อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

THE EFFECTS OF FLUIDIZED BED DRYING TECHNIQUE USING SUPERHEATED STEAM AND HOT AIR ON QUALITY OF INSTANT GERMINATED BROWN RICE

ชนาพร สรวงเทพ
CHANAPORN SRUANGTHEP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-270-088

อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน ต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

THE EFFECTS OF FLUIDIZED BED DRYING TECHNIQUE USING SUPERHEATED STEAM AND HOT AIR ON QUALITY OF INSTANT GERMINATED BROWN RICE

ชนาพร สรวงเทพ
CHANAPORN SRUANGTHEP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562
KMITL-2019-EN-M-270-088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE EFFECTS OF FLUIDIZED BED DRYING TECHNIQUE USING SUPERHEATED STEAM AND HOT AIR ON QUALITY OF INSTANT GERMINATED BROWN RICE

CHANAPORN SRUANGTHEP

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-M-270-088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2019
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT’S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป
นักศึกษา	นางสาวชนาพร สรวงเทพ
รหัสประจำตัว	57601289
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์และอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีกระบวนการที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การผลิตข้าวกล้องงอก การผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุก และการอบแห้ง โดยการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งช่วยลดขั้นตอนการทำข้าวกล้องงอกหุงสุกเนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดกระบวนการนึ่งพร้อมกับกระบวนการอบแห้ง ทดลองอบแห้งข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน และอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C เช่นเดียวกัน จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นน้อยกว่า 12 % d.b. นำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้งมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 12 รูปแบบเพื่ออธิบายการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis และ Midilli et al. สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุดตามลำดับ ในการศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้งและหลังการคืนรูป ได้แก่ ความขาว ความหนาแน่นรวม อัตราการดูดน้ำกลับ อัตราการเพิ่มปริมาตร และเนื้อสัมผัส ผลการทดลองพบว่าค่าความขาวและอัตราการดูดน้ำของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่ความหนาแน่นรวม อัตราการเพิ่มปริมาตร และปริมาณสารกาบาสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อคืนรูปข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยวิธีไมโครเวฟ ผลการทดลองพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ผ่านการคืนรูปมีค่าความขาว ความแข็ง และความเหนียวต่ำกว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อน การทดสอบทางประสาทสัมผัสผลการทดลองพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยด้านลักษณะภายนอก เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงกว่าอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The Effects of Fluidized Bed Drying Technique Using Superheated Steam and Hot Air on Quality of Instant Germinated Brown Rice
Student	Miss Chanaporn Sruangthep
Student ID.	57601289
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Ekkapong Cheevitsopon

ABSTRACT

This research aimed to study the drying kinetics and the effects of fluidized bed drying technique using superheated steam and hot air on quality of instant germinated brown rice (IGBR). Generally, the IGBR production consists of three important operations: germinated brown rice (GBR) production, cooking of germinated brown rice and drying. The fluidized bed drying technique using superheated steam provided simultaneous cooking and drying of IGBR process as a single state. Cooked GBR samples were dried by a hot-air fluidized bed dryer (120, 140, and 160°C), while GBR samples were dried by a superheated-steam fluidized bed dryer (120, 140, and 160°C) until its moisture content reached 12% dry basis (d.b.). The moisture ratio values of samples were fitted to the twelve different mathematical drying models for describing drying. In this drying study, the Modified Henderson and Pabis model and Midilli et al. model were the best model for describing behavior of hot-air fluidized bed drying and superheated-steam fluidized bed drying, respectively. The qualities of dried samples undergoing different drying techniques were investigated, i.e. value of whiteness, bulk density, rehydration ratio, increased volume ratio and texture. The experimental results showed that, the values of whiteness and rehydration ratio of samples dried by superheated steam were lower than those dried by hot air while its bulk density, increased volume ratio and GABA content were higher. After rehydration of IGBR with microwave method, the results indicated that value of whiteness, hardness and stickiness of samples dried by superheated steam were lower than those dried by hot air. In addition, results of sensory test showed that the average scores of appearance, texture and overall acceptance of samples dried by superheated steam were higher than those dried by hot air. Then, a fluidized bed drying technique using superheated steam at the temperature of 160°C represents an optimal practice in the IGBR production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณวราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ ที่ช่วยจัดเตรียมอุปกรณ์และสอนการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

ขอบคุณ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในสาขาวิชาวิศวกรรมอาหารที่ช่วยทำการทดลอง

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ที่มอบชีวิต การศึกษา อนาคตที่ดี ตลอดจนให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ชนาพร สรวงเทพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ II
กิตติกรรมประกาศ........ III
สารบัญ........ IV
สารบัญตาราง........ VII
สารบัญรูป........ VIII
บทที่ 1 บทนำ........ 1
1.1 ความสำคัญและที่มา........ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา........ 2
1.3 ขอบเขตการศึกษา........ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 4
2.1 ข้าว........ 4
2.1.1 องค์ประกอบของข้าว........ 4
2.1.2 ชนิดของข้าว........ 5
2.2 ข้าวกล้อง........ 6
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง........ 6
2.2.2 ประโยชน์ของข้าวกล้อง........ 7
2.3 ข้าวกล้องงอก........ 8
2.4 ข้าวหุงสุกไว........ 9
2.5 ข้าวกึ่งสำเร็จรูป........ 9
2.5.1 กระบวนการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป........ 10
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูป........ 12
2.6 ทฤษฎีการอบแห้ง........ 13
2.6.1 หลักการอบแห้งอาหาร........ 13
2.6.2 ความชื้นและความชื้นสมดุล........ 15
2.6.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง........ 16
2.6.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้ง........ 16
2.7 การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด........ 18
2.7.1 การจำแนกประเภทของวัสดุอนุภาคตามเกณฑ์ของ Geldart (Geldart Classification of Particulate Materials) 18
2.7.2 ประเภทของฟลูอิไดเซชัน........ 18
2.7.3 ลักษณะฟลูอิไดซ์เบด........ 19
2.8 การอบแห้งวัสดุด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง........ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

2.9.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก.. 22

2.9.2 กระบวนการผลิตข้าวหุงสุก... 22

2.9.3 การอบแห้งสำหรับการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป....................................... 23

2.9.4 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง................ 24

2.9.5 กระบวนการคืนรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูป.. 25

2.9.6 ปัจจัยของกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสำเร็จรูป... 25

2.10 สรุปแนวทางการศึกษา.. 26

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.. 27

3.1 การเตรียมข้าวกล้อง.. 27

3.2 การเตรียมข้าวกล้องงอก.. 28

3.3 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุก.. 29

3.4 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน................ 30

3.5 หลักการทำงานเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน........................ 31

3.6 หลักการทำงานเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.......... 31

3.7 การทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน.. 33

3.8 การทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.......................... 33

3.9 การศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน.. 34

3.9.1 ค่าไคสแควร์... 35

3.9.2 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย............................. 35

3.9.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์....................................... 35

3.9.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusivity) 35

3.9.5 พลังงานกระตุ้น... 36

3.10 การวิเคราะห์คุณภาพเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง.. 36

3.10.1 ความขาว.. 36

3.10.2 ความหนาแน่นรวม.. 37

3.10.3 อัตราการดูดน้ำกลับ.. 37

3.10.4 อัตราการเพิ่มปริมาตร... 38

3.10.5 สารกาบา.. 38

3.11 วิธีการคืนรูป.. 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.12 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการคืนรูป.. 39
3.12.1 เนื้อสัมผัส.. 39
3.12.2 ความขาว... 40
3.12.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส.. 40
3.13 การวิเคราะห์ทางสถิติ.. 40

บทที่ 4 ผลการทดลอง... 41
4.1 การศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน.. 41
4.1.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง... 41
4.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่... 44
4.1.3 พลังงานกระตุ้น... 45
4.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน...................... 47
4.1.5 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด.. 51
4.2 คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการอบแห้ง.. 52
4.2.1 ความขาว... 52
4.2.2 ความหนาแน่นรวม... 53
4.2.3 อัตราการดูดน้ำกลับ.. 54
4.2.4 อัตราการเพิ่มปริมาตร.. 55
4.2.5 สารกาบา.. 56
4.3 คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการคืนรูป.. 58
4.3.1 ความขาว... 58
4.3.2 เนื้อสัมผัส.. 59
4.3.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส... 62
4.3.4 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้งและหลังการคืนรูป.. 62

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.. 65
5.1 สรุปผลการทดลอง.. 65
5.1.1 การศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน...................... 65
5.1.2 ศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป........................... 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ........ 67
เอกสารอ้างอิง........ 68
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่........ 72
ประวัติผู้เขียน........ 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ประโยชน์ของสารอาหารที่มีในข้าวกล้องงอกต่อร่างกาย.. 9
2.2 สมการการอบแห้งชั้นบาง... 17
3.1 สมการการอบแห้ง.. 34
4.1 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน.. 48
4.2 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.. 49
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis.. 51
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Midilli et al. 51
4.5 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อค่าความขาวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง.. 52
4.6 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อความหนาแน่นรวมของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง.............................. 53
4.7 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่ออัตราการดูดน้ำกลับของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง............................. 54
4.8 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่ออัตราการเพิ่มปริมาตรของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง........................... 55
4.9 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง.................................. 56
4.10 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อค่าความขาวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป....................................... 58
4.11 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป.. 59
4.12 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป.. 61
4.13 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้งและหลังการคืนรูป.. 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.......... 4
2.2 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งกับความชื้น.......... 14
2.3 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิไดเซชัน.......... 20
3.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้อง.......... 27
3.2 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก.......... 28
3.3 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุก.......... 29
3.4 แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน.......... 30
3.5 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน.......... 31
3.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน.......... 32
3.7 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.......... 32
3.8 แผนภาพเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน.......... 33
3.9 เครื่องวัดสี HunterLab รุ่น ColorFlex EZ 37
3.10 การวิเคราะห์คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป.......... 38
3.11 การคืนรูปข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยไมโครเวฟ.......... 39
3.12 การทดสอบแบบ Back Extrusion ด้วยเครื่อง Texture Analyzer.......... 39
3.13 การวิเคราะห์คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการคืนรูป.......... 40
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน.......... 42
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.......... 42
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งกับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน.......... 43
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งกับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.......... 43
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับเวลาการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน... 44
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับเวลาของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.......... 45
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน 46
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.......... 46
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.......... 50
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง ความชื้น 12 % d.b. 57

4.12 ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูปด้วยไมโครเวฟ....................................... 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในภูมิภาคเอเชียนิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารหลักมากกว่าในภูมิภาคอื่น ๆ ของโลก การผลิต การบริโภคข้าว และการค้าข้าวส่วนใหญ่จึงอยู่ในบริเวณทวีปเอเชีย ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณส่งออกข้าวปีละประมาณ 10 ล้านตัน (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2562) คนไทยส่วนใหญ่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก ข้าวที่นิยมบริโภคอยู่ในรูปข้าวขาว ซึ่งเป็นข้าวที่มีสารอาหารน้อยกว่าข้าวกล้อง เพราะข้าวขาวผ่านกระบวนการขัดสีทำให้รำข้าวและจมูกข้าวซึ่งเป็นส่วนที่อุดมไปด้วยโปรตีน วิตามิน แร่ธาตุ และเส้นใยอาหารที่สำคัญที่ร่างกายต้องการสูญเสียในกระบวนผลิตข้าวขาว ดังนั้นผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพจึงหันมาบริโภคข้าวกล้องเพิ่มขึ้น ปัจจุบันนี้มีการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและมูลค่าทางเศรษฐกิจในรูปของข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์และมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวกล้อง ซึ่งเป็นการนำข้าวกล้องมาผ่านกระบวนการงอก โดยการนำข้าวกล้องแช่น้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 12-48 ชั่วโมง (งามชื่น คงเสรี และคณะ, 2551) น้ำไปกระตุ้นเอนไซม์ในเมล็ดข้าวกล้องทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอาหารในเมล็ดข้าวได้เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง และพบการสะสมสารอาหารต่างๆ ที่สำคัญ เช่น แกมมาออริซานอล (Gamma-oraznol) โทโคฟีรอล (Tocopherol) โทโคไตรอีนอล (Tocotrienol) ใยอาหาร วิตามินอี ไลซีน และไนอะซินเพิ่มขึ้นเกือบ 4 เท่า วิตามินบี 1 แมกนีเซียมเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า และโดยเฉพาะสารแกมมาอะมิโนบิวทิริกแอซิด (Gamma-aminobutyric acid) หรือที่รู้จักกันว่า สารกาบา (GABA) ซึ่งพบว่าข้าวกล้องงอกมีสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 10-15 เท่า สารกาบามีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทในระบบประสาทส่วนกลางประเภทสารยับยั้งโดยทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมองทำให้เกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย อีกทั้งช่วยป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ และช่วยลดการเกิดโรคความดันโลหิตสูงและยับยั้งการเกิดโรคมะเร็งได้อีกด้วย (Komatsuzaki et al., 2007) ซึ่งปริมาณสารกาบาที่พบในข้าวกล้องงอกแตกต่างกันไปขึ้นกับพันธุ์ของข้าว โดยเมื่อเปรียบเทียบข้าวกล้องงอกกับข้าวขาวพบว่าข้าวกล้องงอกเมื่อหุงแล้วมีลักษณะนุ่ม และมีรสชาติหวานกว่าข้าวขาว ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกจึงเป็นนวัตกรรมหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจจากผู้ประกอบการภาคเอกชนทั้งไทย และต่างประเทศเป็นอย่างมาก

ข้าวกึ่งสำเร็จรูป (Instant rice) เป็นผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีวิธีการเตรียมรับประทานได้สะดวกและใช้ระยะเวลาสั้น โดยการเติมน้ำร้อน หรือเติมน้ำและให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเพื่อให้เกิดการคืนรูป ลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค ได้แก่ น้ำหนักเบาพกพาได้สะดวก และมีอายุการเก็บรักษายาวนาน นอกจากนี้ผู้บริโภคยังมีความต้องการบริโภคอาหารสุขภาพที่มีสารอาหารและคุณค่าทางโภชนาการที่จำเป็นต่อร่างกาย ข้าวกล้องงอกกึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำเร็จรูปจึงไม่เป็นเพียงผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูป แต่ยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการ รวมทั้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มมูลค่าให้กับข้าวอีกด้วย

ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป (Instant germinated brown rice) เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งของข้าวกล้องงอก การผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ การทำข้าวกล้องงอก การทำข้าวกล้องงอกหุงสุก และการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น โดยการลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีผลทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหารไม่สามารถเจริญเติบโตได้ การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดเหมาะสำหรับใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก และมีความชื้นสูงได้อย่างรวดเร็ว ทั่วถึงและสม่ำเสมอภายในระยะเวลาสั้น เนื่องจากตัวกลางในการอบแห้งกับผลิตภัณฑ์สามารถสัมผัสกันได้เป็นอย่างดี (Srisang et al., 2011) การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้งมีจุดเด่นที่สำคัญ คือ ไม่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากอากาศที่อยู่ภายในห้องอบแห้งถูกแทนที่ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Nimmol et al., 2007) รวมทั้งทำให้เกิดกระบวนการอื่นๆ พร้อมกับกระบวนการอบแห้ง เช่น การลวก (Prachayawarakorn et al., 2002) และ การทำข้าวนึ่ง (Parboiling) (Soponronnarit et al., 2006) ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนการทำข้าวหุงสุกในการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป การอบแห้งด้วยอากาศร้อนก่อให้เกิดการแตกร้าวของเมล็ดข้าวในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ส่วนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดปริมาณการแตกร้าวของเมล็ดข้าวด้วยการเกิดเจลลาทิไนเซชันแป้งในเมล็ดข้าว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งมีความพรุน (Porosity) สูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเนื่องจากน้ำในผลิตภัณฑ์เดือดระหว่างการอบแห้งทำให้เกิดการขยายปริมาตรของน้ำ โครงสร้างภายในของวัสดุถูกดันให้ขยายตัวออกไปทำให้ค่าความพรุนสูงขึ้นส่งผลให้อาหารที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถคืนรูปได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมอาหารกึ่งสำเร็จรูปเป็นอย่างยิ่ง (สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป เพื่อพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป โดยศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน และศึกษาคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จที่ได้จากการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน ได้แก่ การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ได้แก่ ปริมาณสารกาบา ความขาว ความหนาแน่นรวม อัตราการดูดน้ำกลับ อัตราการเพิ่มปริมาตร เนื้อสัมผัส และการทดสอบทางประสาทสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา คือ ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) เพาะงอกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างควบคุมข้าวกล้องงอกหุงสุก คือ การนึ่งด้วยไอน้ำ ร่วมกับการแช่น้ำร้อน

1.3.3 ระบบอบแห้งที่ใช้ในการศึกษา คือ การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

1.3.4 การคืนรูปข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยวิธีไมโครเวฟ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

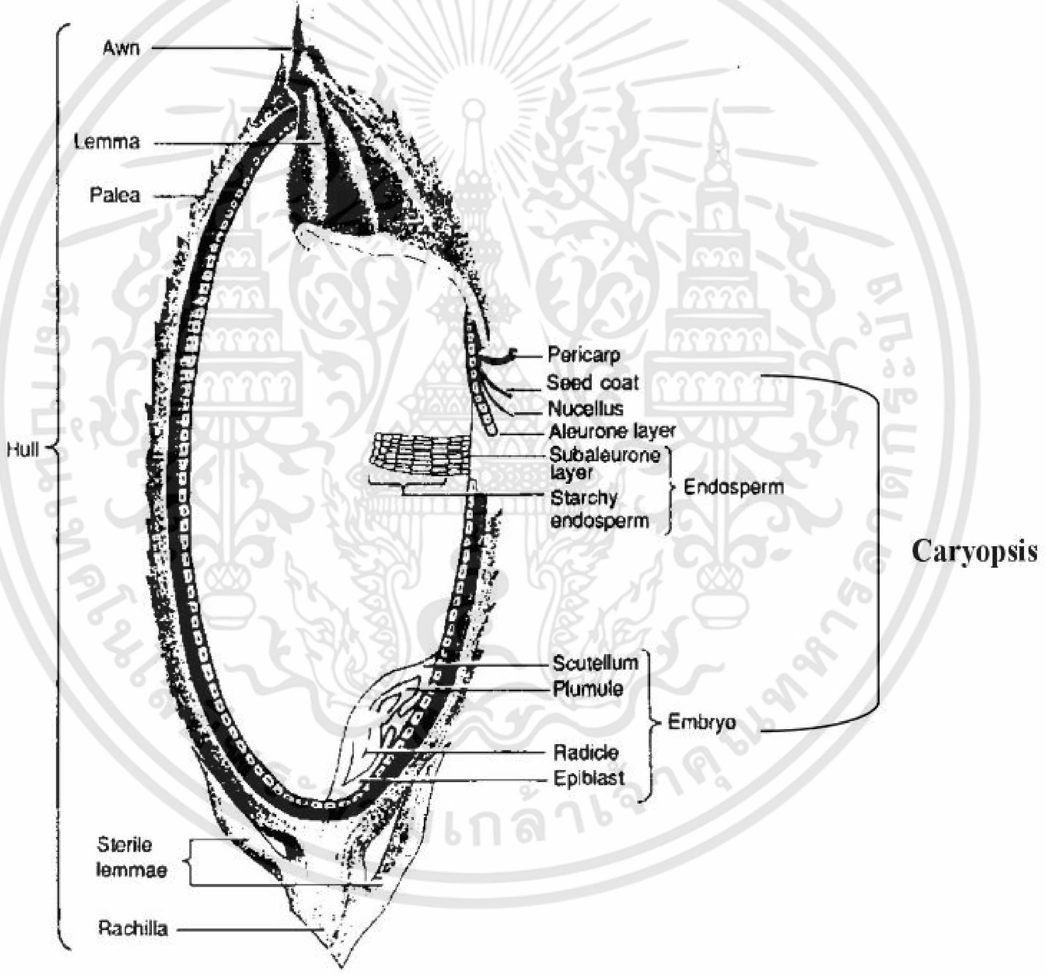
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว (Rice)

2.1.1 องค์ประกอบของข้าว

ข้าวเป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียกเมล็ดข้าว (Rice grain หรือ Rice seed) ซึ่งทางพฤกษศาสตร์หมายถึงผล (Fruit) ที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว (Single fruit) เกิดจากรังไข่อันเดียว โดยเมล็ดข้าวมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Juliano et al., 1981)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว (Juliano et al., 1981)

2.1.1.1 เปลือกนอก (Hull หรือ Husk) คือ ส่วนที่เรียกว่าแกลบ ซึ่งเมื่อกะเทาะเปลือกนอกของเมล็ดออกจะได้ข้าวกล้อง โดยข้าวเปลือกประกอบด้วยแกลบประมาณร้อยละ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 เปลือกเมล็ด (Caryopsis) คือ ส่วนที่เป็นรำข้าว (Rice bran) ซึ่งประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ส่วน คือ ส่วนเยื่อหุ้มผล (Pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) และนูเซลลัส (Nucellus) โดยเมล็ดข้าวเปลือกจะประกอบด้วยรำประมาณร้อยละ 5

2.1.1.3 แป้ง (Endosperm) คือ ส่วนเนื้อของเมล็ด โดยเมล็ดข้าวเปลือกประกอบด้วยแป้งประมาณร้อยละ 72 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) ชั้นอะลูโลน (Aleurone layer) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดของส่วนที่เป็นแป้ง ซึ่งจะอุดมไปด้วยแร่ธาตุต่างๆ อาทิเช่น ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และโพแทสเซียม

2) เนื้อแป้ง (Starchy endosperm) เป็นเนื้อแป้งชั้นใน ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) เป็นส่วนใหญ่

2.1.1.4 คัพภะ (Embryo) คือ ส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าว (Germ) เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อนอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน และวิตามิน เช่น วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และวิตามินบี 3 ซึ่งวิตามินเหล่านี้จะถูกขัดออกไปเมื่อผ่านกระบวนการขัดขาว (จารุรัตน์ สันเต, 2550) โดยเมล็ดข้าวจะมีจมูกข้าวเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 3 ซึ่งประกอบด้วยรากอ่อน (Radical) ต้นอ่อน (Pulmule) เยื่อหุ้มรากอ่อน (Coleorhiza) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (Coleoptile) ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (Scutellum)

2.1.2 ชนิดของข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.1.2.1 การแบ่งชนิดของข้าวตามแหล่งปลูก

ข้าวที่นำมาปลูกเพื่อบริโภคเป็นอาหารนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ข้าว *Oryza sativa L.* เป็นข้าวที่ปลูกในทวีปเอเชีย และ *Oryza glaberrima Steud.* เป็นข้าวที่ปลูกในทวีปแอฟริกา โดยข้าวที่ค้าขายกันในตลาดโลกส่วนใหญ่เป็นข้าว *Oryza sativa L.* ซึ่งข้าวชนิดดังกล่าวสามารถแบ่งได้ 3 สายพันธุ์ ดังนี้

1) ข้าวอินดิกา (Indica) เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดยาวรี ต้นสูง ค้นพบครั้งแรกในประเทศอินเดีย และเริ่มปลูกแพร่หลายมากขึ้นในประเทศต่าง ๆ ของทวีปเอเชีย เช่น จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไทย อินโดนีเซีย อินเดีย และศรีลังกา เป็นต้น และต่อมาได้มีการพัฒนานำไปปลูกในทวีปอเมริกา

2) ข้าวจาปอนิกา (Japonica) เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดป้อม ต้นเตี้ย นิยมปลูกในเขตอบอุ่น เช่น จีน ญี่ปุ่น เกาหลี

3) ข้าวจาวานิกา (Javanica) เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดป้อมใหญ่ ส่วนใหญ่ปลูกในประเทศอินโดนีเซียและฟิลิปปินส์ แต่เป็นสายพันธุ์ที่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากให้ผลผลิตต่ำ

2.1.2.2 การแบ่งชนิดของข้าวตามปริมาณอมิโลส

โครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวจะมีอมิโลเพคติน (Amylopectin) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีอมิโลส (Amylose) เป็นองค์ประกอบรอง ซึ่งปริมาณอมิโลสในแป้งข้าวส่งผลต่อลักษณะของข้าวหุงสุก โดยข้าวที่มีอมิโลสมาก ในระหว่างการหุงต้มสามารถดูดน้ำได้มากกว่าข้าวที่มีอมิโลสต่ำ ทำให้ข้าวหุงขึ้นหม้อ อีกทั้งลักษณะของข้าวหุงสุกแข็งและร่วน ซึ่งแตกต่างจากข้าวที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณอมิโลสต่ำที่หลังผ่านการหุงสุก ลักษณะของเมล็ดข้าวเหนียวและนุ่ม ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของข้าวโดยใช้ปริมาณอมิโลสเป็นเกณฑ์ได้ 4 ชนิด ดังนี้

1) ข้าวเหนียวเป็นข้าวที่มีปริมาณอมิโลสร้อยละ 0-2 เมื่อหุงต้มลักษณะของข้าวหุงสุกจะเหนียวมาก เช่น ข้าวเหนียวสันป่าตอง กข 6 และ กข 10 เป็นต้น

2) ข้าวเจ้าอมิโลสต่ำ เป็นข้าวที่มีปริมาณอมิโลสร้อยละ 10-19 เมื่อหุงต้มลักษณะของข้าวหุงสุกจะนุ่มเหนียว เช่น ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 กข 15 กข 21 ปทุมธานี 1 ข้าวเจ้าหอมคลองหลวง ข้าวเจ้าหอมสุพรรณบุรี และข้าวสังข์หยดพัทลุง เป็นต้น

3) ข้าวเจ้าอมิโลสปานกลาง เป็นข้าวที่มีปริมาณอมิโลสร้อยละ 20-25 เมื่อหุงต้มลักษณะของข้าวหุงสุกค่อนข้างนุ่ม เช่น ข้าวพันธุ์ กข 7 กข 23 สุพรรณบุรี 60 ขาวตาแห้ง 17 สุพรรณบุรี 2 เข็มทอง เล็บนกปัตตานี ดอกพะยอม และหอมจันทร์ เป็นต้น

4) ข้าวเจ้าอมิโลสสูง เป็นข้าวที่มีปริมาณอมิโลส มากกว่าร้อยละ 25 เมื่อหุงต้มลักษณะของข้าวหุงสุกจะร่วนและแข็ง เช่น ข้าวพันธุ์นางพญา 132 เฉลี้ยงพัทลุง ชัยนาท 1 ปทุมธานี 60 สุพรรณบุรี 1 สุพรรณบุรี 90 เหลืองประทิว 123 และปราจีนบุรี 1 เป็นต้น

2.2 ข้าวกล้อง (Brown rice) (งามชื่น คงเสรี, 2547)

ข้าวกล้อง (Brown rice) คือ ข้าวที่ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออก หรือข้าวที่ผ่านการขัดสีเพียงครั้งเดียว โดยข้าวที่ได้จะมีลักษณะสีขาวขุ่น และเป็นข้าวที่ยังคงมีจมูกข้าวและรำข้าวอยู่ ส่งผลให้ข้าวกล้องมีคุณค่าทางโภชนาการและเป็นประโยชน์ต่อร่างกายมากกว่าข้าวขาว

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง

2.2.1.1 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ในข้าวกล้องมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ แป้ง (Starch) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เซลลูโลส (Cellulose) และน้ำตาลอิสระ (Free sugars)

1) แป้ง (Starch) ในข้าวกล้องประกอบด้วยแป้งประมาณร้อยละ 80-90 ของน้ำหนักข้าวกล้อง เป็นอมิโลสประมาณร้อยละ7-33 ส่วนที่เหลือเป็นอมิโลเพคติน โดยโครงสร้างของเม็ดแป้งในข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีขนาดใกล้เคียงกัน

2) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ในข้าวกล้องมีเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 1-2 ซึ่งส่วนใหญ่พบในรำข้าว

3) เซลลูโลส (Cellulose) ในข้าวกล้องมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 2-3 ของน้ำหนักข้าวกล้อง ส่วนใหญ่พบในรำข้าวและจมูกข้าว

4) น้ำตาลอิสระ (Free sugars) ข้าวกล้องมีน้ำตาลอิสระเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 1-2 โดยส่วนใหญ่พบในจมูกข้าวและเนื้อแป้ง ซึ่งน้ำตาลอิสระที่พบมาก ได้แก่ น้ำตาลซูโครส (Sucrose) และน้ำตาลราฟิโนส (Raffinose) ส่วนน้ำตาลกลูโคส (Glucose) และน้ำตาลฟรุคโตส (Fructose) พบว่ามีอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 สารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen compounds)

