



อิทธิพลของการทำแห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณภาพของข้าวหอมมะลิสาขางอก



โดย
นางสาวสุกัญญา แซ่เตียว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของการทำแห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณภาพของข้าวหอมนิลสาบงอก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**EFFECT OF DRYING CONDITIONS ON BIOACTIVE COMPOUNDS AND QUALITY
OF PARBOILED GERMINATED HOMNIL BROWN RICE**



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Science Program in Food Technology

Department of Food Technology

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2016

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ อิทธิพลของการทำ
แห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณภาพของข้าวหอมมะลิฮางอก ” เสนอโดย นางสาวสุกัญญา
แซ่เตียว เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีอาหาร

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภรณ์ มหาโยธี
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตนา วิบูลย์ศิริกุล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภรณ์ มหาโยธี)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย)

...../...../.....

56403220: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

คำสำคัญ : ข้าวฮางอก/การทำแห้ง/ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์/กาบา/แอนโทไซยานิน

สุกัญญา แซ่เตียว : อิทธิพลของการทำแห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณภาพของข้าวหอมนิลฮางอก. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.บุศราภรณ์ มหาโยธี, ผศ.ดร.ปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ และ ผศ.ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. 110 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้ง และการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ต่อการเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวหอมนิลฮางอก โดยการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลม ใช้การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด แปรค่าอุณหภูมิที่ 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมที่ 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ความชื้นจำเพาะ 25 กรัม น้ำตอกิโลกรัมอากาศ และการศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและแบบเรือนกระจก ทำการศึกษาอิทธิพลดังกล่าวต่อกราฟการทำแห้ง ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น กาบา แอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (วิธี 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH และวิธี Ferric Reducing Ability Power, FRAP) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิ ความเร็วลม และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลมมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่ออัตราการทำแห้ง โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที มีอัตราการทำแห้งสูงสุดโดยใช้เวลาในการทำแห้ง 1 ชั่วโมง 50 นาที เพื่อให้ข้าวฮางอกมีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิ ความเร็วลม และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อปริมาณกาบา สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และค่า FRAP ในข้าวฮางอก แต่อุณหภูมิมิมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อปริมาณแอนโทไซยานิน และร้อยละข้าวหัก โดยพบว่าการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส ทำให้มีร้อยละข้าวหักสูงกว่ามาตรฐานกำหนด สำหรับการศึกษาการทำแห้งด้วยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ 3 วิธี ได้แก่ การตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และแบบเรือนกระจก พบว่าเวลาที่ใช้ในการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกด้วยการตากแดด เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และแบบเรือนกระจกมีค่าเท่ากับ 5, 4 และ 4.5 ชั่วโมงตามลำดับ ทั้งนี้วิธีที่ใช้ในการทำแห้งทั้งสามวิธีข้างต้นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อปริมาณกาบาของข้าวหอมนิลฮางอกหลังการทำแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ตากในที่ร่ม แต่วิธีที่ใช้ในการทำแห้งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อปริมาณแอนโทไซยานิน และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ตากในที่ร่ม โดยพบว่าการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมส่งผลให้ค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมีค่าต่ำที่สุด และทำให้มีปริมาณข้าวหักสูงกว่ามาตรฐานกำหนด ดังนั้นการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกมากกว่าการตากแดดซึ่งไม่ถูกสุขลักษณะ และการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2. 3.

56403220: MAJOR: FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD: PARBOILED GERMINATED BROWN RICE, DRYING, SOLAR DRYER, GABA, ANTHOCYANINS

SUKANYA SAETIEW: EFFECT OF DRYING CONDITIONS ON BIOACTIVE COMPOUNDS AND QUALITY OF PARBOILED GERMINATED HOMNIL BROWN RICE. THESIS ADVISORS: ASST.PROF.BUSARAKORN MAHAYOTHEE, Ph.D., ASST.PROF.PRAMOTE KHUWJITJARU, Ph.D., AND ASS.PROF.EAKAPHAN KEOWMANEECHAI, Ph.D. 110 pp.

This research was aim to study the influence of drying temperature, air velocity and solar drying methods on bioactive compounds changing in parboiled germinated brown rice (PGBR). Drying using a tray dryer was carried out at 5 different temperatures (40, 45, 50, 55 and 60°C) and at different air velocity (0.5 and 1.0 m/s) with an under-and overflow mode at the specific humidity of 25 g H₂O/kg dry air for the study of effect of drying temperature and air velocity. Solar tunnel dryer and greenhouse solar dryer were subjected to study their drying influences on drying curve, gamma aminobutyric acid (GABA) contents, anthocyanin contents, total phenolic contents (TPC) and antioxidant capacity (via 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) and Ferric Reducing Ability Power assay (FRAP)). The result of this study found that the temperature, air velocity and interaction between temperature and air velocity affected the drying rate significantly ($p < 0.05$). Drying condition performed at 60°C and 1.0 m/s of air velocity was presented the highest drying rate which consumed 110 min for drying PGBR to the moisture content lower than 13%. While, drying temperature, air velocity and their interaction had no effect on the GABA content, TPC, FRAP. However, increasing in drying temperature significantly affected the anthocyanin contents and the percentage of broken rice yield (BRY). Drying using a tray dryer at temperature higher than 55°C resulted the BRY was over the industry standard. The drying of PGBR including sun drying, solar tunnel dryer and greenhouse solar dryer showed the drying time for 5, 4.5 and 4 h, respectively, but the effect of these drying methods did not influence the GABA contents in dried GPBR ($p > 0.05$). However, the drying methods significantly affected ($p < 0.05$) the anthocyanin contents and antioxidant capacity compared with drying under shade dry. It was found that dried GPBR using solar tunnel dryer gave the lowest antioxidant capacity and resulted in an over amount of BRY. Therefore, drying PGBR using greenhouse solar dryer is more suitable than unsanitary method of sun drying.

Department of Food Technology

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature.....

Academic Year 2016

Thesis Advisors' signature 1. 2..... 3.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภรณ์ มหาโยธี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย อาจารย์ที่ปรึกษาฯ ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลืออันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา และการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติภายใต้สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ปี 2557 ผ่านสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์.ดร.เสริม จันทน์ฉาย และนายยุทธศักดิ์ บุญรอด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เป็นอย่างสูงที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่างๆ

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สถานที่ให้องค์ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณบุคคลในครอบครัวที่ให้โอกาสและให้การสนับสนุนส่งเสริมทางการศึกษาด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณนางสาวปิยะพร เนียมมณี นางสาวภาวริกา รุ่งพิชยพิเชษฐ์ และนางสาวนิโลบล โกลมสิงห์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างข้าวฮางอก การทำแห้ง ตลอดจนการแนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ร่วมงานทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ และเป็นครอบครัวที่ช่วยเหลือกันเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ข้าว.....	5
2.1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	5
2.1.2 ข้าวหอมนิล.....	6
2.2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในข้าวหอมนิล.....	6
2.2.1 สารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ.....	7
2.2.2 แอนโทไซยานิน (anthocyanins).....	7
2.2.3 กรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก (γ -aminobutyric acid).....	8
2.3 ข้าวฮางอก.....	10
2.4 การทำแห้ง (Drying).....	12
2.4.1 การทำแห้งด้วยการตากแดด (sun drying).....	13
2.4.2 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dryer).....	13
2.5 จลนพลศาสตร์การทำแห้ง (drying kinetic).....	15
2.6 อิทธิพลของการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าว.....	17
2.6.1 อิทธิพลของการทำแห้งต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและ ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ.....	18
2.6.2 อิทธิพลของการทำแห้งต่อแอนโทไซยานิน.....	18
2.6.3 อิทธิพลของการทำแห้งต่อกาบา.....	19
2.6.4 อิทธิพลของการทำแห้งต่อคุณภาพด้านการหุงต้ม.....	20
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
3.1 วัสดุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	21

บทที่	หน้า
3.2 สารเคมี.....	21
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	22
3.4 วิธีการทดลอง.....	23
3.4.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและจุลินทรีย์ของข้าวหอมนิล.....	23
3.4.2 กระบวนการผลิตข้าวฮางอก.....	26
3.4.3 ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิตต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าว หอมนิลฮางอก.....	29
3.4.4 ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคต่อ พฤติกรรมการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอก.....	29
3.4.5 ศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคต่อคุณภาพทาง กายภาพ ทงเคมี และคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวหอมนิลฮางอก.....	31
3.4.6 ศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อ พฤติกรรมการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอก.....	34
3.4.7 ศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและจุลินทรีย์ของข้าวหอมนิลฮางอก.....	34
3.4.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	35
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	36
4.1 คุณสมบัติทางเคมีของข้าวเปลือกพันธุ์หอมนิล.....	36
4.2 อิทธิพลของกระบวนการผลิตต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวหอมนิล ฮางอก.....	39
4.3 อิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคต่อพฤติกรรม ทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอก.....	41
4.4 อิทธิพลของการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวหอมนิลฮางอกหลังการทำแห้ง....	47
4.4.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้.....	47
4.4.2 ร้อยละการงอก ร้อยละต้นข้าว และร้อยละข้าวหัก.....	48
4.4.3 ปริมาณสารกาบา.....	49
4.4.4 ปริมาณแอนโทไซยานิน.....	50
4.4.5 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด.....	52
4.4.6 ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ.....	53
4.4.7 คุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวหอมนิลฮางอกหลังการทำแห้ง.....	55
4.5 อิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพฤติกรรม ทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอก.....	57

บทที่	หน้า
4.6 อิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลง คุณภาพทางกายภาพ ทางเคมีและจุลินทรีย์ของข้าวหอมนิลฮางอก	62
4.6.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้.....	62
4.6.2 ร้อยละการงอก ร้อยละต้นข้าว และร้อยละข้าวหัก.....	63
4.6.3 ปริมาณสารกาบา และแอนโทไซยานิน	64
4.6.4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดและความสามารถในการเป็นสารต้าน อนุมูลอิสระ	65
4.6.5 จำนวนแบคทีเรียทั้งหมด จำนวนยีสต์และรา.....	66
5 สรุปลผลการทดลอง.....	67
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก	79
ภาคผนวก ข	81
ภาคผนวก ค	100
ภาคผนวก ง	105
ประวัติผู้วิจัย.....	110



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณกาบาในข้าวกล้อง ข้าวกล้องงอกหรือข้าวฮางอก.....	10
2	รายละเอียดการซื้อข้าวเปลือกสำหรับแต่ละชุดการทดลอง.....	21
3	สภาพที่ใช้ในการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกด้วยเครื่องแห้งแบบถาด high precision laboratory tray dryer กำหนดให้ความชื้นจำเพาะคงที่ที่ 25 กรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง	30
4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายพฤติกรรมการทำแห้งในข้าวฮางอก.....	31
5	คุณสมบัติทางเคมีของข้าวหอมนิล	38
6	ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแต่ละขั้นตอนการผลิต.....	40
7	ระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่ สภาวะต่างๆ.....	44
8	ความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทีวิตีของข้าวหอมนิลฮางอกที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง แบบถาดที่สภาวะต่างๆ	47
9	ร้อยละการงอก ร้อยละต้นข้าวและร้อยละข้าวหักของข้าวหอมนิลฮางอกที่ทำแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ	48
10	ปริมาณสารกาบาของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่อง อบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ.....	49
11	ปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ทำแห้งด้วย เครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC	51
12	ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและหลังการทำแห้ง ที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี pH-differential.....	52
13	ปริมาณสารประกอบฟีนอลของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ทำแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ	53
14	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและ หลังการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ.....	54
15	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและ หลังการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ.....	55
16	ระยะเวลาที่ใช้ในการหุงข้าวหอมนิลฮางอกที่ผ่านการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง แบบถาดที่สภาวะต่างๆ	56
17	อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก การอุ่มน้ำของเมล็ดข้าวสุก ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ในน้ำข้าวสุก และความแข็งของเมล็ดข้าวสุกที่ผ่านการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่อง อบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ.....	57

18	ระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งข้าวฮางหอมนิลฮางอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและแบบเรือนกระจก	61
19	ความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของข้าวฮางหอมนิลฮางอกที่ทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและแบบเรือนกระจก	63
20	ร้อยละการงอก ร้อยละต้นข้าวและร้อยละข้าวหักของข้าวฮางหอมนิลฮางอกที่ทำแห้ง ด้วยการตากแดด เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก	64
21	ปริมาณสารกาบาและแอนโทไซยานินของข้าวฮางหอมนิลฮางอกที่ทำแห้งด้วยการตากแดดเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก	64
22	ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ทำแห้ง ด้วยการตากแดด เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก	65
23	จำนวนแบคทีเรีย จำนวนยีสต์และราทั้งหมดของข้าวฮางหอมนิลฮางอกที่ทำแห้งด้วยการตากแดดเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก	66
24	การเตรียมสารละลายมาตรฐานกาบาที่ความเข้มข้นต่างๆ	84
25	สภาวะสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสารกาบาด้วย HPLC	84
26	การเตรียมสารละลายมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside ที่ความเข้มข้นต่างๆ	87
27	สภาวะสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินด้วย HPLC	88
28	การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่างๆ	90
29	การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox ที่ความเข้มข้นต่างๆ	92
30	การเตรียมสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสไอออนที่ความเข้มข้นต่างๆ	94
31	ค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวฮางหอมนิลฮางอก	101
32	พารามิเตอร์ทางสถิติในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวฮางหอมนิลฮางอก ด้วยการตากแดด และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	103
33	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพทางกายภาพและเคมีของข้าวฮางหอมนิลฮางอก ที่ผ่าน การอบแห้งที่สภาวะต่างๆ	104

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	องค์ประกอบของเมล็ดข้าว	5
2	โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวสีดำ	7
3	โครงสร้างของ Cyanidin 3-glucoside (ก) และ Peonidin 3-glucoside (ข).....	8
4	โครงสร้างทางเคมีของกาบา.....	9
5	กระบวนการสร้างกาบา.....	9
6	ส่วนประกอบระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม	13
7	ส่วนประกอบของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก	15
8	กลไกการย่อยสลายด้วยความร้อนของแอนโทไซยานิน.....	19
9	เครื่องอบแห้งแบบถาด (ก) ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (ข).....	27
10	การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด (ก) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (ข).....	28
11	การเกลี่ยข้าวก่อนการอบแห้ง	29
12	เครื่องอบแห้งแบบถาด high precision laboratory tray dryer	30
13	ข้าวที่มีเมล็ดเต็มตั้งแต่ 8-10 ส่วน (ก) และข้าวที่มีเมล็ดหักตั้งแต่ 2.5-4.9 ส่วน (ข) ที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที	32
14	การทำแห้งข้าวหอมนิลฮ้างอกด้วยวิธีต่างๆ (ก) ตากแดด (ข) ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (ค) ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (ง) ในที่ร่ม	34
15	กราฟการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮ้างอกผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที	41
16	กราฟการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮ้างอกผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที	42
17	อัตราการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮ้างอกผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที.....	43
18	อัตราการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮ้างอกผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที.....	43
19	อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลฮ้างอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที	45

ภาพที่	หน้า
20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง lnk และ 1/T ของการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ จากแบบจำลองของ Page..... 46
21	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสีแสงอาทิตย์ของการทำแห้งข้าวหอมนิลสาอางอก ด้วยการตากแดด 58
22	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการทำแห้งข้าวหอมนิลสาอางอก..... 58
23	การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมระหว่างการทำแห้งข้าวหอมนิลสาอางอก..... 58
24	การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศระหว่างการทำแห้งข้าวหอมนิลสาอางอก..... 59
25	กราฟการทำแห้งของข้าวหอมนิลสาอางอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และเรือนกระจก..... 60
26	อัตราการทำแห้งของข้าวหอมนิลสาอางอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดดระบบ อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และเรือนกระจก..... 61
27	อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลสาอางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งด้วยการ ตากแดด..... 62
28	กราฟมาตรฐานสารกาบา..... 85
29	โครมาโตแกรมของสารกาบาในข้าวหอมนิล 85
30	กราฟมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside 88
31	โครมาโตแกรมของ cyaniding-3-glucoside และ peonidin-3-glucoside ในข้าวหอมนิล 89
32	กราฟมาตรฐานสารละลายกรดแกลลิก 91
33	กราฟมาตรฐานสารละลาย Trolox..... 92
34	กราฟมาตรฐานสารละลายเพอร์รัสไอออน 94
35	ขนาดของเมล็ดข้าว..... 95
36	อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลสาอางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก สมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที..... 106
37	อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลสาอางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก สมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที..... 107
38	อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลสาอางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก สมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที..... 108

ภาพที่

หน้า

39	อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลฮางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที	109
----	--	-----



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยผลิตข้าวเปลือกจำนวน 31.6 ล้านตัน จัดเป็นประเทศผู้ผลิตข้าวอันดับที่ 6 ของโลก รองลงมาจากประเทศจีน อินเดีย อินโดนีเซีย บังคลาเทศ และเวียดนาม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามประเทศไทยจัดเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวอันดับที่ 2 ของโลกรองลงมาจากประเทศอินเดีย โดยในปี พ.ศ. 2558 มีปริมาณการส่งออกข้าว 9.79 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 155,912 ล้านบาท ตลาดข้าวที่สำคัญของประเทศ ได้แก่ ประเทศจีน ฟิลิปปินส์ เบนิน ไนจีเรีย และแอฟริกาใต้ เป็นต้น ชนิดของข้าวที่ส่งออกมากที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ ข้าวขาว ข้าวเหนียว และข้าวหอมมะลิ มีปริมาณการส่งออก 5.24, 2.31 และ 1.98 ล้านตัน ตามลำดับ (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2559)

ข้าวฮางงอก หรือข้าวเปลือกงอก (parboiled germinated brown rice) เป็นข้าวกล้องชนิดหนึ่งที่เกิดจากการกระบวนการตามภูมิปัญญาท้องถิ่นของชาวไทยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพเนื่องจากไม่ผ่านการขัดสี ทำให้อุดมไปด้วยวิตามินต่างๆ จากส่วนรำข้าว ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น มีปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลสูงกว่าข้าวกล้องงอกและข้าวกล้อง (ปวีณา และ ประภัสสร, 2555; Moongngarm และ Saetung, 2010) นอกจากนี้ในกระบวนการงอกยังทำให้เกิดกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก หรือสารกาบา (γ -aminobutyric acid, GABA) ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันทั้งในและต่างประเทศเนื่องจากทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาททำให้เกิดการผ่อนคลายและนอนหลับได้ง่าย และเป็นประโยชน์ต่อผู้ป่วยโรคต่างๆ เช่น โรคความดันโลหิต โรคหัวใจ โรคหลอดเลือด โรคเบาหวาน และช่วยในการควบคุมน้ำหนัก เป็นต้น (Chungcharoen และคณะ, 2014; Han, 2015) นอกจากนี้ข้าวฮางงอกยังมีใยอาหารที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นสูงกว่าข้าวขาวและข้าวกล้อง ช่วยให้การย่อยอาหารเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้อิ่มท้องนาน ไม่หิวง่าย ป้องกันและรักษาโรคเบาหวานได้ดี ช่วยให้ระบบขับถ่ายสะดวก ดูดซับไขมันและสารพิษออกจากร่างกาย ป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Jayadeep และ Malleshi, 2011)

ข้าวฮางงอกสามารถผลิตได้ทั้งจากข้าวเจ้า และข้าวเหนียว กรรมวิธีทั่วไปที่ใช้ในการผลิตข้าวฮางงอกคือนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำ 12-24 ชั่วโมง แล้วนำมาบ่มอีก 24-48 ชั่วโมง ให้เกิดการงอกของจมูกข้าวประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร แล้วจึงนำไปนึ่งจนสุก และนำไปผึ่งลมหรือตากแดดจนแห้งแล้วจึงสีด้วยเครื่องแบบกะเทาะเปลือก ซึ่งข้าวพันธุ์ที่นิยมนำมาผลิตคือ ข้าวพันธุ์หอมมะลิเนื่องจากเป็นข้าวที่นิยมบริโภคและมีกลิ่นหอม นอกจากนี้ยังมีข้าวเจ้าหอมนิลที่เป็นข้าวที่มีสีม่วงเข้มที่ได้รับการคัดเลือกและพัฒนาจนได้เป็นข้าวที่มีเมล็ดข้าวเรียวยาว เมื่อบ่มจะนุ่ม เหนียว หอม มีสีม่วงอ่อน นุ่ม และมีกลิ่นหอมเช่นกัน คุณสมบัติที่สำคัญของข้าวเจ้าหอมนิลคือ มีโปรตีนสูงถึงร้อยละ 12.5 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 70 ปริมาณอะไมโลสร้อยละ 16 และยังประกอบไปด้วยธาตุเหล็ก สังกะสี ทองแดง แคลเซียม และโพแทสเซียม ซึ่งสูงกว่าข้าวหอมมะลิ (อภิชาติ, 2554) นอกจากนี้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญที่พบในข้าวเจ้าหอมนิล ได้แก่ สารประกอบแอนโทไซยานิน และสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Pereira-Caro และคณะ, 2013) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน โรคเบาหวาน และชะลอความแก่ (Lazze และคณะ, 2004) นอกจากนี้ข้าวฮางงอกที่ผลิตจากข้าวหอมนิลมีปริมาณแคโรทีนอยด์ น้ำตาลรีดิคซ์ และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าข้าวฮางงอกที่ผลิตจากข้าวหลายสายพันธุ์ (Sadabpod และคณะ, 2010)

อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตข้าวฮางงอกจะมีการทำแห้งเพื่อทำให้ข้าวมีปริมาณความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรฯ, 2555) ความร้อนที่ใช้ในการทำแห้งจะส่งผลต่อการลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (เทวีกา และ วรณช, 2554) รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานิน (Furtado และคณะ, 1993) แต่ไม่ส่งผลต่อการลดลงของสารกาบาเนื่องจากไม่สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส (อรัญญา และคณะ, 2557) และในปัจจุบันจะทำแห้งด้วยการตากแดด ซึ่งใช้เวลานาน 1 วัน ทำให้มีโอกาสเกิดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์และสิ่งปลอมปนทางกายภาพต่าง ๆ ได้ง่าย ไม่เหมาะสมกับลักษณะสินค้าที่นิยมบริโภคเพื่อประโยชน์เชิงสุขภาพ อีกทั้งประเทศไทยโดยกระทรวงพลังงานได้มีการส่งเสริมการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dryer) ในการทำแห้งสินค้าเกษตร แต่การใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการทำแห้งข้าวฮางงอกนั้นยังไม่กว้างขวางนัก ซึ่งส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการขาดองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลข้อดี ข้อเสียของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อคุณภาพของข้าวฮางงอกยังมีจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาสภาวะในการทำแห้งที่เหมาะสมต่อคุณภาพของข้าวหอมนิลฮางงอกโดยเน้นศึกษาคุณภาพด้านสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการผลิตในขั้นตอน การแช่ การบ่ม และการนึ่ง ต่อการเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ สารกาบา แอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวหอมนิลฮางงอก

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ได้แก่ อุณหภูมิ และความเร็วลม ต่อพฤติกรรมการทำแห้ง การเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวหอมนิลฮางงอก คุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวหอมนิลฮางงอก

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ต่อพฤติกรรมการทำแห้ง การเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวหอมนิลฮางงอก

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 สารกาบาเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นในขั้นตอนการแช่และการนึ่งอาจจะทำให้สารกาบาลดลง ในขณะที่สารกาบาละลายตัวที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นขั้นตอนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียสจะไม่ส่งผลต่อปริมาณสารกาบา

1.3.2 สารประกอบแอนโทไซยานินที่พบมากในข้าวหอมนิลฮางงอก จะไม่เสถียรต่ออุณหภูมิและแสง ดังนั้นการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการทำแห้งและมีการสัมผัสกับแสงอาทิตย์ในระหว่างการทำแห้งน่าจะส่งผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานิน

1.3.3 ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวหอมนิลฮางงอกน่าจะขึ้นอยู่กับสารประกอบแอนโทไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกซึ่งพบมากในข้าวหอมนิล ดังนั้นในการทำแห้งที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบแอนโทไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกน่าจะส่งผลต่อความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวหอมนิลฮางงอก

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ข้าวพันธุ์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ข้าวเจ้าพันธุ์หอมนิล

1.4.2 ในการศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ใช้เครื่องอบแห้งแบบถาด Hohenheim type high precision laboratory tray dryer ที่ Institute of Agricultural Engineering in the Tropics and Subtropics, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany ทำการอบแห้งด้วยการให้ลมร้อนไหลผ่านด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง (over- and under flow mode) โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ และความเร็วลม ศึกษาอุณหภูมิที่ 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วลมที่ 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่ความชื้นจำเพาะ 25 กรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

1.4.3 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษามี 2 ระบบ ได้แก่ ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (solar tunnel dryer) และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (greenhouse solar dryer) ศึกษาเปรียบเทียบกับ การตากแดด (sun drying) และการทำแห้งในที่ร่ม (shade drying)

1.4.4 คุณภาพของข้าวหอมนิลยางอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณสารกาบา แอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลทั้งหมด ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ จำนวนแบคทีเรียทั้งหมด จำนวนยีสต์และรา และคุณภาพทางกายภาพ



บทที่ 2

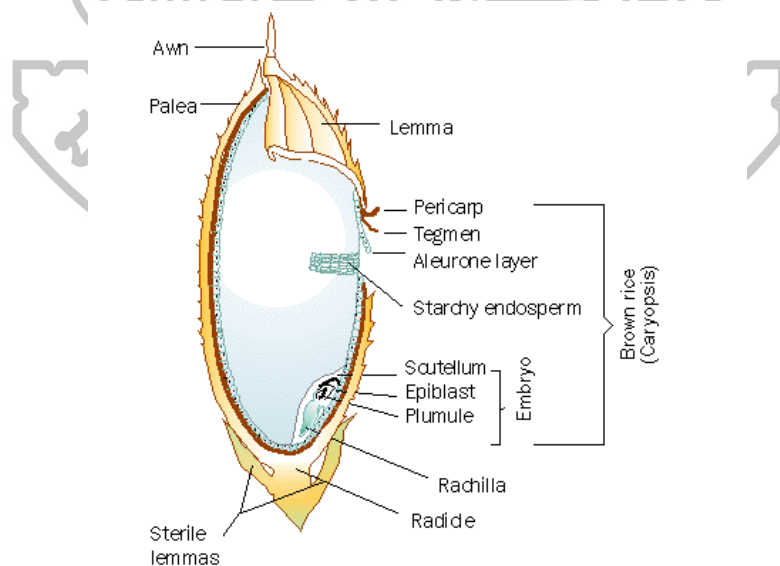
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าว (*Oryza sativa* L) เป็นพืชล้มลุกวงศ์ Poaceae สามารถเจริญได้ดีทั้งในเขตร้อนและอบอุ่น มีแหล่งกำเนิดจากทวีปเอเชีย ข้าวเป็นอาหารหลักของประชากรเกือบครึ่งหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในภูมิภาคเอเชียที่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารประจำวันมากกว่าภูมิภาคอื่น ๆ ของโลก ในปัจจุบันมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวมากกว่าร้อยละ 90 ของพื้นที่เพาะปลูกทั่วโลก (Oil และคณะ, 2014) และการผลิตข้าวส่วนใหญ่อยู่ในเอเชียมากกว่าร้อยละ 90

2.1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเรียกว่าเกลบ (hull หรือ husk) ทำหน้าที่ในการหุ้มเมล็ดข้าว อีกส่วนหนึ่งเรียกว่าเนื้อผล หรือผลแท้ หรือเป็นส่วนที่เรียกว่าข้าวกล้อง (true fruit หรือ caryopsis หรือ brown rice) (แสดงดังภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว
ที่มา: Chang และ Bardenas (1965)

โดยมีรายละเอียดแต่ละส่วน ดังนี้ (อรอนงค์, 2550)

1. แกลบ แบ่งออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หุ้มเนื้อผลด้านท้อง เรียกว่า เปลือกใหญ่ (lemma) ส่วนที่หุ้มเปลือกด้านหลัง เรียกว่า เปลือกเล็ก (palea) ส่วนของเซลล์ผิวนอกที่เจริญ (epidermal cell) เรียกว่า ขน ส่วนปลายของเปลือกใหญ่ที่งอกยาวออกมาเกินยอดดอก (apiculus) เรียกว่า หาง ส่วนที่อยู่ระหว่างกลีบรองเมล็ดกับเปลือกใหญ่ เรียกว่า ขั้ว และกลีบรองเมล็ด

2. เนื้อผล หรือข้าวกล้อง แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ เยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด นิวซีลัส (nucellus) และเยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer)

