรีเจษฎารักษ์.(2011).ผลของการอบแห้งแบบถาดของข้าวกล้อง

ข้าวดอกมะลิ 105 จกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ ทางชีวภาพ. The graduate research

conferenceKhonKaen University.

นฤปดี ศรีสังข์, สมเกียรติ ปรัชญารากร, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และวารุณี วารุณยานนท. (2552).

การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยฟลูอิดเบดแบบอากาศร้อนและไอน้ำ

รอนยวดยิ่ง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 40, ฉบับที่ 3, กันยายน – ธันวาคม

พรทิพย์ ศิริสุนทรลักษณ์, กัญญารัตน์ รุจิราษฎร์เรือง และ เกื้อพันธ์ ชยะสุนทร. (2552). การพัฒนา

กระบวนการผลิตข้าวหุงสุกเร็วด้วยวิธีการแช่น้ำ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 40 , ฉบับที่

1, มกราคม – เมษายน

วราภรณ์ ประเสริฐ และปรีศนา สุวรรณภรณ์. (2010). ผลของกระบวนการผลิตต่อสมบัติทาง

กายภาพและเคมีกายภาพของข้าวหอมมะลิที่สำเร็จรูป. Department of Food Science

and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

วุฒิชัย นาครักษา และสุภาภรณ์ธัญญะวานิช. (2005). การปรับปรุงคุณภาพข้าวหุงสุกเร็วโดยใช้

วิธีแช่เยือกแข็งร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ.สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, (37)

Chaiyong Taechapiroj, Isares Dhuchakallaya, Somchart Soponronarit,Somboon

Wetchacama and SomkiatPrachayawarakorn.(2003).Superheated steam

fluidised bed paddy drying. Journal of Food Engineering, (58), p.67 -73.

Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. (2011). Effects of parboiling and fluidized bed

drying on the physicochemical properties of germinated brown rice.

International Journal of Food Science and Technology, 46, 2498-2504.

Cheevitsopon, E., Noomhorm, A. and Roonprasang, K. (2012). Mathematical

- modeling of superheated-steam fluidized-bed drying of parboiled germinated brown rice, p. 102. In International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology 2012, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
- Jiraporn Sripinyowanich(2011). **Application of microwave-vibro-fluidized drying in production of instant rice.** Master of Science in Food Engineering and Bioprocess Technology Asian Institute of Technology, Thailand
- Marinos-Kouris, D. & Maroulis, Z.B. (2007). **Transport Properties in the Drying of Solids.** In: Handbook of Industrial Drying (edited by A.S. Mujumdar). P. 81-119. Boca Raton, FL, USA: CRC press.
- Marinos-Kouris, D. and Maroulis, Z.B. (2007). **Transport Properties in the Drying of Solids.** In: Handbook of Industrial Drying (edited by A.S. Mujumdar). p. 81-119. Boca Raton, FL, USA: CRC press.
- Payungsak Tamaisuk. **Cooked Rice Drying for Producing Instant Rice.** Energy Technology, School of Energy and Materials
- Srisoontaralak, P., Rujjarungruang, K and Chayasoontorn, K. (2009). **Process Development of Quick Cooking Rice by Soaking Method.** Agricultural Science, 40, p. 429-432
- Srisang, N., Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S and Varanyanond, W. (2009). **Hot-Air Fluidized Bed Drying of Germinated Brown Rice.** Agricultural Science, 40, 449-452
- Waraporn Prasert and Prisana Suwannaporn.(2009). **Optimization of instant jasmine rice process and its physicochemical properties.** Journal of Food Engineering, 95, p. 54-61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้