ข้าวกล้องมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 9-14 ซึ่งมีมากเป็นอันดับสองรองจากแป้ง พบในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด โดยโปรตีนส่วนใหญ่ที่พบ คือ อัลบูมิน (Albumin) โกลบูลิน (Globulin) และกลูเตนิน (Glutenin) นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวกล้องยังประกอบไปด้วยสารประกอบไนโตรเจนอื่น ๆ อีก เช่น ฮิสทิดีน (Histidine) อะลานีน (Alanine) ออร์นิทีน (Ornithine) และกรดไรโบนิวคลิอิก (Ribonucleic acid) เป็นต้น

2.2.1.3 ไขมัน (Fat)

ข้าวกล้องมีไขมันเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 1-3 โดยพบอยู่ในรำข้าวซึ่งไขมันที่พบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) และกรดปามิติก (Palmitic acid) ส่วนกรดยูริก (Uric acid) และกรดไมริสโทเลอิก (Myristoleic acid) นั้นพบว่ามีอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.2.1.4 วิตามิน (Vitamin)

ข้าวกล้องมีวิตามินเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 3-4 ส่วนใหญ่พบในรำข้าว และจมูกข้าว โดยวิตามินที่พบ คือ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และวิตามินบี 3

2.2.1.5 แร่ธาตุ (Mineral)

ข้าวกล้องมีแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 2-3 โดยปริมาณแร่ธาตุที่พบในเมล็ดข้าวกล้องจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของดินที่ปลูก แร่ธาตุที่พบ ได้แก่ แคลเซียม (Calcium) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) เหล็ก (Iron) เซเลเนียม (Selenium) และแมกนีเซียม (Magnesium) โดยแร่ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะช่วยเสริมสร้างการทำงานในระบบต่างๆ ของร่างกาย

2.2.2 ประโยชน์ของข้าวกล้อง

ข้าวกล้องมีคุณค่าทางโภชนาการมากมาย เพราะอุดมไปด้วยวิตามินบี (Vitamin B) วิตามินอี (Vitamin E) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ อีกทั้งเยื่อหุ้มเมล็ดประกอบด้วยใยอาหาร ซึ่งทางการแพทย์พบว่าเส้นใยเหล่านี้ มีส่วนช่วยป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่และกระเพาะอาหาร นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการดูดซึมไขมันชนิดอิ่มตัวเข้าสู่กระเพาะอาหารอีกด้วย การบริโภคข้าวกล้องจึงมีประโยชน์ต่อร่างกายหลายประการ เช่น คาร์โบไฮเดรตให้พลังงานแก่ร่างกาย โปรตีนช่วยเสริมสร้างและซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ไขมันชนิดที่ไม่อิ่มตัวให้พลังงานและความอบอุ่นแก่ร่างกาย นอกจากนี้ยังได้รับประโยชน์จากสารอาหารอื่น เช่น วิตามินต่าง ๆ ได้แก่

- วิตามินบี 1 ช่วยป้องกันโรคเหน็บชา และช่วยในกระบวนการเปลี่ยนแป้งในร่างกายให้เป็นพลังงาน อีกทั้งช่วยในการทำงานของระบบประสาทในการควบคุมกล้ามเนื้อ
- วิตามินบี 2 ช่วยป้องกันโรคปากนกกระจอก และช่วยในการเผาผลาญอาหารให้เป็นพลังงาน
- วิตามินบี 3 ช่วยในการทำงานของระบบผิวหนังและระบบประสาท

นอกจากนี้ข้าวกล้องยังประกอบไปด้วยเส้นใยอาหาร ซึ่งเป็นสารประกอบน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ (Polysaccharides) ที่มีอยู่ในผนังของเซลล์พืช และมีอยู่มากในชั้นรำของข้าวกล้อง เมื่อบริโภคเข้าไปแล้วจะผ่านกระเพาะและลำไส้เล็กได้ง่าย เนื่องจากน้ำย่อยไม่สามารถย่อยได้ เส้นใยอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดจึงถูกขับออกมาและช่วยพาสิ่งที่ตกค้างอยู่ในลำไส้ออกไปเป็นกากอาหาร ทำให้ขับถ่ายสะดวก ป้องกันอาการท้องผูกและช่วยป้องกันการเป็นมะเร็งลำไส้

แม้ว่าข้าวกล้องมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวขาว แต่ข้าวกล้องกลับไม่เป็นที่นิยมของผู้บริโภคมากนัก เนื่องจากที่รำของข้าวกล้องมีโปรตีนเป็นตัวขวางกั้นการดูดซึมน้ำในระหว่างการหุง จึงทำให้ข้าวกล้องมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง หุงสุกยาก อีกทั้งข้าวกล้องมีสีไม่น่ารับประทานเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวขาว นอกจากนี้ข้าวกล้องยังมีอายุในการเก็บรักษาสั้น เนื่องจากเกิดกลิ่นหืนจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพของข้าวกล้องสามารถทำได้โดยนำข้าวมาผ่านกระบวนการเพาะงอก (Germination process) จนกระทั่งได้เป็นข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice)

2.3 ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) (สุนัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์, 2556)

ข้าวกล้องงอก เป็นการนำข้าวกล้องไปผ่านกระบวนการงอกเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของเมล็ดข้าวจนได้ข้าวกล้องงอกกระบวนการงอกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในเมล็ดข้าว โดย Hydrolytic enzyme ภายในเมล็ดข้าวจะถูกกระตุ้นในระหว่างการงอก ซึ่งเอนไซม์เหล่านี้ไปย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้ง โปรตีน และ Non-starch polysaccharide ให้กลายเป็นสารโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล เปปไทด์ และกรดอะมิโน (Saman et al., 2008) เป็นต้น ซึ่งสารอาหารเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของเมล็ด ด้วยเหตุนี้ในข้าวกล้องงอกจึงอุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์มากมาย เช่น แกมมาออริซานอล กรดเฟอรูลิก กรดไฟติก และสารแกมมาอะมิโนบิวทิริกแอซิด (Gamma-aminobutyric acid, GABA) เป็นต้น โดยเฉพาะสาร GABA ซึ่งจะเพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 10-15 เท่า สารอาหารเหล่านี้มีประโยชน์ต่อร่างกายดังแสดงในตางรางที่ 2.1

สารแกมมาอะมิโนบิวทิริกแอซิด เป็นกรดอะมิโนที่เกิดจากกระบวนการ Decarboxylation ของกรดกลูตามิก (Glutamic acid สาร GABA ทำหน้าที่เป็นสารสื่อนำประสาท (Neurotransmitter) ประเภทสารยับยั้ง (Inhibitor) ในระบบประสาทส่วนกลาง (Kinnersley & Turano, 2000) ซึ่งช่วยรักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้น ทำให้สมองเกิดการผ่อนคลาย นอนหลับสบาย ช่วยป้องกันและบำบัดอาการของโรคทางประสาท เช่น ป้องกันการทำลายสมองเนื่องจากสารเบต้าไมลอยด์เปปไทด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคสูญเสียความทรงจำ (อัลไซเมอร์) นอนไม่หลับและโรควิตกกังวล เป็นต้น อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโตทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อเกิดความกระชับ และเกิดสาร Lipotropic ซึ่งเป็นสารป้องกันการสะสมไขมัน ทำให้ช่วยในการควบคุมน้ำหนักตัวอีกด้วย นอกจากนี้สาร GABA ยังช่วยบำบัดอาการเจ็บป่วยอื่น ๆ อีก เช่น ช่วยยับยั้งการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็ง (Oh & Oh, 2004) และช่วยบำบัดอาการนอนไม่หลับ

นอกจากปริมาณสารอาหารที่เพิ่มขึ้นในข้าวกล้องงอกแล้ว กระบวนการงอกโดยการนำข้าวกล้องมาแช่น้ำจะช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องให้ดีขึ้น เนื่องจากการนำข้าวกล้องไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แช่น้ำทำให้เมล็ดข้าวดูดน้ำเข้าไปได้มากขึ้น เมื่อนำข้าวไปหุงต้ม ภายในเมล็ดข้าวมีปริมาณน้ำที่เพียงพอทำให้เกิดเจลาทิไนเซชันได้ง่ายและเร็วขึ้น การเกิดเจลาทิไนเซชันที่ดีขึ้นในข้าวกล้อง ทำให้ได้ข้าวกล้องที่มีเนื้อสัมผัสที่นุ่มขึ้น รวมทั้งทำให้สารอาหารในเมล็ดสามารย่อยสลาย และดูดกลืนไปใช้งานได้ง่ายขึ้น (Komatsuzaki et al., 2007)

ตารางที่ 2.1 ประโยชน์ของสารอาหารที่มีในข้าวกล้องงอกต่อร่างกาย (Shallan et al., 2010)

สารอาหาร	ประโยชน์ของสารอาหาร
แกมมาอะมิโนบิวทิริกแอซิด	เร่งกระบวนการเผาผลาญพลังงานในสมอง ป้องกันอาการปวดศีรษะ หรือภาวะที่ผนังเส้นโลหิตแดงหนาเนื่องจากความเครียด ป้องกันโรคนอนไม่หลับ
ใยอาหารอินโนซิทอล	ป้องกันการเกิดท้องผูก และป้องกันโรคมะเร็งลำไส้ ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด
กรดเฟอรูลิก	เร่งกระบวนการเผาผลาญไขมัน ป้องกันภาวะที่ผนังเส้นโลหิตแดงหนา
กรดไฟติก	เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยในการสร้างเม็ดสีให้แก่ผิว
วิตามินอี	ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน และป้องกันการตกตะกอนของเกล็ดเลือด
แมกนีเซียม	เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และป้องกันผิวจากแสงแดด
โพแทสเซียม	ป้องกันโรคหัวใจ
สังกะสี	ลดระดับความดันโลหิต
แกมมาออริซานอล	ป้องกันภาวะผนังเส้นโลหิตแดงหนา
ไดเปปติเดส	ป้องกันการเกิดโรคสมองเสื่อม

2.4 ข้าวหุงสุกไว (Quick cooking rice)

ข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยต้มในน้ำร้อนหรือไอน้ำร้อน เพื่อให้ข้าวสุขถึงระดับหนึ่งโดยการสุขเพียงบางส่วน (Partially gelatinization) แล้วทำให้แห้งโดยมีโครงสร้างที่มีรูพรุน เพื่อให้ดูดน้ำกลับได้ง่าย และใช้ระยะเวลาสั้นเพียง 10-15 นาทีในการเตรียมก่อนรับประทาน (พรทิพย์ ศิริสุนทราลักษณ์ และคณะ, 2552)

2.5 ข้าวกึ่งสำเร็จรูป (Instant rice) (วิภาวดี สงัดกิจ, 2547)

ข้าวกึ่งสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปชนิดหนึ่ง โดยคุณลักษณะที่สำคัญของข้าวกึ่งสำเร็จรูป ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ควรแห้งความชื้นประมาณ 10-12 % แยกตัวจากกัน ไม่เกาะเป็นก้อน รูปร่างเมล็ดสมบูรณ์ไม่แตกหักจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และมีค่าความหนาแน่นรวมประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.4-0.42 g/cm^3 ค่าความหนาแน่นรวมเกี่ยวข้องกับความพรุนของข้าว ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีค่าความหนาแน่นรวมต่ำแสดงว่ามีความพรุนมาก สามารถคืนรูปได้อย่างรวดเร็วซึ่งมีผลต่อระยะเวลาการคืนรูปของข้าว โดยข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีความพรุนมากช่วยให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในเมล็ดได้เร็ว ดังนั้นระยะเวลาในการคืนรูปจึงสั้น ซึ่งการที่ทำให้ค่าความหนาแน่นรวมต่ำนั้นทำได้โดยการทำให้ข้าวสุกดูดซับน้ำเป็นปริมาณมากก่อนที่จะทำแห้งและต้องทำแห้งโดยการระเหยน้ำออกอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนานเกินไปอาจทำให้ข้าวดูดซับน้ำมากเกินไป ซึ่งเป็นผลให้เมื่อนำไปคืนรูปแล้ว ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแฉะเละมีคุณภาพไม่เป็นที่ต้องการ นอกจากนี้แล้วการใช้วิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน เช่น การทำแห้งด้วยลมร้อน การทำแห้งโดยการลดความดันในระบบสุญญากาศ หรือการทำแห้งแบบระเหิดน้ำมีผลต่อความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ สำหรับวิธีการในการคืนรูปต้องทำได้ไม่ยุ่งยากและสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การต้มในน้ำเดือด การเติมน้ำร้อน และการใช้ไมโครเวฟ เป็นต้น โดยระยะเวลาในการคืนรูปควรสั้น เนื่องจากน้ำแทรกเข้าไปในเมล็ดในระยะเวลาอันสั้น ทั้งนี้สามารถพิจารณาจากอัตราการดูดน้ำกลับ (Rehydration ratio) (น้ำหนักข้าวที่คืนรูปแล้วต่อน้ำหนักเริ่มต้น) ถ้าอัตราการดูดน้ำกลับมากแสดงว่าข้าวมีความพรุนมาก แสดงว่าคืนรูปได้เร็วกว่าข้าวที่มีอัตราการดูดน้ำกลับต่ำกว่า คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ภายหลังการคืนรูป ได้แก่ ปริมาตรรวมมีค่า 1.5-3.0 เท่าของผลิตภัณฑ์ก่อนคืนรูป ผลิตภัณฑ์เมื่อคืนรูปมีเนื้อสัมผัส สี กลิ่น ใกล้เคียงข้าวหุงสุกด้วยวิธีธรรมดา และมีคุณค่าทางอาหารเหมาะสม

2.5.1 กระบวนการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป

ที่ผ่านมาได้มีผู้พัฒนาปรับปรุงรูปแบบวิธีการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปมาโดยตลอด โดยมีวัตถุประสงค์แตกต่างกันไป เช่น เพื่อเพิ่มปริมาณการบริโภค ลดเวลาในการเตรียมหรือเพื่อพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ที่ให้ความสะดวก จึงได้สรุปรวบรวมกระบวนการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปไว้เป็นหมวดหมู่ ดังนี้

2.5.1.1 การแช่ข้าว-ต้ม/ไอน้ำ-ทำแห้ง (The “Soak-Boil-Steam-Dry” Method)

กระบวนการนี้เป็นวิธีแรกที่ใช้ในการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป ตามวิธีของ Ozari-Durrani ค.ศ.1948 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ การแช่ข้าวสาร การให้ความร้อนเพื่อทำให้สุกและการทำแห้ง วิธีการถูกนำมาพัฒนาปรับปรุงต่อในหลายวิธี เช่น การพยายามทำให้เมล็ดข้าวเกิดรอยร้าวมากขึ้น จึงมีการนำข้าวสารไปผ่านกรรมวิธีต่างๆ อาจมีการใช้ความร้อนหรือแรงบีบทำให้เมล็ดข้าวร้าวมากขึ้น ส่งผลให้น้ำหรือไอน้ำสามารถซึมผ่านเข้าสู่เมล็ดข้าวได้ง่ายขึ้น ช่วยให้ลดเวลาการแช่ข้าวหรือหุงลงได้

2.5.1.2 การทำให้เกิดการพองตัว (The Expanded and Pregelatinized Rice)

หลักการของวิธีการนี้คือ นำข้าวสารมาผ่านการเจลาติไนเซชันก่อน โดยการให้ความร้อนด้วยวิธีต่างๆ เมล็ดข้าวที่ได้ในขั้นตอนนี้จะมีลักษณะแข็งใสและหดตัว มีความหนาแน่นมาก หลังจากนั้นทำให้พองโดยการใช้ไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง ข้าวหุงสุกเร็วที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าเดิมประมาณ 4 เท่า เบาและมีรูพรุน ใช้เวลาในการคืนรูปสั้นประมาณ 2-3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3 การใช้ลูกกลิ้ง (The Rolling or Bumping Treatment)

เป็นการใช้ลูกกลิ้งกดทับเมล็ดข้าวที่หุงสุกแล้วเพื่อให้แบนก่อนลดความชื้นซึ่งจะทำให้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้เป็นแผ่นบางๆ มีพื้นที่ในการสัมผัสน้ำได้มากขึ้น ทำให้การดูดคืนน้ำระหว่างการคืนรูปเร็วใช้เวลาน้อย

2.5.1.4 การใช้ความร้อนแห้ง (Dry Heat Treatment)

ก่อนการแช่ข้าวสาร มีการใช้ความร้อนแห้งเพื่อทำให้เมล็ดข้าวสารเกิดรอยแตกเล็กๆ ที่เรียกว่า Fissure ขยายตัวจากผิวเข้าสู่ภายในเมล็ดจนทั่วทั้งเมล็ดจะทำให้ง่ายต่อการที่ความชื้นเข้าสู่เมล็ดข้าวซึ่งจะทำให้เวลาในการแช่ การทำให้สุกเบื้องต้นและการทำให้สุกอย่างสมบูรณ์ลดลง และขณะเดียวกันความร้อนที่ใช้จะทำให้เกิดเจลาติไนเซชันที่ระดับหนึ่ง

2.5.1.5 การแช่แข็งและละลายน้ำแข็ง (Freeze-Thaw Process)

กระบวนการผลิตวิธีนี้เป็นการใช้วิธีการแช่เยือกแข็งร่วมกับการแช่ การต้มและการทำแห้ง โดยพบว่าการแช่เยือกแข็งข้าวที่ผ่านการทำให้สุกแล้วมีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำในระหว่างการคืนรูปโดยในระหว่างการแช่แข็งข้าวสุกจะมีผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนและหดตัวของกลูเตลิน (Glutelin) และ Starch gel ได้มีการปล่อยน้ำอิสระเข้าสู่ช่องว่างและน้ำจะมาเพิ่มขนาดน้ำแข็งจนตัดโครงสร้างของแป้งที่เป็นคอลลอยด์ (Colloid) เมื่อนำมาอบแห้งเป็นผลทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเกิดรูพรุน โดยกระบวนการผลิตวิธีนี้ทำได้โดยนำข้าวมาแช่น้ำแล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเพื่อให้ข้าวเกิดเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ แล้วจึงนำมาทำการแช่เย็นในน้ำเย็นเพื่อป้องกันการเกิด Over gelatinization จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็ง ก่อนที่จะทำการอบแห้งนำมาละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้องเพื่อป้องกันเมล็ดข้าวเหนียวติดกันเพราะจะส่งผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการคืนรูปสั้น

2.5.1.6 การใช้ Puffing gun (Gun-Puffing)

เป็นวิธีการที่นิยมในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูปจากข้าวเจ้า ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี โดยอุปกรณ์ที่ใช้เรียกว่า Puffing gun จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะพองตัว การทำงานของ Puffing gun แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้ไอน้ำ (Steam chamber) เมื่อวัตถุดิบผ่านเข้ามาจะมีการลดความดันเพื่อที่จะดึงอากาศออกจากวัตถุดิบก่อน ไอน้ำจะถูกส่งเข้ามาเพื่อให้ข้าวเกิดการเจลาติไนซ์ จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกส่งไปยังห้องสุญญากาศ ข้าวที่ผ่านเข้ามาจะเกิดการขยายตัวทันที เพราะความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ได้จะมีขนาดใหญ่ประมาณ 2-3 เท่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มาก น้ำจะดูดซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวได้เร็ว ข้าวกึ่งสำเร็จรูปสามารถคืนรูปได้โดยระยะเวลาสั้น แต่วิธีนี้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการไล่ความดันออกจาก Expansion chamber ทำได้ไม่ทันทีขณะที่เมล็ดข้าวถูกป้อนเข้ามา

2.5.1.7 การทำแห้งในสภาวะแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying)

เป็นการใช้เครื่องทำแห้งเยือกแข็ง โดยข้าวสุกจะถูกนำไปแช่เยือกแข็งก่อนในขณะแช่แข็งจะเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นในเมล็ด หลังจากนั้นจึงนำไปเข้าเครื่องทำแห้งเยือกแข็ง ผลึกน้ำแข็งจะเกิดการระเหิดหายไปในสภาพอุณหภูมิต่ำได้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่มีรูพรุน ใช้เวลาในการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 24 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสำเร็จรูปความชื้นต่ำรูพรุนสูง วิธีการนี้จะใช้ต้นทุนในการผลิตสูงมากจึงไม่เป็นที่นิยม

2.5.1.8 การใช้สารเคมี (Chemical Treatment)

มีการใช้สารเคมีในขั้นตอนการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป เช่น การแช่และการต้ม สารเคมีที่นิยมใช้ เช่น เกลือโซเดียมคลอไรด์ เอนไซม์ เฮมิเซลลูโลส สารประเภทเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งคุณสมบัติของสารเหล่านี้เป็นสารเพิ่มความคงตัว สารเพิ่มความสามารถในการละลาย โดยจะไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีนที่ผิวของเมล็ดข้าวให้มีการดูดซึมน้ำง่ายขึ้น

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูป

2.5.2.1 การแช่

เพื่อให้เมล็ดข้าวดูดน้ำ ช่วยลดเวลาในขั้นตอนการใช้ความร้อนต่อไป เมื่อนำเมล็ดข้าวแช่ในน้ำเมล็ดข้าวจะดูดความชื้นได้ถึงจุดอิ่มตัว เกิดกระบวนการดูดซึมน้ำ (Water absorption น้ำที่แทรกตัวเข้าสู่ส่วนแป้งเกิดพันธะไฮโดรเจน ช่องว่างในเมล็ดข้าวมีน้ำแทนที่อากาศ เม็ดแป้งจะพองตัวขึ้นทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ความชื้นซึ่งทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้นั้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ได้ นอกจากนี้การแช่ข้าวในน้ำจะช่วยให้เมล็ดข้าวดิบเกิดรอยร้าว เป็นการเร่งขั้นตอนการหุงเพราะความชื้นสามารถซึมผ่านเข้าสู่เมล็ดข้าวได้มากขึ้น ทำให้ข้าวเกิดเจลาติไนซ์ได้เร็วเป็นการลดเวลาในการทำให้ข้าวสุก โดยอัตราการดูดซึมน้ำเข้าสู่เมล็ดข้าวนั้นขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว การขัดสี การขัดสี ถ้าข้าวถูกสีมากน้ำจะเข้าสู่เมล็ดข้าวได้เร็ว นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำที่ใช้แช่ ถ้าอุณหภูมิสูงจะเพิ่มการดูดซึมน้ำดีขึ้นและช่วยลดระยะเวลาในการแช่ข้าวลง การแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงมากจนแป้งสุกเพราะจะทำให้มีแป้งบางส่วนละลายออกมา โดยอุณหภูมิที่ใช้แช่อยู่ในช่วง 10-100 °C เวลาที่ใช้ 3-60 นาที ค่าความชื้นที่ได้ 35-40 % เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ในขั้นตอนการให้ความร้อนต่อไป

2.5.2.2 การให้ความร้อน

เป็นการทำให้แป้งที่ดูดน้ำไว้เปลี่ยนเป็นเจล โดยใช้วิธีเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเท่ากับหรือสูงกว่าอุณหภูมิแป้งสุก ข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนในขั้นตอนนี้ตามระยะเวลาการหุงต้มที่เหมาะสมจะมีความชื้นประมาณ 65-75 % และมีอัตราการขยายตัวประมาณ 2.5 เท่า การทำให้ข้าวสุกอาจแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

1) การทำข้าวให้สุกในขั้นตอนเดียว เป็นการให้ความร้อนแก่ข้าวที่ผ่านการแช่มาก่อนแล้ว จนกระทั่งข้าวมีความชื้นอย่างน้อย 65-75 % และมีการเกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนนี้อาจทำให้ข้าวสุก โดยการต้มข้าวในน้ำเดือดที่ความดันบรรยากาศหรือการทำให้สุกในหม้อนึ่งความดัน โดยการทำให้ข้าวสุกในขั้นตอนเดียวอาจใช้อุณหภูมิ 185-280 °F ใช้เวลาประมาณ 2-70 นาที

2) การทำให้สุกตามลำดับ เพื่อควบคุมระดับความสุกให้เป็นไปตามความต้องการ ประกอบด้วยขั้นตอนการทำให้สุกบางส่วน เป็นการเพิ่มความชื้นเมล็ดข้าวให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ประมาณ 35-40 % หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนเกิดการเจลาติไนซ์เซชัน ประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

80 % และการทำให้สุกอย่างสมบูรณ์ อาจทำได้โดยการต้มหรือการทำให้สุกในหม้อนึ่งความดัน เมล็ดข้าวที่ได้จะมีความชื้นประมาณ 65-75 % และมีการเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์

2.5.2.3 การทำแห้ง

เป็นกระบวนการสุดท้ายของการทำข้าวกึ่งสำเร็จรูป เป็นการลดความชื้นของข้าวจนความชื้นสุดท้ายประมาณ 10-13 % ในระดับที่สามารถป้องกันการเน่าเสียของอาหารจากเชื้อจุลินทรีย์ การทำแห้งข้าวกึ่งสำเร็จรูปอาจทำได้ 2 วิธี ดังนี้

1) การทำแห้งในขั้นตอนเดียว เป็นการทำแห้งที่ใช้ความร้อนไม่สูงมากประมาณ 70 °C แต่ใช้ระยะเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง เช่น การทำแห้งในตู้อบลมร้อน

2) การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน การทำแห้งในขั้นแรกเป็นการให้ความร้อนสูงภายในระยะเวลาสั้น จุดประสงค์เพื่อต้องการลดความชื้นจากบริเวณผิวให้เร็วกว่าที่ดูดซึมจากข้างในทำให้เกิดขอบแข็งเรียกว่า Case hardening จะช่วยทำให้โครงสร้างอยู่ตัวเพื่อป้องกันการหดตัว ซึ่งการหดตัวจะทำให้สมบัติการดูดน้ำคืนลดลง นอกจากนี้การทำแห้งในขั้นแรกนี้ยังทำให้ข้าวที่ผ่านการอบแห้งเกิดรูพรุนและพอง อุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนนี้อยู่ในช่วง 200-500 °C ใช้เวลา 1-5 นาที หลังจากนั้นใช้ที่อุณหภูมิต่ำลงอยู่ในช่วง 30-150 °C ใช้เวลา 2-4 ชั่วโมง

2.6 ทฤษฎีการอบแห้ง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

การอบแห้งเป็นการกำจัดความชื้นออกจากอาหาร วัตถุประสงค์ที่สำคัญในการอบแห้งเพื่อเก็บรักษาถนอมผลิตภัณฑ์ให้มีอายุการเก็บนาน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในอาหารสูง ๆ จะทำให้อาหารเน่าเสียง่าย ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์และจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยพบว่าปริมาณความชื้นในอาหารที่จะป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์จะต้องดึงน้ำออกจนเหลือต่ำกว่าร้อยละ 10 หรือมี a_w ต่ำกว่า 0.6 ดังนั้นการอบแห้งจึงเป็นกระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย เนื่องจากกระบวนการอบแห้งอาหารเกี่ยวข้องกับทั้งการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อน มวลที่ถ่ายเทระหว่างการทำแห้งอาหารส่วนใหญ่ คือ น้ำที่มีอยู่ในอาหาร การทำแห้งอาหารที่มีประสิทธิภาพสูงต้องคำนึงถึงคุณภาพของอาหารที่ได้หลังจากการทำแห้ง เช่น การนำมาคืนตัว (Rehydration) ด้วยการดูดน้ำกลับเข้าไปใหม่ คุณค่าทางโภชนาการ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส รูปทรง อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น

2.6.1 หลักการอบแห้งอาหาร

เป็นกระบวนการลดความชื้นวัสดุจนถึงระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เพื่อทำให้วัสดุมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาด้วยการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปพร้อม ๆ กัน โดยทั่วไปแล้วการทำแห้งมักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง (Drying Medium) ในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุ ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออัตราการทำแห้งด้วยลมร้อน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศร้อน ด้วยเหตุนี้ปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นกับการทำแห้งด้วยลมร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุและของไหลโดยอาศัยแรงขับจากความต่างศักย์ของ