2.1.2 ข้าวหอมนิล

ข้าวหอมนิล (black jasmine rice) เป็นผลผลิตของศูนย์พันธุวิศวกรรม และเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พัฒนาร่วมกับประเทศจีน แล้วนำมาปลูกในประเทศไทยจนเกิดการกลายพันธุ์จากข้าวเหนียวเป็นข้าวเจ้า ผ่านการนำมาผสมกับข้าวดอกมะลิ และผ่านการคัดเลือกพันธุ์จนกลายเป็นพันธุ์ข้าวหอมนิล (ปาริชาติ และคณะ, 2557) ข้าวหอมนิลเป็นพันธุ์ข้าวที่มีสีม่วงเข้ม มีกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์ของตัวเองแตกต่างจากข้าวชนิดอื่น ๆ ข้าวหอมนิลเป็นข้าวพันธุ์ไม่ไวแสง ปลูกได้ตลอดทั้งปี มีอายุการเก็บประมาณ 95 วัน ลักษณะใบของต้นข้าวมีสีเขียวเข้ม ลำต้นมีสีเขียวเข้มปนสีม่วง เมล็ดเรียวยาว เมื่อทำการกะเทาะเปลือกเป็นข้าวกล้องจะมีขนาดเมล็ดประมาณ 6.5 มิลลิเมตร และเมื่อนำไปหุงจะมีสีม่วงอ่อน และมีกลิ่นหอม

ข้าวหอมนิลเป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีนร้อยละ 12.5 มีสารต้านอนุมูลอิสระที่วัดด้วยวิธี DPPH ประมาณ 293 ไมโครโมลต่อกรัม โดยในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดที่มีสีม่วงดำประกอบไปด้วยสารกลุ่มแอนโทไซยานินที่เป็นสีม่วงเข้ม (cyanidin) และสารสีชมพูอ่อน (peonidin) และสารโปรแอนโทไซยานิน (จุฑามาศ และเฉลิมพล, 2558) ซึ่งแอนโทไซยานินและโปรแอนโทไซยานิน ที่พบในข้าวหอมนิลจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถทำงานได้ดีกว่าวิตามินอี และมีประโยชน์ต่อสุขภาพร่างกาย โดยสารโปรแอนโทไซยานินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและทำลายเซลล์มะเร็ง (อริสรา และอรอุมา, 2550)

2.2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในข้าวหอมนิล

ข้าวหอมนิลจัดอยู่ในข้าวที่มีเมล็ดสีดำ (black rice) เนื่องจากมีแอนโทไซยานินอยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ดในส่วนของผิวเมล็ดจนถึงเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นในซึ่งแอนโทไซยานินมีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Plaitho และคณะ, 2013) นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งของสารอาหาร ได้แก่ วิตามินบี 1 (thiamin) วิตามินบี 2 (riboflavin) วิตามินบี 3 (niacin) วิตามินบี 6 (pyridoxine) แคลเซียม (calcium) สังกะสี (zinc) และโพแทสเซียม (potassium) (Chrispell และDavid, 1994) นอกจากนี้เมื่อผ่านกระบวนการงอกแล้วจะทำให้มีสารกาบาเพิ่มขึ้น (Polthum และ Ahromrit, 2014)

2.2.1 สารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

สารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวสาลีดำมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ มีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) จำนวนหนึ่งวงหรือมากกว่า และมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ สารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวสาลีดำ ได้แก่ กรดฟีนอลิก (phenolic acid) และ ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) เป็นต้น (Tang และคณะ, 2016)

Sumczynski และคณะ (2016) ได้ศึกษาชนิดของสารประกอบฟีนอลที่พบในข้าวสาลีดำพบว่า สารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวสาลีดำ ได้แก่ กรดแกลลิก (gallic acid) กรดโปรโตคาเทอซอิก (protocatechuic acid) กรดวานิลลิก (vanillic acid) กรดคาเฟอิก (caffeic acid) กรดไซริงจิก (syringic acid) กรดพาราคูมาริก (p-cumaric acid) และกรดเฟอร์ริก (ferulic acid) สูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2 โดยสารประกอบฟีนอลิกที่พบมากที่สุดได้แก่ กรดเฟอร์ริก กรดโปรโตคาเทอซอิก และกรดแกลลิก พบในปริมาณ 25.4, 21.0 และ 13.6 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

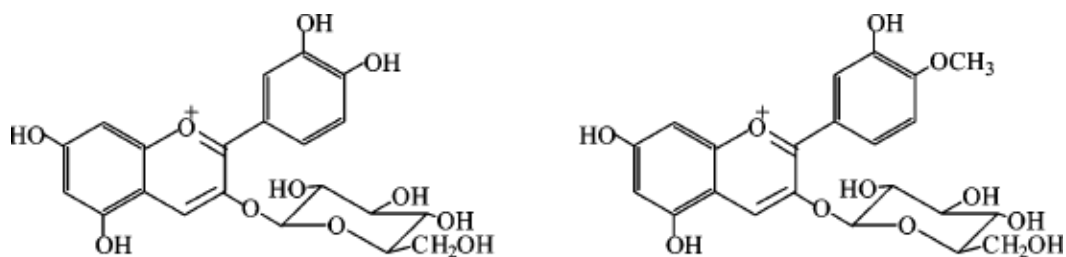


Benzoic acid Derivatives	Substitutions			Cinnamic acid Derivatives	Substitutions		
	R1	R2	R3		R1	R2	R3
Protocatechuic	H	OH	OH	p-Coumaric	H	OH	H
Vannilic	CH ₃ O	OH	H	Caffeic	H	OH	OH
Syringer	CH ₃ O	OH	CH ₃ O	Ferulic	CH ₃ O	OH	H
Gallic	OH	OH	OH				

ภาพที่ 2 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวสาลีดำ
ที่มา: Liu (2004)

2.2.2 แอนโทไซยานิน (anthocyanins)

ข้าวหอมนิลประกอบด้วยแอนโทไซยานินหลัก 2 ชนิดได้แก่ Cyanidin 3-glucoside และ Peonidin 3-glucoside แสดงโครงสร้างดังภาพที่ 3 โดยแอนโทไซยานินจะพบมากในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นแอลิวโรน พบประมาณร้อยละ 1.36 และในส่วนของรำข้าว พบประมาณร้อยละ 0.16 (Sadabpod และคณะ, 2014) ในข้าวหอมนิลมีปริมาณของ Cyanidin 3-glucoside ประมาณ 150.81 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (Sutharut และ Sudarat, 2012)



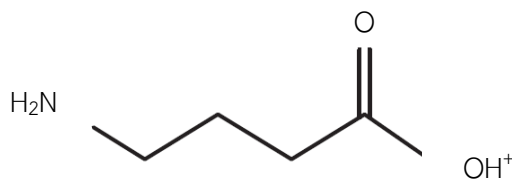
ภาพที่ 3 โครงสร้างของ Cyanidin 3-glucoside (ก) และ Peonidin 3-glucoside (ข)
ที่มา: Hu และคณะ (2003)

Plaitho และคณะ (2013) ศึกษาปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวไทย 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวเหนียวดำ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ และข้าวหอมนิล พบว่ามีปริมาณของแอนโทไซยานิน เท่ากับ 115, 25 และ 18 มิลลิกรัมไซยานิดินต่อ 100 กรัมสารแห้ง เช่นเดียวกับ Htwe และคณะ (2010) ศึกษาปริมาณของแอนโทไซยานินในข้าว 2 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวหอมนิล พบว่ามีปริมาณแอนโทไซยานิน เท่ากับ 0.45 และ 29.77 มิลลิกรัมไซยานิดินต่อ 100 กรัมสารแห้ง

Sarma และคณะ (1997) รายงานว่าแอนโทไซยานินมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น การที่มีหมู่ OH ในตำแหน่งที่ 3' และ 4' จะสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะทำให้อยู่ในรูปที่เสถียรได้ ในขณะที่ถ้าพีเอชอยู่ระหว่าง 2-4 จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับโลหะได้ทำให้อยู่ในรูปของฟลาวาเลียมแคทไอออน นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนของตำแหน่งเมทอกซิลจะส่งผลต่อความไวในการต้านอนุมูลอิสระ แอนโทไซยานินที่เป็นชนิด Cyanidin 3-glucoside และ Delphinidin 3-glucoside จะมีความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระได้ดี (ยูปาพร, 2547)

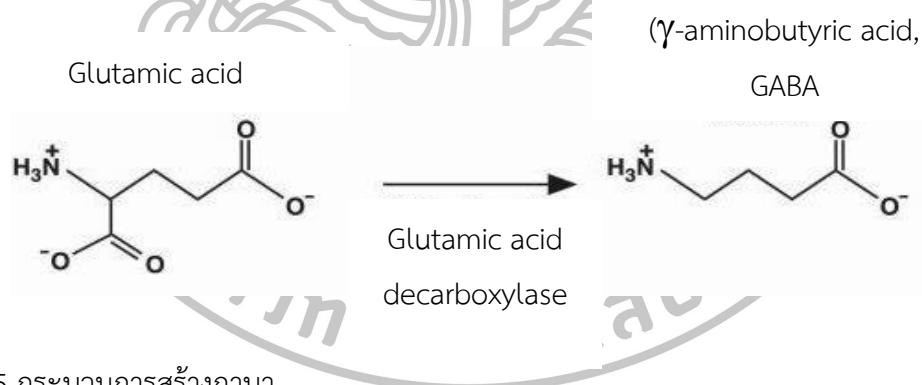
2.2.3 กรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก (γ -aminobutyric acid)

ข้าวที่อยู่ในระหว่างการงอกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ น้ำเข้าสู่เมล็ด น้ำจะเข้าไปกระตุ้นเอนไซม์ภายในเมล็ดข้าว เพื่อเตรียมสารอาหารให้พร้อมสำหรับการงอก โดยการย่อยคาร์โบไฮเดรตให้เป็นโมเลกุลเล็กลงด้วยเอนไซม์อะไมเลส ได้เป็นโอลิโกแซคคาไรด์และน้ำตาล ย่อยโปรตีนให้เป็นกรดอะมิโนและเปปไทด์ และพบว่ามี的增加ขึ้นของกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก (γ -aminobutyric acid, GABA) หรือที่รู้จักกันในชื่อสารกาบาเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า (ทัศนีย์, 2553) กาบาเป็นกรดอะมิโนประเภทที่ไม่เป็นส่วนประกอบของโปรตีนพบได้ทั้งในพืชและสัตว์ มีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 4 สารกาบามีส่วนประกอบของหมู่คาร์บอกซิลและหมู่อะมิโน ซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของโปรตีน แต่สารกาบาไม่พบในโปรตีนทั่วไป



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของกาบา
ที่มา: Hayat และคณะ (2014)

สารกาบาเกิดจากกระบวนการสลายหมู่คาร์บอกซิล (decarboxylation) ของกรดกลูตามิก (glutamic acid) โดยเอนไซม์กลูตาเมต (glutamic acid decarboxylase: GAD) (แสดงดังภาพที่ 5) ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่เมล็ดข้าวเริ่มกระบวนการงอก ซึ่งช่วงนี้จะมีสารกาบามาก และจะลดลงจนหายไปเมื่อเมล็ดข้าวได้สร้างใบและรากออกมา อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ศึกษาปริมาณของกาบาที่เพิ่มขึ้นหลังจากเมล็ดข้าวเกิดการงอกจากข้าวสายพันธุ์ต่างๆ (ตารางที่ 1) จะเห็นว่าเมื่อผ่านกระบวนการงอกแล้วข้าวทุกพันธุ์จะมีปริมาณสารกาบาที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่า ซึ่งสารกาบานี้มีบทบาทเป็นสารสื่อประสาท (neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง และทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมอง ช่วยทำให้สมองเกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย อีกทั้งยังสามารถป้องกันการเจริญของเซลล์มะเร็ง และโรคอัลไซเมอร์ได้ (Komatsuzaki และคณะ, 2005)



ภาพที่ 5 กระบวนการสร้างกาบา
ที่มา: Jorgensen (2005)

มัตสนา (2555) พบว่ากาบาทำหน้าที่รักษาสมดุลของระบบสมองช่วยให้เกิดการผ่อนคลาย นอนหลับง่าย และยังกระตุ้นการผลิตฮอร์โมน HGH (Human growth hormone) ที่ช่วยในการเจริญเติบโต จึงมีการใช้สารกาบาเพื่อบำบัดโรคต่างๆ เช่น โรควิตกกังวล โรคนอนไม่หลับ เป็นต้นและนิยมบริโภคผลิตภัณฑ์ตามธรรมชาติที่มีสารกาบาหรือผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมสารกาบาลงไปเพื่อให้ผู้บริโภคได้รับอย่างเพียงพอ เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Kim และคณะ (2015) ได้มีการนำสารกาบามาใช้ในการในการรักษาโรควิตกกังวล เพื่อลดความเครียด เป็นต้น

ตารางที่ 1 ปริมาณกาบาในข้าวกล้อง ข้าวกล้องงอกหรือข้าวฮางอก

ผู้วิจัย	พันธุ์ข้าว	ปริมาณกาบาในข้าว กล้อง (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	ปริมาณกาบาในข้าว กล้องงอก/ข้าวฮางอก (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)
Komatsuzaki และคณะ (2007)	Haiminori	7.30 ± 2.05	24.90 ± 4.0
วรั้มพร และคณะ (2555)	ข้าวหอมนิล	4.56 ± 1.13	17.42 ± 0.54
Chungcharoen และคณะ (2012)	ข้าวดอกมะลิ 105	4.20 ± 0.30	25.90 ± 27.3
Wei และคณะ (2013)	Hai7, Xs110, Biyuzaonuo	11.99 ± 2.27	32.08 ± 3.76
Thuwapanichayanan และคณะ (2015)	ปทุมธานี 1	1.56 ± 0.04	23.19 ± 1.39
Wunjuntuk และคณะ (2016)	ข้าวดอกมะลิ 105	2.60 ± 0.1	11.90 ± 0.6

Roohinejad และคณะ (2009) พบว่าการบริโภคข้าวกล้องงอกทำให้ได้รับสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติ ซึ่งสามารถป้องกันการทำลายสมองเนื่องจากสารเบตาอไมลอยด์เปปไทด์ (beta-amyloid peptide) ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคอัลไซเมอร์ ดังนั้น จึงได้มีการนำสารกาบมาใช้ในวงการแพทย์เพื่อการรักษาโรคเกี่ยวกับระบบประสาทต่าง ๆ หลายโรค เช่น โรควิตกกังวล โรคนอนไม่หลับ โรคลมชัก เป็นต้น เป็นไปในทางเดียวกันกับผลการทดลองของ บุษยา (2553); ภาคินี และคณะ (2556) ที่ระบุว่าข้าวกล้องงอกที่ประกอบด้วยสารกาบ มีผลช่วยลดความดันโลหิต ลด LDL (low density lipoprotein) ลดการอักเสบของหลอดเลือด ลดน้ำหนัก ทำให้ผิวพรรณดี และใช้บำบัดโรคเกี่ยวกับประสาทส่วนกลาง นอกจากนี้ผลงานวิจัยของ Hiroshi (2005) พบว่าข้าวกล้องงอกนั้นมีคุณสมบัติมากมายหนึ่งในนั้นคือ กาบา ที่เป็นสารสื่อประสาทมีการเสริมสร้างประสิทธิภาพในการทำงานของสมอง มีฤทธิ์ต้านมะเร็ง และเป็นตัวเร่งกิจกรรมในการเผาผลาญไขมันของร่างกาย

2.3 ข้าวฮางอก (parboiled germinated brown rice)

การผลิตข้าวฮางอกเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นของชาวไทยภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ได้รับการสืบทอดต่อกันมายาวนานกว่า 200 ปี (วรั้มพร และสุนีย์, 2552) มีการผลิตในระดับครัวเรือน ขยายขนาดการผลิตสู่ชุมชน แต่ยังคงแพร่หลายอยู่ในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน กระบวนการผลิตข้าวฮางอกประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

ทำความสะอาดข้าวเปลือก เพื่อแยกสิ่งเจือปนออกจากเมล็ดข้าว เช่น เศษฟาง หิน ดิน โดยใช้การล้างน้ำ นอกจากนี้จะสามารถกำจัดสิ่งสกปรกได้แล้วยังสามารถแยกข้าวเปลือกเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ เช่น เมล็ดข้าวท้องไข่ ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเมล็ดอ่อน ซึ่งเมล็ดข้าวลักษณะดังกล่าวจะมีน้ำหนักเบากว่าเมื่อล้างน้ำจึงลอยอยู่บนผิวน้ำ ทำให้กำจัดออกได้ง่าย

นำข้าวเปลือกแช่น้ำเพื่อให้น้ำซึมผ่านเข้าสู่เนื้อเมล็ดจนอิ่มตัว ยกข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่น้ำแล้วออกมาบ่มอีก 24-48 ชั่วโมง เพื่อให้จมูกข้าวงอกออกมา 0.5-1 มิลลิเมตร โดยใช้กระสอบป่าน

คลุมทับ รดน้ำทุก 3-4 ชั่วโมง การงอกของข้าวจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมี มีสารอาหารหลายชนิดเพิ่มขึ้นและเพิ่มในปริมาณหลายเท่า ข้าวฮางอกมีปริมาณกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก หรือกาบา (γ -aminobutyric acid, GABA) ในปริมาณสูงกว่าข้าวที่ไม่เกิดการงอก (เยาพา และพัชริน, 2553; Rattanasena และ Bussaman, 2013)

นำข้าวเปลือกมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดกลิ่นที่เกิดจากการหมัก หลังจากนั้นนำมาใส่ในหวด แล้วนึ่งให้ข้าวสุกนาน 30-40 นาที เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ดหลังจากการสี นึ่งจนเมล็ดข้าวแตกและมีเจลเคลือบผิวทั่วทั้งเปลือก ขั้นตอนนี้ช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์และทำลายไข่มอดด้วย (อรอนงค์, 2550) โดยการนึ่งนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในข้าวเปลือก ดังนี้ ข้าวเปลือกจะมีความชื้นที่สูงขึ้นจากการควบแน่นของไอน้ำ จะได้รับสารอาหารที่เพิ่มขึ้นจากสารอาหารบางตัวที่ละลายได้ในน้ำ ทำให้เมล็ดข้าวเกิดเจลลาตินไนซ์ ทำให้ข้าวพองตัวเต็มเมล็ดและช่วยในการประสานรอยแตกร้าวภายในส่วนเนื้อของเมล็ด เปลือกชั้นในที่หุ้มเนื้อเมล็ดจะนิ่มขึ้นและติดแน่นกับเนื้อในเมล็ด ทำให้เนื้อเยื่อชั้นนี้แยกออกจากกันยากในขั้นตอนการกะเทาะ หรือการสีเปลือก และเป็นการหยุดการงอกของข้าวเปลือก ทำลายสปอร์ของเชื้อรา ไซแมลง ตัวอ่อนของแมลง และทำลายเอนไซม์ ทำให้เก็บข้าวฮางอกได้นานขึ้น

นำข้าวที่ผ่านการนึ่งแล้วมาตากให้แห้ง 1 แดด และผึ่งลมอีก 2 วัน จนข้าวแห้งสนิท ถ้าไม่มีแดด หรือฝนตกจะใช้พัดลมเป่าเพื่อให้แห้งเร็วขึ้น การทำแห้งจะทำให้จมูกข้าวที่งอกหุบเข้าไปในเปลือกเช่นเดิมเมื่อข้าวแห้ง โดยการทำแห้งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้นในเมล็ดข้าวให้เหมาะสมต่อการสี และการเก็บรักษา โดยความชื้นที่เหมาะสมนั้นจะไม่เกินร้อยละ 14

พักข้าวประมาณ 7 วัน วัตถุประสงค์เพื่อให้มีการปรับสภาพ เกิดการกระจายความชื้น และปรับอุณหภูมิในเมล็ดข้าวให้สม่ำเสมอ นำมาสีและควรถูกะเทาะเพียงเอาเปลือกออกเท่านั้น ไม่ขัดขาว เพื่อให้ได้รับสารอาหารที่มีประโยชน์อย่างเต็มเมล็ด

Sareepuang และคณะ (2008) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการแช่ข้าวต่อสมบัติเชิงกายภาพเคมี และคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อหุงสุก โดยศึกษาอุณหภูมิในการแช่ 3 ระดับ ได้แก่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า การแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำให้คุณภาพของข้าว และการยอมรับของผู้บริโภคสูงที่สุด

ชนิษฐา (2555) ศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวฮางอกโดยใช้ข้าวพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 แช่น้ำที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส บ่มข้าวที่งอกด้วยเวลาต่างกันว่า 14, 24 และ 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตข้าวฮางอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 คือ การแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 32.72 องศาเซลเซียส และบ่มข้าว นาน 28.01 ชั่วโมง

วรัมพร และคณะ (2555) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในข้าวกล้อง 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวหอมนิล ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวดำ พบว่าเมื่อผ่านการงอกข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์มีปริมาณกาบา และวิตามิน B1 เพิ่มขึ้น ข้าวที่มีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระมากที่สุดคือข้าวเหนียวดำ ในขณะที่ข้าวที่มีปริมาณกาบาสูงที่สุดหลังจากการงอกคือข้าวหอมนิล มีกาบาเท่ากับ 17.42 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม

อรัญญา และคณะ (2557) ศึกษาผลของการนึ่งต่อสารกาบาและสมบัติเชิงกายภาพและเคมีของข้าวฮาง และข้าวฮางงอกสีดำ จากข้าว 2 สายพันธุ์ คือ ข้าวหอมนิล และข้าวเหนียวดำ โดยนึ่งข้าวที่อุณหภูมิน้ำเดือด กำหนดเวลาในการนึ่ง 3 ระดับ ได้แก่ 30, 60 และ 90 นาที ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการนึ่งส่งผลต่อการลดลงของปริมาณกาบาในข้าวฮางงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ การนึ่งโดยใช้เวลานาน 90 นาที ทำให้ตรวจไม่พบสารกาบา ทั้งนี้เนื่องจากกาบาเป็นสารที่ละลายน้ำได้ อาจทำให้สลายไปในขั้นตอนการนึ่ง

กรรณิการ์ และคณะ (2559) ศึกษาวิธีการเตรียมและการอบแห้งต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวฮางงอกจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยหลังจากขั้นตอนในการนึ่ง นำข้าวมาแช่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และแช่เยือกแข็งที่ -20 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำมาทำแห้ง 2 วิธี ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด นาน 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า การแช่เย็นแล้วนำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดสูงที่สุด เท่ากับ 115.51 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง

Hu และคณะ (2017) ศึกษาผลของการนึ่งต่อการเปลี่ยนแปลงสารฟลาโวนอยด์ ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และสมบัติเชิงกายภาพเคมีในข้าวพันธุ์ Anhui 02 โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการนึ่ง 4 ระดับ ได้แก่ 2, 5, 10 และ 15 นาทีด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า ปริมาณ vanillic และ p-coumaric acid มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อนึ่งไม่เกิน 5 นาที

ข้าวเปลือกที่เพาะจนงอกจะมีสารอาหาร วิตามิน แร่ธาตุ ไฟเบอร์ และกลิ่นหอมจากเปลือกมาเคลือบที่เมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น จึงทำให้ข้าวฮางงอกมีสารอาหารมากกว่าข้าวกล้องงอก มีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าธัญพืชทั้งหลาย ช่วยให้สุขภาพแข็งแรงและสมดุล เพิ่มภูมิคุ้มกัน ลดการอักเสบ ช่วยป้องกันเชื้อโรคหรือโรคที่ไม่ได้เกิดจากเชื้อโรคได้ดี เช่น ความดัน เบาหวาน ไขมันสูง โรคหัวใจ โรคอ้วน ไชข้ออักเสบ โรคไต โรคเกี่ยวกับประสาทและสมอง ความจำเสื่อม การแก่เกินวัย โรคมะเร็งชนิดต่างๆ (Tortayeva, 2005; Wunjuntuk และคณะ, 2016)

2.4 การทำแห้ง (Drying)

การทำแห้งเป็นหนึ่งในวิธีการถนอมอาหาร โดยอาศัยการดึงน้ำออกเพื่อลดความชื้นของอาหาร และค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity, a_w) เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้อาหารเกิดการเน่าเสีย โดยวัตถุประสงค์ของการทำแห้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ทำให้อาหารปลอดภัย ทำให้อาหารมีน้ำหนักเบา หรือสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นทางเลือกของผู้บริโภคมากขึ้น การทำแห้งมีหลากหลายวิธี โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น การใช้ลมร้อนเป็นวิธีการทำแห้งโดยทั่วไป ทำได้โดยการตากแดด หรือใช้เครื่องทำแห้งลมร้อนแบบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบอบแห้งแบบถาด แบบอุโมงค์ แบบฟลูอิดไดซ์เบด แบบพ่นฝอย เป็นต้น ซึ่งการทำแห้งจะทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญเช่น การหดตัว การสูญเสียสารหอมระเหย สี และคุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น (ชาลีตา, 2555)

2.4.1 การทำแห้งด้วยการตากแดด (sun drying)

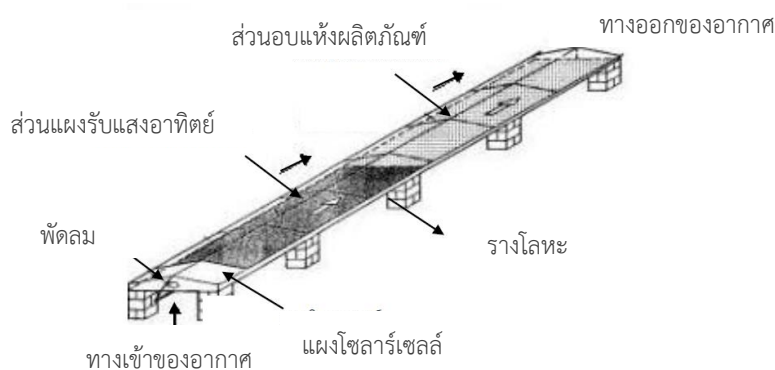
การตากแดดเป็นการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดและใช้กันมาเป็นเวลานาน โดยการนำอาหารไปตากให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ แต่อาหารที่ตากแห้งที่ได้มักมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์สูงและอาจมีความชื้นเหลืออยู่สูงมากซึ่งถ้าเก็บไว้นานอาจจะเสียได้ง่าย การทำแห้งด้วยวิธีนี้ต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำแห้งเป็นอย่างดี เช่น ขนาดของชิ้นอาหาร เวลาในการทำแห้ง อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมและฤดูกาล เป็นต้น

การตากแดด ประสบปัญหามากมาย ทั้งความไม่แน่นอนของธรรมชาติ และบางครั้งยังอาจก่อให้เกิดความไม่สะอาดของผลผลิต หรือวัตถุดิบ เช่น ฝุ่นละออง แมลงวัน เชื้อโรคต่างๆ ดังนั้น การพยายามหาเครื่องมือ หรืออุปกรณ์ เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว ก็ถูกพัฒนาขึ้น ในรูปของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งที่ขจัดผลทางการเกษตร และลดความเสียหายในการตากแห้งโดยอาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก

2.4.2 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dryer)

ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีการใช้งานในประเทศ คือระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (solar tunnel dryer) และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (greenhouse solar dryer) หรือเรียกว่า พาราโบลาโดม

ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (แสดงดังภาพที่ 6) ประกอบไปด้วย แผ่นกระจกที่ปกคลุมอยู่ด้านบนอาศัยพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านกระจก โดยมีพัดลมระบายอากาศซึ่งทำงานด้วยโซลาร์เซลล์ (solar cell) ช่วยระบายอากาศร้อนให้ทั่วถึง อากาศจะผ่านส่วนที่ทาสีดำซึ่งเป็นส่วนที่กักเก็บความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านกระจกมา (solar collector) กลายเป็นอากาศร้อนพัดผ่านผิวหน้าของอาหารที่มีความชื้นที่วางอยู่ในส่วนของถาดที่สามารถเปิดเข้าออกได้ (drying tunnel) และอากาศร้อนจะถูกกำจัดออกไปทางส่วนท้ายของเครื่องอบ ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง



ภาพที่ 6 ส่วนประกอบระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม
ที่มา: Esper (1995)

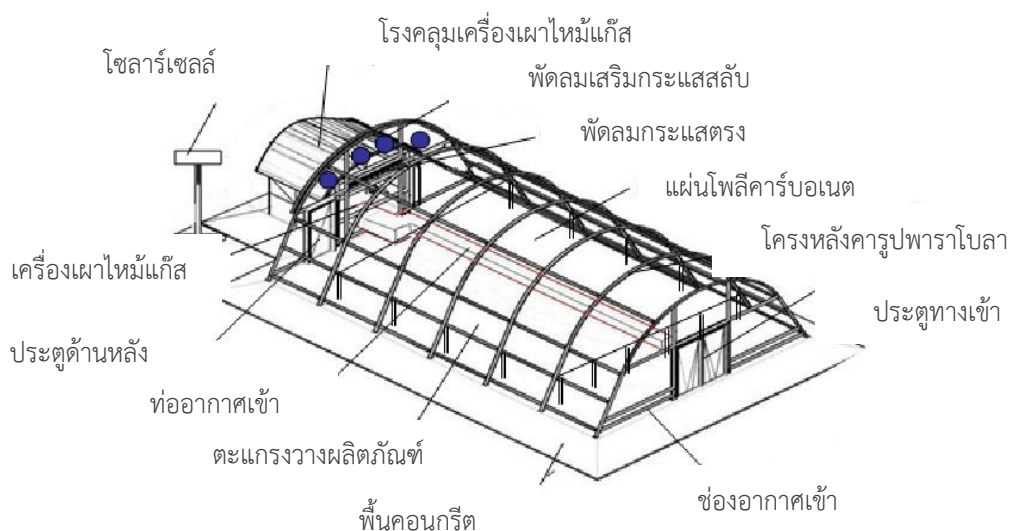
Schirmer และคณะ (1995) ทดลองใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมในการตากกล้วยน้ำว่าเปรียบเทียบกับการตากแดด พบว่าสามารถอบกล้วยได้ครั้งละ 300 กิโลกรัม อุณหภูมิภายในเครื่องอบอยู่ระหว่าง 40-65 องศาเซลเซียส และพบว่าการอบแห้งนี้สามารถลดระยะเวลาลงได้จากการใช้แสงแดดปกติที่ต้องใช้เวลาถึง 5-7 วัน เหลือเพียง 3-5 วัน และให้สี กลิ่นรสชาติที่ดี