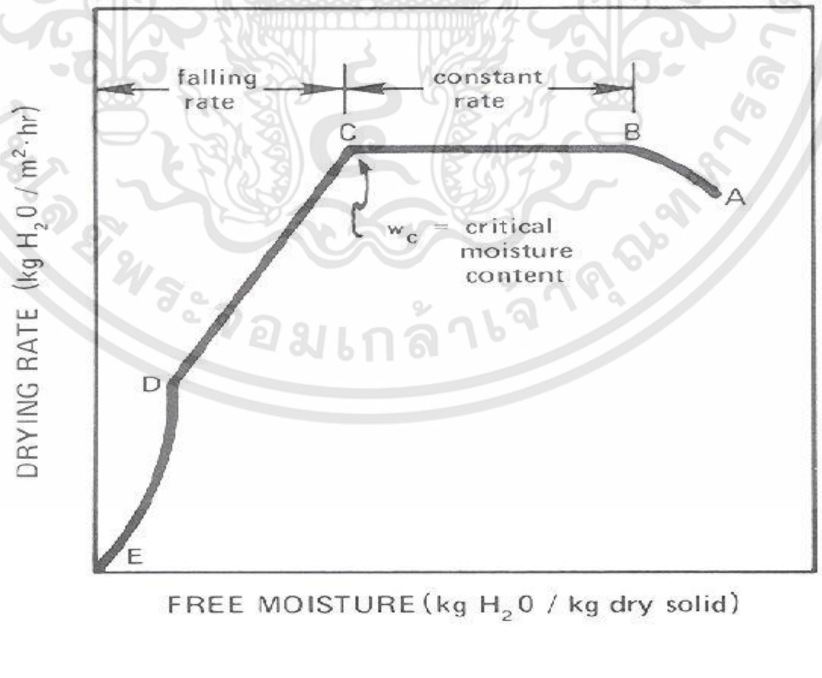
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ และความชื้น กล่าวคือ ความร้อนจากของไหลจะถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ซึ่งทำให้ความชื้นของวัสดุระเหยออกไปกับอากาศในขณะเดียวกันไอน้ำก็จะเคลื่อนที่จากผิวหน้าวัสดุไปยังอากาศร้อนด้วย กราฟระหว่างอัตราการอบแห้ง (Drying rate) และความชื้นในวัสดุ แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.2

2.6.1.1 ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period : A-B) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหารทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหารมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกะเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางอัตราการทำแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (Constant rate)

2.6.1.2 ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (Constant rate period : B-C) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าพลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้งจุดสุดท้ายของช่วงอัตราการทำแห้งคงที่อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

2.6.1.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period : C-D และ D-E) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่องผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้งทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งจะลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุดภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งกับความชื้น (Karel & Lund, 2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ความชื้นและความชื้นสมดุล

2.6.2.1 ความชื้น

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 แบบดังนี้

1) ความชื้นฐานเปียก (Moisture content on wet basis, % MC_{wb}) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุ โดยทั่วไปมักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์และนิยมใช้ในทางการค้าในการบอกค่าความชื้นของวัสดุนั้น ๆ

$$\%\,\mathrm{MC_{wb}} = \frac{\mathrm{M_w}}{\mathrm{M_w} + \mathrm{M_s}} \times 100 \tag{2.1}$$

เมื่อ	% MC_{wb}	คือ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก
	M_w	คือ	มวลน้ำในวัสดุ
	M_s	คือ	มวลแห้งของวัสดุ

2) ความชื้นฐานแห้ง (Moisture content on dry basis, % MCdb) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ ค่าน้ำหนักแห้งของวัสดุจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น

$$\%\,\mathrm{MC_{db}} = \frac{\mathrm{M_w}}{\mathrm{M_s}} \times 100 \tag{2.2}$$

เมื่อ	% MC_{db}	คือ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง
	M_w	คือ	มวลน้ำในวัสดุ
	M_s	คือ	มวลแห้งของวัสดุ

2.6.2.2 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content)

ความชื้นสมดุล คือ ความชื้นของวัสดุซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศหรือตัวกลางอบแห้งอื่น ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ค่าหนึ่ง ๆ ทั้งนี้แผนภาพแสดงความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จะเรียกว่า ไอโซเทิร์มการดูด-คายซับ (Sorption isotherms) โดยไอโซเทิร์มซึ่งได้จากการให้ของแข็งสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นลำดับเรียกว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm) ในขณะที่ไอโซเทิร์มซึ่งได้จากการให้ของแข็งสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นลดลงเป็นลำดับจะเรียกว่า ไอโซเทิร์มการคายซับ (Desorption isotherm) ดังนั้นในกรณีการอบแห้งไอโซเทิร์มการคายซับจะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งมากกว่าไอโซเทิร์มการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง

ลักษณะธรรมชาติของวัสดุอบแห้ง เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (Porosity) ซึ่งวัสดุที่มีความพรุนมาก จะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งที่เร็วขึ้น เนื่องจากน้ำในวัสดุสามารถเคลื่อนจากภายในออกมาภายนอกได้ง่าย นอกจากนี้สำหรับวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากก็จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสามารถเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่การระเหยของน้ำในวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งมีดังนี้

2.6.3.1 ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของวัสดุ เป็นสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่มีผลต่อการทำแห้ง วัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากจะมีพื้นที่ระเหยน้ำมากส่งผลให้เกิดอัตราการทำแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นหากวัสดุที่มีความหนามากจะส่งผลให้อัตราการ อบแห้งช้ากว่าวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าเนื่องจากอัตราการทำแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

2.6.3.2 ปริมาณของวัสดุที่นำมาอบแห้ง วัสดุที่นำมาอบแห้งในปริมาณมาก ๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้าเนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับวัสดุที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึง จึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนกับวัสดุได้ จึงเป็นสาเหตุทำให้อัตราการอบแห้งช้าลง

2.6.3.3 ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจากวัสดุจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม

2.6.3.4 ความดัน เกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่ความดันต่ำ ๆ น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้นเช่นกัน

2.6.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้ง

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การหารูปแบบการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งเพื่อใช้ทำนายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและระยะเวลาการอบแห้ง สำหรับการทดลองทั่วไป การหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางจะทำการอบแห้งจนกว่าน้ำหนักของวัสดุคงที่ จึงกำหนดให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยคำนวณจากสมการที่ 2.3 และอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) จากสมการที่ 2.4

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \tag{2.3}$$

เมื่อ M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% dry-basis)

M_e คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$DR = \frac{M_i - M_{i+1}}{T_{i+1} - T_i} \tag{2.4}$$

เมื่อ	M_i	คือ	ความชื้นเริ่มต้น (dry-basis)
	M_{i+1}	คือ	ความชื้นที่เวลาใด ๆ (dry-basis)
	T_i	คือ	เวลาใด ๆ ที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)
	T_{i+1}	คือ	เวลาที่ความชื้นเริ่มต้น (นาที)

การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical) และสมการจากการทดลอง (Empirical) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุด จากตารางที่ 2.2 โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เงื่อนไขการพิจารณาความสามารถในการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งคือ ค่าสัมประสิทธ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าไคสแควร์ (The reduced chi-square, χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Mean relative percent deviation, EMD) โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2, RMSE และ EMD ต่ำที่สุด

ตารางที่ 2.2 สมการการอบแห้งชั้นบาง (Midilli et al., 2002 ; Ertekin & Yaldiz, 2004 ; Gunhan et al., 2005)

ที่	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Lewis	MR = exp(-kt)
2	Page	MR = exp(-kt^n)
3	Modified Page	MR = exp(-(kt)^n)
4	Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt)
5	Logarithmic	MR = a exp(-kt) + c
6	Two term	MR = a exp(-k$_0$t) + b exp(-k$_1$t)
7	Modified Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt) + b exp(-gt) + c exp(-ht)
8	Verma et al.	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-gt)
9	Two term exponential	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-kat)
10	Approximation of diffusion	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-kbt)
11	Midilli et al.	MR = a exp(-kt^n) + bt
12	Wang and Singh	MR = 1+ at + bt^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

ฟลูอิไดเซชัน (Fluidization) เป็นคำที่ใช้อธิบายกระบวนการที่ของแข็ง ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดหรือชิ้นสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ทั้งนี้เม็ดหรือชิ้นของแข็งตอนเริ่มแรกถูกวางอยู่ในตระแกรงในหอทดลองที่มักมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ในปัจจุบันมีการดัดแปลงให้อยู่ในรูปร่างในแนวนอนด้วย ของไหลที่ใช้อาจเป็นก๊าซหรือของเหลวปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตระแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งแล้วไหลออกทางส่วนบนของหอทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวเป็นอิสระจากกันไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล คือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบดหรือภายในหอทดลองจึงเรียกของแข็งในลักษณะนี้ว่าฟลูอิไดเซชัน การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดสามารถใช้ได้ดีเป็นพิเศษสำหรับวัสดุที่เป็นอนุภาคหรือเม็ดของแข็งที่มีขนาดอยู่ในช่วง 20-200 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นวัสดุชนิด Geldart A แต่ในทางปฏิบัติการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดใช้งานได้ดีสำหรับวัสดุที่มีขนาดตั้งแต่ 20-2,000 ไมโครเมตร

2.7.1 การจำแนกประเภทของวัสดุอนุภาคตามเกณฑ์ของ Geldart (Geldart Classification of Particulate Materials) เป็นการแบ่งวัสดุอนุภาคออกเป็น 4 กลุ่มดังนี้ (สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

2.7.1.1 วัสดุชนิด Geldart A มีขนาดในช่วง 20 -200 ไมโครเมตร มีลักษณะที่เกิดฟลูอิไดเซชันได้ง่าย

2.7.1.2 วัสดุชนิด Geldart B มีขนาดในช่วง 200 -1,000 ไมโครเมตร มีลักษณะคล้ายเม็ดทราย เมื่อนำไปฟลูอิไดซ์จะทำให้กระแสอากาศไหลผ่านเบดไปในลักษณะที่เป็นฟอง (Bubby bed)

2.7.1.3 วัสดุชนิด Geldart c มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร มีลักษณะที่เกาะตัวกันมาก (Cohesive) และเกิดฟลูอิไดเซชันได้ยาก

2.7.1.4 วัสดุชนิด Geldart D มีขนาดใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร มีลักษณะหยาบและมีความหนาแน่นสูง เกิดฟลูอิไดเซชันได้ยากเหมาะที่จะนำไปอบแห้งแบบสเปาท์เตด

2.7.2 ประเภทของฟลูอิไดเซชัน

2.7.2.1 ฟลูอิไดเซชันสองสถานะ (Two-phase Fluidization) หมายความว่า ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานประกอบด้วยของสองสถานะคือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิไดเซชันสองสถานะจึงแบ่งได้อีกเป็น 2 ประเภทคือ ก๊าซฟลูอิไดเซชันและฟลูอิไดเซชันของเหลว

2.7.2.2 ฟลูอิไดเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) หมายความว่า ภายในหอทดลองหรือเบดจะประกอบไปด้วยของสามสถานะอยู่ด้วยกันคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

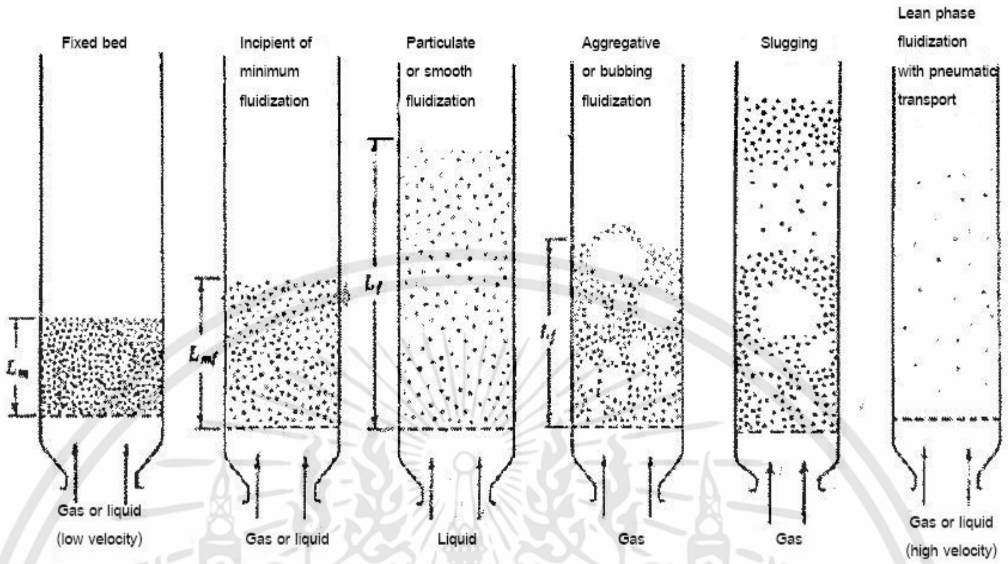
2.7.3 ลักษณะฟลูอิไดซ์เบด

เบด หมายถึง อาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลองจนมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตระแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributer) จนถึงระดับสูงสุดคือ ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอทดลองเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้า ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นจนถึงความเร็วระดับหนึ่งเม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลเพิ่มอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิไดเซชัน หลังจากนี้ไปแล้วความเร็วของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของไหลเม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมากและยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidization bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอทดลองอยู่แล้ว เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดเจือจาง (Diluted phase fluidization bed) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็หลุดลอยออกจากหอทดลองไป ฟลูอิไดซ์เบดที่เป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัว และหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เรียกเบดนี้ว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Particulated bed of homogeneously bed or Smoothly Fluidized bed or Liquid Fluidized bed) ดังรูปที่ 2.3 ฟลูอิไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวเองขึ้นมายังผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมานี้จะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาฟองก๊าซลงมายังส่วนล่างพร้อม กันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปด้านบนด้วย ภายในเบดจะเห็นว่าการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างชุลมุนวุ่นวาย เบดชนิดนี้เรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดวุ่นวาย

การอบแห้งวัสดุอนุภาคหรือเม็ดของแข็งอาจมีทางเลือกหรือวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมหลายวิธีการ เช่น การใช้เครื่องอบแห้งแบบท่อหมุน เครื่องอบแห้งแบบสายพาน ฯลฯ แต่เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดก็ยังอาจจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากจุดเด่นของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดคือ ความสามารถในการอบแห้งวัสดุได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการสัมผัสกันเป็นอย่างดีของวัสดุและตัวกลางการอบแห้ง เช่น อากาศร้อน ก๊าซร้อน หรือแม้กระทั่งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างตัวกลางการอบแห้งและวัสดุเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ใช้พื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างน้อยและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ๆ แต่เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดก็ยังคงมีข้อเสียที่สำคัญบางประการ ได้แก่ ต้องใช้พลังงานค่อนข้างมากในการเดินพัดลมเพื่อจ่ายอากาศให้เพียงพอในการที่จะทำให้เบดของอนุภาคเกิดฟลูอิไดเซชันได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของเครื่องอบแห้งประเภทนี้คือ ไม่สามารถทำการอบแห้งวัสดุที่แตกหักหรือเกาะติดกันได้ง่าย เช่น วัสดุที่มีความชื้นที่ผิวสูง ซึ่งอาจต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปอบแห้งด้วยวิธีอื่น ๆ ก่อนนำมาอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดให้ได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ



รูปที่ 2.3 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิไดเซชัน (Kunii & Levenspiel, 1991)

การออกแบบหรือเลือกใช้งานเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด ข้อมูลที่สำคัญมากที่สุด 2 ชุดคือ ข้อมูลความเร็วต่ำสุดที่ทำให้วัสดุเกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum fluidization velocity; U_{mf}) และค่าความดันลดตกคร่อมเบดสูงสุด (Maximum pressure drop; ΔP_{max}) โดยจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลดังกล่าวในการเลือกพัดลมที่เหมาะสมสำกรับการเกิดฟลูอิไดเซชันของวัสดุชนิดหนึ่ง ๆ โดยทั่วไปแล้วมักเดินเครื่องอบแห้งแบบฟูลอิไดซ์เบดที่ความเร็วมากกว่าค่า U_{mf} ประมาณ 1.5-4 เท่า (Bahu, 1997)

2.8 การอบแห้งวัสดุด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

หลักสำคัญของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งคือ การใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนกับวัสดุและพาความชื้นที่ระเหยจากวัสดุออกไปจากห้องอบแห้ง โดยหลักการแล้วสามารถดัดแปลงเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรงทุกประเภทให้สามารถทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ แม้ว่าบางกรณีอาจมีความซับซ้อนและยุ่งยากอยู่บ้าง เนื่องจากเครื่องอบแห้งนี้ต้องเป็นระบบปิด เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหลของไอน้ำออกจากเครื่องอบแห้งจนทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานงานหรือมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

จุดเด่นที่สำคัญของการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งคือความสามารถในการนำพลังงานส่วนใหญ่ที่ป้อนให้กับเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งช่วยในการประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการอบแห้งได้มาก และการที่ไม่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากอากาศที่อยู่ภายในห้องอบแห้งจะถูกแทนที่ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ต้องการได้ เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ การเกิดออกซิเดชันของลิพิด หรือปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของวิตามิน นอกจากนี้การใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้งยังทำให้เกิดกระบวนการอื่น ๆ พร้อมไปกับกระบวนการอบแห้ง เช่น การลวก (Prachayawarakorn et al., 2002) การทำข้าวนึ่ง (Parboiling) (Soponronnarit et al., 2006) หรือการพองตัว (Iyota et al., 2005) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมักมีความพรุน (Porosity) สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน เนื่องจากการเดือดของน้ำในวัสดุระหว่างกระบวนการอบแห้งทำให้เกิดการขยายปริมาตรของน้ำเป็นอย่างมากส่งผลให้โครงสร้างภายในของวัสดุถูกดันให้ขยายตัวออกไปทำให้ค่าความพรุนสูงขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้วัสดุสามารถคืนตัวได้อย่างรวดเร็ว

การอบแห้งวัสดุด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะแตกต่างกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนคือ ในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุแล้วจึงเริ่มเข้าสู่ช่วงการอบแห้ง ดังนั้นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้

1) ช่วงเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุ (Condensation rate period)

เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวกลาง เมื่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งสัมผัสกับเม็ดวัสดุจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้ง ความร้อนแฝงของไอน้ำที่เกิดจากการควบแน่นจะช่วยให้อุณหภูมิของวัสดุสูงถึงจุดเดือดของน้ำได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ช่วงแรกที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุนั้น อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และความชื้นที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนความชื้นภายในเนื้อวัสดุบริเวณที่ใกล้ผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากไอน้ำที่เกิดจากการควบแน่นบางส่วนแพร่เข้าไปภายในเนื้อวัสดุ เมื่อน้ำที่ควบแน่นบริเวณผิววัสดุมีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำจึงเกิดการระเหยขึ้น ทำให้ความชื้นที่ผิวของวัสดุลดลง และเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น ความชื้นที่ผิวของวัสดุจะลดลงต่ำกว่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ แต่ความชื้นภายในเนื้อวัสดุบริเวณที่ใกล้กับผิวอาจจะยังสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นแต่จะค่อย ๆ ลดลงจนต่ำกว่าความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณไอน้ำที่ควบแน่นจะขึ้นอยู่กับความชื้นในวัสดุ อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและค่า Thermal diffusivity ของวัสดุ

2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate drying period)

เป็นช่วงที่วัสดุมีความชื้นสูงอยู่ และบริเวณผิววัสดุเต็มไปด้วยน้ำอิสระ ดังนั้นจึงมีการถ่ายเทมวลและความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น โดยความร้อนส่วนใหญ่ที่วัสดุได้รับจะถูกใช้ไปในการระเหยน้ำอิสระ (Free water) บริเวณผิววัสดุ ซึ่งอุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำในวัสดุ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย แต่การอบแห้งวัสดุด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีกระบวนการถ่ายเทมวลที่แตกต่างไปจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากโดยรอบวัสดุเต็มไปด้วยไอน้ำ ดังนั้นการถ่ายเทความชื้นที่ผิวด้านนอกจึงไม่ได้เกิดจากการแพร่ (diffusion mass transfer) แต่เกิดจากการพาของไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยมีความดันที่แตกต่างเป็นแรงขับเคลื่อนและความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาที่ผิวของวัสดุจะเท่ากับเอนทัลปีที่ใช้ในการระเหยน้ำที่ผิวของเม็ดวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate drying period)

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเหมือนกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนคือ ช่วงนี้ความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ที่ความชื้นนี้อัตราการอบแห้งจะลดลง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

นฤบดี ศรีสังข์ และคณะ (2552) ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (KMDL-105) นำมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก ได้ข้าวกล้องหอมมะลิ 105 นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 ชั่วโมง ข้าวกล้องภายหลังการแช่น้ำจะเกิดการงอกบริเวณจมูกข้าวขนาดเล็กประมาณ 0.5-2 มิลลิเมตร

เทวิกา กีรติบูรณะ และวรนุช ศรีเจษฎารักษ์ (2554) นำข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 มาผ่านการแช่น้ำ Reverse osmosis ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำคือ 1:2 จากนั้นนำไปเพาะงอกที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 25 ชั่วโมง

Cheevitsopon & Noomhorm (2011) นำข้าวหอมมะลิ 105 มาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บ่มที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 ชั่วโมง

2.9.2 กระบวนการผลิตข้าวหุงสุก

วราภรณ์ ประเสริฐ และปริศนา สุวรรณาภรณ์ (2551) ได้ศึกษาผลของกระบวนการผลิตต่อสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพของข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปซึ่งใช้ข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 มาแช่น้ำให้ได้ความชื้น 35-60 % (w.b.) หลังจากนั้นแช่ข้าวที่ความดัน 11.6-28.4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วนำมาอบแห้งเพื่อผลิตเป็นข้าวกึ่งสำเร็จรูป

พรทิพย์ ศิริสุนทราลักษณ์ และคณะ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องหุงสุกเร็วด้วยวิธีการแช่น้ำโดยใช้ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มาแช่น้ำด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:2 (w/w) วางในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง (30±2°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 มหรรณพกุล (2552) นำข้าวผ่านการให้ความร้อนขั้นต้น (pre-heat) โดยอบข้าวหอมมะลิ ในตู้อบลมร้อนที่ 120°C นาน 15 นาที จากนั้นนำข้าวมาแช่ (Soak) ในน้ำร้อนปริมาตร 5-6 เท่าของน้ำหนักข้าวเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 85-90°C นาน 15 นาที การให้ความร้อนขั้นต้นเป็นการอบข้าวให้เกิดรอยร้าวเล็ก ซึ่งจะทำให้ข้าวดูดซึมน้ำได้ดีใน จากนั้นแช่ข้าวในน้ำร้อนปริมาตร 5-6 เท่าของน้ำหนักข้าวเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 85-90°C นาน 15 นาที เพื่อให้ข้าวเกิดเจล เมล็ดข้าวเกิดการสุกบางส่วน (Partial gelatinized) นำมาหุงสุก (Cooking) ด้วยวิธีการนึ่ง (Steam) ใช้เวลานึ่งประมาณ 8-10 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิโดยแช่ข้าวในน้ำที่เย็นจัดที่อุณหภูมิ 0-2°C นาน 30 วินาที และนำไปอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sripinyowanich (2011) ได้ศึกษาการประยุกต์การอบแห้งไมโครเวฟ-ไวโบร-ฟลูอิไดซ์เบดในการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปโดย ใช้ข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 แช่น้ำที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นจะมี 3 วิธี คือ 1) การต้มในน้ำเดือด 15 นาที 2) การหุงในหม้อหุงข้าวอัตโนมัติโดยล้างน้ำ 3 ครั้ง 3) ใช้วิธีการแช่ร่วมกับไอน้ำสองรอบโดยข้าวที่ผ่านการแช่น้ำมานึ่งในหม้อไอน้ำ 5 นาที แล้วแช่น้ำอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 5 นาที และนึ่งเป็นเวลา 10 นาที ตัวอย่างหุงสุกทั้ง 3 วิธี นำไปอบแห้ง

2.9.3 การอบแห้งสำหรับการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป

งามชื่น คงเสรี และคณะ (2551) ศึกษาการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป โดยการอบแห้งข้าวด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดมาใช้ในการลดความชื้น เป็นเทคนิคการลดความชื้นที่มีลมเป่าจากด้านล่างทำให้ผลิตภัณฑ์ลอยตัวขึ้นเป็นอิสระช่วยให้การลดความชื้นที่มีลมเป่าจากด้านล่างทำให้ผลิตภัณฑ์ลอยตัวขึ้นเป็นอิสระช่วยให้การลดความชื้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และรวดเร็ว จากการลดความชื้นที่ 180°C พบว่า ขาวดอกมะลิ 105 จะได้ผลผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป 96.2% ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีความเหนียวมากเมื่อเป็นผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณข้าวหักมากถึง 44.3% เนื่องจากเมล็ดข้าวสุกเหนียวเกาะติดกัน การพลิกกลับข้าวในระหว่างขบวนการผลิต เมล็ดข้าวเกิดการแตกหักมาก ขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาตร 225 มิลลิลิตร/100 กิโลกรัม แสดงว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวอมิโลสต่ำ เมื่อนำมาทำข้าวกึ่งสำเร็จรูปจะมีการขยายปริมาตรน้อย การขึ้นฟูของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอมิโลสของเมล็ดข้าว ทั้งนี้ อาจเนื่องจากปริมาณอมิโลสในเมล็ดข้าวมีผลให้ข้าวสุกร่วนซุย เมื่อทำการคืนรูปโดยแช่ในน้ำร้อนจัด ระยะเวลาในการคืนรูปที่เหมาะสมจนได้ข้าวสุกพร้อมรับประทาน โดยพิจารณาจากลักษณะ และความนุ่มของเมล็ด คือ 5 นาที

พรทิพย์ ศิริสุนทราลักษณ์ และคณะ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องหุงสุกเร็วด้วยวิธีการแช่น้ำโดยใช้ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 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 แม้ว่าข้าวกล้องหุงสุกเร็วมีอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงสุกไม่แตกต่างจากข้าวกล้องที่นำมาหุงสุกสภาวะเดียวกันแต่เช่นเดียวกับข้าวขาวหุงสุกเร็วที่ผ่านการแช่น้ำปริมาณของแข็งในน้ำที่เหลือจากการหุงต้มข้าวกล้องหุงสุกเร็วน้อยกว่าข้าวกล้องโดยเฉพาะเมื่อแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อนำข้าวกล้องหุงสุกเร็วมาคืนรูปด้วยการต้มในน้ำเดือด พบว่าความแข็งของข้าวกล้องหุงสุกเร็วจากวิธีการแช่น้ำมากกว่าข้าวกล้องสุกโดยความแข็งของข้าวกล้องหลังคืนรูปเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการแช่น้ำ

เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ และเกียรติศักดิ์ รุ่นพระแสง (2556) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด กระบวนการผลิตข้าวกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งอกกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วยสามขั้นตอนที่สำคัญคือ การงอกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง การหุงสุก และการอบแห้ง ในขั้นตอนการอบแห้ง เมล็ดข้าวได้รับการลดความชื้นจากความชื้นสูงจนถึงร้อยละ 12 %d.b. ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิอากาศเป็น 110 130 และ 150°C ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้รับการคืนรูปด้วยวิธีการไมโครเวฟเป็นเวลา 8 นาที คุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปทั้งก่อนและหลังการคืนรูปได้รับการตรวจสอบ ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งมีผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าความขาว อัตราส่วนการดูดน้ำกลับ อัตราส่วนการเพิ่มปริมาตรมากที่สุด แต่มีค่าความหนาแน่นรวมต่ำที่สุด เมื่อคืนรูปข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยวิธีการไมโครเวฟพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีค่าความแข็งและความเหนียวลดลง

2.9.4 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Soponronnarit et al. (2006) ประสบความสำเร็จในการผลิตข้าวนึ่งจากข้าวกล้องโดยใช้เทคนิคแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง หลักการทำงานที่สำคัญคือ เกิดการนึ่งและการอบแห้งขึ้นมาในขั้นตอนเดียวกัน เป็นการลดระยะเวลาและขั้นตอนของการผลิตข้าวนึ่ง ส่วนข้อดีอย่างอื่นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากไม่มีอากาศในระบบให้อัตราการอบแห้งที่สูง สามารถประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่มีการเผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนสำหรับการอบแห้ง

Rordprapat et al. (2005) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ใช้อุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150°C พบว่าระหว่างการอบแห้งช่วงเริ่มต้นอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากไอน้ำเกิดการควบแน่นส่งผลให้แป้งในเมล็ดข้าวเกิดการเจลาทิไนเซชันทำให้ปริมาณข้าวสารเต็มเมล็ด (Head rice yield) สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ค่าความขาวของข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ในช่วงการอบแห้งเริ่มต้น

Srisang et al. (2011) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวกลางการอบแห้งโดยใช้ฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 130°C และ 150°C การอบแห้งข้าวกล้องงอกโดยใชฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนทำให้เมล็ดข้าวแตกหักเป็นจำนวนมากจึงใช้การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาช่วยลดการแตกหักของเมล็ดข้าว ซึ่งพบว่าตัวกลางการอบแห้งและอุณหภูมิของตัวกลางส่งผลต่ออัตราการอบแห้งและคุณลักษณะของข้าวกล้องงอก ได้แก่ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลให้ปริมาณการแตกหักของเมล็ดข้าวต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ตัวกลางการอบแห้งและอุณหภูมิอบแห้งไม่ส่งผลต่อปริมาณสารกาบาและเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุก หลังการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อบแห้งได้

ปัจจุบันนี้มีการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งอาหารหลายชนิดและประสบผลสำเร็จ เช่น ข้าวเปลือก (Taechapairoj et al., 2003) ถั่วเหลือง (Prachayawarakorn et al., 2006) และทุเรียนแผ่น (Jamradloedluk et al., 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.5 กระบวนการคืนรูปข้าวกึ่งสำเร็จรูป

วุฒิชัย นาครักษา, และสุภาภรณ์ ธัญญะวานิช (2546) ทำการศึกษาข้าวกล้องที่ได้สามารถคืนรูปด้วยการเติมน้ำร้อน (ประมาณ 95°C) หรือเติมน้ำ แล้วนำเข้าเตาไมโครเวฟในระดับครัวเรือนได้เป็นข้าวกล้องพร้อมรับประทานด้วยระยะเวลาสั้นๆ (5-8 นาที)

งามชื่น คงเสรี และคณะ (2551) การผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปโดยการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 180°C จะมีความเหนียวมาก มีปริมาณข้าวหักมาก เนื่องจากเมล็ดข้าวสุกเหนียวติดกัน เมล็ดมีสีขาวขุ่นเล็กน้อย เมล็ดข้าวมีรูพรุนน้อย และมีปริมาตร 225 มิลลิลิตรต่อ 100 กิโลกรัม มีอัตราการดูดน้ำกลับ 2.10 เท่าของน้ำหนัก อัตราการขยายปริมาตร 1.2 เท่า การคืนรูปด้วยน้ำร้อนจัดใช้เวลาการคืนรูป 5 นาที

พรทิพย์ ศิริสุนทราลักษณ์ และคณะ (2552) การพัฒนากระบวนการผลิตข้าวหุงสุกเร็วด้วยวิธีการแช่น้ำซึ่งใช้การอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C จนข้าวมีปริมาณความชื้นสุดท้าย 7-10 % w.b. ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.84-0.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมล็ดข้าวมีสีเหลืองเล็กน้อย และค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการแช่น้ำ ใช้เวลาในการคืนรูป 5 นาที

2.9.6 ปัจจัยของกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสำเร็จรูป

วราภรณ์ ประเสริฐ และปริศนา สุวรรณาภรณ์ (2551) ศึกษาคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปกับความชื้น เมื่อความชื้นและอุณหภูมิของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็ง และค่า chewiness ลดลงในขณะที่ความชื้นต่ำการเพิ่มความดันส่งผลให้ค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้นในทางกลับกันเมื่อข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีความชื้นที่สูงการเพิ่มของความดันทำให้ค่าดัชนีความขาวลดลงความหนาแน่นอัตราการคืนรูป และปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากความชื้น และความดันที่ใช้การผลิตเพราะทำให้เกิดรูพรุนในเมล็ดข้าว

Prasert & Suwannaporn (2009) พบว่าตัวอย่างของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดมีอัตราการเพิ่มปริมาตรมากกว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มปริมาตรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวในเมล็ดข้าว การดูดซึมน้ำมากขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการเพิ่มปริมาตรมาก

พรทิพย์ ศิริสุนทราลักษณ์ และคณะ (2552) ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยประเมินด้วยผู้ชิมกึ่งฝึกฝนซึ่งเป็นนิสิตสาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จำนวน 30 คน โดยใช้การประเมินความชอบแบบแบ่งสเกล 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) (1 หมายถึงชอบน้อยที่สุด 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) โดยคุณภาพข้าวกล้องหุงสุกเร็วก่อนคืนรูปที่ประเมินได้แก่ลักษณะปรากฏสีกลิ่นและการยอมรับโดยรวมและคุณภาพข้าวกล้องหุงสุกเร็วหลังคืนรูปที่ประเมิน ได้แก่ สี กลิ่น รสเนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม

จารุวรรณ บางแวก และคณะ (2553) ศึกษาสารหอมระเหย 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ในข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 โดยเทคนิค NIR Spectroscopy พบว่าเมื่อได้รับความร้อนหรือเก็บไว้เป็นเวลานานความหอมจะสูญเสียได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sripinyowanich (2011) ทำการศึกษาอัตราการดูดน้ำกลับกับการอบแห้งข้าวขาวหุงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่ช่วงอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าตัวอย่างของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดมีอัตราการดูดน้ำกลับมากว่าการอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการดูดน้ำกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวในเมล็ดข้าวส่งผลให้มีอัตราการดูดน้ำกลับมาก

2.10 สรุปแนวทางการศึกษา

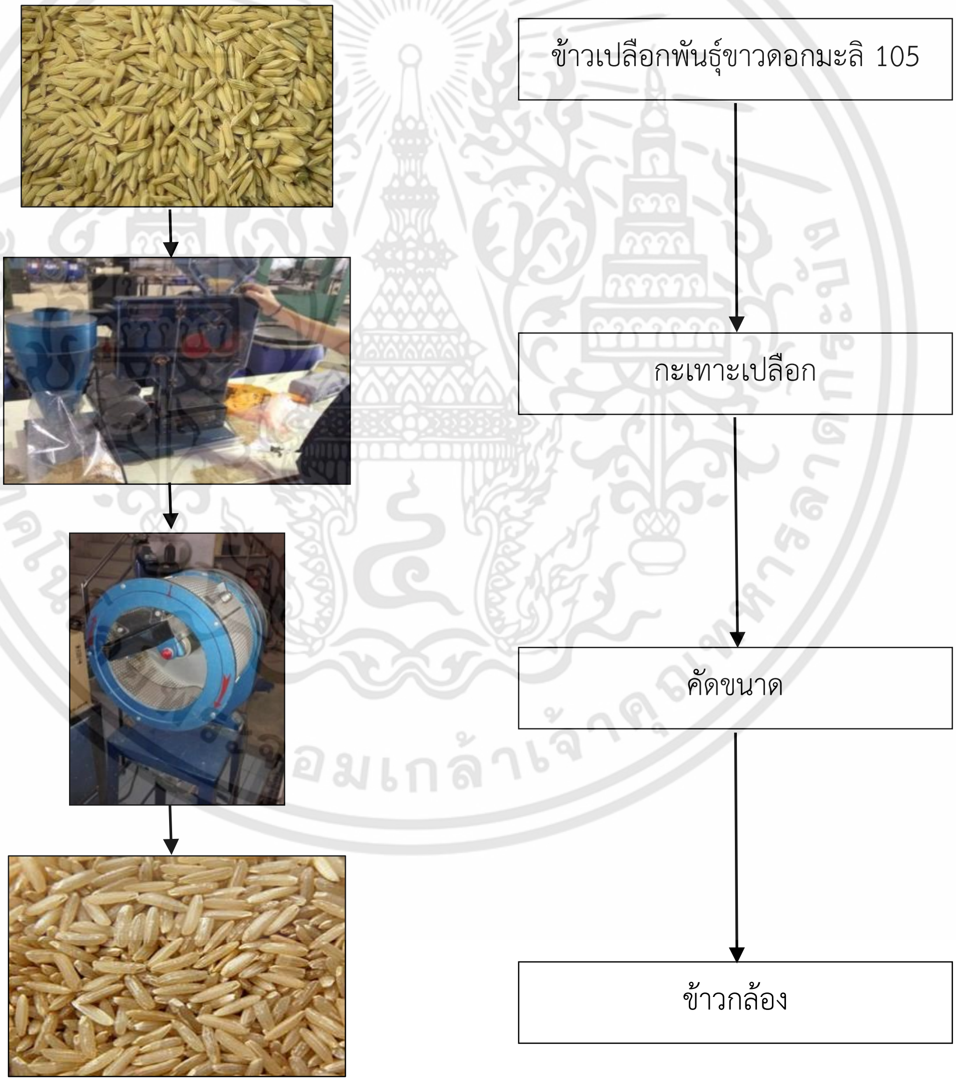
กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุก และการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เก็บรักษาไว้ได้นานขึ้น ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบเอกสารกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกและกระบวนการผลิตข้าวหุงสุกเพื่อให้ได้วิธีการผลิตข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกหุงสุกมาปรับใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะขั้นตอนการอบแห้งได้มีการศึกษาการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนในการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพเพื่อนำมาใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมข้าวกล้อง

ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) นำมาบรรจุถุงสุญญากาศเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เมื่อมีการทดลองนำข้าวเปลือกมาผ่านการกะเทาะเปลือกออกจากเมล็ดข้าวด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกเพื่อให้ได้ข้าวกล้อง แล้วนำเมล็ดข้าวกล้องมาผ่านการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเพื่อเอาเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ออก ดังรูปที่ 3.1

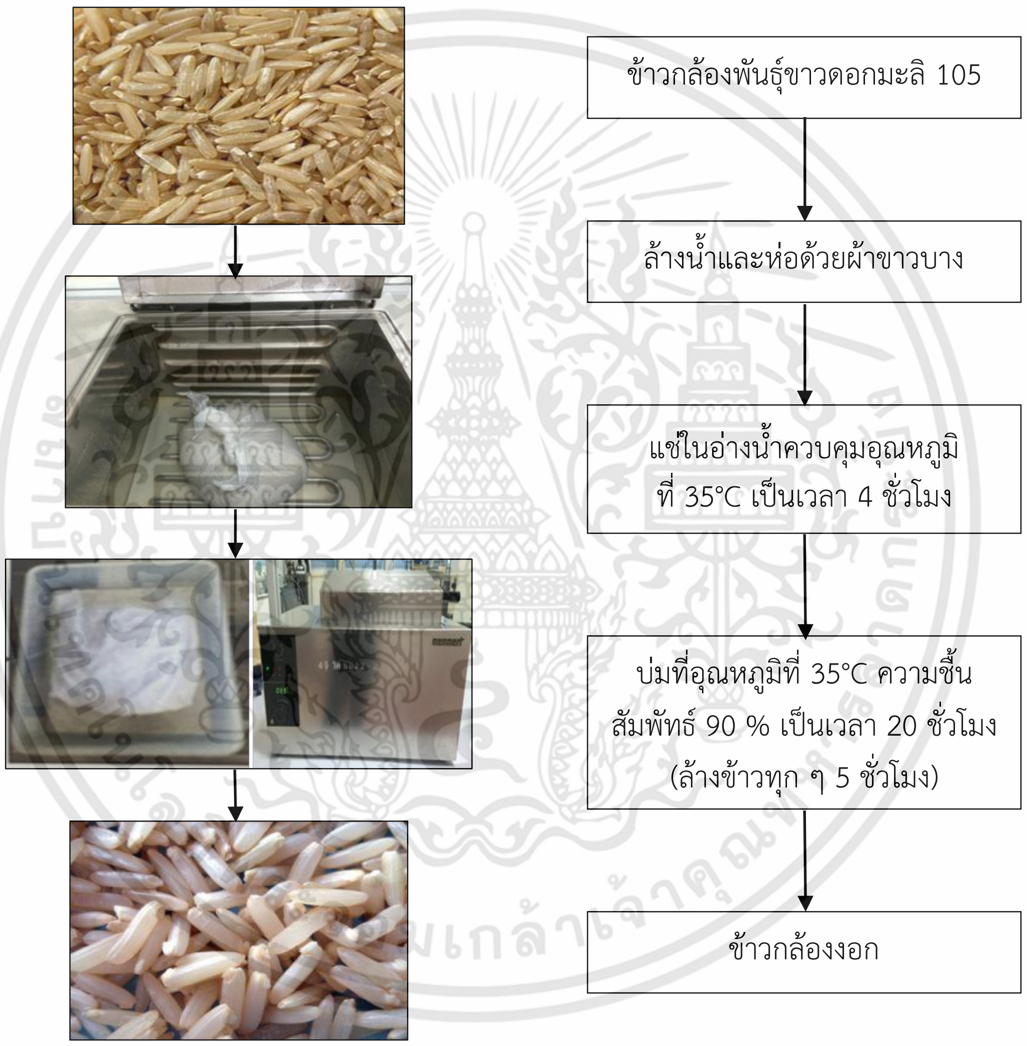


รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมข้าวกล้องงอก

นำข้าวกล้องมาล้างน้ำและห่อด้วยผ้าขาวบาง แล้วนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำไปเพาะงอกโดยการบ่มที่อุณหภูมิที่ 35°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90 % เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยในระหว่างกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกต้องทำการล้างข้าวทุก ๆ 5 ชั่วโมงเพื่อลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Cheevitsopon & Noomhorm, 2011) ข้าวกล้องภายหลังการบ่มจะเกิดการงอกบริเวณจมูกข้าวเป็นตุ่มเล็ก ๆ ได้เป็นข้าวกล้องงอก ดังรูปที่ 3.2

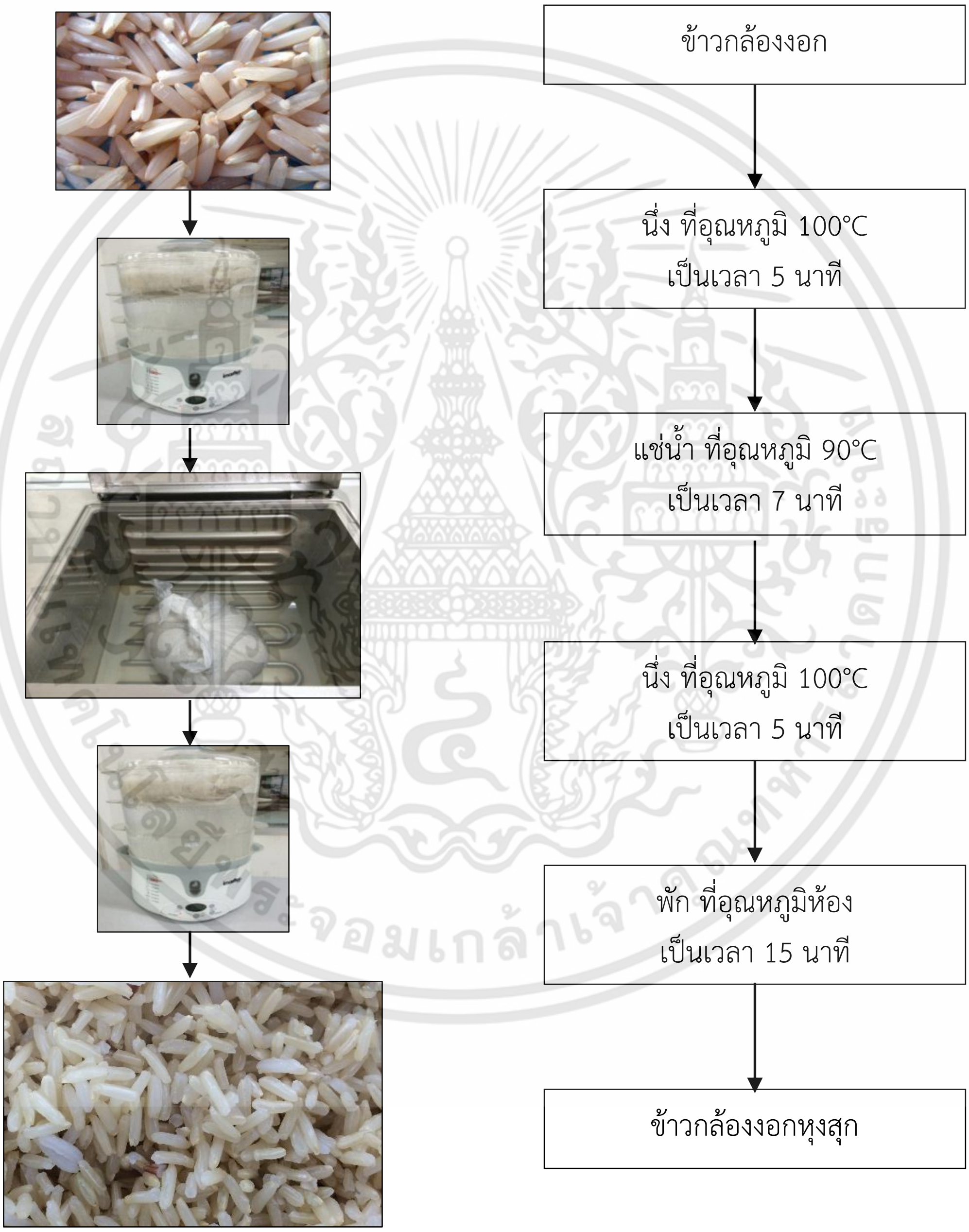


รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุก

นำข้าวกล้องงอกมาหุงสุกด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาทีทำให้เกิดเจลาทิไนเซชันบางส่วน จากนั้นนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 90°C เป็นเวลา 7 นาที แล้วนำมานึ่งอีกครั้งด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาที จะทำให้ข้าวสุกเต็มเมล็ด (Sripinyowanich, 2011) และนำไปพักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อไม่ให้เมล็ดข้าวติดกัน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

จากรูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน โดยเป็นเครื่องฟลูอิไดซ์เบดที่สามารถใช้อบแห้งได้ทั้งสองระบบคืออบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน ส่วนประกอบระบบอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนมีดังนี้

1) พัดลม (Blower) แบบใบพัดโค้งหลัง ขนาดมอเตอร์ 22 kW

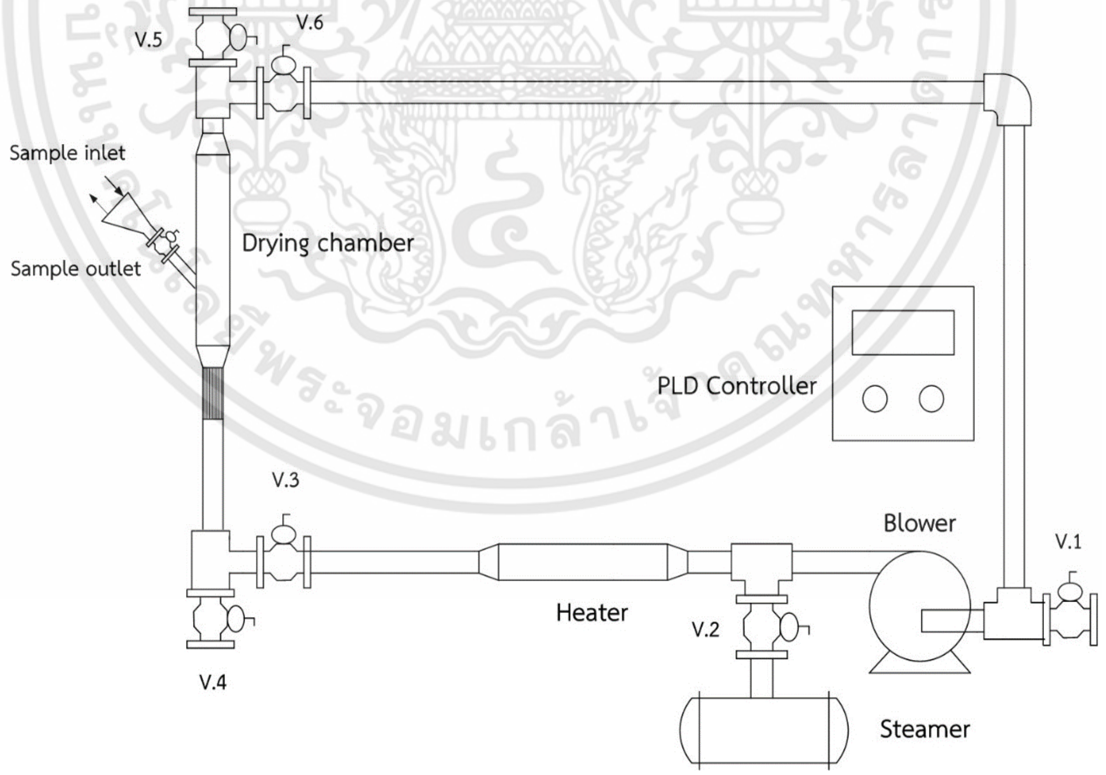
2) แหล่งทำความร้อน (Heater) แบบครีบทำจาก Heater ท่อกลมที่ดัดเป็นรูปต่าง ๆ และเพิ่มแผ่นครีบม้วนติดกับท่อ ขนาด 15 kW

3) ห้องอบแห้ง (Drying chamber) เป็นทรงกระบอกสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร ด้านล่างห้องอบแห้งมีท่อลมกระจายอากาศ (Distributor) ลักษณะเป็นกลุ่มท่อสแตนเลสกระจายลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จำนวน 8 ท่อ ถูกสวมด้วยท่อสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร และตระแกรงรองรับผลิตภัณฑ์

4) แหล่งกำเนิดไอน้ำ (Steamer) ขนาด 7.5 kW ผลิตไอน้ำที่ความดันเกจ 3.3-4 bar

5) ระบบควบคุมความเร็วลมและอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง (PLD Controller)

6) ระบบท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร หุ้มฉนวนความร้อนแบบแร่ใยหิน และวาล์ว



รูปที่ 3.4 แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

3.5 หลักการทำงานเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

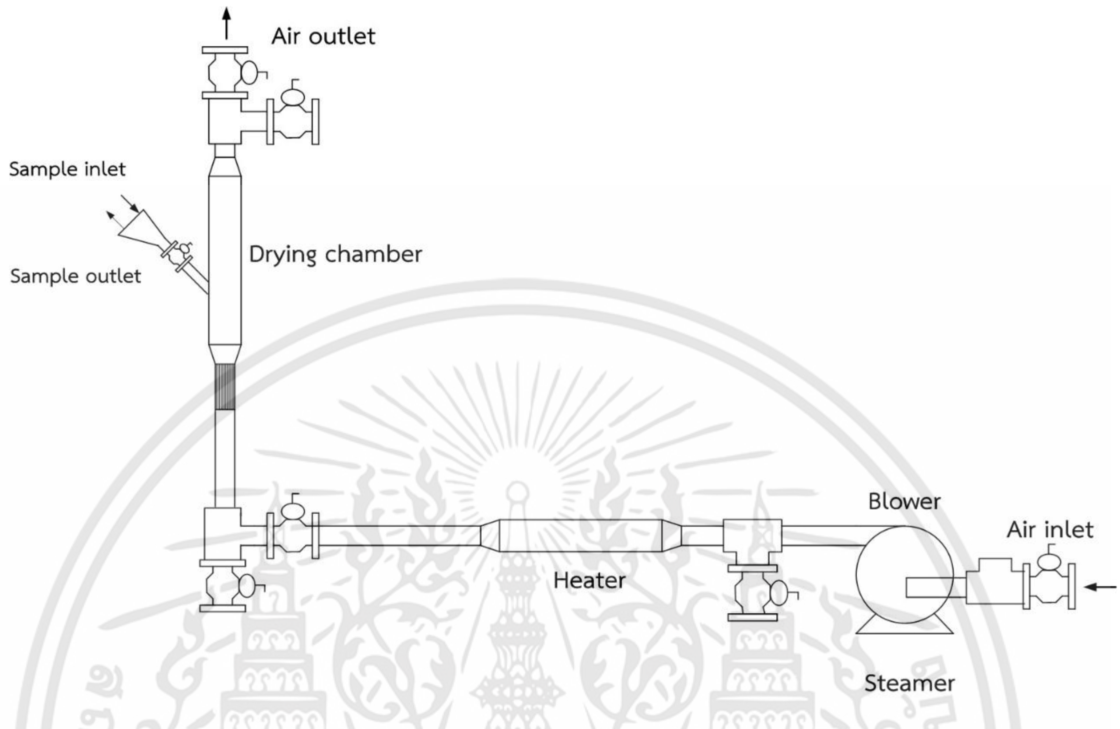
เริ่มจากลมผ่านพัดลมทำให้มีความเร็วลมเพิ่มขึ้นผ่านแหล่งทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิลมให้สูงขึ้นลมร้อนเป่าผ่านกลุ่มท่อกระจายลมทางด้านล่างห้องอบแห้งทำให้เมล็ดข้าวลอยตัวขึ้นมีพฤติกรรมคล้ายของไหลส่งผลให้เมล็ดข้าวสัมผัสกับลมร้อนได้เป็นอย่างดี ทั่วถึงและสม่ำเสมอ เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนและเมล็ดข้าวทำให้น้ำในเมล็ดข้าวระเหยออกไปส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความชื้นลดลง ลมร้อนจะไหลออกจากห้องอบแห้งและออกสู่บรรยากาศ ดังรูปที่ 3.6

3.6 หลักการทำงานเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

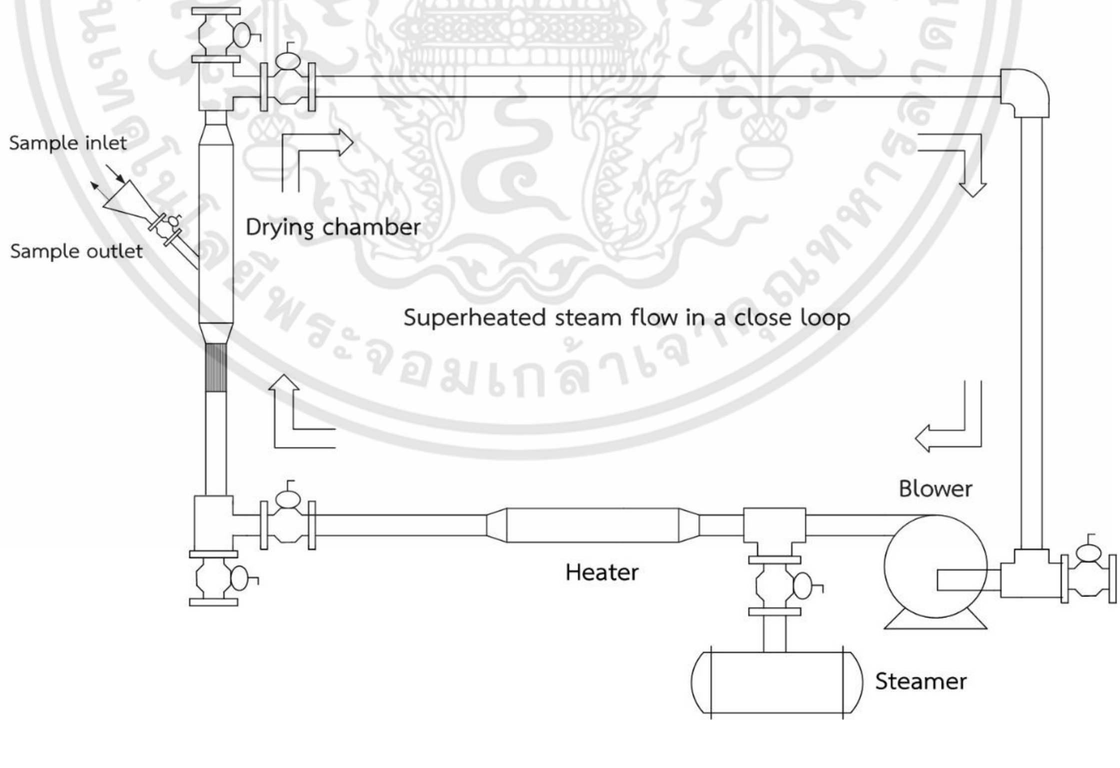
เริ่มจากป้อนไอน้ำอิ่มตัว (Saturated steam) จากแหล่งกำเนิดไอน้ำเข้าสู่เครื่องทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป่าผ่านกลุ่มท่อกระจายไอน้ำทางด้านล่างห้องอบแห้งทำให้เมล็ดข้าวลอยตัวขึ้นมีพฤติกรรมคล้ายของไหลส่งผลให้เมล็ดข้าวสัมผัสกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้เป็นอย่างดี ทั่วถึงและสม่ำเสมอ ไอน้ำร้อนยวดยิ่งถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดข้าวทำให้น้ำในเมล็ดข้าวระเหยออกไปส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความชื้นลดลง ไอน้ำร้อนยวดยิ่งรับความชื้นที่ระเหยออกจากเมล็ดข้าวทำให้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอุณหภูมิลดลงไหลออกจากห้องอบแห้งผ่านพัดลมและผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิแล้วไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งต่อไปไอน้ำร้อนยวดยิ่งไหลหมุนเวียนในระบบท่อปิดดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน



รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

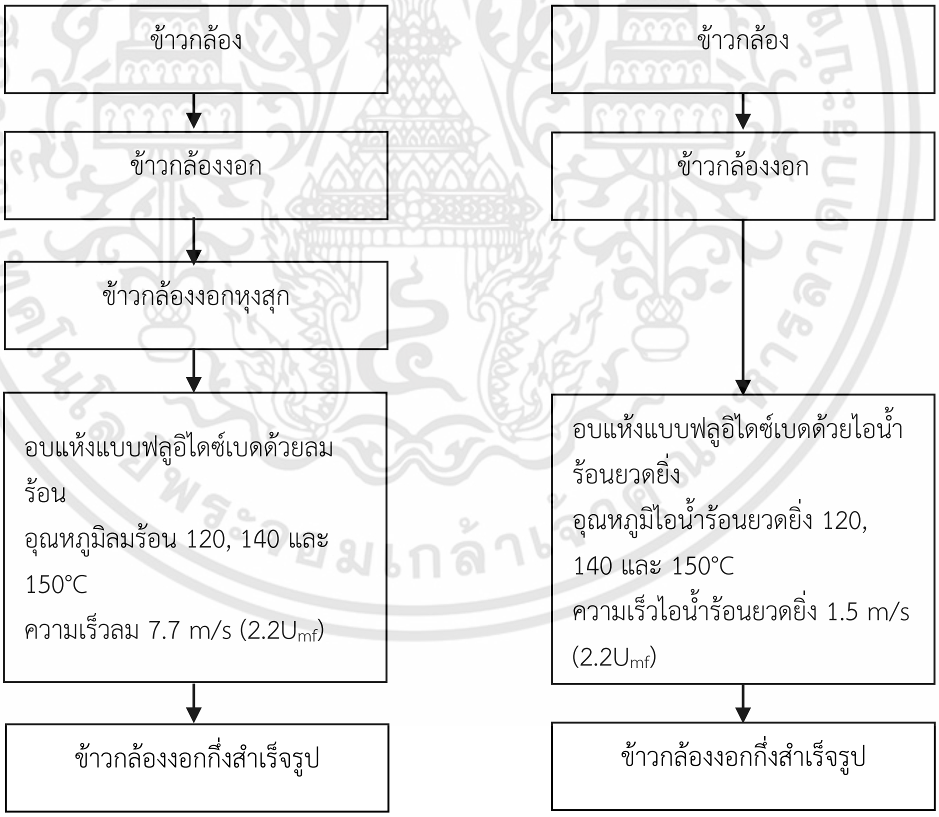
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

นำข้าวกล้องงอกหุงสุก 300 กรัม มาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 120, 140 และ 150°C ที่ความเร็วลม 7.7 m/s (2.2U_{mf}) ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการลอยตัวแบบฟลูอิไดซ์เบด (U_{mf}) 3.5 m/s ความสูงเบด 6.5 เซนติเมตร สุ่มตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ลดลงทุก ๆ 1 นาที จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 12 % d.b. ซึ่งหาความชื้นของเมล็ดข้าวโดยการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.8 การทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

นำข้าวกล้องงอก 300 กรัม มาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140 และ 150°C ที่ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 1.5 m/s (2.2U_{mf}) ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการลอยตัวแบบฟลูอิไดซ์เบด (U_{mf}) 0.7 m/s ความสูงเบด 6 เซนติเมตร สุ่มตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ลดลงทุก ๆ 1 นาที จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 12 % d.b. ซึ่งหาความชื้นของเมล็ดข้าวโดยการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.8 แผนภาพเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในตัวอย่างด้วยสัดส่วนความชื้น (Moisture ratio) ในรูปของสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical) และสมการจากการทดลอง (Empirical) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ดังตารางที่ 3.1 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่และค่าสัมประสิทธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพิจารณาความสามารถในการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งคือ ค่าสัมประสิทธ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าไคสแควร์ (The reduced chi-square, χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Mean relative percent deviation, EMD) โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2, RMSE และ EMD ต่ำที่สุด

ตารางที่ 3.1 สมการการอบแห้ง (Midilli et al., 2002 ; Ertekin & Yaldiz, 2004 ; Gunhan et al., 2005)

ที่	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
6	Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
7	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
8	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$
9	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$
10	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
11	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
12	Wang and Singh	$MR = 1+ at + bt^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.1 ค่าไคสแควร์ (The reduced chi-square, χ^2)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - Z} \quad (3.1)$$

3.9.2 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE)

$$RMSE = [\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2]^{1/2} \quad (3.2)$$

3.9.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Mean relative percent deviation, EMD)

$$EMD = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|MR_{exp,i} - MR_{pre,i}|}{MR_{exp,i}} \quad (3.3)$$

เมื่อ	$MR_{exp,i}$	คือ	ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง
	$MR_{pre,i}$	คือ	ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
	N	คือ	จำนวนข้อมูลการทดลอง
	Z	คือ	จำนวนตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.9.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusivity)

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวัสดุคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของ Fick ตามสมการที่ 3.4 โดยสมมติให้เมล็ดข้าวกล้องงอกหุงสุกเป็นทรงกลม การคำนวณหา D_{eff} สามารถหาได้จากความชันของสมการเชิงเส้นแบบถดถอยของ ln(MR) กับเวลาในการอบแห้ง

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2}\exp\left(-\frac{D_{eff}\pi^2}{{R_e}^2}t\right) \quad (3.4)$$

เมื่อ	D_{eff}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
	t	คือ	เวลาในการอบแห้ง (วินาที)
	R_e	คือ	รัศมีของวัสดุ (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.5 พลังงานกระตุ้น (Activation energy)

พลังงานกระตุ้นหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในวัสดุและอุณหภูมิอบแห้งซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Arrhenius ดังสมการที่ 3.5 พลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ ซึ่งความชันของเส้นตรงสามารถหาพลังงานกระตุ้นได้จาก E_a/R

$$D_{eff} = D_{\infty}\exp(-\frac{E_a}{RT_a}) \quad (3.5)$$

เมื่อ	D_{∞}	คือ	ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
	E_a	คือ	พลังงานกระตุ้น (J/mol)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.3145 J/mol.K)
	T_a	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

3.10 การวิเคราะห์คุณภาพเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง

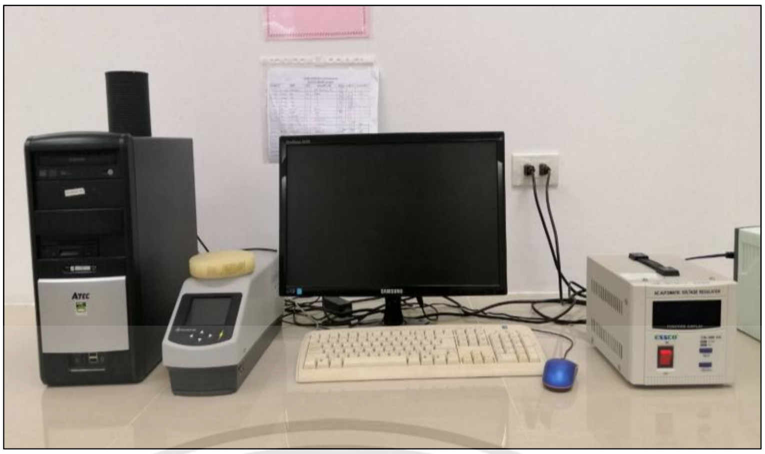
3.10.1 ความขาว

นำตัวอย่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ความชื้น 12 % d.b. และกลุ่มควบคุมข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ความชื้น 12 % d.b มาวัดสีด้วยเครื่องวัดสี HunterLab รุ่น ColorFlex EZ เป็นการวัดค่าสีในระบบ Hunter (L*, a*, b*) แสดงค่า L* (100-0 หมายถึงค่าความสว่าง), a* (ค่า + หมายถึงสีแดง, ค่า- หมายถึงสีเขียว), b* (ค่า + หมายถึงสีเหลือง, ค่า - หมายถึงสีน้ำเงิน) นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความขาว (Whiteness Index, WI) ดังสมการที่ 3.6

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (3.6)$$

เมื่อ	WI	=	ค่าความขาว
	L^*	=	ค่าความสว่าง
	a^*	=	ค่าความเป็นสีแดง หรือสีเขียว
	b^*	=	ค่าความเป็นสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดสี HunterLab รุ่น ColorFlex EZ

3.10.2 ความหนาแน่นรวม

ใช้ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ความชื้น 12 % d.b. และกลุ่มควบคุมข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ความชื้น 12 % d.b น้ำหนักประมาณ 20 กรัม บันทึกน้ำหนักข้าว แล้วนำข้าวใส่กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร เขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าสาร Scientific Industries รุ่น Vortex-Genie 2 ความเร็วรอบ 1,200 rpm เป็นเวลา 1 นาที เพื่อลดช่องว่างระหว่างเมล็ดข้าว บันทึกค่าปริมาตรรวมของเมล็ดข้าว และคำนวณค่าความหนาแน่นรวม ดังสมการที่ 3.7

ความหนาแน่นรวม = มวลของเมล็ดข้าว/ปริมาตรรวมของเมล็ดข้าว (3.7)

3.10.3 อัตราการดูดน้ำกลับ

ใช้ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ความชื้น 12 % d.b. และกลุ่มควบคุมข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ความชื้น 12 % d.b น้ำหนักประมาณ 20 กรัม แช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 97°C เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นวางให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาอัตราการดูดน้ำกลับ ดังสมการที่ 3.8

อัตราการดูดน้ำกลับ = น้ำหนักข้าวหลังการคืนรูป/น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (3.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

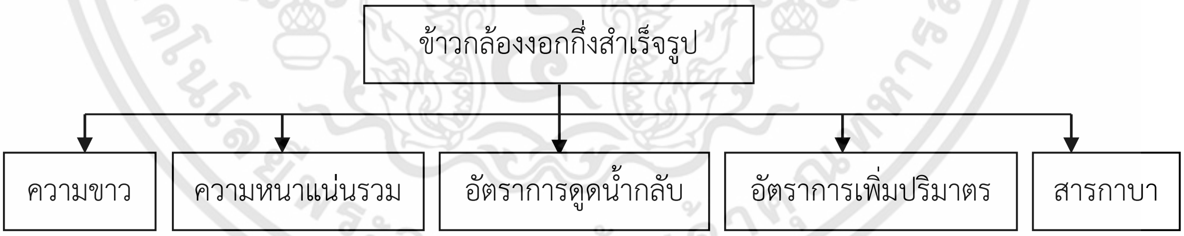
3.10.4 อัตราการเพิ่มปริมาตร

ใช้ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ความชื้น 12 % d.b. และกลุ่มควบคุมข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ความชื้น 12 % d.b น้ำหนักประมาณ 20 กรัม ใส่ในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร เขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าสาร Scientific Industries รุ่น Vortex-Genie 2 ความเร็วรอบ 1,200 rpm เป็นเวลา 1 นาที เพื่อลดช่องว่างระหว่างเมล็ดข้าว บันทึกค่าปริมาตร หลังจากนั้นนำข้าวแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 97°C เป็นเวลา 10 นาที วางให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมาใส่กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร เขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าสาร Scientific Industries รุ่น Vortex-Genie 2 ความเร็วรอบ 1,200 rpm เป็นเวลา 1 นาที แล้วบันทึกค่าปริมาตรหลังการแช่น้ำ และคำนวณอัตราการเพิ่มปริมาตร ดังสมการที่ 3.9

อัตราการเพิ่มปริมาตร = ปริมาตรข้าวหลังการคืนรูป/ปริมาตรเริ่มต้น (3.9)

3.10.5 สารกาบา

ใช้ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ความชื้น 12 % d.b. และกลุ่มควบคุมข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ความชื้น 12 % d.b และข้าวกล้อง น้ำหนักประมาณ 50 กรัม สกัดสารกาบาจากแป้งข้าวโดยใช้วิธีของ Komatsuzaki et al. (2007) และวิเคราะห์สารกาบาโดยใช้วิธีการ HPLC (High Performance liquid chromatography)



รูปที่ 3.10 การวิเคราะห์คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

3.11 วิธีการคืนรูป

วิธีการคืนรูปข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ความชื้น 12 % d.b. และกลุ่มควบคุมข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C ความชื้น 12 % d.b ใช้ข้าวตัวอย่างละ 20 กรัม คืนรูปด้วยวิธีไมโครเวฟ โดยสัดส่วนข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปต่อน้ำเป็น 1:5 ใส่ถ้วยแล้วปิดฝาและใส่ในไมโครเวฟกำลังไฟสูงสุด 800 วัตต์ เป็นเวลา 8 นาที หลังจากนั้นวางไว้ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 การคืนรูปข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยไมโครเวฟ

3.12 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการคืนรูป

3.12.1 เนื้อสัมผัส

ใช้ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการคืนรูป น้ำหนักประมาณ 3 กรัม นำมาทดสอบแบบ Back Extrusion ด้วยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT Plus ใช้หัวกดรูปทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร โดยตั้งระยะความสูงของหัวกด 50 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะกด 49 มิลลิเมตร โดยที่ค่าแรงสูงสุดคือค่าความแข็งและค่าแรงต่ำสุดคือค่าความเหนียวของเมล็ดข้าว

รูปที่ 3.12 การทดสอบแบบ Back Extrusion ด้วยเครื่อง Texture Analyzer

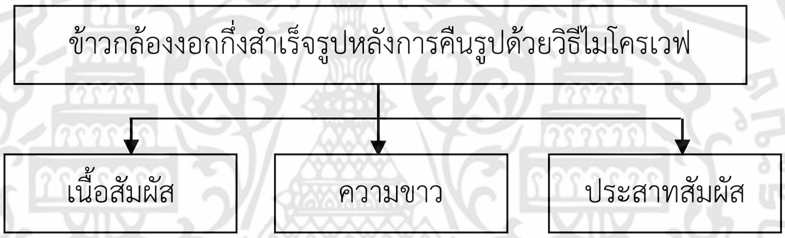
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12.2 ความขาว

นำตัวอย่างข้าวที่ผ่านการคืนรูป มาวัดสีด้วยเครื่องวัดสี HunterLab รุ่น ColorFlex EZ เป็นการวัดค่าสีในระบบ Hunter (L*, a*, b*) แสดงค่า L* (100-0 หมายถึงค่าความสว่าง), a* (ค่า + หมายถึงสีแดง, ค่า- หมายถึงสีเขียว), b* (ค่า + หมายถึงสีเหลือง, ค่า - หมายถึงสีน้ำเงิน) นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความขาว (Whiteness Index, WI) ดังสมการที่ 3.6

3.12.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

นำตัวอย่างข้าวที่ผ่านการคืนรูป มาทดสอบทางประสาทสัมผัส ใช้วิธีการให้คะแนนความชอบ (9 point hedonic scaling test) โดยเปรียบเทียบข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ความชื้น 12 %d.b. และกลุ่มควบคุมข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C ความชื้น 12 %d.b ที่คืนรูปแล้ว โดยทดสอบลักษณะดังนี้ ลักษณะภายนอก, สี, เนื้อสัมผัส, กลิ่น, การยึดติดกันของเมล็ด, รสชาติ และความชอบโดยรวม



รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการคืนรูป

3.13 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ได้แก่ ปริมาณสารกาบา ความขาว ความหนาแน่นรวม อัตราการดูดน้ำกลับ อัตราการเพิ่มปริมาตร เนื้อสัมผัส และการทดสอบทางประสาทสัมผัส ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งแต่ละการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

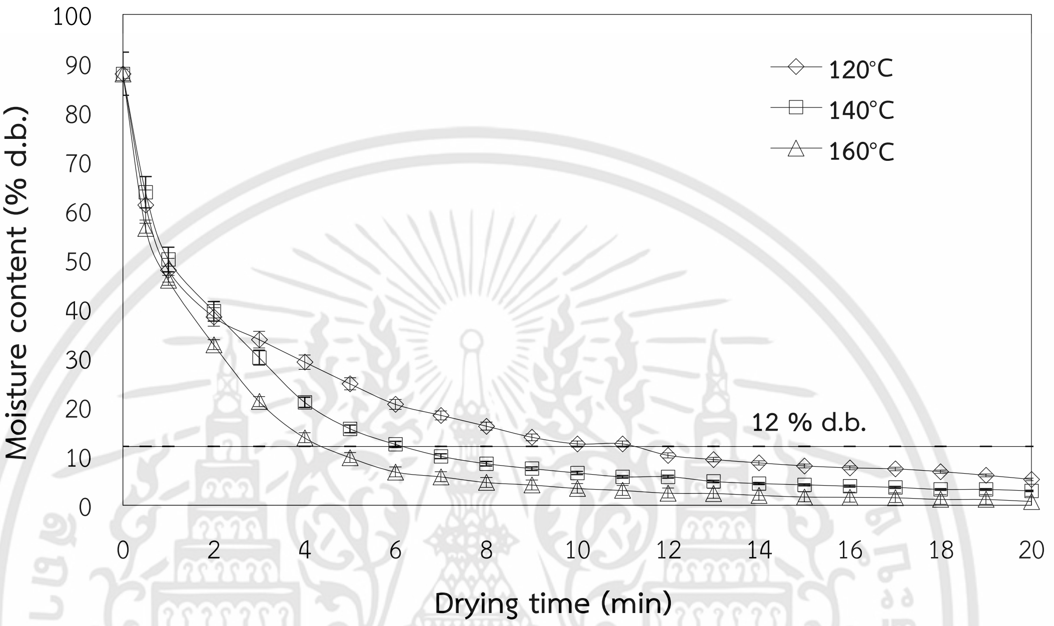
4.1.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง

การอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความชื้นเริ่มต้น 87.92±0.07 % d.b. ถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิลมร้อน 120, 140 และ 160°C ส่วนการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ข้าวกล้องงอกมีความชื้นเริ่มต้น 47.84±2.44 % d.b ถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140 และ 160°C การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นกับเวลาของการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาของการอบแห้ง และเมื่ออุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง (Srisang et al., 2011) แต่การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C ในช่วงเวลาการอบแห้งเริ่มต้น 30 วินาที ข้าวกล้องงอกมีความชื้นเพิ่มขึ้นจากความชื้นเริ่มต้นเนื่องจากอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C เป็นอุณหภูมิที่ต่ำทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของเมล็ดข้าวมาก เมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นความชื้นของข้าวกล้องงอกลดลงเช่นเดียวกับการอบแห้งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140 และ 160°C เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ 12% d.b. ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยลมร้อน เท่ากับ 11.22, 6.18 และ 4.44 นาที ส่วนเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เท่ากับ 24.57, 6.52 และ 3.87 นาที ที่อุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140 และ 160°C ตามลำดับ

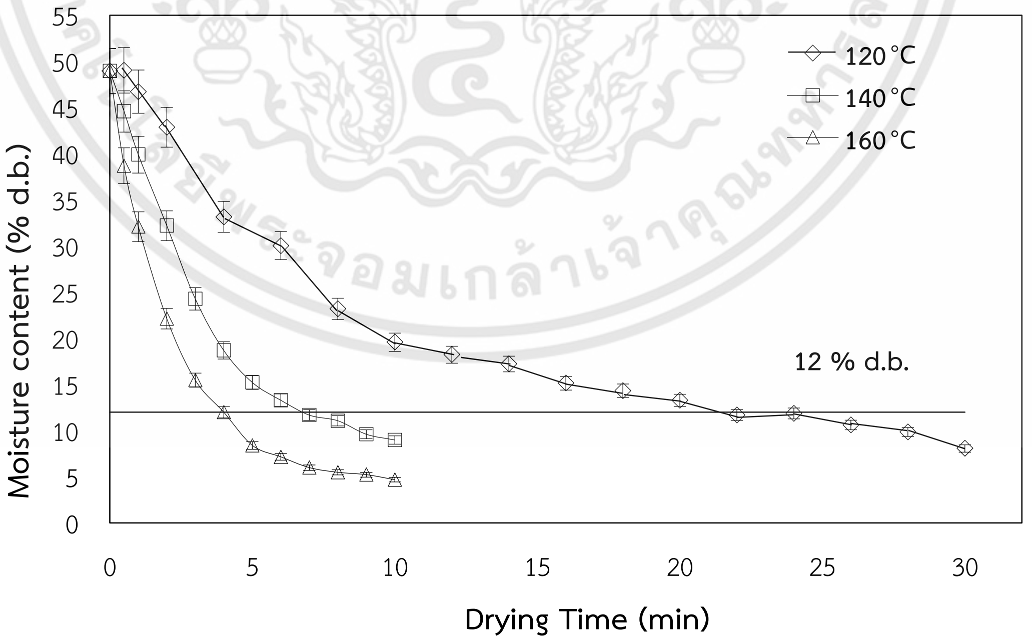
การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยลมร้อน ระหว่างการอบแห้งความชื้นและอัตราการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเป็นช่วงที่อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเมล็ดข้าวที่แพร่มาที่ผิวหน้าช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าทำให้อัตราการอบแห้งลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น (Rordprapat et al., 2005) ส่วนการอบแห้งกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ระหว่างการอบแห้งช่วงเริ่มต้นอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากไอน้ำสัมผัสกับผิวของเมล็ดข้าวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำทำให้ไอน้ำเกิดการควบแน่น ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ไอน้ำร้อนยวดยิ่งถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดข้าวส่งผลให้น้ำที่ผิวของเมล็ดข้าวเกิดการระเหยส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ ส่วนช่วงอัตราการอบแห้งลดลงของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเหมือนกับการอบแห้งด้วยลมร้อนคือ ช่วงนี้ความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นวิกฤต ที่ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง (Taechapairoj et al., 2003) และอัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 7.65, 11.91 และ 13.46 g water/g dry matter.min ส่วนอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 2.15, 6.64 และ 9.74 g water/g dry matter.min ที่อุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140 และ 160°C ตามลำดับ

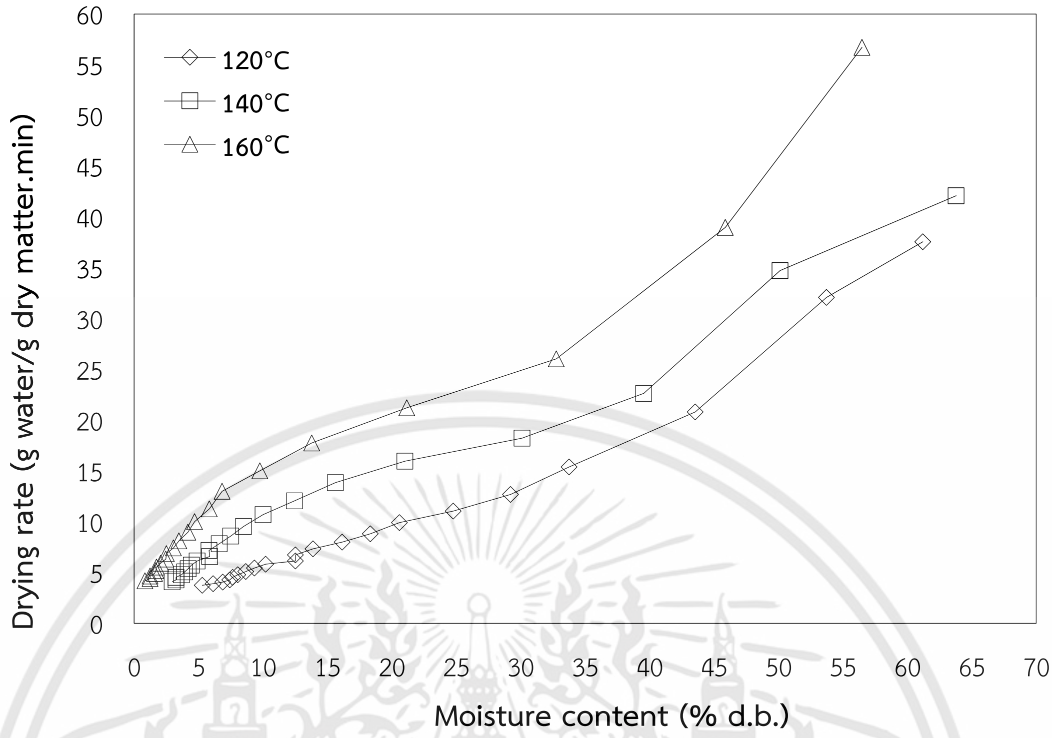


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

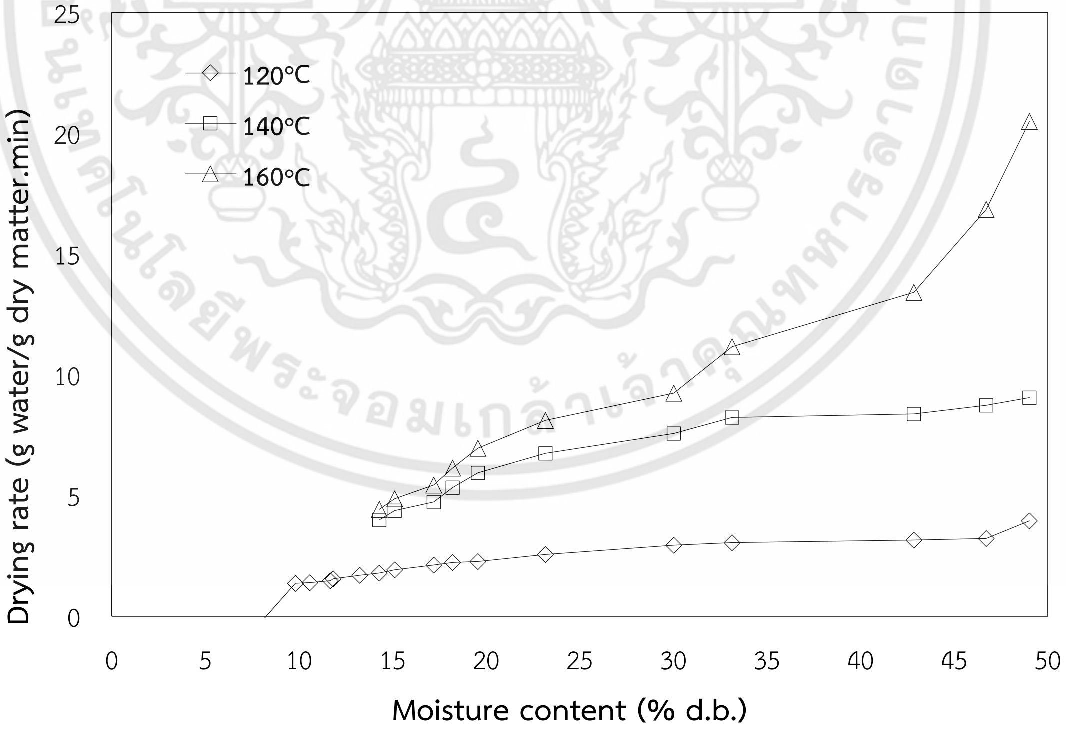


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้งกับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งกับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

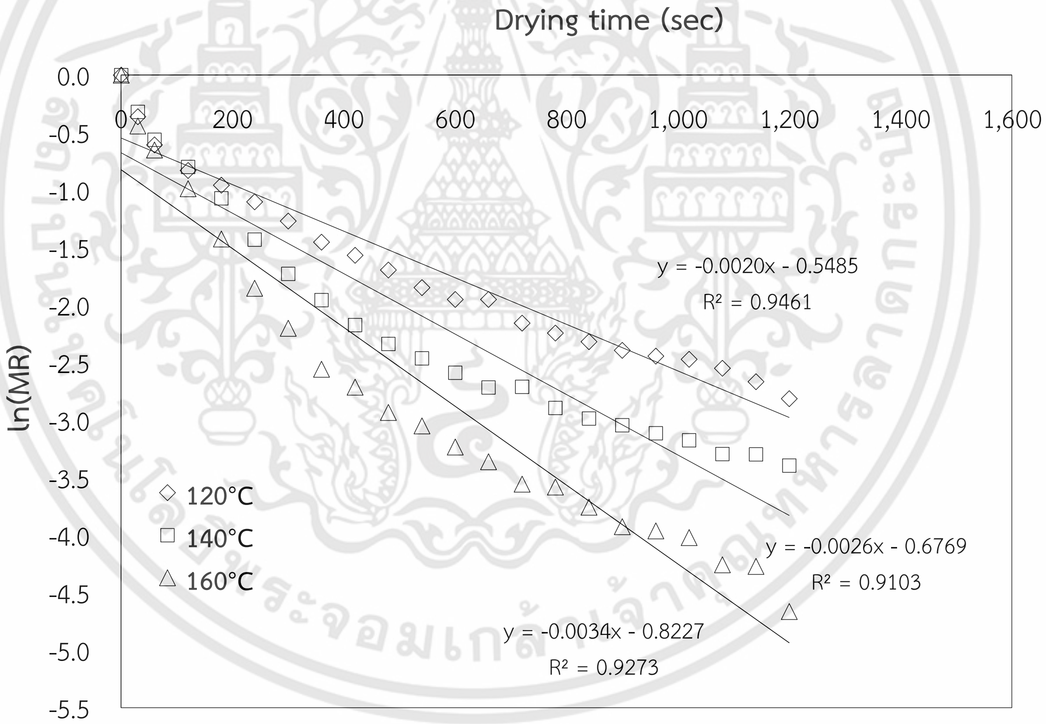


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งกับความชื้นฐานแห้งของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