Bala และคณะ (2003) ทดลองใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมในการทำแห้งแอปเปิลสไลด์หนา 0.5 เซนติเมตรเปรียบเทียบกับการตากแดด โดยเรียงชั้นแอปเปิลให้เป็นการทำแห้งชั้นบางพบว่า ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสามารถอบแอปเปิลสไลด์ได้ครั้งละ 150 กิโลกรัม อุณหภูมิภายในเครื่องอบอยู่ระหว่าง 34.1-64 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เมื่ออบไป 20 ชั่วโมง พบว่าการตากด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมแอปเปิลสไลด์มีความชื้นร้อยละ 14.13 จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 87.32 ในขณะที่การทำแห้งด้วยการตากแดดแอปเปิลสไลด์มีความชื้นร้อยละ 21.52 ทั้งนี้เนื่องจากการตากแดดมีอัตราการทำให้แห้งที่ต่ำกว่าระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

Hossain และ Bala (2007) ทดลองใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมในการทำแห้งพริกสดสีแดงและสีเขียวเปรียบเทียบกับการตากแดด เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง สีและความเผ็ดของพริกหลังจากการทำแห้งด้วยสองวิธีข้างต้น พบว่าสามารถอบพริกได้ครั้งละ 80 กิโลกรัม การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมช่วยลดระยะเวลาการทำแห้งในพริกแดงและพริกเขียวได้โดยใช้เวลาในการทำแห้ง 20 และ 22 ชั่วโมงตามลำดับ ในขณะที่การตากแดดใช้เวลา 32 และ 35 ชั่วโมงตามลำดับ และพบว่าพริกแดงและพริกเขียวที่อบด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมมีค่าสีและค่าความเผ็ดที่ดีกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ

ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (แสดงดังภาพที่ 7) อาศัยหลักการเรือนกระจกเมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ส่องผ่านมายังกระจกเข้าไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่วางไว้ด้านใน จะเกิดการดูดกลืนแล้วเปลี่ยนเป็นความร้อน โดยที่วัสดุภายในโรงเรือนจะแผ่รังสีอินฟราเรดให้แก่ผลิตภัณฑ์ แต่ไม่สามารถแผ่ผ่านออกมาได้ทำให้อากาศในเรือนกระจกร้อนขึ้นและเกิดการถ่ายเทความร้อนให้แก่ผลิตภัณฑ์ โดยอุณหภูมิของระบบอบแห้งนี้อยู่ระหว่าง 40-60 องศาเซลเซียส

Janjai และคณะ (2009) ทำการศึกษาการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกในการทำแห้งเนื้อลำไยและกล้วยตาก พบว่าอุณหภูมิภายในเครื่องอบอยู่ระหว่าง 31-58 องศาเซลเซียส และ 30-60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าอัตราการทำให้แห้งของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีอัตราการทำให้แห้งที่สูงกว่าการตากแดด ทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งน้อยกว่าโดยในการอบแห้งเนื้อลำไยสามารถลดระยะเวลาการทำแห้งจากการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 5-6 วัน เหลือ 3 วัน และการทำแห้งกล้วยตากสามารถลดระยะเวลาการทำแห้งจากการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 5-6 วัน เหลือระยะเวลาการทำแห้ง 3 วัน



ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก
ที่มา: เสริม (2555)

Janjai และคณะ (2011) ศึกษาการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในประเทศลาวเพื่ออบกล้วย พริก และเมล็ดกาแฟ พบว่าสามารถอบกล้วยได้ครั้งละ 1,000 กิโลกรัม พริกสดครั้งละ 300 กิโลกรัม และเมล็ดกาแฟครั้งละ 2,000 กิโลกรัม โดยการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งด้วยการตากแดดตามธรรมชาติ โดยใช้เวลา 7, 5 และ 4 วัน ตามลำดับ เหลือระยะเวลาในการทำแห้ง 5, 3 และ 2 วัน ตามลำดับ

Kaewkiew และคณะ (2012) ทำการศึกษาการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (ขนาด 8.00x20.00 เมตร) ในการทำแห้งพริก พบว่าสามารถอบพริกได้ครั้งละ 500 กิโลกรัม ใช้ระยะเวลาในการทำแห้ง 3 วันทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 9 ในขณะที่การตากแดดใช้ระยะเวลาในการทำแห้ง 5 วัน

2.5 จลนพลศาสตร์การทำแห้ง (drying kinetic)

จลนพลศาสตร์มีประโยชน์ต่อการทำนายปริมาณความชื้น หรือระยะเวลาในการอบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นเครื่องมือสำคัญในการออกแบบระบบการอบแห้ง เนื่องจากสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสาร และความชื้นที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งตลอดจนการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ ได้ดี

การถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการอบแห้งจะเกิดขึ้นเกือบพร้อม ๆ กัน การถ่ายเทมวลในที่นี้คือการเคลื่อนย้ายความชื้นจากภายในวัสดุออกมาที่ผิวภายนอกวัสดุ แล้วความชื้นที่ผิววัสดุจะระเหยกลายเป็นไอสู่บรรยากาศเพราะความแตกต่างของความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำในอากาศกับ

ไอน้ำที่พื้นผิวของวัสดุที่กำลังอบแห้ง พฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุใด ๆ สามารถอธิบายได้ด้วย จลนพลศาสตร์การอบแห้ง (drying kinetics) ซึ่งมีประโยชน์ต่อการทำนายปริมาณความชื้น หรือ ระยะเวลาในการอบแห้ง

อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) คือปริมาณของน้ำที่เหลืออยู่ภายในวัสดุที่กำลังอบแห้งเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่อยู่ภายในวัสดุซึ่งสามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่ง ๆ สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการได้ว่า

$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{(M_0 - M_{eq})} \quad (1)$$

เมื่อ M คือ ความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใด (%d.b)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%d.b)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (%d.b)

ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, M_{eq}) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษากระบวนการอบแห้งโดยเฉพาะการศึกษาระยะเวลาการอบแห้ง (drying period) เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งของการอบแห้งกับความชื้นสมดุลของวัสดุคือการวัดความเป็นไปได้หรือแรงขับเคลื่อนไอน้ำระหว่างวัสดุกับอากาศแวดล้อม นอกจากนี้ความชื้นสมดุลยังมีความสำคัญต่อการผสม (mixing) การบรรจุ (packaging) และการเก็บรักษา (storage) ผลผลิตเกษตร เนื่องจากวัสดุทางการเกษตรเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและเต็มไปด้วยความชื้น การแลกเปลี่ยนความชื้นจะเกิดขึ้นระหว่างตัววัสดุเองกับสิ่งแวดล้อมจนกว่าวัสดุจะถึงจุดความชื้นสมดุลซึ่งเป็นสภาพที่ไม่มีการเพิ่มหรือสูญเสียความชื้นอีกต่อไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งหรือรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งมีความสำคัญในการออกแบบการอบแห้งที่เหมาะสมในการหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวฮางอกได้ ใช้สมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล (empirical equation) ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยใช้สมการทำแห้งชั้นบางของ Newton, Page, Modified page, Henderson และ Pabis และ Logarithmic

พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการพิจารณา คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาความแม่นยำของสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้ง ถ้าค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก และค่า RMSE จะเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงค่าความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลอง ถ้ามีค่าต่ำแสดงว่าการทำนายของแบบจำลองมีความคลื่อนที่ต่ำด้วย ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวคำนวณได้ตามสมการที่ 2 และ 3 (Page, 1949)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n MR_{exp} \times MR_{pre}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n MR_{exp}^2)(\sum_{i=1}^n MR_{pre}^2)}} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pre})^2}{N}} \quad (3)$$

เมื่อ MR_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุที่ได้จากการทดลอง

MR_{pre} คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนค่าสังเกต

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

Cihan และคณะ (2007) ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชั้นบางในการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนไหลผ่านผิวหน้าตัวอย่าง กำหนดอุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที โดยการนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาหาความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง 10 แบบ จากการทดลองพบว่า แบบจำลอง Midilli เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งข้าวเปลือกได้ดีที่สุด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hacıhafzoglou และคณะ (2007) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำแห้งข้าวเปลือก โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง 5 ระดับ ได้แก่ 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 ระดับ ได้แก่ 1.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองพบว่า แบบจำลอง Midilli เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งข้าวเปลือกได้ดีที่สุด

2.6 อิทธิพลของการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าว

การทำแห้งเป็นหนึ่งในขั้นตอนการผลิตข้าวฮางอกเพื่อลดความชื้นในเมล็ดข้าวให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งขั้นตอนในการทำแห้งนี้จะส่งผลให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวหอมนิล เช่น สารประกอบฟีนอลทั้งหมด กาบา และแอนโทไซยานินมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้อิทธิพลในการทำแห้ง เช่น อุณหภูมิ หรือความเร็วลม อาจส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ หรือคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าว แสดงรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวดังนี้

2.6.1 อิทธิพลของการทำแห้งต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

สารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวหอมนิลเป็นองค์ประกอบหลักที่จัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยจะพบว่าการทำแห้งส่งผลต่อปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกในข้าวหอมนิล

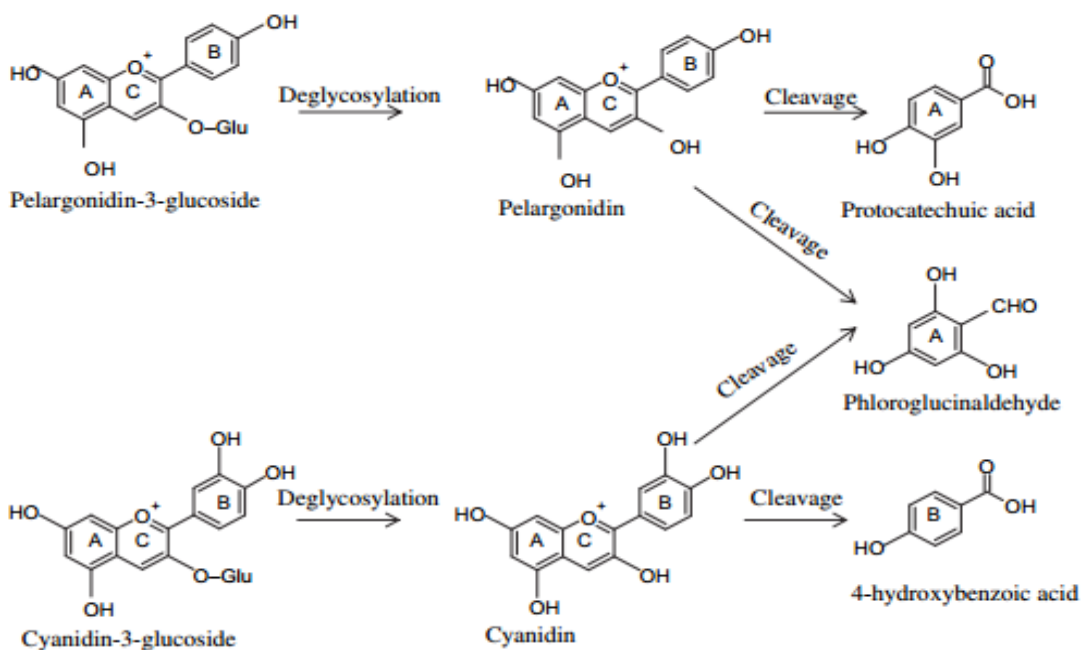
กรรณิการ์ และคณะ (2559) ศึกษาอิทธิพลร่วมของสองปัจจัยในการผลิตข้าวฮางอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้แก่ การเตรียมข้าวฮางก่อนการอบแห้ง และชนิดของเครื่องอบแห้ง ต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ผลการทดลองพบว่า ปัจจัยร่วมที่ศึกษามีอิทธิพลต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ข้าวฮางอกที่เตรียมโดยการแช่เยือกแข็งแล้วนำไปอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุด ปริมาณ 115.51 มิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่าง เนื่องจากการแช่เยือกแข็งและการทำแห้งด้วยอินฟราเรดช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

กฤตนิย และชัยรงค์ (2556) ศึกษาวิธีการทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันในการทำแห้งข้าวเปลือกอกพันธุ์พิษณุโลก 2 โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 110-150 องศาเซลเซียส พบว่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวอ้างอิง โดยมีค่าร้อยละการยับยั้งของ DPPH อยู่ในช่วง 78.11 - 80.90% และมีปริมาณ FRAP อยู่ในช่วง 26.86 - 27.92 ไมโครโมลาร์ของไอโรออนซัลเฟตต่อกรัมตัวอย่าง

2.6.2 อิทธิพลของการทำแห้งต่อแอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่เสื่อมสลายได้ง่ายเนื่องจากอุณหภูมิ อัตราการเสื่อมสลายของแอนโทไซยานินจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้น ความร้อนทำให้แอนโทไซยานินเสื่อมสลายด้วยการเปลี่ยนโครงสร้าง โดยการเปิดออกของวงแหวน pyrylium ทำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ chalcone และการสลายตัวของอะโกลโคนเป็นขั้นแรกของการสลายตัวของแอนโทไซยานิน เกิดอนุพันธ์เป็น coumarin จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ (ยูพาพร, 2547) แสดงกลไกการย่อยสลายดังภาพที่ 8

Norkaew และคณะ (2017) ศึกษาผลของการทำแห้งหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวหอมนิล ด้วยวิธีการทำแห้ง 2 วิธี คือการตากแดด และการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 52 และ 9 ชั่วโมงตามลำดับ ปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกหอมนิลไม่เกินร้อยละ 14 จากผลการทดลองพบว่า วิธีที่ใช้ในการทำแห้งส่งผลต่อปริมาณแอนโทไซยานินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การทำแห้งด้วยการตากแดด และการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดมีปริมาณแอนโทไซยานินเท่ากับ 1,984 และ 1,691 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่าง ตามลำดับ



ภาพที่ 8 กลไกการย่อยสลายด้วยความร้อนของแอนโทไซยานิน
 ที่มา : Patras และคณะ (2010)

2.6.3 อิทธิพลของการทำแห้งต่อกาบ

สารกาบที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวที่เพิ่มขึ้นมาจากกระบวนการงอกสามารถทนต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งได้สูง จึงทำให้ยังคงคุณสมบัติของข้าวฮางอกไว้ได้ เทวีกา และวรรณช (2554) ศึกษาผลของการอบแห้งแบบภาคในการทำแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ทำแห้งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกาบ การทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีปริมาณกาบสูงที่สุดปริมาณ 12.15 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม

Chungcharoen และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 3.5 เมตรต่อวินาที การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้สารกาบามีปริมาณที่ลดลงเล็กน้อยในทุกๆ สภาวะ เป็นไปในทางเดียวกันกับ Srisang และคณะ (2009) ศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 90-150 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณสารกาบ

กรรณิการ์ และคณะ (2559) ศึกษาอิทธิพลร่วมของสองปัจจัยในการผลิตข้าวฮางอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้แก่ การเตรียมข้าวฮางก่อนการอบแห้ง และชนิดของเครื่องอบแห้ง ต่อปริมาณกาบ โดยเตรียมข้าวฮางอกก่อนงอกแบบแช่เย็นและแช่เยือกแข็ง และทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคและแบบอินฟราเรด ผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของสองปัจจัยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง

ปริมาณของกาบา แต่การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดมีปริมาณกาบาสูงที่สุดปริมาณ 23.37 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง

2.6.4 อิทธิพลของการทำแห้งต่อคุณภาพด้านการหุงต้ม

การหุงต้มมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของเมล็ดข้าว ซึ่งมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องส่งผลต่อคุณภาพด้านการหุงต้ม เช่น องค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดข้าว อุณหภูมิที่ใช้การอบแห้งข้าวเปลือก ระยะเวลาในการเก็บรักษา เป็นต้น โดยการประเมินคุณภาพของข้าวด้านการหุงต้ม ได้แก่ อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าว ระยะเวลาในการหุงต้ม การอมน้ำของข้าวสุก และเนื้อสัมผัส

Jaiboon และคณะ (2011) ศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ต่อคุณสมบัติด้านการหุงต้ม และลักษณะเนื้อสัมผัสในข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 โดยกำหนดอุณหภูมิในการทำแห้ง 4 ระดับ ได้แก่ 90, 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า การอมน้ำของเมล็ดข้าวสุก และปริมาณของแข็งที่สูญเสียไปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอะไมโลเพคตินเมื่อถูกความร้อนจึงทำให้อะไมโลเพคตินแตกออกเกิดเจลาตไนซ์เซชัน เมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้อะไมโลเพคตินไม่สามารถจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ จึงทำให้เจลมีลักษณะเป็นของเหลว ดังนั้นข้าวเหนียวที่ผ่านการเกิดเจลาตไนซ์แล้ว เจลของอะไมโลเพคตินจึงสามารถดูดน้ำกลับ และละลายน้ำได้มากขึ้น แต่การทำแห้งที่อุณหภูมิไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็ง และความเหนียว สอดคล้องกับการศึกษาของ Cheevitsopon และ Noomhorm (2014) ศึกษาการทำแห้งที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในการผลิตข้าวฮางอกจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งไม่ส่งผลต่อค่าการอมน้ำของเมล็ดข้าว ปริมาณของแข็งที่สูญเสีย และค่าความแข็ง

Srisang และคณะ (2011) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง 2 วิธี คือการทำแห้งลมร้อน และการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่อุณหภูมิ 2 ระดับ ได้แก่ 130 และ 150 องศาเซลเซียสต่อค่าความแข็ง และความเหนียวของข้าวกล้องงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการทำแห้งไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็ง และความเหนียว พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าความแข็งลดลงส่งผลให้ค่าความเหนียวลดลงด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมนิลที่เก็บเกี่ยว 95-100 วันหลังจากวันที่หว่านเมล็ด โดยซื้อจากเกษตรกรตำบลบางไทรป่า อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐมซื้อมา 2 ครั้งสำหรับการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2 ข้าวเปลือกที่ซื้อมาถูกนำมาทำความสะอาดด้วยการผัดเพื่อกำจัดเศษฟางและสิ่งสกปรก และกำจัดข้าวเมล็ดลีบด้วยเครื่องเป่าลม ก่อนเก็บรักษาในถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร ที่อุณหภูมิ 31 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 71.71 ± 6.67 โดยใช้ยากำจัดมอดห่อด้วยผ้าขาวบางวางไว้ก้นถังเพื่อกำจัดและป้องกันมอด จนกระทั่งทำการทดลอง

ตารางที่ 2 รายละเอียดการซื้อข้าวเปลือกสำหรับแต่ละชุดการทดลอง

ครั้งที่ซื้อวัสดุ	เดือนที่ซื้อข้าวเปลือก	ปริมาณ (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง	ชุดการทดลอง	สถานที่ทำการทดลอง
1	กุมภาพันธ์ 2557	50	มิถุนายน - ตุลาคม 2557	อิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด (3.4.4)	มหาวิทยาลัยไฮเอนไฮม์ เมืองสตูดการ์ต ประเทศเยอรมัน
2	มกราคม 2558	75	มกราคม - กุมภาพันธ์ 2558	อิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (3.4.6)	มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย

3.2 สารเคมี

1. น้ำกลั่น (distilled water, Vunique, Thailand)
2. กรดอะซิติก (acetic acid, RCL Labscan, Thailand)
3. เมทานอล เกรด AR (methanol, RCL Labscan, Thailand)
4. เมทานอล เกรด HPLC (methanol, RCL Labscan, Thailand)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, Merck, Germany)
6. กรดแกลลิก (gallic acid, Sigma-Aldrich, Germany)

7. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, QR&C, New Zealand)
8. กรดบอแรกซ์ (borax acid, Ajax Finechem, Australia)
9. โพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride, Ajax Finechem, Australia)
10. โซเดียมอะซิเตท (sodium acetate, Ajax Finechem, Australia)
11. สารมาตรฐานกาบา (γ -aminobutyric acid assay \geq 99%, Sigma-Aldrich, Japan)
12. สารอนุพันธ์ 2-ไฮดรอกซี-1-แนฟทอลดีไฮด์ (2-hydroxy-1-naphthaldehyde Sigma-Aldrich, Germany)
13. สารมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside เกรด HPLC (Kuromanin Chlorid assay \geq 95%, Sigma Aldrich, Germany)
14. โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, Ajax Finechem, Australia)
15. ไอร์ออน (II) ซัลเฟต (ferrous sulphate, Chem-supply Pty, Australia)
16. 2, 4, 6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ, Fluka Sigma-Aldrich, Switzerland)
17. 2, 2 diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH, Fluka Sigma-Aldrich, Switzerland)
18. กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid, RCL Labscan, Thailand)
19. อะซิโตนไทรล์ (acetonitrile, RCL Labscan, Thailand)
20. คาร์ลฟิชเชอร์รีเอเจนต์ (Karl Fischer reagent) (Fluka Sigma-Aldrich, Germany)
21. สารละลายโฟลีน ไฮโอแคลทู (Folin-Ciocalteu's phenol reagent) (Merck, Germany)
22. เปปโตน (peptone water) (Merck, Germany)
23. Plate count agar (Merck, Germany)
24. Potato dextrose agar (Merck, Germany)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และแบบเวียนกระแส (ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร) พัฒนาโดย ศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน
2. เครื่องอบแห้งแบบถาด Hohenheim type high precision laboratory tray dryer (Agricultural Engineering in the Tropics and Subtropics, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany)
3. เครื่องชั่งน้ำหนักหยากรุ่น 2 ตำแหน่ง (Sartorius AG, Inc., Germany)
4. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง (รุ่น BP 221S, Sartorius AG, Germany)
5. เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (rotronic hygrolab รุ่น Hygromer Handheld A2, Rotronic AG, Switzerland)

6. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวความดันสูง (Shimadzu model RF-20A prominence PDA, degassing unit (DGU-20A3R); LC-20AD, heating box model T-120D, Japan)
7. เครื่องปั่นผสม (รุ่น 9 Moulinex, France)
8. เครื่องปิดผนึกระบบสุญญากาศ (บริษัท WITT – GASTECHNIK, Germany)
9. เครื่องเขย่าสาร (รุ่น Vortex-Genie2, Scientific Industries, USA)
10. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น GENESYS10S UV-Vis, Thermo Fisher Scientific, USA)
11. ตู้อบลมร้อน (Binder, Germany)
12. คอลัมน์ Luna 5 ไมโครเมตร C18 (2) 100 อังสตรอม ขนาด 250x4.6 มิลลิเมตร (Phenomenex, Torrance, USA)
13. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (รุ่น PHM 210 Metro Lab. Co.Ltd., France)
14. เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (รุ่น RV 10 control auto, IKA®, Malaysia)
15. เครื่องกะเทาะเปลือกข้าว (รุ่น HU-35, S.U. Intertrade (1999), Thailand)
16. เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (รุ่น TA-X T2i, Stable Micro systems, England)
17. เครื่องเขย่าสารที่อุณหภูมิห้อง (รุ่น LS 500, Gerhardt, Germany)
18. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น MEM-1 WNB7, Memmert, Germany)
19. เครื่องบรรจุแบบสุญญากาศ (รุ่น Multivac, Sepp Hagenmuller, Germany)
20. เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว (รุ่น I-1, ห้างหุ้นส่วนจำกัด แจ็กเซ่งฮวด, ประเทศไทย)
21. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ (รุ่น SS-325, TOMY SEIKO, Japan)
22. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (CTS, Germany)
23. อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและจุลินทรีย์ของข้าวหอมนิล

นำข้าวเปลือกพันธุ์หอมนิลทั้ง 2 ชุดการทดลองมาศึกษาคุณสมบัติทางเคมีโดยใช้ข้าวทั้งเปลือกเพื่อวิเคราะห์ ปริมาณความชื้น ค่าเอนโทรปีแอกติวิตี้ ใช้ข้าวที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าวเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณแอนโทไซยานิน และปริมาณกาบา โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

3.4.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

- ปริมาณความชื้น (moisture content; MC)

ในการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกหอมนิลสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ซึ่งทำการศึกษาที่มหาวิทยาลัยโชนไฮม์ เมืองสตุดการ์ต ประเทศเยอรมัน วิเคราะห์โดยวิธีการไตเตรท Karl Fischer (Karl Fischer titration) (Insengard, 2006) โดยการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือก ประมาณ 1 กรัม จากนั้นทำการไตเตรทกับสารละลายคาร์ลฟิชเชอร์ จนกระทั่งถึงจุดยุติซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 1) ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกหอมนิลสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ใช้วิธีมาตรฐานด้วยตู้อบลมร้อน (AOAC, 1999) โดยสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนการทำแห้งทั้งหมด ประมาณ 3-5 กรัม ซึ่งลงในกระป๋องอลูมิเนียม (moisture can) ที่ทราบน้ำหนักแล้วจากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างกับภาชนะ นำภาชนะอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างมาอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 2) นำภาชนะอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

- ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, a_w)

สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกหอมนิลประมาณ 2-4 กรัม บรรจุลงในถ้วยพลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่าง แล้ววางไว้ในเครื่องวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งตัวเลขแสดงผลคงที่ (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 3) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

- ปริมาณสารกาบา (GABA content)

วิเคราะห์ปริมาณสารกาบาด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวความดันสูง (high performance liquid chromatography, HPLC) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Khunhawar และ Rajper (2003) นำตัวอย่างข้าวหอมนิลที่ทำการกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม จากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวที่ปั่นละเอียดแล้ว จำนวน 5 กรัม นำมาสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 80 (สกัดซ้ำ 2 ครั้ง) จากนั้นนำไประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปรับปริมาตรของสารละลายในขวดปรับปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารสกัดที่ได้มา 1 มิลลิลิตร ผสมกับสาร 2-hydroxy-1-naphthaldehyde derivative (0.75% ในเมทานอล) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 8.0 ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร นำไปอุ่นด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 80 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรเป็น 5 มิลลิลิตรด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80 สภาวะที่ใช้งานสำหรับเครื่อง HPLC (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 4)

- ปริมาณแอนโทไซยานิน (anthocyanins content)

วิเคราะห์ปริมาณ monomeric anthocyanins โดยดัดแปลงจากวิธีของ Lee และคณะ (2005) โดยการนำตัวอย่างข้าวหอมนิลที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าวมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม จากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวที่ปั่นละเอียดประมาณ 1.0 กรัม นำมาสกัดด้วยสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 ต่อกรดไฮโดรคลอริก ในอัตราส่วน 98 ต่อ 2 ปริมาตร/ปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตรด้วยสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 ต่อกรดไฮโดรคลอริก ในอัตราส่วน 98 ต่อ 2 ปริมาตร/ปริมาตร นำสารสกัดที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานิน ทำการเจือจางสารสกัดด้วยบัฟเฟอร์ pH = 1.0 และเจือจางด้วยบัฟเฟอร์ pH = 4.5 โดยเจือจางตัวอย่างในอัตราส่วนสารสกัดต่อบัฟเฟอร์ที่ 1:10 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 5) ingsให้เข้าสู่สมดุลง่ายน้อย 15 นาที่วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 และ 700 นาโนเมตร แล้วนำมาคำนวณปริมาณ monomeric anthocyanins โดยแสดงค่าเทียบเป็น cyanidin-3-glucoside equivalents (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม สารแห้ง) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวความดันสูง (high performance liquid chromatography, HPLC) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Brown และ Shipley (2011) นำสารสกัดตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้คอลัมน์ C18 และใช้ cyanidin-3-glucoside เป็นสารมาตรฐาน โดยรายงานค่าเป็นมิลลิกรัม cyanidin-3-glucoside ต่อ 100 กรัมสารแห้ง (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 6) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

- ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content; TPC)

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด โดยดัดแปลงจาก Zhou และคณะ (2014) นำตัวอย่างข้าวหอมนิลที่ทำการกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าวมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม นำมาสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล โดยสารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม phenylpropanoid ที่มีโครงสร้างหลักประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก แทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ส่วนมากมีขั้วและละลายได้ดีในตัวทำละลายจำพวกแอลกอฮอล์ โดยการชั่งน้ำหนักข้าวที่ปั่นละเอียดประมาณ 5 กรัม เติมเมทานอลปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไประเหยด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศแบบหมุน ปรับปริมาตรที่แน่นอนด้วยเมทานอล จากนั้นนำตัวอย่างสารสกัดมาเจือจางที่ 1/10 เท่า ปิเปตสารสกัดปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Folin Ciocalteu ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร เขย่าทิ้งไว้ 5 นาที ในที่มืด เติม Na_2CO_3 ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 (มวล/ปริมาตร) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ในที่มืด 2 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 725 นาโนเมตร จากนั้นนำมาเทียบหาปริมาณสารฟีนอลิกจากกราฟมาตรฐาน โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 7) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

- การหาความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant capacity)

ในการวิเคราะห์หาความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ วิเคราะห์โดยใช้ 2 วิธี คือ วิธี DPPH และ FRAP assay สำหรับวิธี DPPH ดัดแปลงมาจาก Brand-Williams และคณะ (1995) โดยปีเปตสารละลายตัวอย่างที่สกัดที่ได้ (วิธีเดียวกันกับการหาสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร (ทำการเจือจางตัวอย่าง 10 เท่า) เติมสารละลาย DPPH (2,2 diphenyl-1-picrylhydrazyl) ที่ความเข้มข้น 6×10^{-5} โมลาร์ นำไปเก็บในที่ที่ไม่มีแสงเพื่อทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณเป็นมิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อ 100 กรัมสารแห้ง โดยเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox ที่ทำปฏิกิริยากับ DPPH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 8)

ในการวิเคราะห์หาความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP assay ดัดแปลงมาจาก Benzie และ Strain (1996) โดยปีเปตตัวอย่างที่สกัดด้วยวิธีเดียวกับการหาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด มาทำการเจือจาง 10 เท่าด้วยเมทานอล นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย FRAP reagent ที่ไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณเป็น $\mu\text{M FeSO}_4$ ต่อ 100 กรัม สารแห้ง โดยเทียบกับสารมาตรฐานของไอร์ออน (II) ซัลเฟต ที่ทำปฏิกิริยากับ FRAP reagent ที่ความเข้มข้นต่างๆ ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 9)

3.4.1.2 คุณสมบัติทางจุลินทรีย์

ซึ่งตัวอย่างข้าวหอมนิลแบบแห้งเปลือกปริมาณ 10 กรัม นำมา homogenized ในสารละลายเปปโทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ปริมาณ 90 กรัม โดยใช้ stomacher นาน 60 วินาที น้ำหนักต่อปริมาตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง จากนั้นทำการเจือจางตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 1:10, 1:100 และ 1:1000 จากนั้นดูดสารละลายที่เจือจางปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยการหาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดจะทำการเทอาหาร PCA ประมาณ 20 มิลลิลิตรลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นหมูนวนจานอาหาร ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง เพื่อนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด การหาจำนวนยีสต์และราทั้งหมดทำการเทอาหาร PDA ประมาณ 20 มิลลิลิตร จากนั้นหมูนวนจานอาหาร ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ± 2 ชั่วโมง และ 120 ± 2 ชั่วโมง (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 10) หลังจากบ่มจานเพาะเชื้อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ตรวจนับจำนวนโคโลนีบนจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนีอยู่ระหว่าง 30-300 โคโลนี หาค่าจำนวนโคโลนีเฉลี่ยจากทั้งสองจานเพาะเชื้อรายงานตรวจนับในหน่วยจำนวนโคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (CFU/g)

3.4.2 กระบวนการผลิตข้าวฮางอก

กระบวนการผลิตข้าวฮางอกทั่วไปในการศึกษานี้ดัดแปลงจากกรรมวิธีการผลิตที่ผลิตกันทั่วไปในปัจจุบัน โดยการนำข้าวเปลือกหอมนิลมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาเพื่อกำจัดเศษฝุ่น

ดิน หยั่ว ที่ติดมาในระหว่างการเก็บเกี่ยว และเพื่อกำจัดข้าวเมล็ดลีบออกไป ล้างจนไม่มีข้าวลอยอยู่เหนือน้ำ จากนั้นนำไปแช่ด้วยน้ำประปา เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ 1:3 (น้ำหนักต่อปริมาตร) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดแล้วนำขึ้นมาล้างด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาบ่มโดยกำหนดการงอกของจมูกข้าวให้มีความยาว 0.5-1.0 มิลลิเมตร ใช้เวลา 14 ชั่วโมง จากนั้นนำข้าวฮางงอกมาผ่านการนึ่งเพื่อเป็นการหยุดการงอกและเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิตและสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ที่ประเทศเยอรมันจะควบคุมอุณหภูมิในการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส โดยเก็บไว้ในเครื่องอบแห้งแบบถาดที่ควบคุมอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิในการบ่มข้าวที่ 35 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น แสดงดังภาพที่ 9 ทำการนึ่งข้าวด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าควบคุมโดยการเติมน้ำประปา 1 ลิตรต่อการนึ่ง 1 รอบ ทำการนึ่งด้วยเครื่องนึ่งไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาที



(ก)



(ข)

ภาพที่ 9 เครื่องอบแห้งแบบถาด (ก) ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (ข)

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย ทำการแช่และบ่มข้าวในถังที่อุณหภูมิห้อง (33 ± 4 องศาเซลเซียส) ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 73.29 ± 5.94 และทำการนึ่งโดยใช้ซึ่งนึ่งโดยการเติมน้ำประปา 4 ลิตรต่อการนึ่ง 1 รอบ นำตัวอย่างวางบนซึ่งที่มีผ้าขาวบางรองอยู่โดยใช้ซึ่งนึ่งชั้นเดียวตั้งบนเตาแก๊สที่เปิดไฟแรงสุด จับเวลาจนครบ 30 นาที ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดและอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 10

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาอิทธิพลของ
สภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด

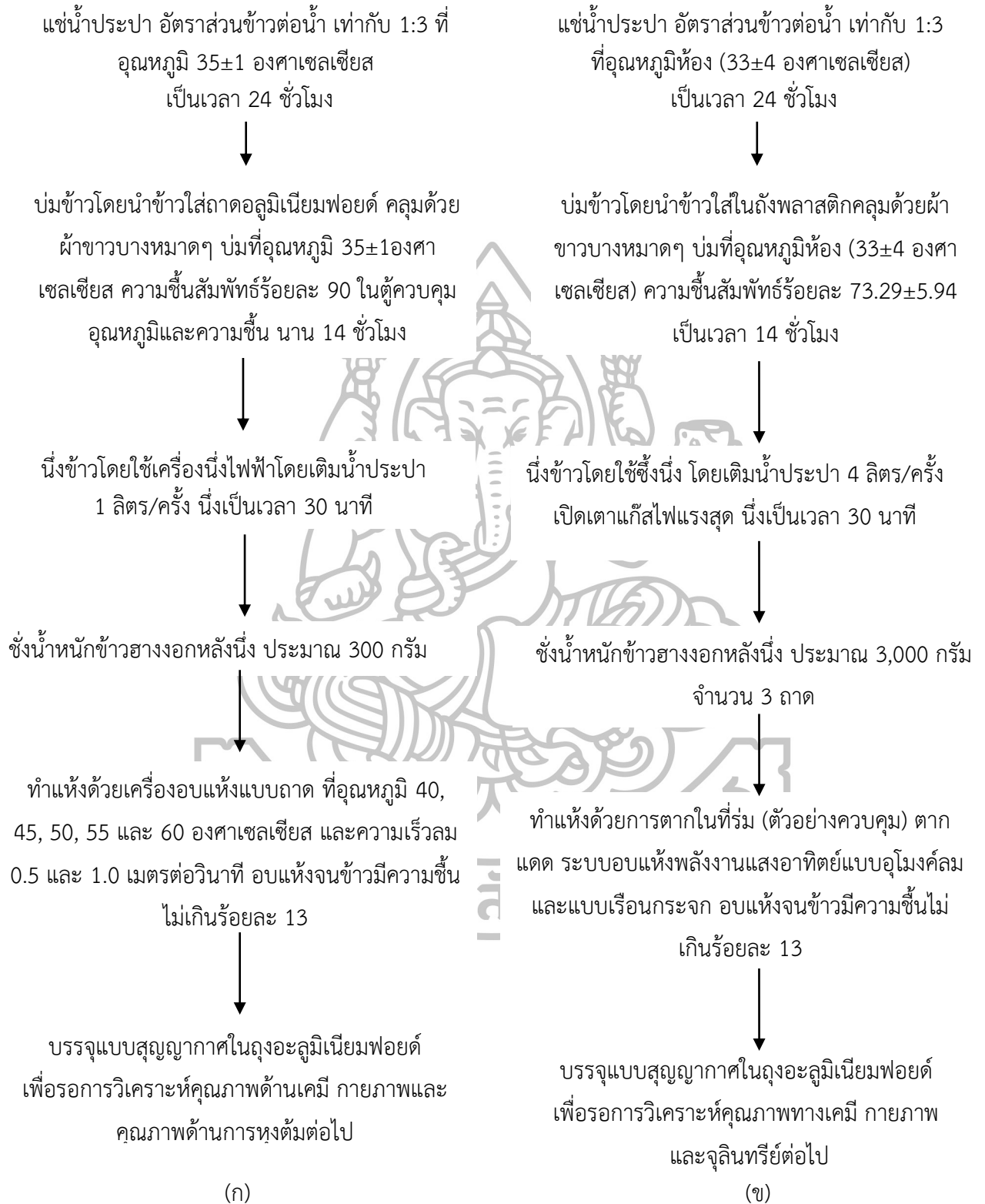
การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาอิทธิพล
ของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงาน
แสงอาทิตย์

ซึ่งข้าวเปลือก 500 กรัม ล้างทำความสะอาด
ด้วยน้ำประปา



ซึ่งข้าวเปลือก 15,000 กรัม ล้างทำความสะอาดด้วย
น้ำประปา





ภาพที่ 10 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ ถาด (ก) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ (ข)

3.4.3 ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิตต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวหอมนิลฮางอก

ในการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิตต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวหอมนิลฮางอก ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิต ได้แก่ ขั้นตอนการแช่ การบ่ม และการนึ่ง ของข้าวหอมนิลฮางอก ต่อปริมาณกาบา แอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยการสุ่มตัวอย่างข้าวแต่ละขั้นตอนจากตัวอย่างสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลาดตามการผลิตข้อ 3.4.2 ขั้นตอนละประมาณ 30 กรัม จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณกาบา แอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ตามข้อ 3.4.1 ทำการทดลอง 20 ซ้ำ

3.4.4 ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลาดต่อพฤติกรรมการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอก

ในการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลาดต่อพฤติกรรมการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอกนี้ ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง และความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้ง ทำการแปรค่าอุณหภูมิที่ 5 ระดับ ได้แก่ 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 ระดับ ได้แก่ 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที กำหนดให้ความชื้นจำเพาะคงที่ที่ 25 กรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ทำการทดลองทำแห้ง 2 ซ้ำ โดยนำข้าวเปลือกหอมนิลที่เตรียมจากข้อ 3.4.2 มาทำแห้งแบบชั้นบาง (thin layer) โดยนำข้าวมาเกลี่ยบนตะแกรงให้เป็นชั้นบางไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร เว้นระยะจากขอบบน และล่างประมาณ 1 นิ้ว แสดงดังภาพที่ 11 ทำแห้งในโหมด over- และ under flow ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลาด high precision laboratory tray dryer (ภาพที่ 12) โดยทำแห้งจนกระทั่งปริมาณความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 13 บันทึกน้ำหนักแบบอัตโนมัติ ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส บันทึกน้ำหนักทุกๆ 15 นาที ในขณะที่การทำแห้งที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส บันทึกน้ำหนักทุกๆ 10 นาที ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้ง แสดงดังตารางที่ 3



ภาพที่ 11 การเกลี่ยข้าวก่อนการอบแห้ง



ภาพที่ 12 เครื่องอบแห้งแบบถาด high precision laboratory tray dryer

ตารางที่ 3 สภาวะที่ใช้ในการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกด้วยเครื่องแห้งแบบถาด high precision laboratory tray dryer กำหนดให้ความชื้นจำเพาะคงที่ที่ 25 กรัม/น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง

สภาวะการทำแห้ง		
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วลม (m/s)	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศชื้นในห้องอบ (%)
40	0.5	50.8
	1.0	50.8
45	0.5	39.1
	1.0	39.1
50	0.5	30.4
	1.0	30.4
55	0.5	23.8
	1.0	23.8
60	0.5	18.8
	1.0	18.8

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์อัตราการแห้งระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลา และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งข้าวฮางอก ได้แก่

สมการของนิวตัน (Newton) เพจ (Page) โมดิฟายด์เพจ (Modified Page) และ ล็อกกาธิทึมมิก (Logarithmic) แสดงสมการดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายพฤติกรรมการทำแห้งในข้าวฮางงอก

ลำดับที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
1	Newton	$MR=e^{-kt}$	Mujumdar (1987)
2	Page	$MR=e^{-kt^n}$	Page (1949)
3	Modified Page	$MR=e^{-(kt)^n}$	White และคณะ (1981)
4	Logarithmic	$MR=a e^{-kt}+c$	Togrul และ Pehlivan (2002)

3.4.5 ศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวหอมนิลฮางงอก

ในการศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวหอมนิลฮางงอกนี้ ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง และความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้ง ทำการแปรค่าอุณหภูมิที่ 5 ระดับ ได้แก่ 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 ระดับ ได้แก่ 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที กำหนดให้ความชื้นจำเพาะคงที่ที่ 25 กรัม/น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ตามข้อ 3.4.2 และมีขั้นตอนการทำแห้ง ตามข้อ 3.4.4 จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างข้าวหอมนิลฮางงอกมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ปริมาณสารกาบา ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ตามข้อ 3.4.1.1 คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณร้อยละต้นข้าว และปริมาณร้อยละข้าวหัก คุณภาพด้านการหุงต้ม ได้แก่ ระยะเวลาในการหุงต้ม อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก การอุ้มน้ำของเมล็ดข้าวสุก ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำข้าวสุก และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

- ปริมาณร้อยละต้นข้าว (Head rice yield)

ซึ่งข้าวหอมนิลฮางงอกที่ผ่านการทำแห้ง จำนวน 250 กรัม นำไปกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว จากนั้นนำไปตัดแยกเมล็ดด้วยเครื่องคัดขนาด โดยทำการคัดแยกด้วยเครื่องคัด

ขนาด 3 ครั้งเพื่อคัดข้าวที่มีเมล็ดเต็มที่มีความยาวตั้งแต่ 8-10 ส่วนของเมล็ดแสดงดังภาพที่ 12 จากนั้นนำมาคัดขนาดด้วยสายตาอีกรอบเพื่อให้ได้ขนาดตามที่กำหนด คำนวณเป็นร้อยละต้นข้าว แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 11 ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 13 ข้าวที่มีเมล็ดเต็มตั้งแต่ 8-10 ส่วน (ก) และข้าวที่มีเมล็ดหักตั้งแต่ 2.5-4.9 ส่วน (ข) ที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

- ปริมาณร้อยละข้าวหัก (Broken rice yield)

ซึ่งข้าวหอมนิลฮางอกที่ผ่านการทำแห้งในแต่ละสภาวะ จำนวน 250 กรัม นำไปกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว จากนั้นนำไปคัดแยกเมล็ดด้วยเครื่องคัดขนาด โดยทำการคัดแยกด้วยเครื่องคัดขนาด 3 ครั้ง เพื่อคัดข้าวที่มีเมล็ดหักตั้งแต่ 2.5 - 4.9 ส่วนของเมล็ด จากนั้นนำมาคัดขนาดด้วยสายตาอีกรอบเพื่อให้ได้ขนาดตามที่กำหนด คำนวณเป็นร้อยละข้าวหัก แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 13 ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

- ระยะเวลาในการหุงต้ม

วิเคราะห์ระยะเวลาในการหุงต้ม โดยดัดแปลงจากวิธีของ Juliano และ Bechtel (1985) ทำการซั่งข้าวฮางอกหลังการทำแห้งที่กะเทาะเปลือกออกแล้วด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว ใช้ข้าวที่กะเทาะเปลือกแล้วแบบเต็มเมล็ด จำนวน 2 กรัม เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 98 ± 1 องศาเซลเซียส ทำการชั่งตัวอย่าง 10 เมล็ด ทุก ๆ 3 นาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างเมล็ดข้าวที่ถูกชั่งมากดทับด้วยแผ่นกระจก นับจำนวนข้าวที่มีจุดโตขุนขาว ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข 13)

- อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก

วิเคราะห์อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก โดยดัดแปลงจากวิธีของ อรอนงค์ (2550) ทำการชั่งข้าวฮางอกหลังการทำแห้งที่กะเทาะเปลือกออกแล้วด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว ใช้ข้าวที่กะเทาะเปลือกแล้วแบบเต็มเมล็ด จำนวน 10 เมล็ด ทำการวัดความยาวของข้าวก่อนการหุง หลังจากนั้นนำไปผ่านการหุงต้มให้สุก โดยนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 98 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการสุ่มเมล็ดข้าวที่หุงสุกแล้วเพื่อวัดความยาวของข้าวสุกที่มีเมล็ดตรง จากนั้นคำนวณตามสูตรในภาคผนวก ข 14 ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

- การอุ้มน้ำของเมล็ดข้าวสุก

วิเคราะห์การอุ้มน้ำของเมล็ดข้าวสุก โดยดัดแปลงจากวิธีของ Oko และคณะ (2012) ทำการชั่งข้าวฮางอกหลังการทำแห้งที่กะเทาะเปลือกออกแล้วด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว ใช้ข้าวที่กะเทาะเปลือกแล้วแบบเต็มเมล็ด จำนวน 2 กรัม เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 98 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที หลังจากหุงสุกแล้วทำการเทน้ำออกจนบนกระดาษกรอง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักคำนวณกลับเป็นอัตราส่วน water uptake ratio ภาคผนวก ข 15

- ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำข้าวสุก

วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำข้าวสุก โดยดัดแปลงจากวิธีของ Oko และคณะ (2012) ทำการชั่งข้าวฮางอกหลังการทำแห้งที่กะเทาะเปลือกออกแล้วด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว ใช้ข้าวที่กะเทาะเปลือกแล้วแบบเต็มเมล็ด จำนวน 2 กรัม เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 98 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักของจานอาหารเลี้ยงเชื้อจذبที่น้ำหนักที่แน่นอน ทำการเทน้ำที่เหลือจากการหุงต้มข้าวที่สุกแล้วลงจานอาหารเลี้ยงเชื้อจذبที่น้ำหนักอีกครั้ง หลังจากนั้นนำไประเหยที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของแข็งที่แห้งแล้ว

- ความแข็งของข้าวสุก

วิเคราะห์ความแข็งของข้าวสุก โดยดัดแปลงจากวิธีของ Juliano และ Bechtel, (1985) ทำการชั่งข้าวฮางอกหลังการทำแห้งที่กะเทาะเปลือกออกแล้วด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว ใช้ข้าวที่กะเทาะเปลือกแล้วแบบเต็มเมล็ด จำนวน 2 กรัม เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 98 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ใช้หัววัด cylindrical probe P/25 จากนั้นวัดแบบ compression ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส ความเร็วก่อนการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการกดตัวอย่างลงไป 2 มิลลิเมตร วัดซ้ำ 5 ครั้ง ได้ค่าเนื้อสัมผัสเป็นค่าความแข็ง (hardness)

3.4.6 ศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพฤติกรรมกรทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางงอก

ในการศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพฤติกรรมกรทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางงอกนี้ ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งคือวิธีที่ใช้ในการทำแห้ง ได้แก่ การทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ทำการทำแห้งข้าวเปลือกหอมนิลที่เตรียมจากข้อ 3.4.2 โดยเกลี่ยข้าวให้เป็นชั้นบางๆ (thin layer) ความหนาไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร จำนวนอย่างละ 3 ถาด ถาดละ 1 กิโลกรัม ทำการทดลองทำแห้ง 3 ชั่วโมง โดยทำการอบแห้งดังภาพที่ 14 ทำแห้งจนกระทั่งปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวหอมนิลฮางงอกไม่เกินร้อยละ 13 บันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และน้ำหนักของข้าวฮางงอกที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการทำแห้งทุก ๆ 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการทำแห้งในที่ร่ม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์มาสร้างกราฟการทำแห้ง อัตราการทำแห้ง และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมกรทำแห้งที่เหมาะสมสำหรับข้าวฮางงอก โดยใช้สมการการทำแห้งชั้นบางของ Newton, Page, Modified page และ Logaritermic (ตารางที่ 4)



ก ข ค ง

ภาพที่ 14 การทำแห้งข้าวหอมนิลฮางงอกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (ก) ตากแดด (ข) ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (ค) ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (ง) ในที่ร่ม

3.4.7 ศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี ทางกายภาพและจุลินทรีย์ของข้าวหอมนิลฮางงอก

ในการศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี ทางกายภาพและจุลินทรีย์ของข้าวหอมนิลฮางงอกนี้ ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งคือวิธีที่ใช้ในการทำแห้ง ได้แก่ การทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ที่มีการเตรียมตัวอย่าง ตามข้อ 3.4.2 และมีขั้นตอนการทำแห้ง ตามข้อ 3.4.6 ทำแห้งจนกระทั่งปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวหอมนิลฮางงอกไม่เกินร้อยละ 13 จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างข้าวหอม

นิลฮางอกมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ปริมาณสารกา
บา ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสาร
ต้านอนุมูลอิสระ และคุณภาพด้านจุลินทรีย์ ตามข้อ 3.4.1 และคุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณ
ร้อยละต้นข้าว และปริมาณร้อยละข้าวหัก ตามข้อ 3.4.5

3.4.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด และระบบอบแห้ง
พลังงานแสงอาทิตย์ วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design: CRD ทำการ
ทดลองอบแห้งจำนวน 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of
Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดย
ใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป SPSS for Windows เวอร์ชัน 16.0



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 คุณสมบัติทางเคมีของข้าวเปลือกพันธุ์หอมนิล

ข้าวเปลือกหอมนิลที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณความชื้นร้อยละ 13 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 14 จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานสินค้าการเกษตร (สำนักงานมาตรฐานสินค้าการเกษตร, 2555) มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ 0.68 ซึ่งจะเป็นค่าที่ปลอดภัยจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และยีสต์ราในระหว่างการเก็บรักษา (ตารางที่ 5) สำหรับปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในข้าวหอมนิลที่ผ่านการกะเทาะเปลือกพบว่าปริมาณสารกาบาของข้าวหอมนิลที่กะเทาะเปลือกออกแล้วทั้งสองชุดการทดลองมีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่าประมาณ 4 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมสารแห้ง ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ วรมพร และคณะ (2555) ซึ่งรายงาน bahwa ข้าวเปลือกพันธุ์หอมนิลมีปริมาณกาบา 4.56 ± 1.13 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมสารแห้ง

ปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวเปลือกพันธุ์หอมนิลที่ทำการกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าวทั้งสองชุดการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการปลูกคนละปีจึงอาจส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีในข้าว โดยแอนโทไซยานินที่พบในข้าวหอมนิลมีค่าประมาณ 26 มิลลิกรัม cyaniding-3-glucoside ต่อ 100 กรัม สารแห้ง พบว่าผลการศึกษาสอดคล้องกับ Plaithe และคณะ (2013) ซึ่งรายงาน bahwa ข้าวหอมนิลมีปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด 19 มิลลิกรัม cyaniding-3-glucoside ต่อ 100 กรัม สารแห้ง และ Htwe และคณะ (2010) พบว่าปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดในข้าวหอมนิลเท่ากับ 29.77 ± 0.33 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมสารแห้ง

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวหอมนิลที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกแล้วของทั้งสองชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณ 127 มิลลิกรัมกรดแกลลิก ต่อ 100 กรัมสารแห้ง สอดคล้องกับค่าที่ได้จากงานวิจัย ที่พบว่าข้าวหอมนิลที่ปลูกในพื้นที่ต่างๆ กัน มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 86.26-272.07 มิลลิกรัมกรดแกลลิก ต่อ 100 กรัมสารแห้ง (Htwe และคณะ, 2010; Sadabpod, 2010) โดยสารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวหอมนิลเป็นรงควัตถุประเภทฟลาโวนอยด์ โดยเฉพาะกลุ่มแอนโทไซยานิน และสารประกอบฟีนอ เช่น กรดเฟอร์ูลิก กรดแกลลิก และกรดวานิลลิก เป็นต้น (Zhang และคณะ, 2015)

ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวหอมนิลที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกแล้วของทั้งสองชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH มีค่าประมาณ 19 มิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อ 100 กรัม สารแห้ง และค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP มีค่าประมาณ 1,243 ไมโครโมลาร์ของไอร์ออนซัลเฟต ต่อ 100 กรัม สารแห้ง โดยค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวหอมนิลฮางอกเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ตำแหน่งที่ 3' และ 4' ที่อยู่ภายในโครงสร้างของแอนโทไซยานิน (Miguel, 2011) และหมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะบนวงแหวนเบนซีนของสารประกอบฟีนอลิก มีบทบาทสำคัญในการดักจับอนุมูลอิสระไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Shao และ Bao, 2014)

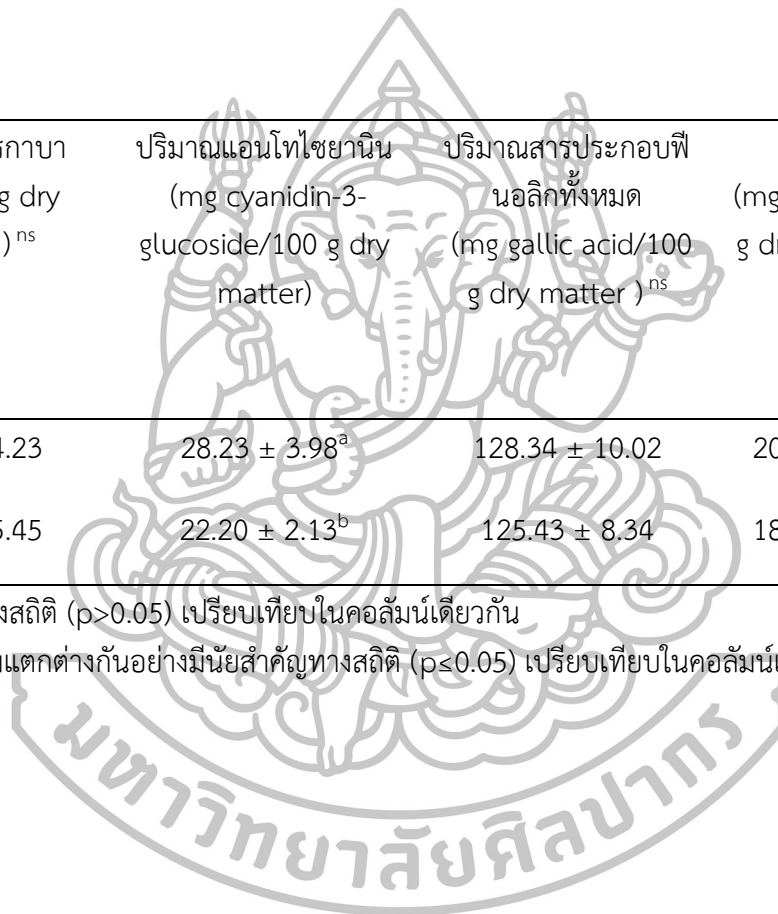


ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางเคมีของข้าวหอมนิล

ครั้งที่ซื้อวัตถุดิบ	ปริมาณความชื้น (%) ^{ns}	ปริมาณสารกาบา (mg/100 g dry matter) ^{ns}	ปริมาณแอนโทไซยานิน (mg cyanidin-3-glucoside/100 g dry matter)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg gallic acid/100 g dry matter) ^{ns}	DPPH (mg Trolox/100 g dry matter) ^{ns}	FRAP (μ M FeSO ₄ /100 g dry matter) ^{ns}
1	13.21 ± 2.01	4.21 ± 4.23	28.23 ± 3.98 ^a	128.34 ± 10.02	20.49 ± 1.38	1251 ± 198.43
2	13.01 ± 1.83	3.95 ± 5.45	22.20 ± 2.13 ^b	125.43 ± 8.34	18.34 ± 3.02	1243 ± 202.11

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{a, b} และ ^c หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน



4.2 อิทธิพลของกระบวนการผลิตต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวหอมนิลฮางงอก

ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวเปลือกหอมนิลที่ผ่านขั้นตอนการผลิตต่างๆ เพื่อให้ได้ข้าวฮางงอก และผ่านการกะเทาะเปลือกออกแล้ว แสดงดังตารางที่ 6 จะเห็นว่าขั้นตอนการผลิตส่งผลต่อปริมาณกาบา โดยพบว่าสารกาบาจะเพิ่มขึ้นในขั้นตอนการแช่และการบ่ม ทั้งนี้เมื่อเมล็ดข้าวได้รับน้ำเข้าไปจะส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์ภายในเซลล์เริ่มทำงาน โดยสังเคราะห์สารที่จำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ และเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอาหารภายในเมล็ด เช่น การย่อยโปรตีนด้วยเอนไซม์โปรตีเอสเป็นกรดอะมิโน โดยกรดอะมิโนสำคัญที่ถูกสร้างขึ้น คือกลูตามัท ซึ่งจะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ decarboxylation โดยเอนไซม์ glutamate decarboxylase ได้สารผลิตภัณฑ์เป็นกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริกหรือกาบา (วรัญพร และคณะ, 2555) จึงทำให้กาบาเพิ่มขึ้นในขั้นตอนการแช่และการบ่ม ในขณะที่ขั้นตอนการนึ่งไม่ส่งผลต่อกาบาเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนการแช่และการบ่ม แต่จะลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากกาบาส่งผลให้น้ำได้จึงละลายไปในขั้นตอนการนึ่ง

ปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวหอมนิลฮางงอกที่ผ่านการผลิตในขั้นตอนต่างๆ พบว่าขั้นตอนในการแช่ข้าวส่งผลต่อการลดลงของแอนโทไซยานินเนื่องจากแอนโทไซยานินมีคุณสมบัติที่ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ ดังนั้นหลังจากที่ผ่านกระบวนการแช่ข้าวในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงส่งผลต่อการลดลงของสารดังกล่าว แต่พบว่าในขั้นตอนการบ่มมีสารแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากกระบวนการชีวเคมีในช่วงที่ข้าวเกิดการงอก

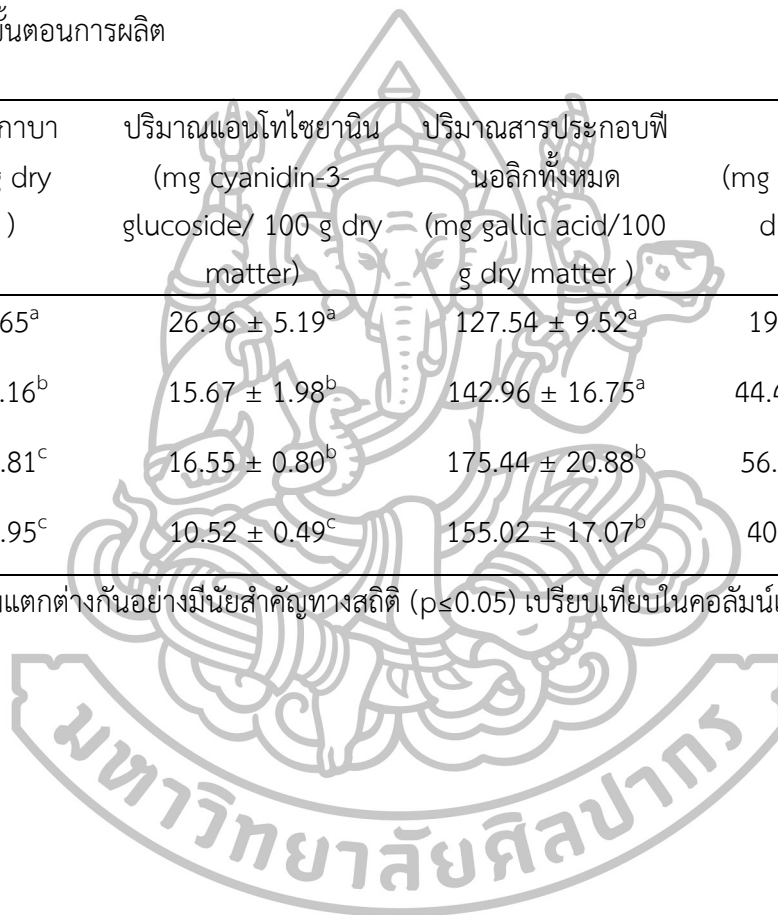
ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่ผ่านการผลิตในขั้นตอนต่างๆ พบว่าในขั้นตอนการแช่และการบ่มส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเนื่องจากกระบวนการทางชีวเคมีภายในเมล็ดข้าวทำให้เกิดการสร้างเอนไซม์กลูโคซิเดสที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างสารประกอบฟีนอลิก (Coda และคณะ, 2010) แต่ในขั้นตอนการนึ่งพบว่าสารประกอบฟีนอลิกลดลง เนื่องจากการสลายตัวจากความร้อน หรือละลายไปกับน้ำในระหว่างการนึ่ง ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกันกับ Walter และคณะ (2013) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวที่มีเปลือกสีน้ำตาลอ่อน สีแดง และสีดำ และผลของกระบวนการในการผลิตต่อคุณสมบัติดังกล่าวพบว่าเมื่อผ่านขั้นตอนการนึ่งปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวทั้งสามชนิดลดลงร้อยละ 13-50

ค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ตรวจวัดด้วยวิธีการทำละลายอนุมูลอิสระ DPPH ที่รายงานค่าเป็นมิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อ 100 กรัม สารแห้ง และวิธีวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริกของสารต้านอนุมูลอิสระ หรือ FRAP assay ซึ่งรายงานผลเป็นไมโครโมลาร์ไอร์ออนซัลเฟต ต่อ 100 กรัม สารแห้ง โดยทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่วิเคราะห์ง่าย สะดวก มีความเสถียร และสามารถใช้ได้กับตัวอย่างหลายชนิด พบว่า มีการเพิ่มขึ้นในขั้นตอนการแช่ และการบ่ม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และกาบาซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

ตารางที่ 6 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแต่ละขั้นตอนการผลิต

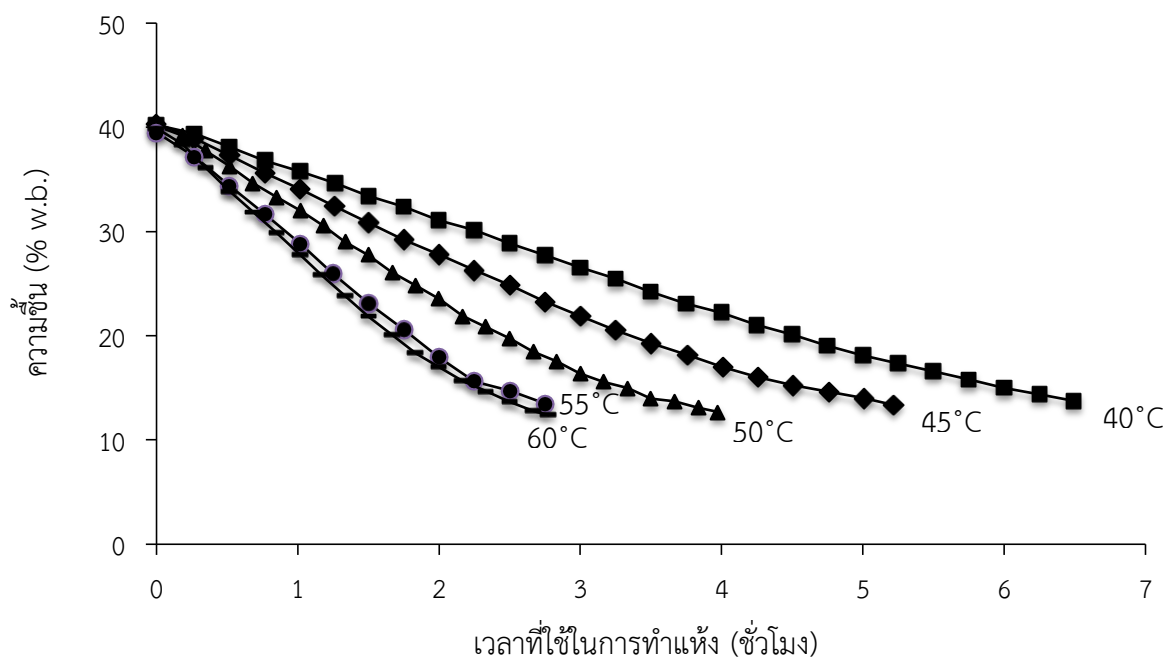
ขั้นตอนการผลิต	ปริมาณความชื้น (%)	ปริมาณสารกาบา (mg/100 g dry matter)	ปริมาณแอนโทไซยานิน (mg cyanidin-3-glucoside/ 100 g dry matter)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg gallic acid/100 g dry matter)	DPPH (mg Trolox/100 g dry matter)	FRAP (μ M FeSO ₄ /100 g dry matter)
ข้าวเปลือก	13.21 \pm 2.01 ^a	4.58 \pm 2.65 ^a	26.96 \pm 5.19 ^a	127.54 \pm 9.52 ^a	19.95 \pm 1.32 ^a	1.30 \pm 0.27 ^a
ข้าวหลังการแช่	37.01 \pm 1.04 ^b	15.43 \pm 3.16 ^b	15.67 \pm 1.98 ^b	142.96 \pm 16.75 ^a	44.45 \pm 10.56 ^{bc}	2.99 \pm 0.15 ^b
ข้าวหลังการบ่ม	36.54 \pm 3.87 ^{bc}	23.34 \pm 2.81 ^c	16.55 \pm 0.80 ^b	175.44 \pm 20.88 ^b	56.66 \pm 18.41 ^c	3.25 \pm 0.30 ^c
ข้าวหลังการนึ่ง	40.39 \pm 1.88 ^c	23.02 \pm 3.95 ^c	10.52 \pm 0.49 ^c	155.02 \pm 17.07 ^b	40.04 \pm 6.52 ^b	3.05 \pm 0.14 ^c

^{a, b} และ ^c หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

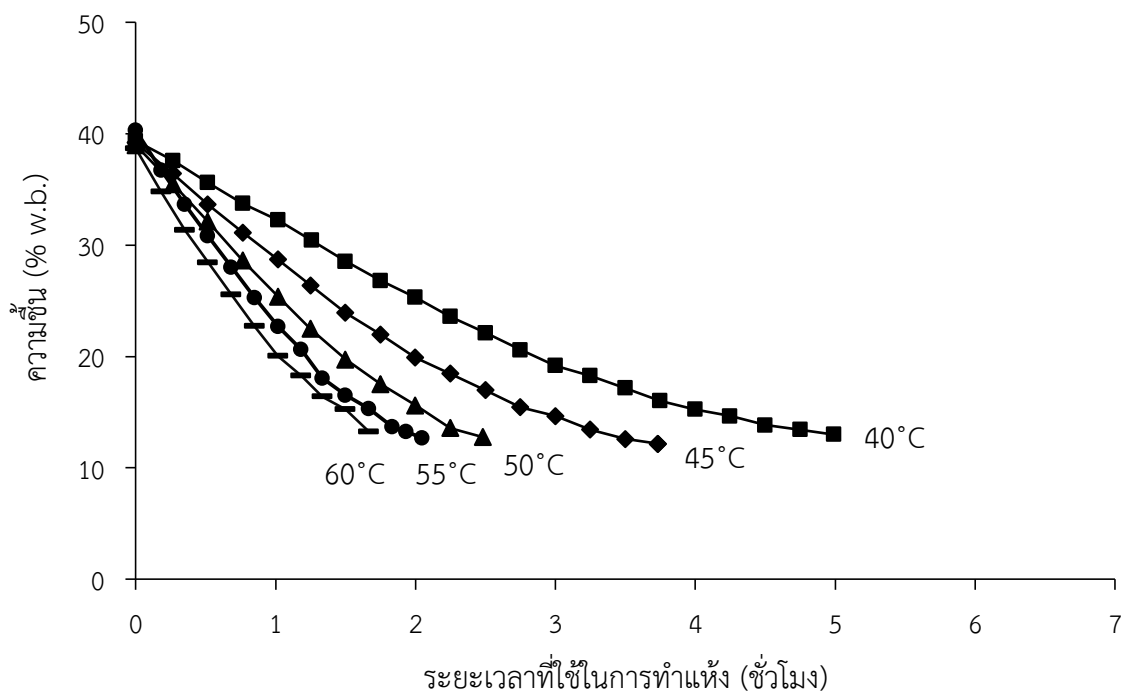


4.3 อิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดต่อพฤติกรรมการทำแห้งของข้าวหอม นิลยางอก

อุณหภูมิ และความเร็วลมมีผลต่อการทำแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อการทำแห้ง โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมีการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวได้เร็วกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิกับเม็ดข้าวสูง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนไปยังเมล็ดข้าวเพื่อใช้ในการระเหยน้ำจึงน้อยกว่า โดยจากภาพที่ 15 และ 16 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการทำแห้งน้ำระเหยออกจากตัวอย่างอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงอัตราการทำแห้งที่ลดลง จนปริมาณความชื้นของทุกตัวอย่างมีค่าประมาณร้อยละ 13 โดยสภาวะที่มีการทำแห้งต่ำที่สุดคือ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที และสภาวะที่มีการทำแห้งสูงที่สุดคือ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

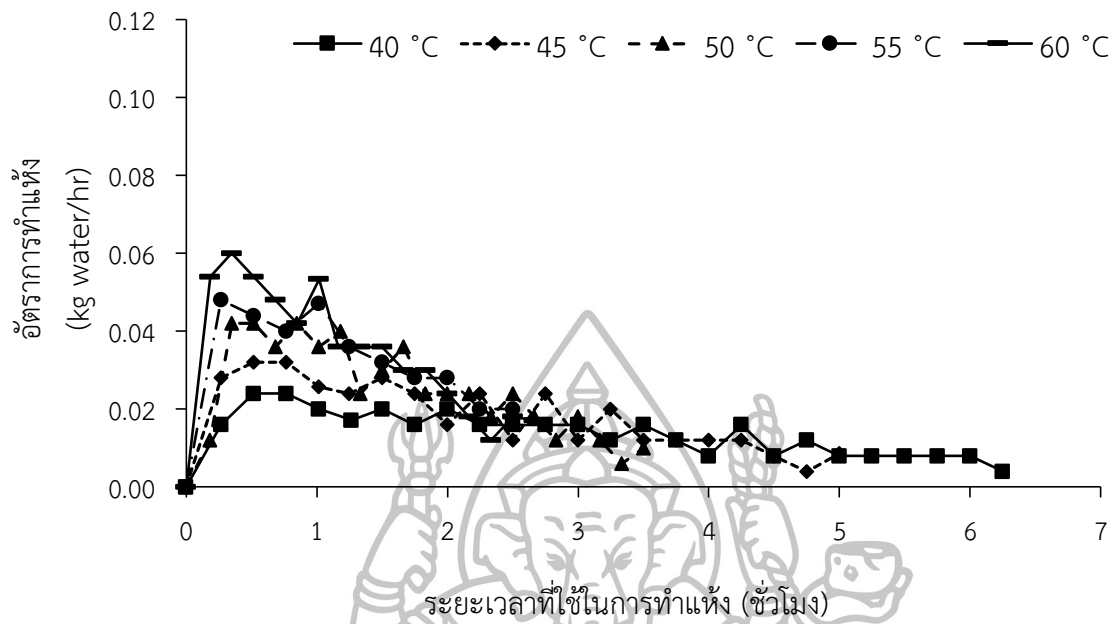


ภาพที่ 15 กราฟการทำแห้งของข้าวหอม นิลยางอกผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที

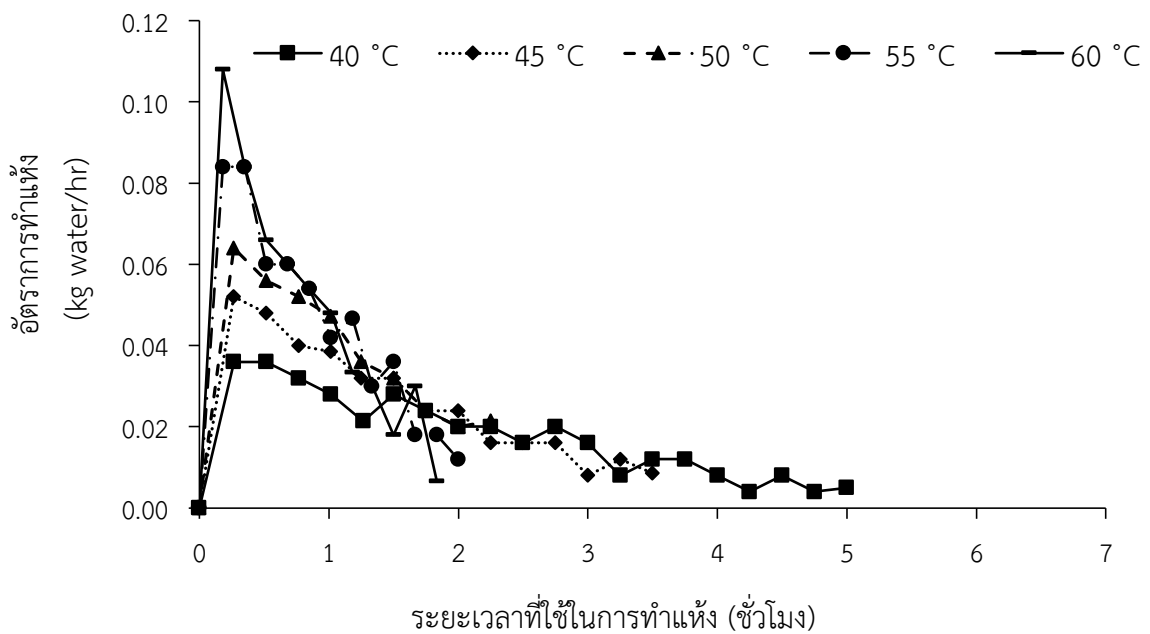


ภาพที่ 16 กราฟการทำแห้งของข้าวหอมนิลสางอกผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุกับมวลน้ำเริ่มต้นในระหว่างการทำแห้ง ที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาทีแสดงดังภาพที่ 17 และ 18 ตามลำดับ พบว่าในทุกๆ สภาวะการทำแห้ง ปริมาณน้ำจะระเหยออกจากตัวอย่างอย่างรวดเร็วในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรกของการทำแห้ง จากนั้นค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล การเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อน ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับการเพิ่มความเร็วลมในการทำแห้งทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และความเร็วลมสูงกว่าจะใช้เวลาในการทำแห้งที่สั้นกว่า จากตารางที่ 7 พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาในการทำแห้งเร็วที่สุดโดยใช้เวลาในการทำแห้ง 1 ชั่วโมง 50 นาที โดยการทำแห้งที่ใช้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะมีผลต่ออัตราการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งเห็นได้จากการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งได้ร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งโดยใช้ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาทีที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำมีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำทำให้อัตราการระเหยความชื้นจากตัวอย่างต่ำกว่าการทำแห้งที่มีอุณหภูมิลมร้อนสูง



ภาพที่ 17 อัตราการทำแห้งของข้าวหอมนิลยางอกผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที

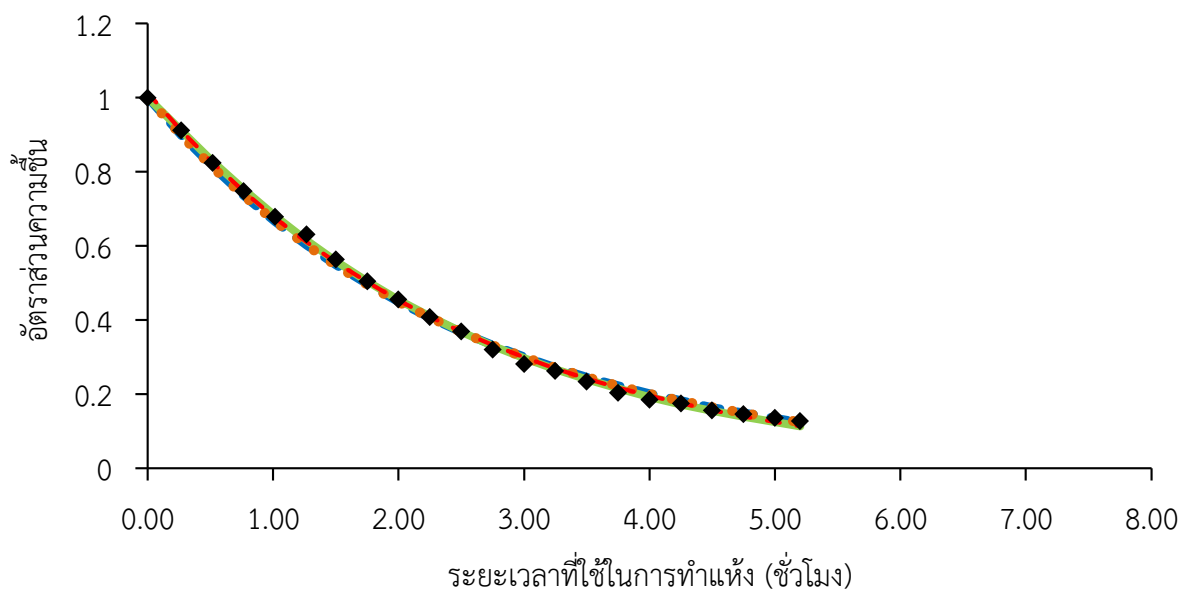
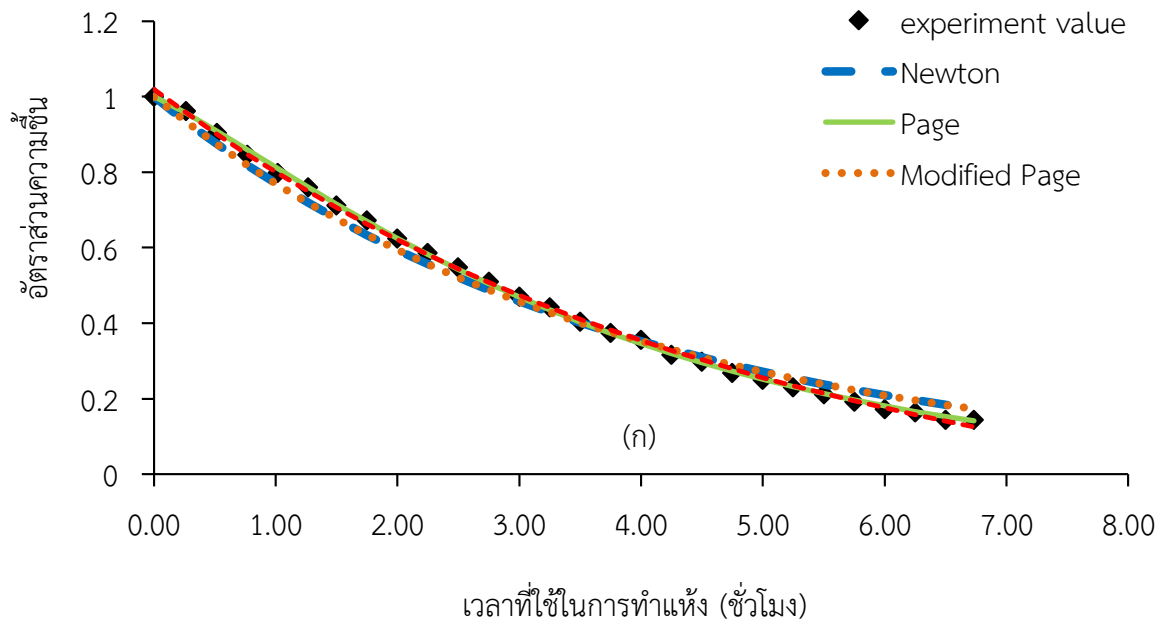


ภาพที่ 18 อัตราการทำแห้งของข้าวหอมนิลยางอกผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 7 ระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งข้าวหอมนิลยางอกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง		ระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	
40	0.5	6 ชั่วโมง 30 นาที
	1.0	5 ชั่วโมง 12 นาที
45	0.5	5 ชั่วโมง 14 นาที
	1.0	3 ชั่วโมง 44 นาที
50	0.5	3 ชั่วโมง 57 นาที
	1.0	2 ชั่วโมง 29 นาที
55	0.5	2 ชั่วโมง 47 นาที
	1.0	2 ชั่วโมง 5 นาที
60	0.5	2 ชั่วโมง 15 นาที
	1.0	1 ชั่วโมง 50 นาที

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์สมการการทำแห้งชั้นบาง (thin-layer) เพื่อหาสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์ในการทำแห้งข้าวหอมนิลยางอก โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการทำแห้งชั้นบาง ได้แก่ สมการของนิวตัน (Newton) เพจ (Page) โมดิไฟด์เพจ (Modified Page) และ ล็อกกาลีทึมมิก (Logarithmic) โดยเลือกสมการทำแห้งที่สามารถทำนายลักษณะการทำแห้งข้าวหอมนิลยางอกได้เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination; R^2) สูงที่สุด และค่า RMSE (root mean square Error) ต่ำที่สุด ซึ่งค่า RMSE ได้จากการคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับอัตราส่วนความชื้นที่ประมาณได้จากสมการทำแห้งชั้นบาง

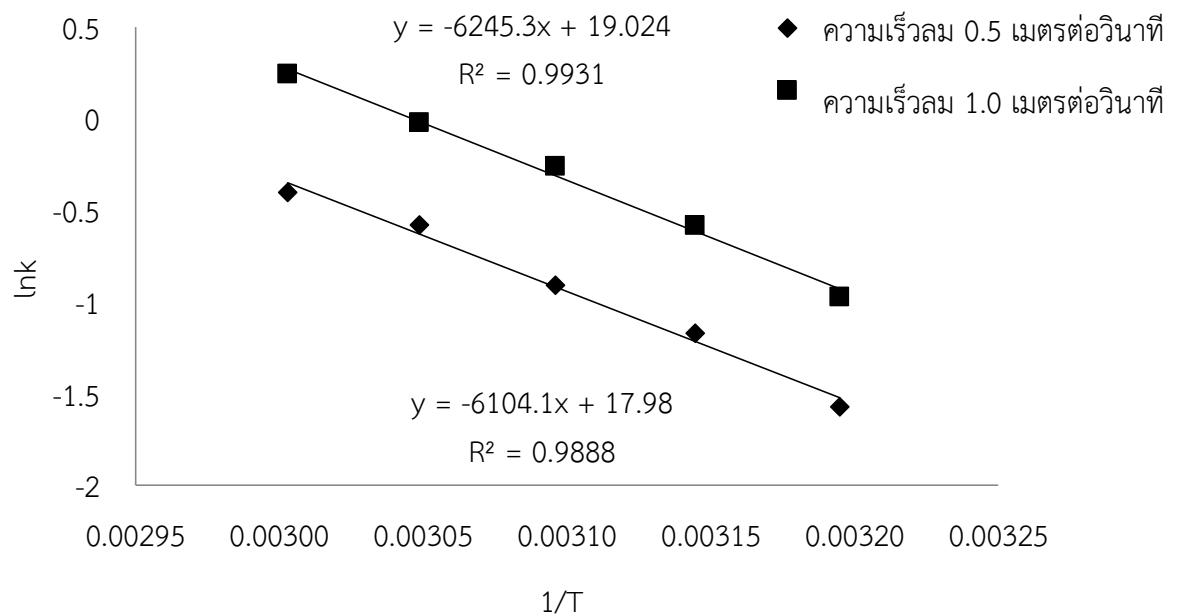


ภาพที่ 19 อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลฮ้างอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

เมื่อนำค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองโดยกำหนดให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวฮ้างอกที่อบจนมีน้ำหนักคงที่เป็นความชื้นสมดุลไปหาความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Page จะเห็นว่าสมการ Page สามารถที่จะทำนายพฤติกรรมการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮ้างอกได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยพิจารณาจากค่า R^2 มากที่สุด และ RMSE น้อย

ที่สุด (ตารางที่ 31) ของแบบจำลองทั้ง 4 แบบ พบว่าสมการ Page จะมีค่า R^2 มากที่สุด และมีค่า RMSE ต่ำที่สุด (ภาคผนวก ค ตารางที่ 31) ซึ่งจะแสดงถึงความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมการทำงานได้ดีที่สุด (สุนทร และ ฤทธิชัย, 2554) ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการของ Page มาเปรียบเทียบกับพบว่ามีค่าสอดคล้องกัน แสดงดังภาพที่ 19

เมื่อพิจารณาค่า k จากทุกแบบจำลองจะเห็นว่าค่า k เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลต่อการระเหยน้ำ หรือการถ่ายโอนความร้อนของตัวอย่าง ในระหว่างการทำแห้ง นอกจากนี้ค่าคงที่ได้จากสมการ k จะสามารถอธิบายระยะเวลาในการอบแห้งได้ โดยที่ค่า k มีค่ามากจะใช้เวลาในการทำแห้งน้อยลง สอดคล้องกับผลการทดลองพบว่าข้าวฮางอกที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที จะใช้เวลาสั้นที่สุดเนื่องจากค่า k ที่ได้จากสมการมีค่ามากที่สุด เช่นเดียวกับเมื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ที่ความเร็ว 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที พบว่าสมการ Page ให้ค่า R^2 ที่สูงกว่าแบบจำลองอื่น แสดงดังภาพที่ 20 จะเห็นว่าจลนพลศาสตร์การอบแห้งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายปริมาณความชื้นหรือระยะเวลาในการทำแห้งข้าวฮางอกได้ ทั้งนี้ข้อจำกัดคือสภาวะในการทำแห้งจะต้องคล้ายกับสภาวะในการทดลอง



ภาพที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ และ $1/T$ ของการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ จากแบบจำลองของ Page

4.4 อิทธิพลของการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวหอมนิลฮางงอกหลังการทำแห้ง

4.4.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

อุณหภูมิ ความเร็วลม และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วมมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระของข้าวหอมนิลฮางงอก แสดงดังตารางที่ 8 โดยการทำแห้งในแต่ละสภาวะสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด คือมีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 14 (สำนักงานมาตรฐานสินค้าการเกษตร, 2555) และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษา

ตารางที่ 8 ความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของข้าวหอมนิลฮางงอกที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคต่อที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาวะการทำแห้ง		ปริมาณความชื้น	วอเตอร์แอกติวิตี้
	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	สุดท้าย (%)		
40	0.5	13.81 ± 0.31^c	0.64 ± 0.01^b	
	1.0	12.78 ± 0.56^{ab}	0.62 ± 0.01^a	
45	0.5	12.80 ± 0.07^{ab}	0.61 ± 0.02^a	
	1.0	12.39 ± 0.83^{ab}	0.60 ± 0.01^a	
50	0.5	12.55 ± 0.41^{ab}	0.61 ± 0.01^a	
	1.0	12.62 ± 0.50^{ab}	0.62 ± 0.01^a	
55	0.5	12.38 ± 0.62^{ab}	0.62 ± 0.01^a	
	1.0	12.97 ± 0.37^b	0.62 ± 0.01^a	
60	0.5	12.42 ± 0.43^{ab}	0.61 ± 0.01^a	
	1.0	12.13 ± 0.79^a	0.62 ± 0.01^a	

^{a, b} และ ^c หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.4.2 ร้อยละการงอก ร้อยละต้นข้าว และร้อยละข้าวหัก

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตข้าวหอมนิลฮางอกในการศึกษาคั้งนี้ พบว่ามีปริมาณการงอกของข้าวอยู่ในช่วงร้อยละ 91-96 จากผลการทดลองพบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ทั้งที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 เมตรต่อวินาที มีปริมาณต้นข้าวที่ต่ำ และมีปริมาณข้าวหักที่สูง (ตารางที่ 9) ซึ่งเกินกว่าเกณฑ์ของการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องึ่งที่ระบุว่าร้อยละข้าวหักที่ยอมรับได้อยู่ในช่วงร้อยละ 3.5-7.7 (สมเกียรติ, 2554) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเมื่อเมล็ดข้าวเริ่มอบ ทำให้เมล็ดข้าวสูญเสียความชื้นไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดรอยร้าวในเมล็ด เมื่อทำการกะเทาะเปลือกจึงทำให้เมล็ดข้าวแตกหักมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกหักของเมล็ดข้าวเช่น การเก็บก่อนอายุหรือช้าเกินไป การเกิดท้องไข ขั้นตอนการนวดข้าวหรืออีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือขั้นตอนการทำแห้งที่เมล็ดข้าวได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วเกินไปและไม่สม่ำเสมอ ทำให้เมล็ดข้าวสูญเสียความชื้นไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดรอยร้าวในเมล็ด เมื่อทำการกะเทาะเปลือกจึงทำให้เมล็ดข้าวแตกหัก (Bhattacharya และ Indudhara, 1967)

ตารางที่ 9 ร้อยละการงอก ร้อยละต้นข้าวและร้อยละข้าวหักของข้าวหอมนิลฮางอกที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาดที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาวะการทำแห้ง ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ร้อยละการงอก	ร้อยละต้นข้าว	ร้อยละข้าวหัก
		(%)	(%)	(%)
ข้าวหอมนิล	-	-	71.46 ± 0.48 ^f	5.34 ± 0.32 ^b
40	0.5	92.01 ± 2.98 ^b	77.85 ± 0.02 ^a	2.75 ± 0.75 ^a
	1.0	93.54 ± 1.42 ^{ab}	77.22 ± 0.51 ^{ab}	2.81 ± 0.03 ^a
45	0.5	95.99 ± 2.66 ^a	76.57 ± 0.03 ^{bc}	2.85 ± 0.09 ^a
	1.0	93.45 ± 0.59 ^{ab}	76.23 ± 0.56 ^c	2.83 ± 0.11 ^a
50	0.5	92.72 ± 0.93 ^{ab}	73.24 ± 0.10 ^d	4.62 ± 0.04 ^b
	1.0	93.59 ± 2.52 ^{ab}	72.46 ± 0.19 ^e	4.47 ± 0.15 ^b
55	0.5	94.24 ± 0.95 ^{ab}	69.15 ± 0.06 ^f	7.16 ± 0.09 ^c
	1.0	94.41 ± 2.39 ^{ab}	69.60 ± 0.49 ^f	6.81 ± 0.19 ^c
60	0.5	91.53 ± 2.49 ^b	66.90 ± 0.05 ^g	11.25 ± 0.09 ^d
	1.0	94.55 ± 2.36 ^{ab}	66.97 ± 0.10 ^g	10.93 ± 0.50 ^d

a, b, c, d, e, f และ g หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.4.3 ปริมาณสารกาบา

อุณหภูมิ ความเร็วลม และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกาบา (Δ GABA) โดยพบว่าหลังการทำแห้งปริมาณกาบาจะลดลงเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นทำให้กาบามีปริมาณลดลง (ตารางที่ 10) เนื่องจากกาบาเป็นสารที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานของ เทวีกา และ วรณุช (2011) ที่พบว่าการทำแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40-60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมงในข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 ไม่มีผลต่อปริมาณกาบาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยปริมาณกาบาที่อบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีการลดลงมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 10 ปริมาณสารกาบาของข้าวหอมนิลฮ้างงอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ปริมาณสารกาบา (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม สารแห้ง)		Δ GABA (%) ^{ns}
		ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง ^{ns}	
40	0.5	23.60 ± 1.13 ^{Aabc}	22.22 ± 0.71 ^A	-5.74 ± 4.42
	1	21.60 ± 0.99 ^{Ac}	21.22 ± 2.04 ^A	-3.01 ± 4.32
45	0.5	21.49 ± 1.25 ^{Ac}	21.20 ± 2.27 ^A	-2.41 ± 8.32
	1	20.83 ± 2.23 ^{Ac}	20.07 ± 0.44 ^A	-3.69 ± 9.93
50	0.5	22.98 ± 1.36 ^{Aabc}	22.25 ± 1.98 ^A	-2.87 ± 14.16
	1	24.15 ± 2.30 ^{Aa}	22.80 ± 1.22 ^A	-8.12 ± 3.63
55	0.5	24.54 ± 1.19 ^{Aab}	21.50 ± 1.96 ^A	-7.26 ± 26.08
	1	23.47 ± 1.19 ^{Aabc}	22.11 ± 0.54 ^A	-5.42 ± 7.11
60	0.5	23.88 ± 1.53 ^{Aabc}	22.91 ± 0.81 ^A	-3.62 ± 6.95
	1	25.22 ± 1.69 ^{Aa}	23.57 ± 0.61 ^B	-5.36 ± 3.84

^a และ ^b หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^A และ ^B หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

เช่นเดียวกับ Chungcharoen และคณะ (2012) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่เตรียมจากข้าวเปลือกและข้าวกล้อง โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 90, 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งไม่ส่งผลต่อปริมาณสารกาบาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องมาจากกาบาสลายตัวที่อุณหภูมิ 203 องศาเซลเซียส (Lide, 2006) ทำให้การทำแห้งที่อุณหภูมิดังกล่าวไม่ทำให้กาบาเกิดการสลายตัว

4.4.4 ปริมาณแอนโทไซยานิน

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณ cyanidin-3-glucoside (Δ cyanidin-3-O-glucoside) และร้อยละการเปลี่ยนแปลงแอนโทไซยานิน (Δ Anthocyanins) ในข้าวหอมนิลฮ้างงอกที่วิเคราะห์ด้วยวิธี HPLC และวิธี pH-differential method แสดงดังตารางที่ 11 และ 12 ตามลำดับ พบว่าค่า Δ cyanidin-3-glucoside มีแนวโน้มลดลงหลังการทำแห้งเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที มีค่า Δ cyanidin-3-glucoside น้อยที่สุดในขณะที่การทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ทำให้แอนโทไซยานินสลายตัวมากที่สุด เนื่องจากการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาทำให้ตัวอย่างสัมผัสกับออกซิเจนนานกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการที่ตัวอย่างสัมผัสกับออกซิเจนจะเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยที่โมเลกุลของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 หรือหมู่ OH ของวงแหวน B ทำให้พันธะคู่ของวงแหวนหายไปเกิดเป็น carbinol base หรือ chalcone หรือ quinoidal base (Saint-Gaulejac และคณะ, 1999)

นอกจากนี้การที่ตัวอย่างสัมผัสกับแสงในขณะที่ทำการอบแห้งเป็นเวลานานจะส่งผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานิน เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 5 (photo-oxidation) และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องจากความร้อนทำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูป chalcone หรือ quinoidal base (ยุพาพร, 2547) โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัวน้อย เนื่องจากการทำแห้งในระยะเวลาที่สั้นช่วยลดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ทำให้แอนโทไซยานินคงเหลือในปริมาณที่มากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำแต่ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งที่นานกว่า

เมื่อพิจารณาปริมาณแอนโทไซยานินโดยใช้วิธี HPLC และสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่า ข้าวหอมนิลมีปริมาณแอนโทไซยานินก่อนการทำแห้งสูงสุดทั้งในสองวิธีคือ 11.10 และ 16.39 มิลลิกรัม cyanidin-3-glucoside ต่อ 100 กรัม สารแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ระหว่างผลการวิเคราะห์โดยวิธี HPLC และวิธีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) เท่ากับ 0.457 (แสดงรายละเอียดภาคผนวก ค ตารางที่ 33)

ตารางที่ 11 ปริมาณ cyanidin-3-glucoside ของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

สภาวะการทำแห้ง		ปริมาณ cyanidin-3-glucoside (มิลลิกรัม cyanidin-3-glucoside ต่อ 100 กรัม สารแห้ง)		(Δ Cyanidin-3-glucoside) (%)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	
40	0.5	11.09 \pm 0.43 ^{Aa}	6.71 \pm 0.72 ^{Bde}	-39.08 \pm 7.60 ^e
	1.0	11.10 \pm 0.44 ^{Aa}	6.89 \pm 0.53 ^{Bde}	-28.63 \pm 4.88 ^{bcd}
45	0.5	10.59 \pm 0.61 ^{Abc}	7.54 \pm 0.16 ^{Bbcd}	-38.27 \pm 6.68 ^{de}
	1.0	10.92 \pm 0.3 ^{Aab}	7.20 \pm 0.35 ^{Bde}	-30.62 \pm 1.99 ^{cde}
50	0.5	10.37 \pm 0.88 ^{Ac}	6.39 \pm 0.37 ^{Be}	-37.95 \pm 1.75 ^{de}
	1.0	10.14 \pm 0.18 ^{Ac}	8.07 \pm 0.10 ^{Bbc}	-19.01 \pm 5.64 ^b
55	0.5	10.23 \pm 2.01 ^{Ac}	7.10 \pm 0.22 ^{Bde}	-33.96 \pm 18.60 ^{cde}
	1.0	10.25 \pm 0.41 ^{Ac}	7.44 \pm 0.10 ^{Bbc}	-20.47 \pm 3.96 ^b
60	0.5	10.32 \pm 0.54 ^{Ac}	8.38 \pm 0.12 ^{Bb}	-27.33 \pm 4.85 ^{bc}
	1.0	10.22 \pm 0.64 ^{Ac}	9.47 \pm 0.43 ^{Aa}	-7.21 \pm 8.22 ^a

a, b, c, d และ e หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

A และ B หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน



ตารางที่ 12 ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดของข้าวหอมนิลฮางงอกก่อนและหลังการทำแห้ง ที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาดที่สภาวะต่างๆ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี pH-differential

สภาวะการทำแห้ง		แอนโทไซยานิน (มิลลิกรัม cyanidin ต่อ 100 กรัม สารแห้ง)		(Δ Anthocyanins) (%)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	
40	0.5	16.17 \pm 1.44 ^A	10.27 \pm 0.49 ^{Be}	-39.14 \pm 3.05 ^c
	1.0	16.24 \pm 1.36 ^A	11.99 \pm 0.99 ^{Bbc}	-26.61 \pm 9.00 ^b
45	0.5	16.02 \pm 2.45 ^A	13.16 \pm 0.51 ^{Ab}	-19.07 \pm 14.94 ^{ab}
	1.0	16.25 \pm 1.08 ^A	13.09 \pm 1.28 ^{Bbc}	-21.03 \pm 9.95 ^{ab}
50	0.5	16.04 \pm 0.94 ^A	12.42 \pm 1.09 ^{Bbcd}	-22.17 \pm 10.05 ^{ab}
	1.0	16.39 \pm 1.76 ^A	13.13 \pm 1.00 ^{Bbcd}	-20.84 \pm 8.37 ^{ab}
55	0.5	16.08 \pm 1.00 ^A	11.73 \pm 0.39 ^{Bd}	-26.62 \pm 4.78 ^b
	1.0	16.03 \pm 0.77 ^A	12.45 \pm 1.84 ^{Bcd}	-24.20 \pm 7.93 ^b
60	0.5	16.29 \pm 1.08 ^A	13.27 \pm 0.96 ^{Bb}	-18.11 \pm 9.31 ^{ab}
	1.0	16.62 \pm 1.04 ^A	14.74 \pm 0.42 ^{Ba}	-10.97 \pm 6.30 ^a

a, b, c, d และ e หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

A และ B หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

4.4.5. ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

อุณหภูมิมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อการย่อยและการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Δ TPC) ของข้าวหอมนิลฮางงอก โดยพบว่าการทำแห้งส่งผลให้ค่า Δ TPC มีแนวโน้มลดลงหลังการทำแห้งเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งสูงขึ้น โดยพบว่าข้าวหอมนิลฮางงอกที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที มีค่า Δ TPC น้อยที่สุด เท่ากับ ร้อยละ -2.05 ± 1.56 (ตารางที่ 13) การที่สารประกอบฟีนอลิกลดลงหลังจากการทำแห้ง เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก เช่น กรดแกลลิก กรดโปรโตคาเทชอิก กรดพาราควมาริก เป็นต้น นอกจากนี้การทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาสั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลซึ่งเป็นสารที่ผลิตสารประกอบฟีนอลิก

ตารางที่ 13 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาดที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง		ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมกรดแกลลิก ต่อ 100 กรัม สารแห้ง)		Δ TPC (%)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	
40	0.5	154.96 \pm 7.86 ^A	142.27 \pm 9.55 ^B	-6.93 \pm 7.39 ^{bc}
	1	152.05 \pm 4.84 ^A	142.91 \pm 5.12 ^B	-5.18 \pm 3.31 ^b
45	0.5	155.30 \pm 5.45 ^A	141.14 \pm 3.89 ^B	-9.11 \pm 2.23 ^{bc}
	1	155.59 \pm 6.07 ^A	143.95 \pm 3.08 ^B	-7.47 \pm 1.42 ^{bc}
50	0.5	156.48 \pm 8.01 ^A	143.69 \pm 2.47 ^B	-10.41 \pm 5.41 ^c
	1	153.69 \pm 3.89 ^A	143.40 \pm 4.71 ^B	-9.11 \pm 3.88 ^c
55	0.5	156.48 \pm 8.01 ^A	140.08 \pm 6.80 ^B	-8.12 \pm 2.93 ^{bc}
	1	155.49 \pm 8.91 ^A	142.49 \pm 3.83 ^B	-7.76 \pm 3.24 ^{bc}
60	0.5	156.33 \pm 5.56 ^A	144.09 \pm 2.57 ^B	-4.50 \pm 1.64 ^{ab}
	1	152.69 \pm 6.82 ^A	144.71 \pm 4.31 ^B	-2.05 \pm 1.56 ^a

^a และ ^b หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^A และ ^B หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

4.4.6 ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

ในการศึกษาครั้งนี้ศึกษาตรวจวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการทำลายอนุมูลอิสระ DPPH ที่รายงานค่าเป็น มิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อ 100 กรัมสารแห้ง และวิธีวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริกของสารต้านอนุมูลอิสระ หรือ FRAP assay ซึ่งรายงานผลเป็น ไมโครโมลาร์ของไอออนซัลเฟตต่อ 100 กรัมสารแห้ง โดยทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่วิเคราะห์ง่าย สะดวก มีความเสถียร และสามารถใช้ได้กับตัวอย่างหลายชนิด

อุณหภูมิมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่วัดด้วยวิธี DPPH (Δ DPPH) ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า Δ DPPH แต่ละสภาวะการทำแห้งพบว่า ค่า Δ DPPH มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 14) โดยจะเห็นว่าหลังการทำแห้งปริมาณค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทำแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ เทวิกา และวรรณุช (2554) ที่ทำแห้งข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส ที่

เวลาต่างๆ พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการทำแห้งส่งผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้จากผลการทดลองจะเห็นว่าการทำงานแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที มีค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใกล้เคียงกับการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากระยะเวลาในการทำแห้งที่สั้นจึงทำให้ช่วยรักษาความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานแห้งที่อุณหภูมิต่ำๆ ที่ใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า

ตารางที่ 14 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของข้าวหอมนิลสาขงอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาคที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง		DPPH (มิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อ 100 กรัม สารแห้ง)		Δ DPPH (%)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อ วินาที)	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	
40	0.5	37.38 \pm 1.33 ^{Aa}	24.44 \pm 5.95 ^{Bab}	-34.87 \pm 14.09 ^{ab}
	1.0	38.50 \pm 7.69 ^{Aa}	26.06 \pm 1.97 ^{Ba}	-29.66 \pm 11.66 ^a
45	0.5	39.24 \pm 1.91 ^{Ab}	22.65 \pm 2.13 ^{Babc}	-44.34 \pm 4.55 ^{abc}
	1.0	38.87 \pm 2.13 ^{Ab}	21.70 \pm 1.27 ^{Bbc}	-44.02 \pm 3.88 ^{ab}
50	0.5	38.26 \pm 3.89 ^{Aab}	20.02 \pm 4.35 ^{Bc}	-46.41 \pm 13.86 ^{ab}
	1.0	41.45 \pm 6.90 ^{Aab}	23.06 \pm 1.90 ^{Bc}	-50.50 \pm 11.51 ^c
55	0.5	39.51 \pm 4.67 ^{Ab}	21.18 \pm 1.39 ^{Bbc}	-45.67 \pm 5.42 ^{ab}
	1.0	44.09 \pm 5.17 ^{Ab}	22.93 \pm 0.96 ^{Babc}	-47.36 \pm 4.26 ^{ab}
60	0.5	39.18 \pm 4.50 ^{Aa}	21.46 \pm 2.53 ^{Bbc}	-45.13 \pm 4.77 ^{ab}
	1.0	37.13 \pm 3.80 ^{Aa}	24.49 \pm 3.24 ^{Bab}	-34.09 \pm 5.99 ^{ab}

a, b และ c หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

A และ B หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

ค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ตรวจวัดด้วยวิธี FRAP assay จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ ความเร็วลม ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลม ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อค่า Δ FRAP ของข้าวหอมนิลสาขงอก โดยตัวอย่างก่อนการทำแห้งมีค่า FRAP อยู่ในช่วง 2.50-3.71 มิลลิโมลาร์ของไอร์ออนซัลเฟตต่อ 100 กรัม สารแห้ง (ตารางที่ 15) หลังการทำแห้งจะเห็นว่าค่า FRAP ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนการทำแห้ง เนื่องจากการลดลงของสารออก

ฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น แอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด เป็นต้น โดยพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) ระหว่างค่า FRAP และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) เท่ากับ 0.722 (แสดงรายละเอียดภาคผนวก ค ตารางที่ 33)

ตารางที่ 15 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ของข้าวหอมนิลฮางอกก่อนและหลังการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง		FRAP (ไมโครโมลาร์ของ FeSO ₄ ต่อ 100 กรัม สารแห้ง)		Δ FRAP ^{ns} (%)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง ^{ns}	
40	0.5	3.02 ± 0.34 ^{Aab}	1.55 ± 0.26 ^B	-57.73 ± 7.42
	1	2.96 ± 0.34 ^{Aab}	1.57 ± 0.84 ^B	-50.04 ± 10.08
45	0.5	2.62 ± 0.27 ^{Ab}	1.31 ± 0.85 ^B	-49.42 ± 6.65
	1	2.71 ± 0.28 ^{Aab}	1.41 ± 0.16 ^B	-47.42 ± 9.88
50	0.5	2.85 ± 0.36 ^{Aab}	1.40 ± 0.60 ^B	-49.79 ± 6.82
	1	2.50 ± 0.19 ^{Ab}	1.42 ± 0.16 ^B	-43.75 ± 4.75
55	0.5	2.86 ± 0.31 ^{Aab}	1.28 ± 0.28 ^B	-54.02 ± 14.46
	1	2.94 ± 0.35 ^{Aab}	1.41 ± 0.19 ^B	-51.32 ± 9.60
60	0.5	2.96 ± 0.17 ^{Aab}	1.29 ± 0.34 ^B	-47.72 ± 8.69
	1	3.71 ± 0.38 ^{Aa}	1.49 ± 0.24 ^B	-48.55 ± 6.81

a, b และ c หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

A และ B หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

4.4.7 คุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวหอมนิลฮางอกหลังการทำแห้ง

ข้าวหอมนิลฮางอกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส เมื่อทำการหุงเป็นเวลา 15 นาทีจะทำให้ข้าวสุกทั้งเมล็ด โดยสังเกตได้ว่าไม่มีจุดไตขุนขาวเมื่อทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ 16 จะพบว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นข้าวฮางอกจะใช้ระยะเวลาในการหุงที่สั้นกว่าตัวอย่างข้าวกล้อง เนื่องจากในกระบวนการงอกของข้าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี เช่น การย่อยสลายด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสส่งผลให้มีปริมาณอะมิโลสต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปเมื่อทำการหุงต้มจึงใช้เวลาน้อยกว่า

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิ ความเร็วลม และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่ออัตราการยึดตัวของเมล็ดข้าวสุก และความแข็งของเมล็ดข้าวสุกที่ผ่านการทำให้แห้งที่สภาวะต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำให้แห้งเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้การอ้วนน้ำของเมล็ดข้าวสุกเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 17) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำข้าวสุกลดลง เนื่องจากขั้นตอนการนึ่งส่งผลให้สตาร์ชเกิดเจลลาติไนซ์ทำให้โครงสร้างภายในเกิดการจับตัวแบบ homogeneous เป็นสาเหตุให้การอ้วนน้ำของเมล็ดข้าวสุกมากขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่ผ่านการแปรรูปและการเกิดโครงสร้างที่จับตัวกันแน่นขึ้นก็เป็นการป้องกันการการสูญเสียของแข็งในระหว่างกระบวนการหุงต้ม ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ ละมุล (2555) ที่ทำการศึกษาศักยภาพที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าว โดยทำแห้งที่อุณหภูมิ 100, 115, 125, 135 และ 150 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าเมื่อความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นการดูดซับน้ำและอัตราการยึดตัวของเมล็ดข้าวสุกจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะลดลง

ตารางที่ 16 ระยะเวลาที่ใช้ในการหุงข้าวหอมนิลฮางงอกที่ผ่านการทำให้แห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่สภาวะต่างๆ

		ร้อยละชื้นข้าวสุกเวลาที่ใช้ในการหุงต้ม (นาที)									
อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อ วินาที)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
ข้าวหอมนิล		0	30	50	75	80	100	100	100	100	100
40	0.5	0	20	40	60	100	100	100	100	100	100
	1	0	30	50	73	100	100	100	100	100	100
45	0.5	0	30	50	73	100	100	100	100	100	100
	1	0	30	50	73	100	100	100	100	100	100
50	0.5	0	30	50	73	100	100	100	100	100	100
	1	0	40	50	75	100	100	100	100	100	100
55	0.5	0	30	50	75	100	100	100	100	100	100
	1	0	30	50	75	100	100	100	100	100	100
60	0.5	0	30	50	77	100	100	100	100	100	100
	1	0	30	50	78	100	100	100	100	100	100

ร้อยละ 0 หมายถึง ข้าวดิบ ร้อยละ 100 หมายถึง ข้าวหุงสุกเต็มที่

อุณหภูมิ ความเร็วลม และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความแข็งของเมล็ดข้าวสุก แต่จะพบว่าเมื่อข้าวผ่านการแปรรูปเป็นข้าวฮางงอกจะมีค่าความแข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมนิลก่อนการแปรรูป ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดระหว่างการงอกของข้าวทำให้เกิดการสลายตัวของโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุล

ใหญ่ต่างๆ เช่น การย่อยสลายทำให้อะมิโนสมีปริมาณลดลงส่งผลให้เนื้อสัมผัสหลังหุงนุ่มกว่าข้าวที่มีอะมิโนสสูง สำหรับโปรตีนนั้นจะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างโปรตีน และไปแทรกอยู่ในช่องว่างของเม็ดแป้งทำให้เพิ่มความแข็งแรงกับเม็ดแป้งในข้าว แต่ขั้นตอนการผลิตมีการย่อยสลายโปรตีนเพื่อใช้เป็นพลังงานจึงทำให้เมื่อผ่านขั้นตอนการหุงความแข็งแรงของข้าวจึงลดลงมากกว่าข้าวหอมนิลที่ไม่ผ่านการแปรรูป สอดคล้องกับการทดลองของ Chungcharoen และคณะ (2012) ทำการศึกษาผลของการอุณหภูมิที่ 90, 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ต่อการทำแห้งข้าวกล้องงอกที่เตรียมจากข้าวเปลือกและข้าวกล้อง พบว่าอุณหภูมิที่ในการทำแห้งไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกโดยรายงานเป็นค่าความแข็งแรงของเมล็ดที่หุงสุก

ตารางที่ 17 อัตราการยึดตัวของเมล็ดข้าวสุก การอุ้มน้ำของเมล็ดข้าวสุก ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำข้าวสุก และความแข็งแรงของเมล็ดข้าวสุกที่ผ่านการทำแห้งที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบภาตที่สถานะต่างๆ

	ความเร็วลม (เมตรต่อ วินาที)	อัตราการยึด ตัวของเมล็ด ข้าวสุก ^{ns}	การอุ้มน้ำของเมล็ด ข้าวสุก (กรัม/กรัม)	ปริมาณของแข็ง ที่ละลายใน น้ำข้าวสุก (%)	ความแข็งแรงของเมล็ด ข้าวสุก (N) ^{ns}
ข้าวหอมนิล	-	1.02 ± 0.01	1.37 ± 0.09 ^a	4.53 ± 0.05 ^a	32.37 ± 3.59
40	0.5	1.09 ± 0.02	2.45 ± 0.05 ^{cd}	1.99 ± 0.02 ^b	24.02 ± 8.67
	1	1.11 ± 0.02	2.42 ± 0.08 ^{cd}	2.09 ± 0.16 ^b	23.21 ± 9.26
45	0.5	1.09 ± 0.02	2.36 ± 0.08 ^c	2.14 ± 0.37 ^b	24.23 ± 13.98
	1	1.09 ± 0.06	2.30 ± 0.20 ^c	2.16 ± 0.23 ^b	22.21 ± 9.26
50	0.5	1.12 ± 0.03	4.40 ± 0.20 ^e	2.20 ± 0.21 ^b	24.83 ± 10.32
	1	1.09 ± 0.03	2.38 ± 0.11 ^c	2.24 ± 0.24 ^b	24.46 ± 11.32
55	0.5	1.13 ± 0.03	2.42 ± 0.20 ^{cd}	2.24 ± 0.24 ^b	23.15 ± 6.99
	1	1.12 ± 0.05	2.21 ± 0.17 ^b	2.27 ± 0.18 ^b	27.70 ± 7.68
60	0.5	1.13 ± 0.03	2.47 ± 0.19 ^d	2.40 ± 0.32 ^b	25.04 ± 8.05
	1	1.13 ± 0.04	2.59 ± 0.08 ^d	2.53 ± 0.51 ^b	28.34 ± 7.80

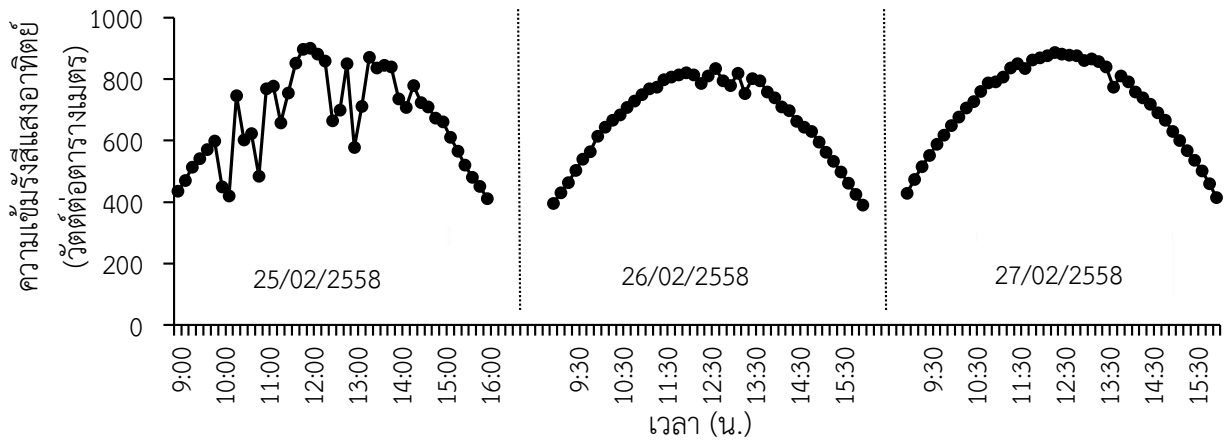
a, b, c, d และ e หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