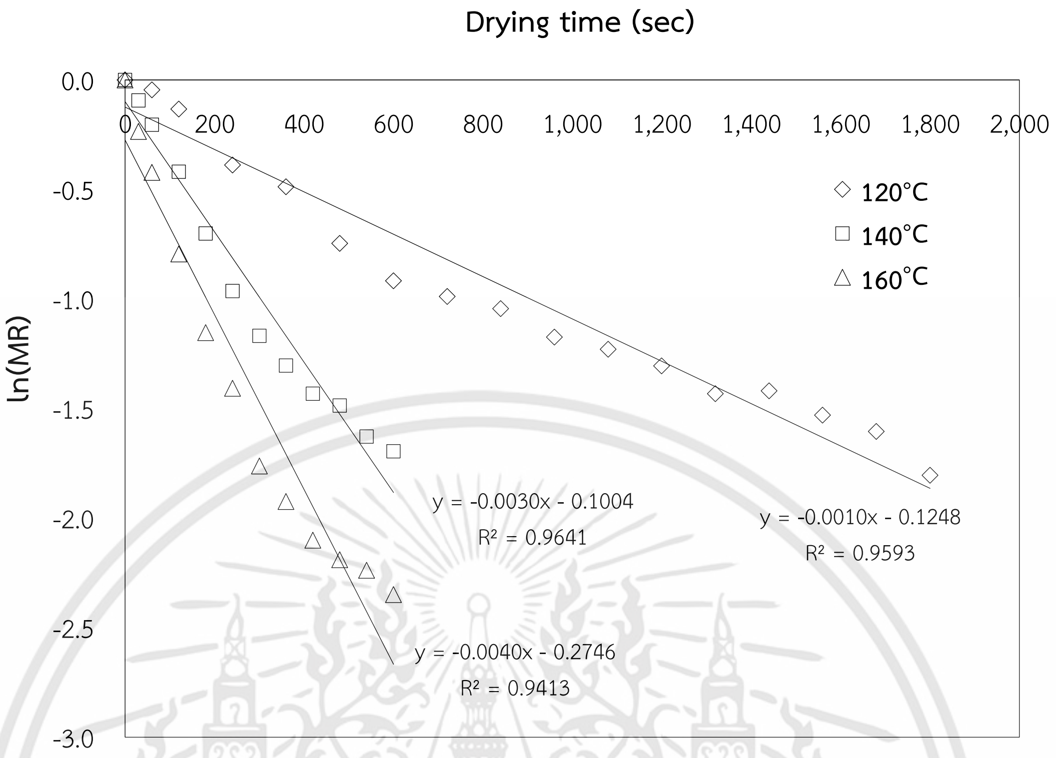
4.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของ Fick โดยสมมติให้เมล็ดข้าวเป็นทรงกลม โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวจากการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งหาได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับเวลาในการอบแห้ง ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนยกเว้นที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C เนื่องจากในช่วงเวลาการอบแห้งเริ่มต้นไอน้ำเกิดการควบแน่นที่ผิวของเมล็ดข้าว และเมื่ออุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้นด้วย (Soponronnarit et al., 2006) สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวจากการอบแห้งด้วยลมร้อน เท่ากับ 2.73×10^{-7}, 3.54×10^{-7} และ 4.63×10^{-7} m^2/s ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 1.36×10^{-7}, 4.09×10^{-7} และ 5.45×10^{-7} m^2/s ที่อุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140 และ 160°C ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับเวลาของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

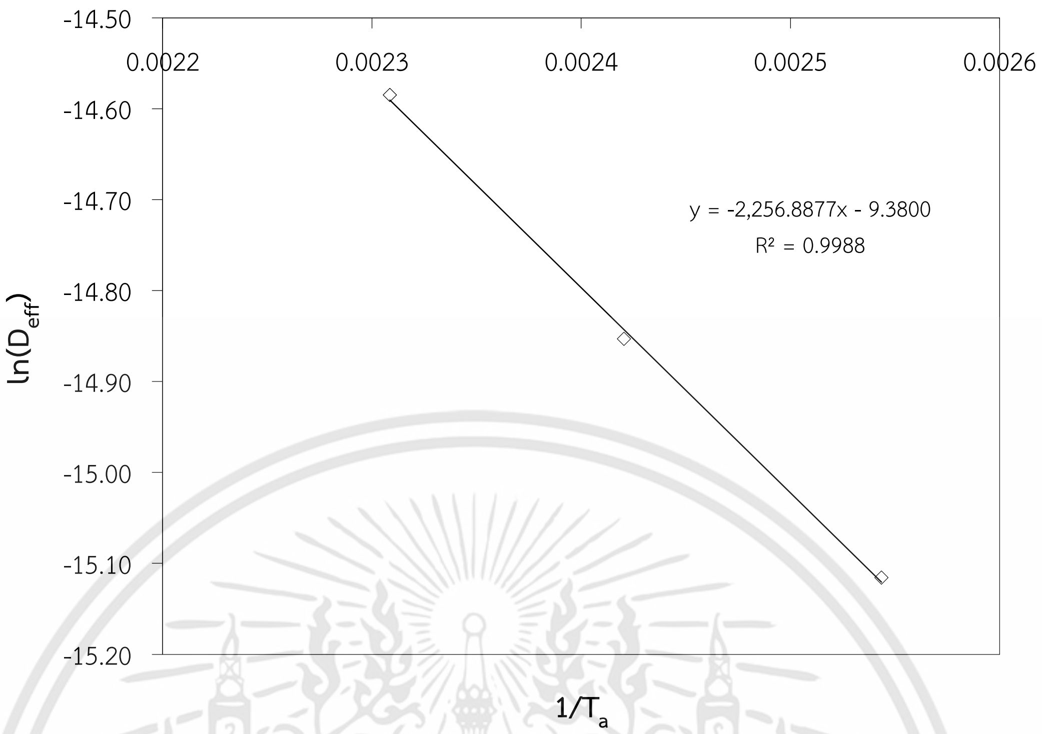


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับเวลาของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

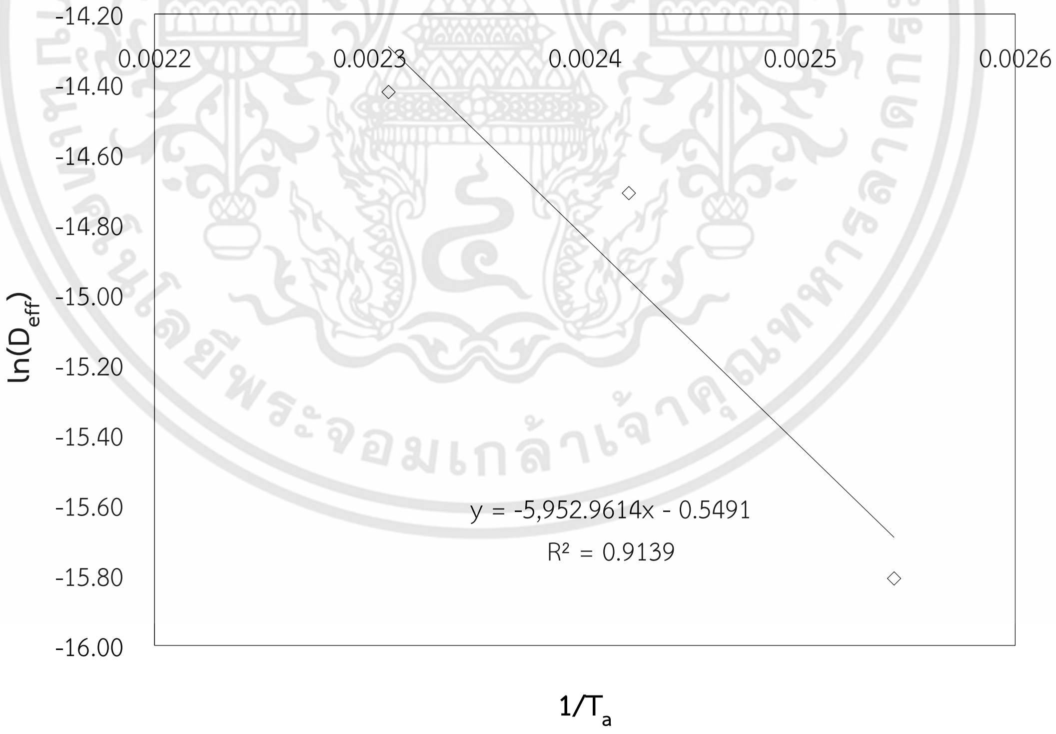
4.1.3 พลังงานกระตุ้น

พลังงานกระตุ้นในการระเหยน้ำของเมล็ดข้าวหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวและอุณหภูมิอบแห้ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Arrhenius โดยพลังงานกระตุ้นจากการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถคำนวณได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งความชันของเส้นตรงสามารถหาพลังงานกระตุ้นได้จาก E_a/R เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งสองรูปแบบ พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าพลังงานกระตุ้นสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต้องการพลังงานในการระเหยน้ำมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (Taechapairoj et al., 2004) ซึ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 18.77 kJ/mol ส่วนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 49.50 kJ/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(D_{eff}) กับ 1/T_a ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln(D_{eff}) กับ 1/T_a ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ทำได้โดยการนำข้อมูลของปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120, 140 และ 160°C นำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 12 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การพิจารณาความสามารถในการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าไคสแควร์ (χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (EMD) โดยพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2, RMSE และ EMD ต่ำที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 12 รูปแบบ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Modified Henderson and Pabis สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2, RMSE และ EMD ต่ำที่สุด ดังตารางที่ 4.2 โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9989 ถึง 0.9994 ค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 4.79×10^{-5} ถึง 9.78×10^{-5} ค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.0059 ถึง 0.0084 และค่า EMD อยู่ระหว่าง 2.87 ถึง 8.63 ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Midilli et al. สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2, RMSE และ EMD ต่ำที่สุด ดังตารางที่ 4.3 โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9916 ถึง 0.9989 ค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 1.00×10^{-3} ถึง 3.53×10^{-5} ค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.0274 ถึง 0.0049 และค่า EMD อยู่ระหว่าง 1.9800 ถึง 4.4133

ในการทวนสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Modified Henderson and Pabis แสดงดังรูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Modified Henderson and Pabis พบว่าใกล้เคียงกันมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9992 ส่วนการทวนสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Midilli et al. แสดงดังรูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองจากการทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Midilli et al. พบว่าใกล้เคียงกันมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9997 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำนายอัตราส่วนความชื้นสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองตลอดกระบวนการอบแห้งทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Modified Henderson and Pabis เหมาะสมในอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Midilli et al. เหมาะสมในอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป (Taechapairoj et al., 2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

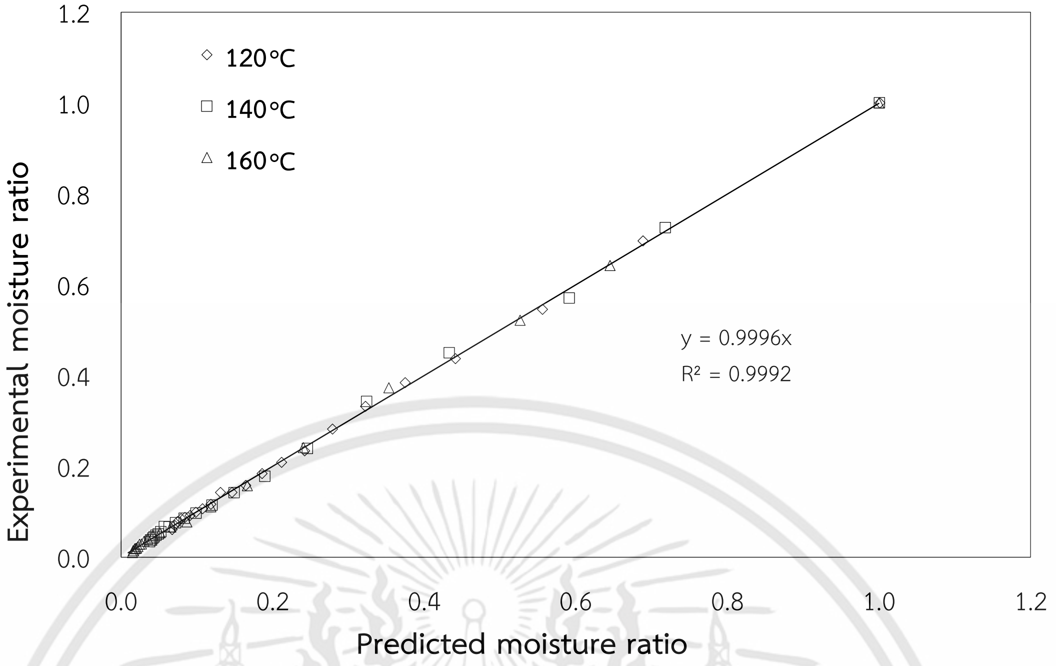
No.	T(°C)	Model constants and coefficients	R^2	χ^2	RMSE	EMD
1	120	k = 0.2692	0.8492	8.52×10^{-3}	0.0902	50.24
	140	k = 0.3682	0.9610	2.64×10^{-3}	0.0502	53.98
	160	k = 0.5214	0.9732	1.75×10^{-3}	0.0409	64.56
2	120	k = 0.5548 ; n = 0.5344	0.9981	1.15×10^{-4}	0.0102	3.58
	140	k = 0.5367 ; n = 0.6803	0.9964	2.57×10^{-4}	0.0153	17.97
	160	k = 0.6679 ; n = 0.6979	0.9976	1.67×10^{-4}	0.0123	23.65
3	120	k = 0.3321 ; n = 0.5344	0.9981	2.25×10^{-4}	0.0102	3.58
	140	k = 0.4006 ; n = 0.6803	0.9964	2.88×10^{-4}	0.0162	19.73
	160	k = 0.5608 ; n = 0.6979	0.9976	1.67×10^{-4}	0.0123	23.65
4	120	a = 0.7933 ; k = 0.1929	0.9199	4.75×10^{-3}	0.0657	31.12
	140	a = 0.8987 ; k = 0.3187	0.9729	1.92×10^{-3}	0.0418	45.99
	160	a = 0.9137 ; k = 0.4606	0.9807	1.32×10^{-3}	0.0347	8.26
5	120	a = 0.7760 ; k = 0.3396 ; c = 0.0995	0.9620	2.37×10^{-3}	0.0452	17.19
	140	a = 0.8819 ; k = 0.4038 ; c = 0.0510	0.9900	7.49×10^{-4}	0.0254	14.09
	160	a = 0.9030 ; k = 0.5233; c = 0.0285	0.9879	8.76×10^{-4}	0.0275	35.19
6	120	a = 0.4787 ; k0 = 1.6790; b= 0.5205 ; k1 = 0.1207	0.9972	1.82×10^{-4}	0.0122	8.26
	140	a = 0.5841 ; k0 = 0.7805 ; b= 0.3913 ; k1 = 0.1553	0.9939	4.82×10^{-4}	0.0199	16.31
	160	a = 0.2705 ; k0 = 4.2361 ; b = 0.7294 ; k1 = 0.3536	0.9967	2.49×10^{-4}	0.0143	43.88
7	**120**	**a = 0.4043; k = 2.1624 ; b = 0.5426 ; g = 0.1759 ; c = 0.0545 ; h = 0.031**	**0.9994**	$\mathbf{4.79\times10^{-5}}$	**0.0059**	**2.87**
	140	**a = 0.7388 ; k = 0.3357 ; b = 0.2037 ; g = 3.4537 ; c = 0.0581 ; h = 0.0228**	**0.9989**	$\mathbf{9.78\times10^{-5}}$	**0.0084**	**4.58**
	160	**a = 0.7490 ; k = 0.4348 ; b = 0.2073 ; g = 59.2975 ; c = 0.0437 ; h = 0.0543**	**0.9994**	$\mathbf{4.87\times10^{-5}}$	**0.0060**	**8.63**
8	120	a = 0.4793 ; k = 1.6823 ; g = 0.1207	0.9972	1.72×10^{-4}	0.0122	8.26
	140	a = -0.8669 ; k = 0.3682 ; g = 0.3682	0.9610	2.91×10^{-3}	0.0502	53.98
	160	a = -1.5549 ; k = 0.5214 ; g = 0.5214	0.9732	1.93×10^{-3}	0.0409	64.56
9	120	a = 0.2111 ; k = 1.0025	0.9130	5.16×10^{-3}	0.0685	38.25
	140	a = 0.2150 ; k = 1.3467	0.9825	1.24×10^{-3}	0.0336	41.52
	160	a = 0.1981 ; k = 2.0941	0.9896	7.13×10^{-4}	0.0255	53.12
10	120	a = 0.4793 ; k = 1.6823 ; b = 0.0717	0.9972	1.72×10^{-4}	0.0122	8.24
	140	a = 0.4887 ; k = 1.0980 ; b = 0.1705	0.9937	4.74×10^{-4}	0.0202	22.14
	160	a = 0.2706 ; k = 4.2371 ; b = 0.0834	0.9967	2.36×10^{-4}	0.0143	43.84
11	120	a = 1.0003 ; k = 0.5570 ; n = 0.5268 ; b = -0.0003	0.9981	1.25×10^{-4}	0.0101	8.24
	140	a = 0.9962 ; k = 0.5198 ; n = 0.7320 ; b = 0.0014	0.9981	1.49×10^{-4}	0.0110	5.61
	160	a = 0.9946 ; k = 0.6583 ; n = 0.7210 ; b = 0.0006	0.9980	1.53×10^{-4}	0.0112	10.98
12	120	a = -0.1467; b = 0.0054	0.6386	2.14×10^{-2}	0.1396	63.55
	140	a = -0.1621; b = 0.0061	0.6921	2.19×10^{-2}	0.1411	126.37
	160	a = -0.1735; b = 0.0067	0.5304	3.22×10^{-2}	0.1711	347.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

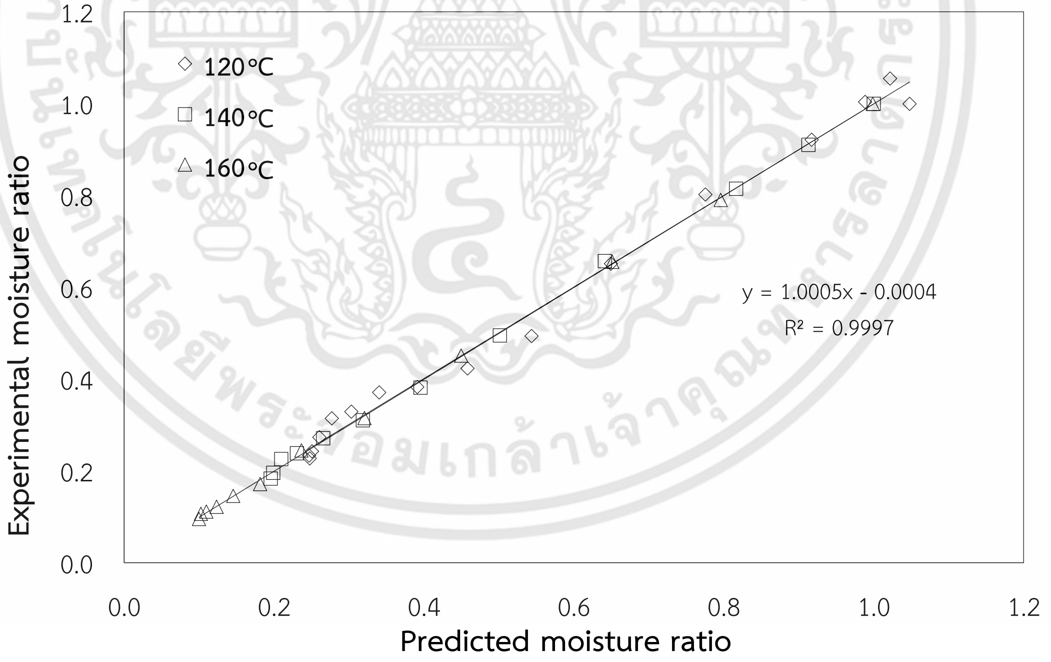
ตารางที่ 4.2 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

No.	T(°C)	Model constants and coefficients	R^2	χ^2	RMSE	EMD
1	120	k = 0.0690	0.9717	2.70×10^{-3}	0.0504	9.4499
	140	k = 0.2108	0.9865	1.19×10^{-3}	0.0330	9.8200
	160	k = 0.4078	0.9344	1.87×10^{-3}	0.0414	22.1000
2	120	k = 0.0732 ; n = 0.9772	0.9719	2.90×10^{-3}	0.0502	9.0044
	140	k = 0.2420 ; n = 0.9110	0.9895	1.02×10^{-3}	0.0292	8.1300
	160	k = 0.5891 ; n = 0.6446	0.9957	4.76×10^{-4}	0.0199	10.3000
3	120	k = 0.0688 ; n = 0.9772	0.9719	2.90×10^{-3}	0.0502	8.9920
	140	k = 0.2107 ; n = 0.9110	0.9895	1.02×10^{-3}	0.0292	8.1300
	160	k = 0.4401 ; n = 0.6446	0.9957	4.76×10^{-4}	0.0199	10.3000
4	120	a = 1.0408 ; k = 0.0727	0.9758	2.50×10^{-3}	0.0465	10.1338
	140	a = 0.9922 ; k = 0.2087	0.9867	1.65×10^{-3}	0.0329	9.8100
	160	a = 0.8946 ; k = 0.3482	0.9532	1.65×10^{-3}	0.0370	19.6000
5	120	a = 0.9054 ; k = 0.1118 ; c = 0.1714	0.9885	1.30×10^{-3}	0.0321	4.4249
	140	a = 0.8982 ; k = 0.2937 ; c = 0.1268	0.9964	3.88×10^{-4}	0.0171	3.5900
	160	a = 0.8457 ; k = 0.5913 ; c = 0.1187	0.9923	6.29×10^{-5}	0.0069	1.8400
6	120	a = 1.0302 ; k0 = 0.0951 ; b = 0.0426 ; k1 = -0.0477	0.9890	1.30×10^{-3}	0.0314	4.8146
	140	a = 0.0109 ; k0 = -0.2282 ; b = 1.0083 ; k1 = 0.2468	0.9967	9.02×10^{-5}	0.0143	3.0900
	160	a = 0.3809 ; k0 = 0.1466 ; b = 0.6087 ; k1 = 0.9737	0.9967	6.76×10^{-5}	0.0067	1.9200
7	120	a = 0.4756 ; k = 0.0951 ; b = 0.0426 ; g = -0.0477 ; c = 0.5546 ; h = 0.0951	0.9890	1.60×10^{-3}	0.0314	4.8148
	140	a = 0.7591 ; k = 0.2468 ; b = 0.2492 ; g = 0.2468 ; c = 0.0109 ; h = -0.2283	0.9975	4.11×10^{-4}	0.0143	3.0900
	160	a = 0.6087 ; k = 0.9737 ; b = 0.4001 ; g = 0.1466 ; c = -0.0192 ; h = 0.1466	0.9967	9.02×10^{-5}	0.0067	1.9200
8	120	a = -0.4846 ; k = 0.0690 ; g = 0.0690	0.9717	3.10×10^{-3}	0.0504	9.4499
	140	a = -0.9948 ; k = 0.2346 ; g = -0.2925	0.9968	3.45×10^{-4}	0.0161	3.4700
	160	a = 0.6058 ; k = 1.0206 ; g = 0.1513	0.9966	2.28×10^{-3}	0.0414	22.1000
9	120	a = 0.3928 ; k = 0.1231	0.9749	2.60×10^{-3}	0.0475	7.2418
	140	a = 0.3668 ; k = 0.4091	0.9923	7.53×10^{-4}	0.0250	6.9400
	160	a = 0.2286 ; k = 1.3778	0.9708	5.99×10^{-4}	0.0223	12.4000
10	120	a = 0.9971 ; k = 0.0758 ; b = -1.7683	0.9787	2.30×10^{-3}	0.0437	5.4303
	140	a = 0.9948 ; k = 0.2346; b = -1.2468	0.9968	3.45×10^{-4}	0.0161	3.4700
	160	a = 0.6058 ; k = 1.0206 ; b = 0.1482	0.9966	6.90×10^{-5}	0.0072	2.2500
11	**120**	**a = 1.0479 ; k = 0.0660 ; n = 1.1866 ; b = 0.0078**	**0.9916**	$\mathbf{1.00\times10^{-3}}$	**0.0274**	**4.4133**
	140	**a = 1.0001 ; k = 0.2215 ; n = 1.1538 ; b = 0.0153**	**0.9989**	$\mathbf{1.34\times10^{-4}}$	**0.0095**	**2.5700**
	160	**a = 0.9999 ; k = 0.5880 ; n = 0.7349 ; b = 0.0062**	**0.9985**	$\mathbf{3.53\times10^{-5}}$	**0.0049**	**1.9800**
12	120	a = -0.0663 ; b = 0.0014	0.9797	7.37×10^{-2}	0.2539	7.8803
	140	a = -0.1934 ; b = 0.0115	0.9945	5.36×10^{-4}	0.0211	6.0800
	160	a = -0.2719 ; b = 0.0193	0.8626	5.13×10^{-3}	0.0654	2.2500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ผลของอุณหภูมิการอบแห้งกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด

ค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Modified Henderson and Pabis คือ a, k, b, g, c และ h ส่วนค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Midilli et al. คือ a, k, n และ b สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis และ Midilli et al. ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าอัตราส่วนความชื้นของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปในเวลาใดๆ (Taechapairoj et al., 2006) ระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองซึ่งทำให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis

Constant/Coefficient	Model	R^2
a	$8.60\times10^{-3}T-0.58$	0.8722
k	$-0.04.32\times10^{-2}T+7.02$	0.8071
b	$-8.40\times10^{-3}T+1.49$	0.8419
g	$1.48T-185.95$	0.8914
c	$-3.00\times10^{-4}T+0.0879$	0.9067
h	$6.00\times10^{-4}T-0.04$	0.8967

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Midilli et al.