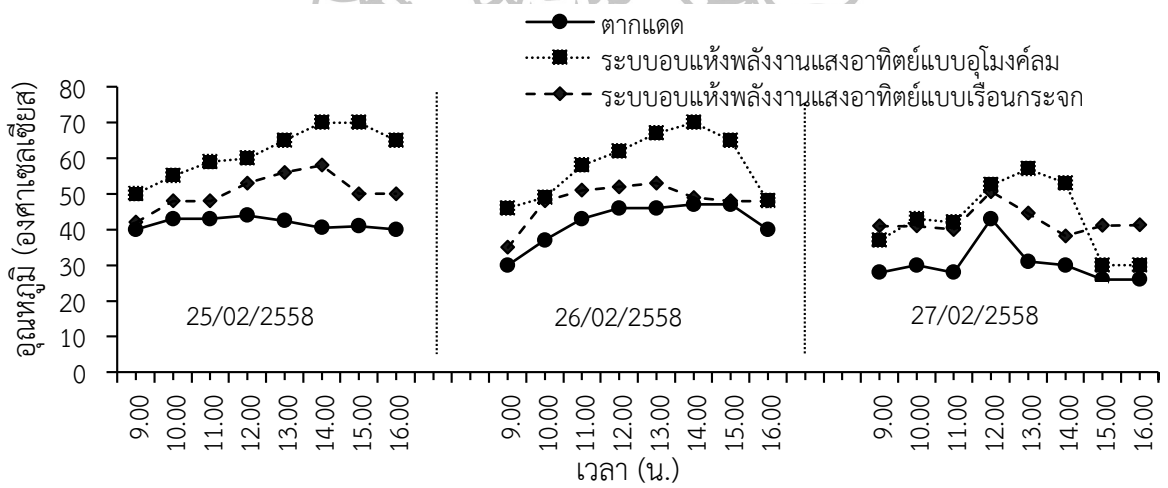
4.5 อิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพฤติกรรมการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอก

การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในระหว่างการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกในแต่ละซ้ำการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 395-872 วัตต์ต่อตารางเมตร (ภาพที่ 21) จะเห็นว่าในช่วงสามวันที่ทำการทดลองการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากเวลา

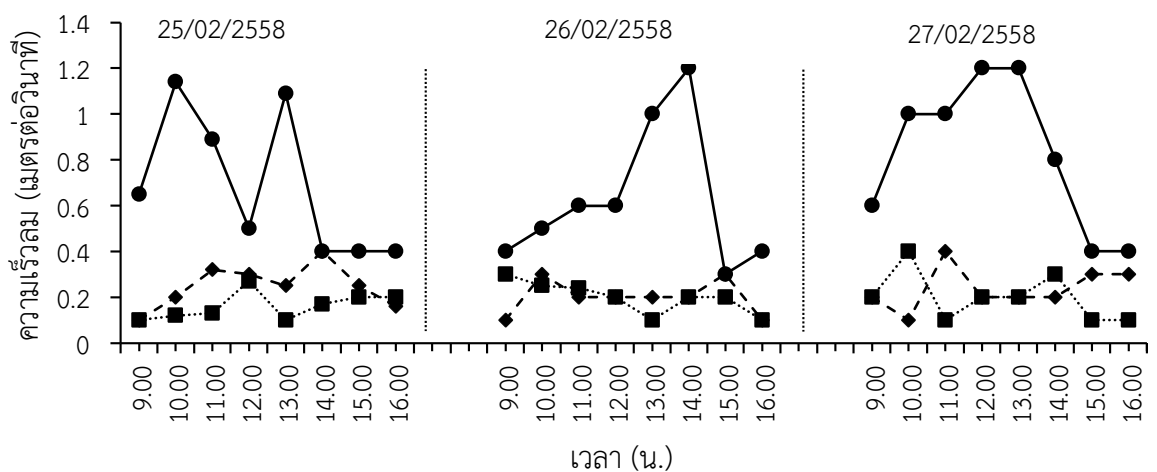
9.00-13.00 น. หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งความแปรปรวนที่เกิดขึ้นอาจเกิดเนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่มีเมฆมากในบางช่วงเวลา



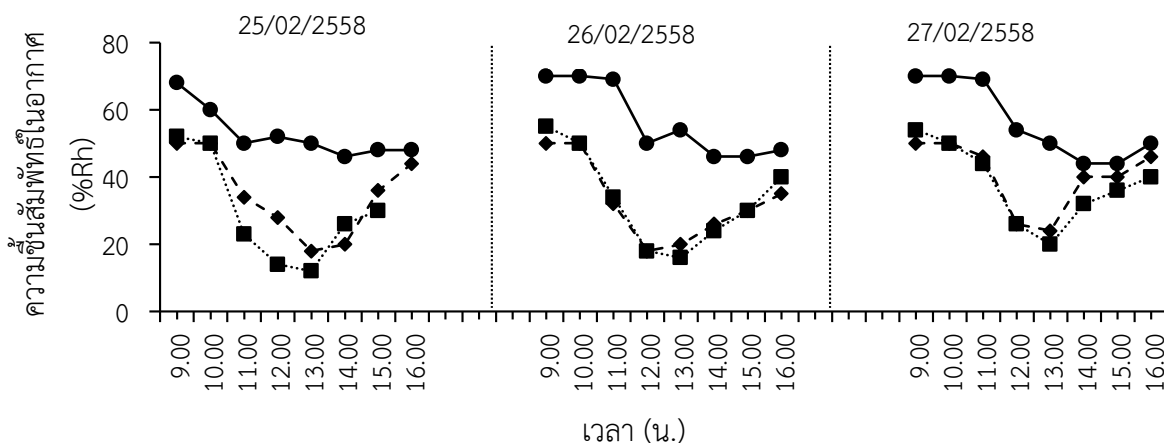
ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ของการทำแห้งข้าวหอมนิลยางอกด้วยการตากแดด



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในระหว่างการทำแห้งข้าวหอมนิลยางอก



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมระหว่างการทำแห้งข้าวหอมนิลยางอก



ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศระหว่างการทำแห้งข้าวหอมนิลสาขงอก

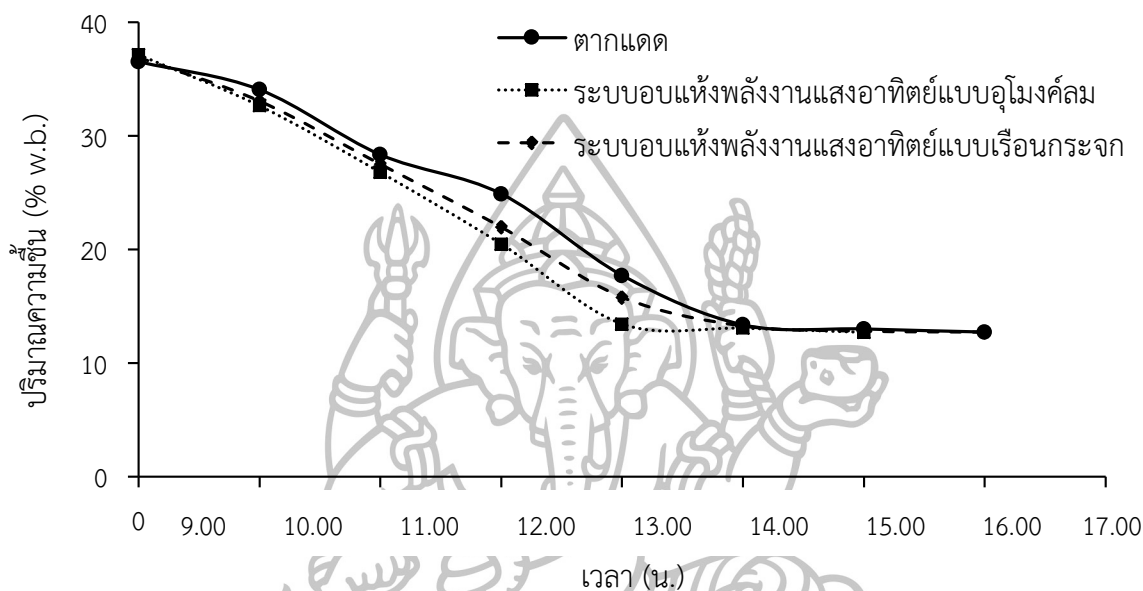
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกแสดงดังภาพที่ 22 จะเห็นว่ารูปแบบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทั้งสามวิธีที่ใช้ในการทำแห้งมีความสัมพันธ์กับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ โดยอุณหภูมิที่สูงสุดคือช่วงบ่าย โดยจะมีค่าความต่างของอุณหภูมิระหว่างการตากแดด และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ 10-15 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมระหว่างการทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกแสดงดังรูปที่ 23 จะเห็นว่าความเร็วลมทั้ง 2 วิธีมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวันโดยจะพบว่าการทำแห้งด้วยการตากแดด จะมีความเร็วลมที่สูงกว่าอยู่ในช่วง 0.4-1.2 เมตรต่อวินาที ในขณะที่การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและเรือนกระจก อยู่ในช่วง 0.1-0.3 และ 0.1-0.4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ความเร็วลมในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่ช่วยให้อุณหภูมิภายในระบบเป็นปกติ โดยเฉพาะในช่วงกลางวันระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิภายในเพิ่มสูงขึ้น ก็จะส่งผลให้ความเร็วลมในระบบอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากมีการสะสมพลังงานเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าให้พัดลมสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพทำให้อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งไม่สูงมากเกินไป เช่นเดียวกันกับในช่วงที่อุณหภูมิลดลงความเร็วลมในระบบอบแห้งก็จะต่ำลงด้วยเช่นกัน (Bala และคณะ, 2003) (แสดงดังภาพที่ 22)

การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศระหว่างการทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกแสดงดังภาพที่ 24 จะเห็นว่าความชื้นสัมพัทธ์ของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดจะต่ำกว่าการตากแดดตลอดการทำแห้งเป็นการช่วยให้ความชื้นจากตัวอย่างระเหยออกสู่บรรยากาศภายนอกได้ดีกว่า การทำแห้งด้วยการตากแดด

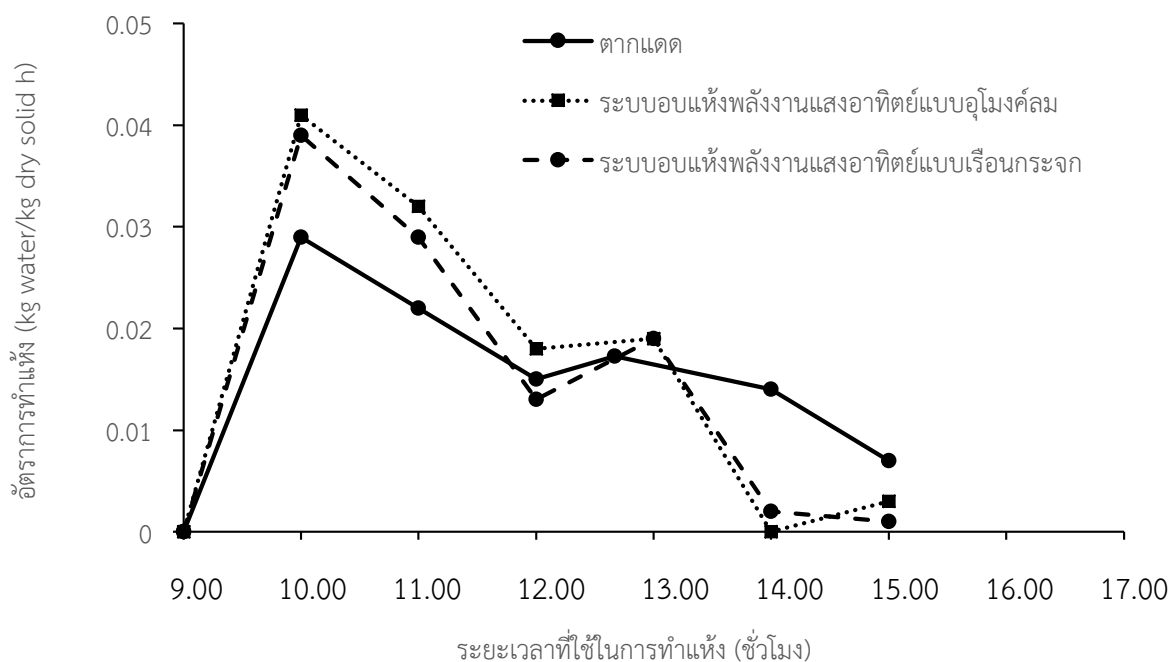
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและแบบเรือนกระจกมีอัตราการทำแห้งที่สูงกว่าการตากแดด จะเห็นว่าอัตราการทำแห้งในช่วงแรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นที่เมล็ดข้าวมีความชื้นสูงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับเมล็ดข้าว ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหาร มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของระบบอบแห้งหลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่อัตราการ

ทำแห้งลดลงเป็นช่วงที่ความชื้นในเมล็ดข้าวเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของเมล็ดข้าวจึงเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดข้าวสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการอบแห้งจะลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ (ภาพที่ 25) ซึ่งเป็นคุณลักษณะทั่วไปของกราฟพฤติกรรมการทำแห้ง (Strumillo และ Kudra, 1930)



ภาพที่ 25 กราฟการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และเรือนกระจก

สำหรับอัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อหน่วยเวลาในการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกนั้นจะพบว่า การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมมีอัตราการระเหยของมวลน้ำในวัสดุสูงกว่าอีกสองวิธี (ภาพที่ 26) เนื่องจากอุณหภูมิภายในระบบที่สูง ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ทำให้การทำแห้งเป็นไปได้ดี ส่งผลให้ใช้เวลาในการทำแห้งสั้นกว่า แสดงดังตารางที่ 18 จะเห็นว่า การทำแห้งด้วยการตากแดดใช้เวลานานที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิในการทำแห้งต่ำกว่าการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งและมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สูงกว่าส่งผลให้ให้ความชื้นออกจากตัวอย่างได้ช้ากว่า



ภาพที่ 26 อัตราการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และเรือนกระจก

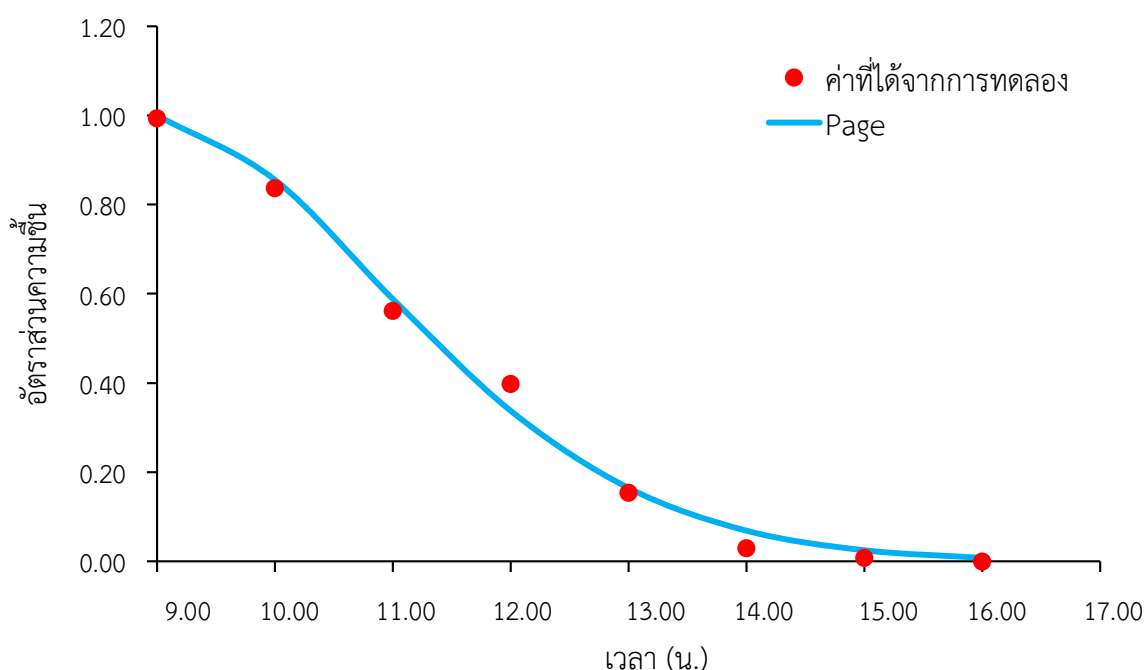
ตารางที่ 18 ระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งข้าวฮางอกหอมนิลฮางอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและแบบเรือนกระจก

วิธีที่ใช้ในการทำแห้ง	ระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง
ตากในที่ร่ม	48 ชั่วโมง
ตากแดด	5 ชั่วโมง
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม	4 ชั่วโมง
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก	4 ชั่วโมง 30 นาที

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์สมการการทำแห้งชั้นบาง (thin-layer) เพื่อหาสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายจลพลศาสตร์ในการทำแห้งข้าวหอมนิล ฮางอก โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการทำแห้งชั้นบาง ได้แก่ สมการของนิวตัน (Newton) เพจ (Page) โมดิฟายด์เพจ (Modified Page) และลอการิทึม (Logarithmic)

เลือกสมการทำแห้งที่สามารถทำนายลักษณะการทำแห้งข้าวฮางอกได้เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination; R^2) สูงที่สุด และค่า RMSE (root mean square Error) ต่ำที่สุด ซึ่งค่า RMSE ได้จากการคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับอัตราส่วนความชื้นที่ประมาณได้จากสมการทำแห้งชั้นบางจากผลการหาแบบจำลองความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับข้าวหอมนิลฮางอก

พบว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายค่าความชื้นสมมูลของข้าวฮางอกได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ ในทุกๆ ระบบการทำแห้ง โดยวิเคราะห์จากค่า R^2 มากที่สุด และ RMSE น้อยที่สุดของแบบจำลองทั้ง 5 แบบ (แสดงดังภาคผนวก ค ตารางที่ 32) เมื่อนำค่าความชื้นสมมูลที่ได้จากการทดลอง ไปหาความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสมมูลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Page จะเห็นว่าสมการ Page สามารถที่จะทำนายพฤติกรรมการทำงานแห้งของข้าวหอมนิลฮางอกได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง (ภาพที่ 27) ซึ่งจะแสดงถึงความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมการทำงานแห้งได้ดีที่สุด (สุนทร และ ฤทธิชัย, 2554)



ภาพที่ 27 อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลฮางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งด้วยการตากแดด

4.6 อิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมีและจุลินทรีย์ของข้าวหอมนิลฮางอก

4.6.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

การทำแห้งด้วย ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยพบว่าปริมาณความชื้นของข้าวหลังการทำแห้งจากการตากแดดจะมีปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้สูงกว่าการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองระบบ เนื่องจากการทำแห้งโดยการตากแดดมีความชื้นสัมพัทธ์สูง โดยเฉพาะในช่วงเย็น อาจทำให้เมล็ดข้าวที่ทำแห้งที่มีความชื้นภายในตัวอย่างน้อยกว่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเกิดการดูดความชื้นกลับ อย่างไรก็ตามการทำแห้งทั้งสามวิธีมีปริมาณความชื้น

สุดท้ายของข้าวไม่เก็ยร้อย 14 ซึ่งไม่เก็ยมาตรฐานสินค้าการเกษตร แสดงดังตารางที่ 19 (สำนักงานมาตรฐานสินค้าการเกษตร, 2555)

ตารางที่ 19 ความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของข้าวหอมนิลฮางงอกที่ท้าแห่งด้วยการตากแดด ระบบอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและแบบเรือนกระจก

วิธีที่ใช้ในการทำแห่ง	ปริมาณความชื้น (%)	วอเตอร์แอกติวิตี้
ตากในที่ร่ม	13.73 ± 0.39 ^a	0.69 ± 0.01 ^b
ตากแดด	13.39 ± 0.33 ^{ab}	0.65 ± 0.02 ^a
อุโมงค์ลม	13.20 ± 0.59 ^b	0.63 ± 0.01 ^a
เรือนกระจก	13.18 ± 0.13 ^b	0.63 ± 0.01 ^a

^a และ ^b หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.6.2 ร้อยละการงอก ร้อยละต้นข้าว และร้อยละข้าวหัก

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตข้าวฮางงอกสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการท้าแห่งด้วยระบบอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์พบว่ามีการงอกของข้าวหอมนิลอยู่ในช่วงร้อยละ 91-93 จากผลการทดลองพบว่าการทำแห่งด้วยการตากแดด ระบบอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อร้อยละต้นข้าวและร้อยละข้าวหักเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห่งโดยตากในที่ร่ม พบว่าร้อยละต้นข้าวมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 60 และมีร้อยละข้าวหักน้อยกว่าร้อยละ 5 (ตารางที่ 20) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องึ่งที่ระบุว่าร้อยละข้าวหักที่ยอมรับได้อยู่ในช่วงร้อยละ 3.5-7.7 (สมเกียรติ, 2554) ในขณะที่การทำแห่งด้วยระบบอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมมีปริมาณร้อยละข้าวหักเท่ากับร้อยละ 17 ซึ่งเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด ในการสีข้าวให้มีร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดสูงนั้นมีปัจจัยหลายอย่าง เช่น วิธีที่ใช้ในการอบแห่ง (ตากแดด, เครื่องอบแห่งแบบฟลูอิดไดซ์เบด) ความชื้น ลักษณะประจำสายพันธุ์ เป็นต้น (สุวรรณษา และถวัลย์ศักดิ์, 2557)

ตารางที่ 20 ร้อยละต้นข้าวและร้อยละข้าวหักของข้าวหอมนิลฮางอกที่ทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลมและระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

วิธีที่ใช้ในการทำแห้ง	ร้อยละการงอก	ร้อยละต้นข้าว	ร้อยละข้าวหัก
ตากในที่ร่ม	92.25 ± 0.58 ^a	70.54 ± 0.98 ^a	2.61 ± 1.29 ^a
ตากแดด	93.37 ± 1.42 ^a	67.03 ± 1.64 ^a	3.79 ± 2.33 ^a
อุโมงค์ลม	93.46 ± 2.01 ^a	50.54 ± 5.95 ^b	17.98 ± 6.14 ^b
เรือนกระจก	93.54 ± 1.26 ^a	67.94 ± 1.48 ^a	4.61 ± 1.42 ^a

^a และ ^b หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.6.3 ปริมาณสารกาบา และแอนโทไซยานิน

การทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อปริมาณกาบาในข้าวฮางอกหลังการการทำแห้ง แต่จะเห็นว่าปริมาณสารกาบาในข้าวหอมนิลฮางอกที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและแบบเรือนกระจกมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับการทำแห้งโดยการตากแดดแสดงดังตารางที่ 21 ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิและสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของสารกาบา

ตารางที่ 21 ปริมาณสารกาบาและแอนโทไซยานินของข้าวหอมนิลฮางอกที่ทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลมและระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

วิธีที่ใช้ในการทำแห้ง	ปริมาณสารกาบา ^{ns} (มิลลิกรัม/100 กรัมสารแห้ง)	ปริมาณแอนโทไซยานิน (มิลลิกรัม/100 กรัมสารแห้ง)
ตากในที่ร่ม	24.61 ± 2.21	14.21 ± 7.38 ^a
ตากแดด	22.27 ± 7.52	8.07 ± 4.54 ^b
อุโมงค์ลม	22.47 ± 10.28	5.34 ± 3.90 ^b
เรือนกระจก	23.44 ± 2.81	7.00 ± 4.93 ^b

^a และ ^b หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

การทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวหอมนิลฮางอกเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (แสดงดังตารางที่ 21) โดยที่

การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมทำให้แอนโทไซยานินลดลงมากกว่าร้อยละ 50 เนื่องจากอนุมูลอิสระที่ใช้ในการทำแห้งเป็นการเพิ่มพลังงานให้แก่ระบบมีผลทำให้แอนโทไซยานินสลายตัวจากการเร่งด้วยอนุมูลอิสระโดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก flavylum cation ไปเป็นโครงสร้าง chalcone (Furtado และคณะ, 1993)

4.6.4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

การทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางอกเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม แสดงดังตารางที่ 22 โดยจะเห็นว่าการทำงานด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการทำงานแห้งด้วยการตากแดดจะมีค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่หาด้วยวิธี DPPH และ FRAP assay ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีอนุมูลอิสระในการทำแห้งใกล้เคียงกันซึ่งอนุมูลอิสระในการทำแห้งอยู่ระหว่าง 40-60 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการทดลองกับการทดลองของเทวีกา และวรนุช (2554) ที่ทำแห้งข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการทำแห้งส่งผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม ที่มีอุณหภูมิภายในระบบสูงจะความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง ทั้งนี้จากผลการทดลองที่สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลดลงเนื่องจากอนุมูลอิสระส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก เช่น กรดแกลลิก กรดโปรโตคาเทชอิก กรดพาราความาริก เป็นต้น นอกจากนี้การอบแห้งที่ใช้เวลานานและสัมผัสแสงอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลดลง และเนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีบทบาทสำคัญในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจึงทำให้การวัดปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระจากวิธี DPPH และ FRAP มีค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระลดลงไปด้วยในตัวอย่งที่ทำงานด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

ตารางที่ 22 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลมและระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

วิธีที่ใช้ใน	TPC	DPPH	FRAP
การทำแห้ง	(มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมสารแห้ง)	(มิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อ 100 กรัมสารแห้ง)	(มิลลิโมลาร์ของไอร์ออนซัลเฟตต่อ 100 กรัมสารแห้ง)
ตากในที่ร่ม	146.82 ± 30.29 ^a	27.80 ± 2.08 ^a	1.45 ± 0.20 ^a
ตากแดด	144.25 ± 37.86 ^a	26.48 ± 1.78 ^{ab}	1.22 ± 0.18 ^{ab}
อุโมงค์ลม	131.24 ± 25.65 ^b	23.48 ± 3.37 ^c	1.10 ± 0.15 ^c
เรือนกระจก	134.32 ± 19.52 ^b	24.15 ± 2.35 ^{ab}	1.23 ± 0.12 ^{ab}

^{a, b} และ ^c หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.6.5 จำนวนแบคทีเรียทั้งหมด จำนวนยีสต์และรา

การทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด จำนวนยีสต์และรา เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนการทำแห้ง พบว่าการทำแห้งด้วยวิธีดังกล่าวสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราได้เมื่อเปรียบเทียบกับการตากในที่ร่ม แสดงดังตารางที่ 23 และพบว่าอยู่ในเกณฑ์ของการปฏิบัติการที่ดีในการผลิตข้าวกล้องงอกที่กำหนดว่าจำนวนจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ข้าวงอกแบบแห้งเปลือกต้องไม่เกิน 1×10^6 CFU/g จำนวนยีสต์และราไม่เกิน 500 CFU/g (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตร, 2555) โดยพบว่าระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองแบบสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ดีกว่าการตากแดด เนื่องจากสามารถลดการปนเปื้อนในขั้นตอนของการทำแห้งโดยตัวอย่างที่อยู่ในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะไม่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกเหมือนการตากแดดที่อาจปนเปื้อนจาก ฝุ่น ดิน แมลง สัตว์พาหะ นอกจากนี้จะเห็นว่าการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้มากที่สุดเนื่องจากอุณหภูมิภายในระบบที่สูงถึง 70 องศาเซลเซียสทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้

ตารางที่ 23 จำนวนจุลินทรีย์ยีสต์และราทั้งหมดของข้าวหอมนิลฮ้างงอกที่ทำแห้งด้วยการตากแดด ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลมและระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

วิธีที่ใช้ในการทำแห้ง	จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/g)	จำนวนยีสต์และราทั้งหมด (CFU/g)
ข้าวเปลือก	$1.34 \times 10^6 \pm 40,275^a$	$1.85 \times 10^2 \pm 59^a$
ตากในที่ร่ม	$5.61 \times 10^6 \pm 61,326^b$	57.22 ± 24^b
ตากแดด	$5.19 \times 10^4 \pm 11,375^c$	<10 (ไม่พบ)
อุโมงค์ลม	$2.58 \times 10^3 \pm 1,048^c$	<10 (ไม่พบ)
เรือนกระจก	$3.40 \times 10^3 \pm 1,652^c$	<10 (ไม่พบ)

^a และ ^b หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. กระบวนการการผลิตข้าวฮางอกส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพโดยเฉพาะขั้นตอนการแช่ การบ่ม และการนึ่ง

2. อุณหภูมิ ความเร็วลม และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลมมีผลต่ออัตราการทำแห้ง โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงจะเกิดอัตราการทำแห้งที่สูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสภาวะการทำแห้งที่มีอัตราการทำแห้งต่ำที่สุดคือ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนาน 6 ชั่วโมง 30 นาที และสภาวะที่มีอัตราการทำแห้งสูงสุดคือ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนาน 1 ชั่วโมง 50 นาที และสมการการทำแห้งที่ทำนายพฤติกรรมการทำแห้งของข้าวหอมนิลฮางอกได้ดีที่สุดคือสมการ Page

3. อุณหภูมิมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อร้อยละต้นข้าว ร้อยละข้าวหัก โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้ตัวอย่างมีคาร์บอนข้าวหักต่ำ โดยสภาวะที่มีร้อยละข้าวหักต่ำที่สุดคือที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที ในทางตรงกันข้ามการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาทีที่มีร้อยละข้าวหักสูงที่สุด