Constant/Coefficient	Model	R^2
a	$-1.20\times10^{-3}T+1.18$	0.8531
k	$1.31\times10^{-2}T-1.54$	0.9483
n	$-1.13\times10^{-2}T+2.61$	0.9042
b	$-3.00\times10^{-4}T+0.05$	0.8647

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการอบแห้ง

4.2.1 ความขาว

จากผลการวิเคราะห์ค่าความขาวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง โดยมีความชื้นสุดท้าย 12 % d.b. แสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาความแตกต่างของชนิดตัวกลางการอบแห้งและความแตกต่างของอุณหภูมิตัวกลางอบแห้งต่อค่าความขาวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าความขาวเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นใช้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน 160°C มีค่าความขาวสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของตัวกลางอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน พบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าความขาวสูงกว่าเนื่องจากข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรกไอน้ำเกิดการควบแน่นที่ผิวของเมล็ดข้าวเป็นตัวเร่งปฏิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Iyota et al., 2002) ทำให้ค่าความขาวลดลง

ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อค่าความขาวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง

Drying media	Temperature (°C)	Whiteness Index (%WI)
Reference Hot air oven	40	50.48±0.01[a]
HA	120	51.90±0.01[b]
	140	50.75±0.02[c]
	160	51.94±0.01[d]
SHS	120	46.48±0.02[e]
	140	49.90±0.01[f]
	160	50.01±0.01[g]

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ความหนาแน่นรวม

จากผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง โดยมีความชื้นสุดท้าย 12 % d.b. แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปกลุ่มควบคุมและอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C มีความหนาแน่นรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C มีความหนาแน่นรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นรวมลดลง (Prasert & Suwannaporn, 2009) เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำใช้ระยะเวลามากส่งผลให้เมล็ดข้าวหดตัวและปริมาตรเมล็ดข้าวลดลงความหนาแน่นรวมจึงเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C มีความหนาแน่นรวมสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของตัวกลางอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความหนาแน่นรวมสูงกว่าอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรกไอน้ำเกิดการควบแน่นที่ผิวของเมล็ดข้าวส่งให้เมล็ดข้าวเกิดเจลาทิไนซ์ที่สมบูรณ์กว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนทำให้เมล็ดข้าวหดตัวและปริมาตรเมล็ดข้าวลดลง

ตารางที่ 4.6 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อความหนาแน่นรวมของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง

Drying media	Temperature (°C)	Bulk density (g/cm^3)
Reference Hot air oven	40	0.80±0.02^a
HA	120	0.62±0.01^b
	140	0.61±0.01^{bc}
	160	0.59±0.01^c
SHS	120	0.79±0.02^a
	140	0.70±0.01^d
	160	0.66±0.01^e

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 อัตราการดูดน้ำกลับ

จากผลการวิเคราะห์อัตราการดูดน้ำกลับของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง โดยมีความชื้นสุดท้าย 12 % d.b. แสดงดังตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาความแตกต่างของชนิดตัวกลางการอบแห้งและความแตกต่างของอุณหภูมิตัวกลางอบแห้งต่ออัตราการดูดน้ำกลับแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการดูดน้ำกลับลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิตัวกลางอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้เมล็ดข้าวแตกร้าวลดลงสาเหตุจากเกิดเจลาทิไนซ์เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน 140°C มีอัตราการดูดน้ำกลับสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของตัวกลางอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอัตราการดูดน้ำกลับต่ำกว่าอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลให้เมล็ดข้าวแตกร้าวต่ำกว่าอบแห้งด้วยลมร้อน (Srisang et al., 2011) เนื่องจากช่วงแรกไอน้ำเกิดการควบแน่นที่ผิวเมล็ดข้าวทำให้เกิดเจลาทิไนซ์ที่สมบูรณ์ซึ่งช่วยลดการแตกร้าวของเมล็ดข้าวส่งผลให้อัตราการดูดน้ำกลับลดลง

ตารางที่ 4.7 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่ออัตราการดูดน้ำกลับของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง

Drying media	Temperature (°C)	Rehydration ratio
Reference Hot air oven	40	1.42±0.02[a]
HA	120	1.67±0.01[b]
	140	1.73±0.01[c]
	160	1.65±0.02[d]
SHS	120	1.54±0.01[e]
	140	1.67±0.02[f]
	160	1.60±0.02[g]

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 อัตราการเพิ่มปริมาตร

จากผลการวิเคราะห์อัตราการเพิ่มปริมาตร (Increased volume ratio) ของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง โดยมีความชื้นสุดท้าย 12 % d.b. แสดงดังตารางที่ 4.8 ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปกลุ่มควบคุมและอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C มีอัตราการเพิ่มปริมาตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C มีอัตราการเพิ่มปริมาตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มปริมาตรลดลงเนื่องจากเมล็ดข้าวแตกร้าวลดลงทำให้อัตราการดูดน้ำกลับลดลง อัตราการเพิ่มปริมาตรจึงลดลงตามไปด้วย ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C มีอัตราการเพิ่มปริมาตรสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของตัวกลางอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอัตราการเพิ่มปริมาตรสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากช่วงแรกไอน้ำเกิดการควบแน่นที่ผิวของเมล็ดข้าวส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความพรุนสูง (Iyota et al., 2001) เมล็ดข้าวดูดน้ำกลับได้มากขึ้นทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.8 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่ออัตราการเพิ่มปริมาตรของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง

Drying media	Temperature (°C)	Increased volume ratio
Reference Hot air oven	40	1.78±0.02[a]
HA	120	1.57±0.02[bc]
	140	1.60±0.02[cd]
	160	1.54±0.02[b]
SHS	120	1.76±0.02[a]
	140	1.61±0.02[d]
	160	1.54±0.02[b]

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 สารกาบา

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง โดยมีความชื้นสุดท้าย 12 % d.b. กับข้าวกล้อง แสดงดังตารางที่ 4.9 ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C มีปริมาณสารกาบาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140 และ 160°C มีปริมาณสารกาบาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารกาบาลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Watanabe et al., (2004) ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C มีปริมาณสารกาบาสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของตัวกลางอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีปริมาณสารกาบาสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน และข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนมีปริมาณสารกาบาสูงกว่าข้าวกล้องงอกกลุ่มควบคุมและข้าวกล้อง

ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง

Drying media	Temperature (°C)	GABA (mg/100g)
Brown rice	-	1.33±0.06[a]
Reference Hot air oven	40	7.49±0.18[b]
HA	120	9.94±0.11[c]
	140	9.72±0.13[cd]
	160	9.45±0.09[d]
SHS	120	16.12±0.23[e]
	140	12.71±0.23[f]
	160	12.96±0.02[f]

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HA 120°C

SHS 120°C

Reference Hot air oven 40°C

HA 140°C

SHS 140°C

HA 160°C

SHS 160°C

a. b. c.

รูปที่ 4.11 ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้ง ความชื้น 12 % d.b.
a. ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน
b. ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
c. ข้าวกล้องงอกอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน 40°C (กลุ่มควบคุม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการคืนรูป

4.3.1 ความขาว

จากผลการวิเคราะห์ค่าความขาวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูปด้วยไมโครเวฟ แสดงดังตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณาความแตกต่างของชนิดตัวกลางการอบแห้งและความแตกต่างของอุณหภูมิตัวกลางอบแห้งต่อค่าความขาวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความขาวลดลงเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เมล็ดข้าวแตกร้าวลดลงทำให้เมล็ดข้าวดูดน้ำกลับลดลง (Srisang et al., 2011) ค่าความขาวจึงลดลงด้วย ที่อุณหภูมิลมร้อน 120°C มีค่าความขาวสูงที่สุด ส่วนเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความขาวเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ข้าวเกิดเจลาทิไนซ์เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมาคืนรูปด้วยไมโครเวฟทำให้ดูดน้ำกลับได้มากขึ้น ค่าความขาวจึงเพิ่มขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 160°C มีค่าความขาวสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของตัวกลางอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าความขาวสูงกว่าอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเนื่องจากเมล็ดข้าวแตกร้าวมากกว่าทำให้เมล็ดข้าวดูดน้ำได้เพิ่มขึ้น ค่าความขาวจึงเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.10 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อค่าความขาวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป

Drying media	Temperature (°C)	Whiteness Index (%WI)
Reference Hot air oven	40	50.12 ± 0.01^{a}
HA	120	48.83 ± 0.02^{b}
	140	45.33 ± 0.02^{c}
	160	43.26 ± 0.01^{d}
SHS	120	42.03 ± 0.02^{e}
	140	45.72 ± 0.01^{f}
	160	46.42 ± 0.01^{g}

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 เนื้อสัมผัส

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป แสดงดังตารางที่ 4.11 ความแข็งของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปกลุ่มควบคุมและอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120 °C ที่ผ่านการคืนรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และความแข็งของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 120 และ 140°C ที่ผ่านการคืนรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งความแข็งของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 140 และ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้เมล็ดข้าวแตกร้าวมากทำให้เมล็ดข้าวดูดน้ำกลับมาก ความแข็งจึงน้อย (นฤบดี ศรีสังข์ และคณะ, 2553) ที่อุณหภูมิลมร้อน 160°C ความแข็งสูงที่สุด ส่วนเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งลดลงเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ข้าวเกิดเจลาทิไนซ์เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมาคืนรูปด้วยไมโครเวฟทำให้ดูดน้ำกลับได้มากขึ้น ความแข็งจึงลดลง ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 160°C ความแข็งต่ำที่สุด ส่วนความเหนียวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และความเหนียวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิตัวกลางอบแห้งไม่ส่งผลต่อความเหนียวของของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของตัวกลางอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนพบว่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำกว่าอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากช่วงแรกไอน้ำเกิดการควบแน่นที่ผิวเมล็ดข้าวทำให้เกิดเจลาทิไนซ์ที่สมบูรณ์ เมื่อนำข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมาคืนรูปด้วยไมโครเวฟทำให้ดูดน้ำกลับได้มากขึ้น ความแข็งและความเหนียวจึงลดลง

ตารางที่ 4.11 อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป

Drying media	Temperature(°C)	Hardness (N)	Stickiness (N)
Reference Hot air oven	40	287.17±35.07[a]	25.67±2.08[a]
HA	120	421.79±24.78[b]	33.53±4.93[b]
	140	449.89±13.14[b]	35.86±3.90[b]
	160	532.22±42.04[c]	34.12±2.36[b]
SHS	120	309.61±4.90[a]	19.85±3.02[c]
	140	210.98±6.39[d]	17.97±2.67[c]
	160	191.50±29.83[d]	14.40±0.95[c]

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูปด้วยไมโครเวฟ
a. ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน
b. ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
c. ข้าวกล้องงอกอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน 40°C (กลุ่มควบคุม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป

ชนิดของตัวอย่าง	ลักษณะภายนอก	สี	เนื้อสัมผัส	กลิ่น	การยึดติดกันของเมล็ด	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
กลุ่มควบคุม	3.50±1.05^{a}	6.00±1.10^{a}	2.67±0.82^{a}	3.83±1.17^{ab}	3.67±1.21^{a}	4.50±1.05^{a}	3.17±1.17^{a}
ลมร้อน 120°C	3.83±0.98^{a}	6.67±1.03^{a}	2.83±0.75^{a}	2.83±0.75^{a}	3.00±0.89^{a}	4.17±1.33^{a}	3.50±1.38^{ab}
ลมร้อน 140°C	3.83±1.17^{a}	6.33±1.21^{a}	4.33±1.37^{b}	3.83±0.75^{ab}	3.50±0.55^{a}	4.67±1.51^{a}	4.17±1.47^{ab}
ลมร้อน 160°C	4.17±0.98^{a}	6.17±0.75^{a}	5.17±1.17^{bc}	3.00±0.89^{a}	3.17±1.17^{a}	4.50±1.38^{a}	4.50±1.52^{ab}
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C	5.67±1.03^{b}	5.67±1.51^{a}	5.50±1.22^{bc}	4.67±1.03^{bc}	3.50±1.76^{a}	4.33±1.51^{a}	4.67±1.21^{ab}
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C	6.17±1.17^{b}	6.33±0.82^{a}	6.17±0.98^{c}	5.33±0.82^{c}	4.17±1.33^{a}	4.83±1.72^{a}	4.83±1.33^{ab}
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 160°C	6.00±1.10^{b}	5.67±1.21^{a}	6.33±1.21^{c}	5.00±1.26^{bc}	4.33±1.21^{a}	4.50±1.38^{a}	5.17±1.17^{b}

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

4.3.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป แสดงดังตารางที่ 4.12 การทดสอบทางประสาทสัมผัสเปรียบเทียบข้าวกล้องงอกกลุ่มควบคุมกับข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปพบว่ามีคะแนนเฉลี่ยด้าน สี กลิ่น การยึดติดกันของเมล็ด รสชาติ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ด้านลักษณะภายนอกของข้าวกล้องงอกกลุ่มควบคุมและกับข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และลักษณะภายนอกของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ลักษณะภายนอกของข้าวกล้องงอกกลุ่มควบคุมและข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อนมีคะแนนเฉลี่ยแตกต่างกับอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีคะแนนเฉลี่ยสูงกว่า ด้านเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกกลุ่มควบคุมและกับข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 120°C ที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 160°C และอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120°C มีคะแนนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140 และ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยด้านเนื้อสัมผัสสูงที่สุดเนื่องจากผู้ทดสอบส่วนใหญ่ชอบข้าวที่มีเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่มมากกว่าข้าวที่แข็งซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบคุณภาพเนื้อสัมผัส (Sripinyowanich & Noomhorm, 2011) โดยข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปมีความแข็งต่ำที่สุด ส่วนด้านความชอบโดยรวมของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120 140 และ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 160°C ที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยความชอบโดยรวมสูงที่สุด

4.3.4 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้งและหลังการคืนรูป

จากการเปรียบเทียบคุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้งและหลังการคืนรูปที่อบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป โดยพิจารณาจากคุณภาพหลังการอบแห้งคือ อัตราการดูดน้ำกลับและปริมาณสารกาบาสูง และคุณภาพหลังการคืนรูปเมื่อนำไปคืนรูปด้วยไมโครเวฟคือ ค่าความแข็งต่ำและมีคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมสูง เมื่อพิจารณาตัวกลางการอบแห้งต่อคุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้งพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอัตราการดูดน้ำกลับต่ำกว่าอบแห้งด้วยลมร้อนแต่มีปริมาณสารกาบาสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ส่วนคุณภาพหลังการคืนรูปพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าความแข็งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแต่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมในการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป เมื่อพิจารณาอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งพบว่าที่อุณหภูมิ 160°C ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด คุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้งพบว่ามีอัตราการดูดน้ำกลับสูงรองลงมาจากอุณหภูมิ 140°C ที่มีอัตราการดูดน้ำกลับสูงที่สุด มีปริมาณสารกาบาสูงที่สุด ส่วนคุณภาพหลังการคืนรูปพบว่ามีค่าความแข็งต่ำที่สุดแต่มีคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังอบแห้งและหลังการคืนรูป

ชนิดของตัวอย่าง	คุณภาพหลังอบแห้ง					คุณภาพหลังการคืนรูป			
	ความขาว (%WI)	ความหนาแน่นรวม (g/cm^{3})	อัตราการดูดน้ำกลับ	อัตราการเพิ่มปริมาตร	ปริมาณสารกาบา (mg/100g)	ความขาว (%WI)	ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)	ความชอบโดยรวม
ข้าวกล้องกล้อง	-	-	-	-	1.33±0.06^{a}	-	-	-	-
ข้าวกล้องงอก 40°C	50.48±0.01^{a}	0.80±0.02^{a}	1.42±0.02^{a}	1.78±0.02^{a}	7.49±0.18^{b}	50.12±0.01^{a}	287.17±35.07^{a}	25.67±2.08^{a}	3.17±1.17^{a}
ลมร้อน 120°C	51.90±0.01^{b}	0.62±0.01^{b}	1.67±0.01^{b}	1.57±0.02^{bc}	9.94±0.11^{c}	48.83±0.02^{b}	421.79±24.78^{b}	33.53±4.93^{b}	3.50±1.38^{ab}
ลมร้อน 140°C	50.75±0.02^{c}	0.61±0.01^{bc}	1.73±0.01^{c}	1.60±0.02^{cd}	9.72±0.13^{cd}	45.33±0.02^{c}	449.89±13.14^{b}	35.86±3.90^{b}	4.17±1.47^{ab}
ลมร้อน 160°C	51.94±0.01^{d}	0.59±0.01^{c}	1.65±0.02^{d}	1.54±0.02^{b}	9.45±0.09^{d}	43.26±0.01^{d}	532.22±42.04^{c}	34.12±2.36^{b}	4.50±1.52^{ab}
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C	46.48±0.02^{e}	0.79±0.02^{a}	1.54±0.01^{e}	1.76±0.02^{a}	16.12±0.23^{e}	42.03±0.02^{e}	309.61±4.90^{a}	19.85±3.02^{c}	4.67±1.21^{ab}
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C	49.90±0.01^{f}	0.70±0.01^{d}	1.67±0.02^{f}	1.61±0.02^{d}	12.71±0.23^{f}	45.72±0.01^{f}	210.98±6.39^{d}	17.97±2.67^{c}	4.83±1.33^{ab}
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 160°C	50.01±0.01^{g}	0.66±0.01^{e}	1.60±0.02^{g}	1.54±0.02^{b}	12.96±0.02^{f}	46.42±0.01^{g}	191.50±29.83^{d}	14.40±0.95^{c}	5.17±1.17^{b}

ตัวอักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีกระบวนการที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การผลิตข้าวกล้องงอก 2) การผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุก และ3) การอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ทำให้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน และศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป โดยการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งช่วยลดขั้นตอนการทำข้าวกล้องงอกหุงสุกเนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดกระบวนการนึ่งพร้อมกับกระบวนการอบแห้ง

5.1.1 การศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

1) พฤติกรรมของการลดความชื้นในข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C การอบแห้งด้วยลมร้อนพบว่าความชื้นของข้าวกล้องงอกหุงสุกลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจนถึงความชื้นสุดท้าย 12 % db คือ 11.22, 6.18 และ 4.44 นาที ที่อุณหภูมิลมร้อนเป็น 120, 140 และ 160°C ตามลำดับ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งไอน้ำเกิดการควบแน่นที่ผิวของเมล็ดข้าวทำให้ความชื้นของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นความชื้นของเมล็ดข้าวลดลง อัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรกต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกจนถึงความชื้นสุดท้าย 12 % d.b. คือ 24.57, 6.52 และ 3.87 นาที ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็น 120, 140 และ 160°C ตามลำดับ

2) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในเมล็ดข้าวสามารถอธิบายความสัมพันธ์ด้วยสมการ Arrhenius และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนมีค่าระหว่าง 2.73×10^{-7} ถึง 4.63×10^{-7} m^2/s และสัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าระหว่าง 1.36×10^{-7} ถึง 5.45×10^{-7} m^2/s ที่อุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งระหว่าง 120 ถึง 160°C ตามลำดับ

3) การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าพลังงานกระตุ้นสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต้องการพลังงานในการระเหยน้ำมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน พลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 18.77 kJ/mol และพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าเท่ากับ 49.50 kJ/mol

4) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุด

5.1.2 ศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

1) คุณภาพหลังการอบแห้งมีดังนี้ เมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าความขาวเพิ่มขึ้น อัตราการดูดน้ำกลับลดลง และเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นรวม อัตราการเพิ่มปริมาตร และปริมาณสารกาบาลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าความขาวและอัตราการดูดน้ำกลับต่ำกว่าอบแห้งด้วยลมร้อน แต่มีความหนาแน่นรวม อัตราการเพิ่มปริมาตร และปริมาณสารกาบาสูงกว่าอบแห้งด้วยลมร้อน

2) คุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูปด้วยไมโครเวฟ โดยสัดส่วนข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปต่อน้ำเป็น 1:5 ใส่ในไมโครเวฟกำลังไฟสูงสุด 800 วัตต์ เป็นเวลา 8 นาที หลังจากนั้นวางไว้ 5 นาที มีดังนี้ เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความขาวลดลงแต่ความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความขาวเพิ่มขึ้นแต่ความความแข็งลดลง ยกเว้นความแตกต่างของอุณหภูมิตัวกลางอบแห้งไม่ส่งผลต่อความเหนียวของของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูป โดยเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่ผ่านการคืนรูปพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าความขาว ความแข็ง และความเหนียวต่ำกว่าอบแห้งด้วยลมร้อน ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าข้าวกล้องงอกกลุ่มควบคุมกับข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยด้าน สี กลิ่น การยึดติดกันของเมล็ด รสชาติ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ผ่านการคืนรูปมีคะแนนเฉลี่ยด้านลักษณะภายนอก เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงกว่าอบแห้งด้วยลมร้อน

3) สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปพิจารณาจากคุณภาพหลังการอบแห้งคือ อัตราการดูดน้ำกลับและปริมาณสารกาบาสูง และคุณภาพหลังการคืนรูปเมื่อนำไปคืนรูปด้วยไมโครเวฟคือ ค่าความแข็งต่ำและมีคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมสูงพบว่าการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปพบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้เป็นที่น่าพึงพอใจ ในการศึกษาต่อในอนาคตควรศึกษาความเร็วของไอน้ำร้อยยวดยิ่งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปและควรศึกษาการใช้พลังงานของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งใช้พลังงานสูงในการระเหยน้ำให้เป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพื่อหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

งามชื่น คงเสรี. (2547). *ข้าว และผลิตภัณฑ์ข้าว*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

งามชื่น คงเสรี, สุนันทา วงศ์ปิยชน, พูลศรี สว่างจิต, ละม้ายมาศ ยังสุข และวิชัย หิรัญยูปกรณ์. (2551). *การผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูป.* ผลงานวิจัยและพัฒนาการแปรรูปผลิตภัณฑ์ข้าวระหว่าง พ.ศ. 2540-2550. กรมการข้าว.

จารุรัตน์ สันเต, วรนุช ศรีเจษฎารักข์ และรัษฎา ตั้งวงค์ไชย. (2550). ผลของกระบวนการแช่ต่อปริมาณสารแกมมาอะมิโนบิวทาริกแอซิดในข้าวกล้องงอก (หอมมะลิ 105). *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 5*(พิเศษ), 164-167.

จารุวรรณ บางแวก, อรวรรณ จิตต์ธรรม, และอรณิชชา สุวรรณโฉม. (2553). การประเมินสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline: 2AP ในข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยเทคนิค NIR Spectroscopy. *วารสารวิชาการเกษตร,* 28(1), 89-95.

เทวิกา กีรติบูรณะ, และวรนุช ศรีเจษฎารักข์. (2554). ผลของการอบแห้งแบบถาดของข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 งอกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ. ใน *การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 12* (น. 729-734). ขอนแก่น : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นฤบดี ศรีสังข์, สมเกียรติ ปรัชญาวรากร, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และวารุณี วารัญญานนท์. (2553). ผลกระทบของตัวกลางการอบแห้งและอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร,* 40(3/1) (พิเศษ), 397-400.

พรทิพย์ ศิริสุนทราลักษณ์ กัญญารัตน์ รุจิรา รุ่งเรือง และเกื้อพันธ์ ชยะสุนทร. (2552). การพัฒนากระบวนการผลิตข้าวหุงสุกเร็วด้วยวิธีแช่น้ำ. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร,* 40(1)(พิเศษ), 429-432.

วรรณดี มหรรณพกุล. (2552). *เทคโนโลยีการแปรรูปข้าว การผลิตข้าวสำเร็จรูปบรรจุกระป๋อง.* เอกสารกรมวิทยาศาสตร์บริการร่วมกับสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยนครพนม.

วราภรณ์ ประเสริฐ และปริศนา สุวรรณาภรณ์. (2551). ผลของกระบวนการผลิตต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีกายภาพของข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูป. ใน *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46* (น. 464-472). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิภาวดี สงัดกิจ. (2547). *ผลของการเตรียมข้าวและการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของข้าวกึ่งสำเร็จรูป* (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.

วุฒิชัย นาครักษา, และสุภาภรณ์ ธัญญะวานิช. (2546). การปรับปรุงคุณภาพข้าวหุงสุกเร็วโดยใช้วิธีแช่เยือกแข็งร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ. *วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ,* 37(2), 125-142.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท.* พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. (2528). *ฟลูอิดไดเซชั่น.* พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. (2562). *รายงานสถานการณ์ส่งออกข้าว แนวโน้มและทิศทางการส่งออกข้าวไทย ปี 2562.* สืบค้น 20 มิถุนายน 2562, จากhttp://www.thairiceexporters.or.th/Press%20release/2019/TREA%20Press%20Release%20Thai%20Rice%20Situation%20&%20Trend%20Year%202019-30012019.pdf. 2019

สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). *การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ Drying of Foods and Biomaterials.* กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

สุนัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์. (2556). *ข้าวกล้องงอกทำง่าย ได้ประโยชน์สูง.* พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

อรอนงค์ นัยวิกุล. (2550). *ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.* พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ และเกียรติศักดิ์ รุ่นพระแสง. (2556). อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร,* 44(2) (พิเศษ), 465-468.

Bahu, E. (1997). *Industrial Drying of Foods.* Baker Ed. London : Blackie Academic and Professional.

Cheevitsopon, E. & 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.

Ertekin, C. & Yaldiz, O. (2004). Drying of Eggplant and Selection of a Suitable Thin layer Drying Model. *Journal of Food Engineering,* 63, 349-359.

Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E. & Hepbasli, A. (2005). Mathematical Modeling of Drying of Bay Leaves. *Energy Conversion and Management,* 46, 1667-1679.

Iyota, H., Nishimura, N. & Nomura, T. (2001). Drying of Sliced Raw Potatoes in Superheated Steam and Hot Air. *Drying Technology,* 19, 1411-1424.

Iyota, H., Nishimura, T., Komoshi, Y., & Yoshida, K. (2002). Effect of Initial Steam Condensation on Color Changes of Potatoes During Drying in Superheated Steam. In *Proceedings of the 13th International Drying Symposium* (pp. 1352–1359). Beijing: China

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jamradloedluk, J., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S. & Prachayawarakorn, S. (2007). Influences of Drying Medium and Temperature on Drying Kinetics and Quality Attributes of Durian Chip. *Journal of food Engineering,* 78, 198-205.

Juliano, O., Perez, M., Blakeney, B., Castillo, T., Kongseree, N., Laignelet, B., ... Webb, D. (1981). International Cooperative Testing on the Amylose Content of Milled Rice. *Starch,* 33(5), 157-162.

Karel, M. & Lund, B. (2003). *Physical Principles of Food Preservation.* New York : Marcel Dekker.

Kinnersley, M. & Turano, J. (2000). Gamma Aminobutyric Acid (GABA) and Plant Response to Stress. *Critical Reviews in Plant Sciences,* 6(19), 479-509.

Komatsuzaki, N., Tsukahara, K., Toyoshima, H., Suzuki, T., Shimizu, N. & Kimura, T. (2007). Effect of Soaking and Gaseous Treatment on GABA Content in Germinated Brown Rice. *Journal of Food Engineering,* 78, 556-560.

Kunii, D. & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering.* 2nd Edition. Massachusetts: Butterworth-Heinemann.

Midilli, A., Kucuk, H. & Yapar, Z. (2002). A New Model for Single-layer Drying. *Drying Technology,* 20, 1503-1513.

Nimmol, C., Devahastin, S. Swasdisevi, T. & Soponronnarit, S. (2007). Drying of Banana Slices Using Combined Low-Pressure Superheated Steam and Far-Infrared Radiation. *Journal of food Engineering,* 81, 624-633.

Oh, H. & Oh, H. (2004). Effect of Germinated Brown Rice Extracts with Enhanced Levels of GABA on Cancer Cell Proliferation and Apoptosis. *Journal of Medical Food,* 1(7), 19-23

Prachayawarakorn, S., Prachayawasin, P. & Soponronnarit, S. (2006). Heating Process of Soybean Using Hot-Air and Superheated-Steam Fluidized-Bed Dryer. *LWT- Food Science and Technology,* 39, 770-778.

Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchacama, S. & Jaisut, D. (2002). Desorption Isotherms and Drying Characteristics of Shrimp in Superheated Steam and Hot Air. *Drying Technology,* 20, 669-684.

Prasert, W. & Suwannaporn, P. (2009). Optimization of Instant Jasmine Rice Process and Its Physicochemical Properties. *Journal of Food Engineering,* 95, 54-61.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rordprapat, W., Nathakaranakule, A., Tia, W. & Soponronnarit, S. (2005). Comparative Study of Fluidized Bed Paddy Drying Using Hot Air and Superheated Steam. *Journal of Food Engineering,* 71, 28-36.

Saman, P., Vazquez, A. & Pandiella, S. (2008). Controlled Germination to Enhance the Functional Properties of Rice. *Process Biochemistry,* 12(43), 1377-1382.

Shallan, M., El-Beltagi, H., Mona, M. & Amera, M. (2010). Chemical Evaluation of Pre-Germinated Brown Rice and Whole Grain Rice Bread. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry,* 3(9), 958-971.

Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A. & Taechapairoj, C. (2006). Parboiling Brown Rice Using Superheated Steam Fluidization Technique. *Journal of food Engineering,* 75, 426-432.

Sripinyowanich, J. (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. Pathum Thani.

Srisang, N., Varanyanond, W., Soponronnarit, S. & Prachayawarakorn, S. (2011). Effects of Heating Media and Operating Conditions on Drying Kinetics and Quality of Germinated Brown Rice. *Journal of food Engineering,* 107, 385-392.

Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S. & Prachayawarakorn, S. (2003). Superheated Steam Fluidized Bed Paddy Drying. *Journal of Food Engineering,* 58, 67-73.

Taechapairoj, C., Prachayawarakorn, S. & Soponronnarit, S. (2004). Characteristics of Rice Dried in Superheated-Steam Fluidized-Bed. *Drying Technology,* 22, 719-743.

Taechapairoj, C., Prachayawarakorn, S. & Soponronnarit, S. (2006). Modelling of parboiled rice in superheated-steam fluidized bed. *Journal of Food Engineering,* 76(3), 411-419.

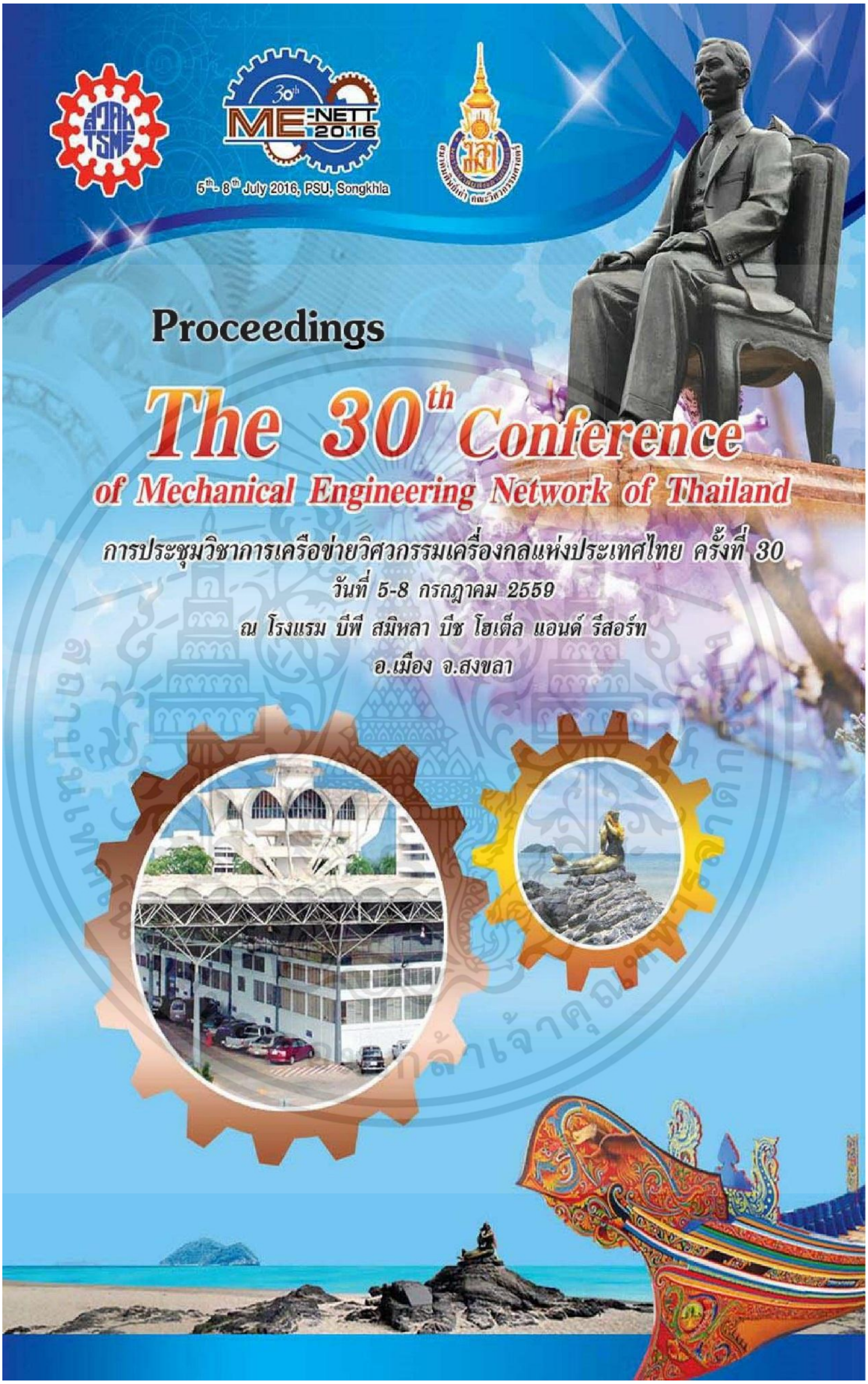
Watanabe, M., Maeda, T., Tsukahara, K., Kayahara, H. & Morita, N. (2004). Application of Pregerminated Brown Rice for Breadmaking. *Cereal Chem,* 81, 450–455.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

ชนาพร สรวงเทพ และเอกพงษ์ ชีวิตโสภณ. 2559. “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป.” หน้า 449-456. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30.** สงขลา : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0028

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป
Mathematical modeling of fluidized bed drying of instant germinated brown rice

ชนาพร สรวงเทพ[1] และ เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ[1]*

[1] ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
*ติดต่อ: cheevitsopon@gmail.com, +66(0) 2-329-8356-8

บทคัดย่อ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปมีความจำเป็นสำหรับการออกแบบ การควบคุม และการทำให้กระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปดีที่สุด ทดลองอบแห้งตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นน้อยกว่า 12% d.b. นำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 12 รูปแบบ เพื่ออธิบายการอบแห้งข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่าไคสแควร์ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของแต่ละแบบจำลอง ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าระหว่าง 2.73×10^{-7} ถึง 4.63×10^{-7} m^2/s ที่ช่วงอุณหภูมิอบแห้งเป็น 120-160°C อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีความสัมพันธ์แบบสมการอาร์เรเนียส พลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นมีค่าเท่ากับ 18.77 kJ/mol แบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุดในช่วงของอุณหภูมิอบแห้งที่ทำการศึกษา

คำหลัก: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด, ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

Abstract

The kinetic study of a fluidized bed drying of instant germinated brown rice (IGBR) are needed in design, control and optimization of the IGBR drying process. Cooked germinated brown rice samples were dried using a fluidized bed dryer at the temperatures of 120, 140, and 160°C until its moisture reached 12% dry basis (d.b.). The moisture ratio values of samples were fitted to the twelve different mathematical drying models for describing IGBR drying. The models were compared with their coefficients of determination, the reduced chi-square, root mean square error, and the mean relative percent deviation. The results indicated that the effective diffusivity values are in the range of 2.73×10^{-7} to 4.63×10^{-7} m^2/s at drying temperatures of 120-160°C. The effect of drying temperature on effective diffusivity of dried IGBR was found to be an Arrhenius-type relationship. The activation energy for moisture diffusion was 18.77 kJ/mol. The Modified Henderson and Pabis model was the best model for describing behavior of the IGBR drying using a fluidized bed technique in the studied temperature range.

Keywords: mathematical modeling, fluidized bed drying, instant germinated brown rice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์และมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวกล้อง ซึ่งเป็นการนำข้าวกล้องมาผ่านกระบวนการงอก โดยการนำข้าวกล้องแช่น้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 12-48 ชั่วโมง [1] น้ำไปกระตุ้นเอนไซม์ในเมล็ดข้าวกล้องทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอาหารในเมล็ดข้าวได้เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง รวมทั้งยังพบการสะสมสารเคมีสำคัญต่างๆ โดยเฉพาะสารแกมมาอะมิโนบิวทิริกแอซิด (Gamma-aminobutyric acid) หรือที่รู้จักกันว่า สารกาบา (GABA) ซึ่งพบว่าข้าวกล้องงอกมีสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 10-15 เท่า สารกาบามีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทในระบบประสาทส่วนกลาง ประเภทสารยับยั้งโดยทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมอง ทำให้เกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย อีกทั้งช่วยป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์และช่วยลดการเกิดโรคความดันโลหิตสูงและยับยั้งการเกิดโรคมะเร็งได้อีกด้วย [2]

ข้าวกึ่งสำเร็จรูป (Instant rice) เป็นผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีวิธีการเตรียมรับประทานได้สะดวก และใช้ระยะเวลาสั้นโดยการเติมน้ำร้อน หรือเติมน้ำและให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเพื่อให้เกิดการคืนรูป [3] เหมาะกับรูปแบบวิถีชีวิตอันเร่งรีบของคนในสังคมเมืองในปัจจุบันซึ่งมีเวลาน้อยในการเตรียมอาหาร

ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป (Instant germinated brown rice) เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งของข้าวกล้องงอก การผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ การทำข้าวกล้องงอก การทำข้าวกล้องงอกหุงสุก และการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น โดยการลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีผลต่อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหาร ทำให้ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดเหมาะสำหรับใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก และมีความชื้นสูงได้อย่างรวดเร็ว ทั่วถึงและสม่ำเสมอภายในระยะเวลาสั้น เนื่องจากตัวกลางในการอบแห้งกับผลิตภัณฑ์สามารถสัมผัสกันได้เป็นอย่างดี [4] ได้มีการศึกษาอิทธิพลของตัวกลางในการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกเมื่อนำมาคืนรูป พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนอบแห้งทำให้ค่าความแข็งและค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น [5] และได้มีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดต่อการหุงสุกของข้าวเหนียวกึ่งสำเร็จรูปและเมื่อนำมาคืนรูปมีผลต่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ค่าความเหนียวลดลงที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ สมการทฤษฎี (Theoretical) สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical) และสมการจากการทดลอง (Empirical) โดยแบบแรกคำนวณจากความต้านทานภายในการส่งผ่านความชื้น ในขณะที่อีก 2 แบบพิจารณาจากความต้านทานภายนอกในการส่งผ่านความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์และตัวกลางอบแห้ง ซึ่งถูกพัฒนามาจากกฎข้อที่สองของ Fick ในการแพร่ของน้ำซึ่งเป็นสมการทางทฤษฎี ได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ประสบความสำเร็จในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งโดยใช้กฎข้อที่สองของ Fick ในอาหารประเภทต่างๆ ได้แก่ กุ้ง [6] ถั่วเหลือง [7] และทุเรียนแผ่น [8] เป็นต้น รวมทั้งสมการกึ่งทฤษฎีและสมการจากการทดลองถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของเมล็ดน้ำมันละหุ่ง [9] การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของข้าวเปลือก [10] ใบกระวาน [11] มะเขือม่วง [12] และกากแอปเปิล [13] เป็นต้น ซึ่งมีประโยชน์ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และพลังงานกระตุ้นระหว่างการอบแห้ง รวมทั้งผลของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งต่อค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมข้าวกล้อง

ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) นำมาผ่านการกะเทาะเปลือกออกจากเมล็ดด้วยเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กะเทาะเปลือกเพื่อให้ได้ข้าวกล้อง และคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาด

2.2 การเตรียมข้าวกล้องงอก

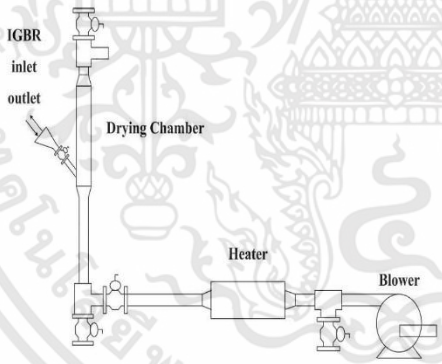
ข้าวกล้องจำนวน 500 g แช่น้ำในอ่างที่ 35°C เป็นเวลา 4 h และเพาะงอกโดยการบ่มที่อุณหภูมิ 35°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% เป็นเวลา 20 h ได้เป็นข้าวกล้องงอก โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 5 h [14]

2.3 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุก

ข้าวกล้องงอกจำนวน 500 g นำมาหุงสุกด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100±2°C เป็นเวลา 5 min แล้วนำมาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 7 min และนำมานึ่งด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100±2°C เป็นเวลา 5 min อีกครั้ง แล้วนำมาพักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 min ดัดแปลงจาก [15]

2.4 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

ระบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนแสดงดังรูปที่ 1 ระบบประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอกสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 cm สูง 120 cm ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 15 kW พัดลมแบบใบพัดโค้งหลัง ขนาดมอเตอร์ 2.2 kW และระบบท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 cm และหุ้มฉนวนความร้อนแบบแร่ใยหิน



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

2.5 การอบแห้งข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อน

นำข้าวกล้องงอกหุงสุก 300 g มาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อนอบแห้งเท่ากับ 120, 140 และ 160°C ที่ความเร็วลมที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการลอยตัวของเมล็ดข้าวแบบฟลูอิไดซ์เท่ากับ 3.5 m/s ความสูงเบด 6.5 cm สุ่มตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ลดลงทุก ๆ 1 minจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 12% d.b. ซึ่งหาความชื้นของตัวอย่างโดยการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 105°C เป็นเวลา 24 h ดัดแปลงจาก [16]

2.6 สมการการอบแห้ง

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งในรูปของสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical) และสมการจากการทดลอง (Empirical) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุด จากตารางที่ 1 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คำนวณได้จาก

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ M_t, M_0 และ M_e คือความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล (% d.b.) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

No.	Model name	Model	[Reference]
1	Lewis	MR = exp(-kt)	[17]
2	Page	MR = exp(-kt^n)	[18]
3	Modified Page	MR = exp(-(kt)^n)	[19]
4	Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt)	[20]
5	Logarithmic	MR = a exp(-kt) + c	[21]
6	Two term	MR = a exp(-k$_0$t) + b exp(-k$_1$t)	[22]
7	Modified Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt) + b exp(-gt) + c exp(-ht)	[23]
8	Verma et al.	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-gt)	[24]
9	Two term exponential	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-kat)	[25]
10	Approximation of diffusion	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-kbt)	[26]
11	Midilli et al.	MR = a exp(-kt^n) + bt	[27]
12	Wang and Singh	MR = 1+ at + bt^2	[28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การหาค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการอบแห้งโดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยโปรแกรม SPSS เงื่อนไขการพิจารณาความสามารถในการทำนายของแบบจำลอง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าไคสแควร์ (The reduced chi-square, χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Mean relative percent deviation, EMD) โดยมีค่า R^2 สูง และมีค่า χ^2, RMSE และ EMD ต่ำ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i}-MR_{pre,i})^2}{N-Z} \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i}-MR_{pre,i})^2\right]^{1/2} \quad (3)$$

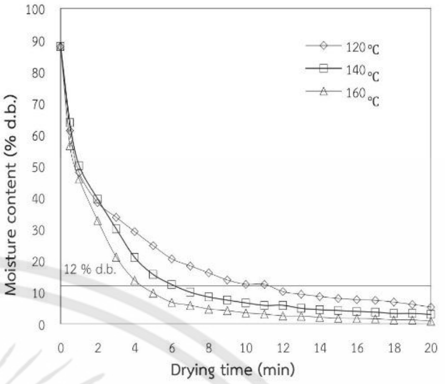
$$EMD = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|MR_{exp,i}-MR_{pre,i}|}{MR_{exp,i}} \quad (4)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง $MR_{pre,i}$ เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ N คือ จำนวนข้อมูลการทดลอง และ Z คือ จำนวนตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

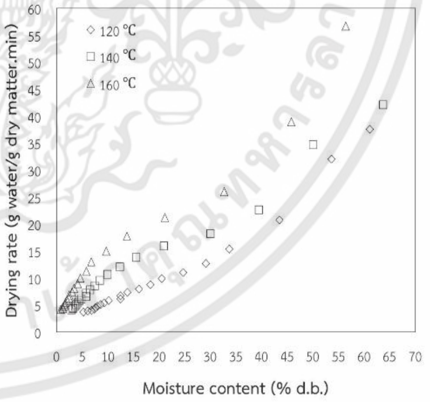
3.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง

ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความชื้นเริ่มต้น 87.92±0.07 % d.b. ถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิลมร้อน 120, 140 และ 160°C การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแสดงอยู่ในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาของการอบแห้ง และเมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ 12% d.b. เท่ากับ 11.22, 6.18 และ 4.44 min ที่อุณหภูมิลมร้อน 120, 140 และ 160°C ตามลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นแสดงในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระหว่างการอบแห้งความชื้นและอัตราการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) เป็นช่วงที่อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเมล็ดข้าวที่แพร่มาที่ผิวหน้าช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าทำให้อัตราการอบแห้งลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้อง [29] และข้าวกล้องงอก [4]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่และพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของ Fick ดังสมการ (5) โดยสมมติให้เมล็ดข้าวกล้องงอกหุงสุกเป็นทรงกลม

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} exp\left(-\frac{D_{eff}\pi^2}{R_e^2}t\right) \quad (5)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s), t คือเวลาในการอบแห้ง (วินาที) และ R_e คือ รัศมีของเมล็ดข้าว (m) จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิลมร้อน 120 ถึง 160°C มีค่าระหว่าง 2.73×10^{-7} ถึง 4.63×10^{-7} m^2/s โดยที่สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนเนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของเมล็ดข้าว

พลังงานกระตุ้นคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวกับอุณหภูมิลมร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Arrhenius ดังสมการ (6)

$$D_{eff} = D_{\infty}\exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (6)$$

เมื่อ D_{∞} คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s), E_a คือ พลังงานกระตุ้น (J/mol), R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.3145 J/mol.K) และ T_a คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) พลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $1/T_a$ ซึ่งความชันของเส้นตรงสามารถหาพลังงานกระตุ้นได้จาก E_a/R พลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 18.77 kJ/mol

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ข้อมูลของปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 12 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ดังตารางที่ 1

โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2, RMSE และ EMD ต่ำที่สุด ดังตารางที่ 2 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดมี ค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.5304 ถึง 0.9994 มีค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 4.79×10^{-5} ถึง 3.22×10^{-7} มีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.0059 ถึง 0.1711 และมีค่า EMD อยู่ระหว่าง 2.87 ถึง 347.10 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2, RMSE และค่า EMD ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุด

การหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis คือ a, k, b, g, c และ h ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ ดังสมการ (7) ถึง (12)

$$a = 3.39\times10^{-4}T^2 - 0.1013T + 8.2666 \quad (7)$$

$$k = -1.28\times10^{-3}T^2 + 0.3882T - 28.9768 \quad (8)$$

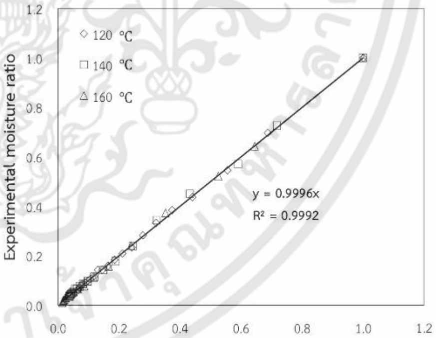
$$b = 4.75\times10^{-4}T^2 - 0.1424T + 10.8269 \quad (9)$$

$$g = 6.44\times10^{-2}T^2 - 16.5382T + 1055.8827 \quad (10)$$

$$c = -1.03\times10^{-3}T^2 - 0.3084T - 22.9187 \quad (11)$$

$$h = -8.90\times10^{-4}T^2 + 0.2687T - 20.1393 \quad (12)$$

ซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าอัตราส่วนความชื้นของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปในเวลาใดๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้งภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองซึ่งทำให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

No.	T(°C)	Model constants and coefficients	R^2	χ^2	RMSE	EMD
1	120	k = 0.2692	0.8492	8.52×10^{-3}	0.0902	50.24
	140	k = 0.3682	0.9610	2.64×10^{-3}	0.0502	53.98
	160	k = 0.5214	0.9732	1.75×10^{-3}	0.0409	64.56
2	120	k = 0.5548 ; n = 0.5344	0.9981	1.15×10^{-4}	0.0102	3.58
	140	k = 0.5367 ; n = 0.6803	0.9964	2.57×10^{-4}	0.0153	17.97
	160	k = 0.6679 ; n = 0.6979	0.9976	1.67×10^{-4}	0.0123	23.65
3	120	k = 0.3321 ; n = 0.5344	0.9981	2.25×10^{-4}	0.0102	3.58
	140	k = 0.4006 ; n = 0.6803	0.9964	2.88×10^{-4}	0.0162	19.73
	160	k = 0.5608 ; n = 0.6979	0.9976	1.67×10^{-4}	0.0123	23.65
4	120	a = 0.7933 ; k = 0.1929	0.9199	4.75×10^{-3}	0.0657	31.12
	140	a = 0.8987 ; k = 0.3187	0.9729	1.92×10^{-3}	0.0418	45.99
	160	a = 0.9137 ; k = 0.4606	0.9807	1.32×10^{-3}	0.0347	8.26
5	120	a = 0.7760 ; k = 0.3396 ; c = 0.0995	0.9620	2.37×10^{-3}	0.0452	17.19
	140	a = 0.8819 ; k = 0.4038 ; c = 0.0510	0.9900	7.49×10^{-4}	0.0254	14.09
	160	a = 0.9030 ; k = 0.5233; c = 0.0285	0.9879	8.76×10^{-4}	0.0275	35.19
6	120	a = 0.4787 ; k0 = 1.6790; b= 0.5205 ; k1 = 0.1207	0.9972	1.82×10^{-4}	0.0122	8.26
	140	a = 0.5841 ; k0 = 0.7805 ; b= 0.3913 ; k1 = 0.1553	0.9939	4.82×10^{-4}	0.0199	16.31
	160	a = 0.2705 ; k0 = 4.2361 ; b = 0.7294 ; k1 = 0.3536	0.9967	2.49×10^{-4}	0.0143	43.88
7	120	a = 0.4043; k = 2.1624 ; b = 0.5426 ; g = 0.1759 ; c = 0.0545 ; h = 0.031	0.9994	4.79×10^{-5}	0.0059	2.87
	140	a = 0.7388 ; k = 0.3357 ; b = 0.2037 ; g = 3.4537 ; c = 0.0581 ; h = 0.0228	0.9989	9.78×10^{-5}	0.0084	4.58
	160	a = 0.7490 ; k = 0.4348 ; b = 0.2073 ; g = 59.2975 ; c = 0.0437 ; h = 0.0543	0.9994	4.87×10^{-5}	0.0060	8.63
8	120	a = 0.4793 ; k = 1.6823 ; g = 0.1207	0.9972	1.72×10^{-4}	0.0122	8.26
	140	a = -0.8669 ; k = 0.3682 ; g = 0.3682	0.9610	2.91×10^{-3}	0.0502	53.98
	160	a = -1.5549 ; k = 0.5214 ; g = 0.5214	0.9732	1.93×10^{-3}	0.0409	64.56
9	120	a = 0.2111 ; k = 1.0025	0.9130	5.16×10^{-3}	0.0685	38.25
	140	a = 0.2150 ; k = 1.3467	0.9825	1.24×10^{-3}	0.0336	41.52
	160	a = 0.1981 ; k = 2.0941	0.9896	7.13×10^{-4}	0.0255	53.12
10	120	a = 0.4793 ; k = 1.6823 ; b = 0.0717	0.9972	1.72×10^{-4}	0.0122	8.24
	140	a = 0.4887 ; k = 1.0980 ; b = 0.1705	0.9937	4.74×10^{-4}	0.0202	22.14
	160	a = 0.2706 ; k = 4.2371 ; b = 0.0834	0.9967	2.36×10^{-4}	0.0143	43.84
11	120	a = 1.0003 ; k = 0.5570 ; n = 0.5268 ; b = -0.0003	0.9981	1.25×10^{-4}	0.0101	8.24
	140	a = 0.9962 ; k = 0.5198 ; n = 0.7320 ; b = 0.0014	0.9981	1.49×10^{-4}	0.0110	5.61
	160	a = 0.9946 ; k = 0.6583 ; n = 0.7210 ; b = 0.0006	0.9980	1.53×10^{-4}	0.0112	10.98
12	120	a = -0.1467; b = 0.0054	0.6386	2.14×10^{-2}	0.1396	63.55
	140	a -0.1621; b = 0.0061	0.6921	2.19×10^{-2}	0.1411	126.37
	160	a = -0.1735; b = 0.0067	0.5304	3.22×10^{-2}	0.1711	347.10

ในการทวนสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis ดังรูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป พบว่าใกล้เคียงกันมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9992 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำนายอัตราส่วนความชื้นสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองตลอดกระบวนการอบแห้งทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis เหมาะสมในอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และอัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C สัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนมีค่าระหว่าง 2.73×10^{-7} ถึง 4.63×10^{-7} m^2/s ที่อุณหภูมิลมร้อนระหว่าง 120 ถึง 160°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในตัวอย่างขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบแห้ง และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ด้วยสมการ Arrhenius และพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้นมีค่าเท่ากับ 18.77 kJ/mol แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Henderson and Pabis อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปได้ดีที่สุด

5. เอกสารอ้างอิง

[1] งามชื่น คงเสรี. (2546). ข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[2] Komatsuzaki, N., Tsukahara, K., Toyoshima, H., Suzuki, T., Shimizu, N. and Kimura, T. (2007). Effect of soaking and gaseous treatment on GABA content in germinated brown rice. *Journal of Food Engineering*. 78, pp.556—560.

[3] ดรุณี ปันคำ, เบ็ญจรัก วายุภาพ, และวราพร ลักษณลม้าย. (2552). กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกเร็ว. *การประชุมนำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยรังสิต.*

[4] Srisang, N., Varanyanond, W., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. (2011). Effects of heating media and operating conditions on drying kinetics and quality of germinated brown rice. *Journal of Food Engineering*, 107, pp. 385-392.

[5] Jaiboon, P., Prachayawarakorn, S., Devahastin, S., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. (2011). Effect of high-temperature fluidized-bed drying on cooking, textural and digestive properties of waxy rice. *Journal of Food Engineering*, 105, pp. 89-97

[6] Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchacama, S. and Jaisut, D. (2002). Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air, *Drying Technology*, 20, pp. 669-698

[7] Prachayawarakorn, S., Prachayawasin, P. and Soponronnarit, S. (2006). Heating process of soybean using hot air and superheated steam fluidized-bed drying, *LWT-Food Science and Technology*, 39, pp. 770-778

[8] Jamradloedluk, J., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. (2007). Influences of drying medium and temperature on drying kinetics and quality attributes of durian chip, *Journal of Food Engineering*, 78, pp 198-205.

[9] 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, pp. 2498-2504.

[10] Perea-Flores, M., Garibay-Febles, V., Chanona-Pérez, J., Calderón-Domínguez, G., Méndez-Méndezc , J., Palacios-González, E. and Gutiérrez-López G. (2012). Mathematical modelling of castor oil seeds (Ricinus communis) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Industrial Crops and Products*, 38, pp. 64–71

[11] Hacıhafızoglu, O., Cihan A. and Kahveci, K. (2008). Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. *Food and Bioproducts Processing*, 86, pp. 268–275

[12] Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E. and Hepbasli, A. (2005). Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46, pp. 1667–1679

[13] Ertekin, C. and Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, pp. 349-359

[14] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. and Hu, X. (2007). Mathematical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40(1), pp. 39–46

[15] Sripinyowanich, J. (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.

[16] AOAC, (2000). *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 17th ed., AOAC International, Gaithersburg, Maryland.

[17] Lui, Q. and Bakker-Arkema, F. (1997). Stochastic modelling of grain drying. Part 2: Model development. *J Agricult Eng Res*, 66, pp. 275–280.

[18] Agrawal, Y. and Singh, R. (1997). Thin layer drying studies on short grain rough rice. *ASAE*, pp. 3531

[19] White, G., Ross, I. and Ponelert, R. (1981). Fully exposed drying of popcorn. *Trans ASAE*, 24, pp. 466–468.

[20] Chhinnan, M. (1984). Evaluation of few selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Trans ASAE*, 27(2), pp. 610–615.

[21] Yaldız, O. and Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technology*, 19(3), pp. 583–596.

[22] Rahman, M., Perera, C. and Theband, C. (1998) Desorption isoterm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Res Int*, 30, pp. 485–491.

[23] Karathanos, V. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39, pp. 337–344.

[24] Verma, L., Bucklin, R., Endan, J. and Wratten, F. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Trans ASAE*, 28, pp. 296–301.

[25] Sharaf-Elden, Y., Blaisdell, J. and Hamdy, M. (1980). A model for ear corn drying. *Trans ASAE*, 23, pp. 1261–1265.

[26] Kassem, A. (1998). Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In: *13th international congress on agricultural engineering*, 6, 2–6 February, Morocco,

[27] Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. (2002) A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7), pp. 1503–13.

[28] Wang, C. and Singh, R. (1978) A single layer drying equation for rough rice. *ASAE*, pp. 3001

[29] Rattanamechaiskul, C., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. (2014). Glycemic response to brown rice treated by different drying media. *Journal of Food Engineering*, 144, pp. 48-55.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวชนาพร สรวงเทพ
วัน เดือน ปีเกิด 21 พฤศจิกายน 2532 ที่นครสวรรค์
ที่อยู่ 107/2 ม.1 ต.บ้านมะเกลือ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000
ที่อยู่ปัจจุบัน 107/2 ม.1 ต.บ้านมะเกลือ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000
ประวัติการศึกษา 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร (เกียรตินิยมอันดับ2)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้