4. อุณหภูมิ ความเร็วลม และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อค่า $\Delta GABA$, ΔTPC , $\Delta FRAP$ ของข้าวหอมนิลฮางอก แต่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อ $\Delta anthocyanins$ และ $\Delta DPPH$ โดยสภาวะที่ทำให้ค่า $\Delta anthocyanins$ และ $\Delta DPPH$ เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด คือการทำแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

5. วิธีในการทำแห้งข้าวฮางอกมีผลต่ออัตราการทำแห้ง โดยการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและเรือนกระจกทำให้เกิดอัตราการทำแห้งที่สูงกว่าการตากแดด ซึ่งวิธีที่ใช้เวลาในการทำแห้งน้อยที่สุดคือ ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการตากแดด ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาในการทำแห้งเท่ากับ 4, 4.5 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ

6. วิธีในการทำแห้งข้าวฮางงอกไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อปริมาณความชื้น ปริมาณกาบา ปริมาณแอนโทไซยานิน จำนวนแบคทีเรียทั้งหมด จำนวนยีสต์และรา แต่มีผลต่อร้อยละต้นข้าว และร้อยละข้าวหัก การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมส่งผลให้ค่าร้อยละต้นข้าวต่ำ แต่ร้อยละข้าวหักสูงซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับในการผลิต เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักในการผลิตข้าวฮางงอกคือการเพิ่มร้อยละต้นข้าวให้สูงขึ้น

ดังนั้นสถานะที่แนะนำให้ใช้ในการทำแห้งข้าวหอมนิลฮางงอกคือการทำแห้งในอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาสั้น มีปริมาณร้อยละข้าวหักต่ำ ทำให้มีปริมาณแอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ค่าความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเหลืออยู่มาก และวิธีการทำแห้งที่แนะนำในการทำแห้งข้าวฮางงอกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์คือ การใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ซึ่งใช้เวลาในการทำแห้งที่สั้น ไม่ส่งผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ร้อยละต้นข้าว และช่วยลดการปนเปื้อนทางจุลินทรีย์ได้



เอกสารอ้างอิง

- กฤตนิย แก้วยศ และ ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์. 2556. อิทธิพลของการอบแห้งของข้าวเปลือกเริ่มงอก ต่อสารต้านอนุมูลอิสระ โดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 32(4): 449-445.
- กรรณิการ์ ห้วยแสน, จิระพันธ์ ห้วยแสน, ชาญณรงค์ ชมนาวัง, หนูเดือน สาระบุตร และ พัฒนา พึ่งพันธุ์. 2559. วิธีการเตรียมและการอบแห้งต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของ ข้าวฮางงอก. วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. 376-383.
- ขนิษฐา หวังดี. 2555. การพัฒนากระบวนการผลิตข้าวฮางงอกจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 วารสารการเกษตรราชภัฏ. 11(1): 33-44.
- จุฑามาศ ธีระสาโรช และ เฉลิมพล ถนอมวงศ์. 2558. การผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากข้าวหอม นิล. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 43(3): 395-402.
- ชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน: การนำมาใช้เพื่อถนอม ผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี. 2: 269-283.
- ทัศนีย์ ลีมสุวรรณ. 2553. ภูมิปัญญาอาหารจากข้าว. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัย แห่งชาติ. 30-59.
- เทวิกา กীরติบุรณ และ วรณช ศรีใจภูารักษ์. 2554. ผลของการอบแห้งแบบลาดของข้าวกล้องงอก ข้าวดอกมะลิ 105 งอกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 14: 729-734.
- บุษยา รัตนสุภา. 2553. ข้าวกล้องงอก. [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม พ.ศ. 2557 www.vcharkarn.com/varticle/39050
- ปาริชาติ เข้มทอง, ช่าง เมฆโหรา และ สมศักดิ์ คุหาสรรค์เวช. 2557. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 3: 27-35.
- ปวีณา รัตนเสนา และ ประภัสสร บุขหมั่น. 2555. กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระและปริมาณ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวกล้องงอก ข้าวกล้องงอก และข้าวฮางงอกของข้าวไทยบาง สายพันธุ์. การประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 2. วันที่ 21-23 ธันวาคม 2555. โรงแรม สวิสไฮเทล เลอ คองคอร์ด. 623-627.
- ภคินี อัครเวสสะพงศ์, สุกัญญา วงศ์พรชัย และ อังศุธรย์ วสุสันต์. 2556. ความสัมพันธ์ของฤทธิ์ ต้านอนุมูล อิสระกับปริมาณ tocopherol และ gamma aminobutyric acid ในข้าวกล้องงอก และข้าวกล้องงอก. [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2558 <http://www.brrd.in.th>
- มณฑนา นครเรียบ. 2555. ประโยชน์ที่ดีต่อสุขภาพของข้าวกล้องงอกและข้าวฮางงอก. วารสาร วิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี. 9(1): 69-79.

- ละมุล วิเศษ. 2555. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าว. วารสาร
วิทยาศาสตร์บูรพา. 17(1): 172-180.
- ยุพาพร ผลาขจรศักดิ์. 2547. การสกัดและความคงตัวของแอนโทไซยานินส์ที่สกัดได้จากเปลือก
มังคุด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เยาวพา นมัสศิลา และ พัทธชิน อุทัยสา. 2553. การวิเคราะห์ปริมาณกรดแกมมา-อะมิโนบิวเทริก
(กาบา) ในผลิตภัณฑ์ข้าวฮางอก. รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยา
เขตสกลนคร.
- เสริม จันทร์ฉาย. 2555. ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. รายงานโครงการนำร่องส่งเสริมระบบ
อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสำหรับชุมชน.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2555. การ
ปฏิบัติที่ดีสำหรับการผลิตข้าวกล้องงอก GOOD MANUFACTURING PRACTICES FOR
GERMINATED BROWN RICE. [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2557
<http://www.acfs.go.th>
- สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2559. สถานการณ์การผลิตและการตลาดข้าวของโลก ปีการผลิต
2557/2558. [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2558
http://www.thairiceexporters.or.th/default_th
- สุนทร สืบคำ และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับ
วัสดุร่วน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 1: 59-66.
- สุวรรณหา ทองหุ่ย และ ถวัลย์ศักดิ์ เผ่าสังข์. 2557. ความแกร่งที่เหมาะสมกับคุณภาพการสีข้าว
ไทย. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 45(2): 629-632.
- วรมพร วงศ์สุติน, พัทธราภรณ์ รัตนธรรม, ณัฏฐา เลหากุลจิตต์ และ อรพิน เกิดชูชื่น. 2555. การ
เปลี่ยนแปลงปริมาณสารสำคัญในข้าวกล้องงอก. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 43(2):
553-556.
- วัลย์พร อุดอมพานิช และ สุนีย์ ทองชัย. 2552. คู่มือคนกินข้าวกินอย่างมีคุณภาพ. ห้างหุ้นส่วน
จำกัดธนาพรินตัง. กรุงเทพมหานคร: 17-23.
- อรัญญา พรหมกุล, พัทธราภรณ์ ถิ่นจันทร์ และ เกรียงไกร พัทธยากร. 2557. ผลของการนึ่งต่อสาร
กาบาและสมบัติเชิงกายภาพและเคมีของข้าวฮางและข้าวฮางอกสีดำ. วารสารวิทยาศาสตร์
เกษตร. 45(2): 469-472.
- อริสรา รอดมัย และ อรอุมา จิตรวโรภาส. 2550. การผลิตคุกกี้โดยใช้แป้งข้าวหอมนิลทดแทนแป้ง
สาลีบางส่วน. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 3: 37-43.
- อภิชาติ วรรณวิจิตร. 2544. การค้นหาจีนทั้งหมดในข้าวไทย. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีข้าวไทย.
ฝ่ายนิเทศสัมพันธ์ศูนย์พันธุ์วิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติสำนักงาน พัฒนา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. กรุงเทพมหานคร. 133-146.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: 34-222.
- AOAC. 1999. Official Methods of Analysis of Internationasl. 16th ed. Gaithersburg, MD.

- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of International. 15th ed. The United States of America.
- Bala, B.K., Mondol, M.R.A., Biswas, B.K., DasChowdury, B.L. and Janjai, S. 2003. Solar drying of pineapple using solar tunnel drier. *Renewable energy*. 28: 183-190.
- Bhattacharya, R.K. 2011. Rice Quality. Woodhead Publishing. Philadelphia, The United States of America. 1902-3406.
- Bhattacharya, K.R. and Indudhara Swamy, Y.M. 1967. Conditions of drying paraboiled paddy for optimum milling quality. *Cereal Chemistry*. 44: 592-600.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E. and Berset, C. 1995. Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*. 28: 25-30.
- Benzie, I.F.F. and Strain, J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "Antioxidant Power": the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*. 239: 70-76.
- Brown, P.N. and Shipley, P.R. 2011. Determination of anthocyanin in canberry fruit and cranberry fruit products by high-performance liquid chromatography with ultraviolet detection: single-laboratory validation. *Journal of AOAC International*. 94(2): 459-466.
- Butsat, S. and Siriamornpun, S. 2010. Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk, bran and endosperm of Thai rice. *Food Chemistry*. 606-613.
- Chang, T.T. and Bardenas, E.A. 1965. The Morphology and Varietal Characteristics of the Rice Plant. Technical Bulletin 4. IRRI, Philippines.
- Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. 2014. Effects of superheated steam fluidized bed drying on the quality of parboiled germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39: 349-356.
- Chrispeels, M.L. and E.S.David. 1994. Plants, Genes and Agriculture. Jones and Bartlett Publishers. London. England. 478.
- Chungcharoen, T., Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S and Tungtrakul, P. 2012. Effect of drying temperature on drying characteristics and quality of germinated rices prepared from paddy and brown rice. *Drying Technology*. 30: 1844-1852.

- Chungcharoen, T., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2014. Effect of germination process and drying temperature on Gamma-aminobutyric acid (GABA) and starch digestibility of germinated brown rice. *Drying Technology*. 32: 742-752.
- Cihan, A., Kahveci, K. and Hacıhafizoğlu, O. 2007. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering*. 79: 293-298.
- Coda, R., Rizzello, C. G. and Gobbetti, M. 2010. Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread enriched of γ -aminobutyric acid (GABA). *Food Microbiology*. 137: 236-245.
- Esper, A. 1995. Solarer tunneltrockner mit photovoltaischem antriebssystem. Ph.D. thesis, Institute for agricultural engineering in the tropics and the subtropics group, Hohenheim University, Germany.
- Furtado, P., Figueiredo, P., Neves, H.C. and Pina, F. 1993. Photochemical and thermal degradation of anthocyanidins. *Journal of Photochemistry and Photobiology A. Chemistry*. 75: 113-118.
- Han, A. 2015. Effect of germination and parboiling on milling, physicochemical, and textural properties of medium- and long-grain rough rice. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Food Science. University of Arkansas.
- Hayat, A., Jahangir, T.M., Khunhawar, M.Y., Alamgir, A., Siddiqui, A.J. and Musharraf, S.G. 2014. Simultaneous HPLC determination of gamma amino butyric acid (GABA) and lysine in selected Pakistani rice varieties by pre-column derivatization with 2-hydroxynaphthaldehyde. *Journal of Cereal Science*. 60: 356-360.
- Hiroshi, C. 2005. Attraction of germinated brown rice and contribution to rice consumption expansion. Proc workshop and conference on rice the world at Stake: 67-70.
- Htwe, N.N., Srilaong, V., Tanprasert, K., Tongchitpakdee, S., Kanlayanarat, S. and Uthairatanakij, A. 2010. Effects of storage time and temperature on radical scavenging activities and bioactive compounds in colored rice varieties. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. (3 and 4): 26-31.
- Hossain, M.A. and Bala, B.K. 2007. Drying of hot chilli using solar tunnel drier. *Solar energy*. 18: 85-92.

- Hu, C., Zawistowski, J., Ling, W. and Kitts, D.D. 2003. Black rice (*Oryza sativa* L. *Indica*) pigmented fraction suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide in chemical and biological model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51: 5271-5277.
- Hu, Z., Tang, X., Liu, J., Zhu, Z. and Shao, Y. 2017. Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice. *Food Chemistry*. 214: 285-292.
- Insengard, H.D. 2006. Karl Fischer titration, a selective method for determining water in food. *Journal of Agroalimentary processes and technologies*. 12: 65-74.
- 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*. 85: 89-97.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B.K., Nagle, M. and Müller, J. 2009. Experimental and simulated performance of a pv-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*. 83: 1550-1565.
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C. and Khamvongsa, V. 2011. A large-scale greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*. 36: 1053-1062.
- Jayadeep, A. and Malleshi, N.G. 2011. Nutrients, composition of tocotrienols, tocopherols and gamma oryzanol and antioxidant activity in brown rice before and after germination. *CyTA-Journal of Food*. 9: 82-87.
- Jorgensen, E.M. 2005. GABA. [Online]. Available (16 February 2016) <http://www.wormbook.org>
- Juliano, B. O. 1985. Polysaccharides, Proteins and lipids of rice. *Rice chemistry and technology*, 2nd ed. Am. Assoc. of cereal chemists, Inc. St. Paul, Minnesota.
- Juliano, B.O. 1993. Rice in human nutrition. Food and agriculture organization of the United Nation, Rome.
- Kaewkiew, J., Nabnean, S. and Janjai, S. 2012. Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand. *Procedia Engineering*. 32: 433-439.
- Khuhawar, M.Y. and Rajper, A.D. 2003. Liquid chromatographic determination of gamma-aminobutyric acid in cerebrospinal fluid using 2-hydroxynaphthaldehyde as derivatizing Reagent. *Journal of Chromatography A*. 788: 413-418.

- Kim, H.S., Lee, E.J., Lim, S.T. and Han, J.A. 2015. Self-enhancement of GABA in rice bran using various stress treatments. *Food Chemistry*. 172: 657-662.
- Komatsuzaki, N., Shima, J., Kawamoto, S., Momose, H. and Kimura, T. 2005. Production of γ -aminobutyric acid (GABA) by *Lactobacillus paracasei* isolated from traditional fermented foods. *International Journal of Food Microbiology*. 22: 497-504.
- 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: 556-560.
- Laokuldilok, T. and Kanha, N. 2015. Effects of processing conditions on power properties of black glutinous rice (*Oryza sativa* L.) bran anthocyanins produced by spray drying and freeze drying. *Journal of Food Science and Technology*. 64: 405-411.
- Lazze, M.C., Savio, M., Pizzala, R., Gazzalini, O., Perucca, P., Scovassi, A.I., Stivala, L.A. and Bianchi, L. 2004. Anthocyanins induce cell cycle perturbations and apoptoss in different human celllines. *Carcinogenesis*. 25: 1427-1433.
- Lide, R.D. 2006. *Handbook of Chemistry and Physics*. 87th ed. CRC Press. New York.
- Liu, R.H. 2004. Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: Mechanism of action. *Journal of Nutrition*. 24: 3479-3485.
- Lee, J., Durst, R.W. and Wrolstad, R.E. 2005. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC International*. 88(5): 1269-1278.
- McRae, J.M., Day, M.P., Bindon, K.A., Kassara, S., Schmidt, S.A., Schulkin, A., Kolouchova, R. and Smith, P.A. 2015. Effect of early oxygen expose on red wine color and tannins. *Chemistry in the Vine and Wine Sciences*. 71: 3131-3137.
- Moongngarm, A. and Saetung, N. 2010. Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. *Food Chemistry*. 122: 782-788.
- Mujumdar, A.S. 1987. *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker, New York: 437-562.
- Norkaew, O., Boontakham, P., Dumri, K., Noneplab, N.L.A., Sookwong, P. and Mahatheeranont, S. 2017. Effect of post-harvest treatment on bioactive phytochemicals of Thai black rice. *Food Chemistry*. 217: 98-105.

- Oil, P., Ward, R., Adhikari, B. and Torley, P. 2014. Parboiled rice: Understanding from a materials science approach. *Journal of Food Engineering*. 124: 173-183.
- Oko, A.O., Ubi, B.E. and Dambaba, N. 2012. Rice cooking quality and physico-chemical characteristics: A comparative analysis of selected local and newly introduced rice varieties in Ebonyi State, Nigeria. *Food and Public Health*. 2(1): 43-49.
- Page, G. E. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M. S. Thesis. Purdue, USA: Department of Mechanical Engineering, Purdue University.
- Panchan, K. and Naivikul, O. 2009. Effect of pre-germination and parboiling on brown rice properties. *Asian journal of Food Agro-Industry*. 2(04): 515-524.
- Patras, A., Brunton, N.P., O'Donnell, C. and Tiwari, B.K. 2010. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science and Technology*. 21: 3-11.
- Pereira-Caro, G., Watanabe, S., Crozier, A., Fujimura, T., Yokata, T. and Ashihara, H. 2013. Phytochemical profile of Japanese black-purple rice. *Food Chemistry*. 141: 2821-2827.
- Plaitho, Y., Kangsadalampai, K. and Sukprasansap, M. 2013. The protective effect of Thai fermented pigmented rice on urethane induced somatic mutation and recombination in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Medicinal Plants Research*. 7(2): 91-98.
- Polthum, P. and Ahromrit, A. 2014. GABA content and antioxidant activity of Thai waxy corn seeds germinated by hypoxia method. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 3: 309-316.
- Rattanasena, P. and Bussaman, P. 2013. Antioxidant activities, total phenolic compounds and γ -aminobutyric acid contents of extracts derived from Thai pre-germinated brown. *Srinakarinwirot Science Journal*. 29(1): 95-105.
- Roohinejad, S., Mirhosseini, H., Saari, N., Mustafa, S., Alias, I., Hussin, M, S, A., Hamid, A and Manap, Y. M. 2009. Evaluation of GABA, crude protein and amino acid composition from different varieties of Malaysian's brown rice. *Australian Journal of Crop Science*. 3: 184-190.
- Sadabpod, K., Kangsadalampai, K. and Tongyonk, L. 2010. Antioxidant activity and antimutagenicity of Hom Nil rice and black glutinous rice. *Journal of Health Research*. 24(2): 49-54.

- Sadabpod, K., Tongyonk, L. and Kangsadalampai, K. 2014. Effect of Hom Nil rice and black glutinous rice extracts during treatment of chicken extract with sodium nitrite using Ames test. *Songklanagarind Medical Journal*. 32(3): 139-149.
- Saint-Cricq de Gaulejac, N., Glories, Y. and Vivas, N. 1999. Free radical scavenging effect of anthocyanin in red wines. *Food Research International*. 32: 327-333.
- Sareepuang, K., Siramornpun, S., Wiset, L. and Meeso, N. 2008. Effect of soaking temperature on physical, chemical and cooking properties of parboiled fragrant rice. *World Journal of Agricultural Sciences*. 4(4): 409-415.
- Sarma, A.D., Sreelakhmi, Y. and Sharma, R. 1997. Antioxidant ability of anthocyanins against ascorbic acid oxidation. *Journal of Plant Biochemistry and Molecular Biology*. 45: 671-674.
- Schirmer, P., Janjai, S., Esper, A., Smitabhindu, R. and Mühlbauer, W. 1995. Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. *Renewable Energy*. 7(2): 119-129.
- Shao, Y., Xu, F., Sun, X., Bao, J and Beta, T. 2014. Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.). *Journal of Cereal Science*. 59: 211-218.
- Singleton, V.L. and Rossi, J.A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagent. *American Journal of Enology and Viticulture*. 16: 144-153.
- Srisang, N., Prachayawarakorn, S., Varanyanond, W. and Saponronnarit, S. 2009. Germinated brown rice drying by hot-air fluidization technique. *Journal of Food Engineering*. 29: 55-63.
- Srisang, N., Varanyanond, W., Saponronnarit, 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(3-4): 385-392.
- Strumillo, C. and Kudra, T. 1930. *Drying: Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland. 69-75.
- Sutharut, J. and Sudarat, J. 2012. Total anthocyanin content and antioxidant activity of germinated colored rice. *International Food Research Journal*. 19(1): 215-221.
- Sumczynski, D., Kotásková, E., Družbíková, H. and Mlček, J. 2016. Determination of contents and antioxidant activity of free and bound phenolics compounds and in

- vitro digestibility of commercial black and red rice (*Oryza sativa* L.) varieties. Food Chemistry. 211: 239-246.
- Tang, Y., Zhang, B., Li, X., Chen, P. X., Zhang, H., Liu, R. and Tsao, R. 2016. Bound phenolics of quinoa seeds released by acid, alkaline and enzymatic treatments and their antioxidant and α -glucosidase and pancreatic lipase inhibitory effects. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 64: 1712–1719.
- Thuwapanichayanan, R., Yoosabai, U., Jaisut, D., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2015. Enhancement of γ -aminobutyric acid in germinated paddy by soaking in combination with anaerobic and fluidized bed heat treatment. Food and bio products processing. 95: 55-62.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. Journal of Food Engineering. 55: 209-216.
- Tortayeva, D.D. 2005. Effect of germination on nutrient composition of long grain rice, and physic-chemical-functional properties of rice protein. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Food Science. M.Kh. Dulaty Taraz State University, Kazakhstan.
- Walter, M., Marchesan, E., Sachet Massoni, P.F., Silva, P.L., Sarzi Sartori, M.G. and Ferreira, B.R. 2013. Antioxidant properties of rice grains with light brown, red and black pericarp colors and the effect of processing. Food Research International. 50: 698-703.
- Wei, Y., Shohag, M.J.T., Ying, F., Yang, X., Wu, C. and Wang, Y. 2013. Effect of ferrous sulfate fortification in germinated brown rice on seed iron concentration and bioavailability. Food Chemistry. 138: 1952-1958.
- White, G.M., Ross, T.J. and Ponekert, R. 1981. Fully exposed drying of popcorn. Transactions of the ASAE. 24(2): 466- 468.
- Wunjunkuk, K., Kettawan, A., Rungruang, T. and Charoenkairat, S. 2016. Anti-fibrotic and anti-inflammatory effects of parboiled germinated brown rice (*Oryza sativa*'KDML 105') in rats with induced liver fibrosis. Journal of Functional Foods. 26: 363-372.
- Zhang, H., Shao, Y., Bao, J. and Beta, T. 2015. Phenolic compounds and antioxidant properties of breeding lines between the white and black rice. Food Chemistry. 172: 630-639.
- Zhou, Z., Chen, X., Zhang, M. and Blanchard, C. 2014. Phenolics, flavonoids, proanthocyanidin and antioxidant activity of brown rice with different pericarp colors following storage. Journal of Stored Products Research. 59: 120-125.



ภาคผนวก



สมการที่ใช้ในการทำแห้ง

1. การหาปริมาณความชื้นในฐานเปียก

$$MC_{wb} = 100 \times \left(1 + \frac{W_f}{W_t} \left(\frac{MC_f}{100-1}\right)\right) \quad (4)$$

เมื่อ MC_{wb} คือ ปริมาณความชื้นฐานเปียก
 W_f คือ น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)
 W_t คือ น้ำหนักที่เวลาใดๆ (กรัม)
 MC_f คือ ความชื้นสุดท้าย (เปอร์เซ็นต์)

2. การหาปริมาณความชื้นในฐานแห้ง

$$MC_{db} = 100 \times \left(\frac{MC_t}{100-MC_t}\right) \quad (5)$$

เมื่อ MC_{db} คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์)
 MC_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์)





ภาคผนวก ข

มหาวิทยาลัยศิลปากร

การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพ คุณภาพด้านการหุงต้ม และจุลินทรีย์

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยวิธี Karl Fischer titration (Insengard, 2006)

1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องวิเคราะห์ความชื้นโดยการไตเตรทอัตโนมัติ
2. ก่อนการใช้ต้องทำการไตเตรท (Titer) คือการวัดความเข้มข้นของสารละลายด้วยการไตเตรท ก่อนการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในตัวอย่าง โดยดูค่านอนอลสัมบูรณ์ลงในโถทำปฏิกิริยาด้วยการกดปุ่ม In เพื่อให้เมทานอลสัมบูรณ์ไหลเข้ามาจนท่วมหัววัด (probe)
3. ทำการไตเตรทเพื่อหาว่าความเข้มข้นของ karl fischer reagent ว่า 1 มิลลิลิตร สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้กี่มิลลิกรัม
4. ก่อนการใช้งานทุกครั้งจะต้องทำการ conditioning เพื่อกำจัดน้ำในถ้วยก่อนโดยกดปุ่ม start และรอจนกระทั่งสัญลักษณ์ OK ปรากฏบนหน้าจอ
5. กดปุ่ม start อีกครั้งเพื่อใส่ตัวอย่างลงในโถทำปฏิกิริยา โดยชั่งถ้วยสำหรับวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่บรรจุตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ตักตัวอย่างประมาณ 0.1 กรัม ปิดฝาตัวอย่างอย่างรวดเร็วและชั่งน้ำหนักที่เหลืออีกครั้ง
6. ปั่นตัวอย่างด้วยเครื่องบดละเอียด (homogenizer) ที่เชื่อมต่อกับโถทำปฏิกิริยา เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ตัวอย่างกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นหยุดเครื่องปั่นละเอียด แล้วกดปุ่ม start เพื่อเริ่มการวิเคราะห์
7. รอจนกระทั่งสัญลักษณ์ KFR ปรากฏบนหน้าจอ และบันทึกค่าปริมาณความชื้นจากนั้นกด stop เพื่อหยุดการวิเคราะห์ แล้วทำการกำจัดตัวอย่างออกจากโถด้วยการดูดออก

2. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1999)

1. อบกระป๋องหาความชื้นพร้อมฝาที่ตุ๋นลมร้อนแบบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำออกจากตุ๋นใส่โถดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง นำมาชั่งน้ำหนัก (W1)
2. ชั่งตัวอย่างที่ต้องการหาความชื้นประมาณ 1-2 กรัม ใส่กระป๋องหาความชื้นที่อบจนน้ำหนักคงที่แล้ว บันทึกน้ำหนักของตัวอย่าง (W2)
3. นำไปอบที่ตุ๋นลมร้อนแบบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำออกจากตุ๋นใส่โถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมกับตัวอย่าง
4. อบซ้ำ จนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม (W3)

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{(W2 - W3)}{(W2 - W1)} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ W1 = น้ำหนักของกระป๋องหาความชื้น (กรัม)

W2 = น้ำหนักของกระป๋องหาความชื้น และตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W3 = น้ำหนักของกระป๋องหาความชื้น และตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

3. วิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (water activity: a_w)

วิเคราะห์โดยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ โดยทำการสุ่มตัวอย่างข้าวหอมนิลสาขงอกทั้งเปลือกจำนวน 3-5 กรัม ลงในถ้วยสำหรับวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ จากนั้นนำถ้วยที่บรรจุตัวอย่างวางลงในช่องใส่ตัวอย่างนำหัววัดวางลงบนถ้วยใส่ตัวอย่าง อ่านค่าที่ได้จากเครื่องวัดเมื่อตัวเลขบนหน้าจอคงที่ หรือหลังจากใส่ตัวอย่างไป 30 นาที

4. วิเคราะห์ปริมาณสารกาบา ด้วยวิธี HPLC (ดัดแปลงจาก Khunhawar และ Rajper, 2003)

การเตรียมสารสกัด

- นำตัวอย่างข้าวที่ทำการแกะห่อเปลือกออกแล้ว และคัดเฉพาะข้าวที่มีความยาวของเมล็ด 8-10 ส่วน ปั่นละเอียดแล้วชั่งน้ำหนักข้าวที่ปั่นละเอียดจำนวน 5 กรัม ลงในหลอดเหียงขนาด 50 มิลลิลิตร
- เติมเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 80 (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาตร 20 มิลลิลิตรลงในหลอดตัวอย่าง
- ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นละเอียด โดยใช้ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- นำไปเหียงด้วยเครื่องแยกสารแบบหมุนเหียงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที โดยกำหนดอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- เทสารละลายส่วนใสลงในขวดสีชาที่มีฝาปิด นำตะกอนไปสกัดซ้ำอีกครั้งโดยล้างด้วยเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.4 แบบสุญญากาศด้วย Buchner funnel
- นำสารละลายส่วนใส ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มาทำการระเหยด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนที่อุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารสกัดระเหยออกหมด
- ใช้น้ำกลั่นละลายตัวอย่าง และปรับปริมาตรเป็น 5 มิลลิลิตรในขวดบับปริมาตร จากนั้นเทใส่ขวดสีชานำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -22 องศาเซลเซียส จนกระทั่งทำการวิเคราะห์

การเตรียมสารมาตรฐานกาบาและการทำอนุพันธ์

ชั่งสารมาตรฐานกาบาด้วยเครื่องชั่งละเอียดชนิดนิยม 4 ตำแหน่ง จำนวน 0.0100 ± 0.0010 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ละลายสารมาตรฐานกาบานั้นด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร (stock solution) ทำการเจือจางสารมาตรฐานที่เตรียมไว้โดยการปิเปตมา 1, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 100

มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร จะได้ความเข้มข้นของสารมาตรฐานกาบาเป็น 10, 20, 40, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 24 แสดงกราฟมาตรฐานกาบาดังภาพที่ 29

ตารางที่ 24 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกาบาที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน กาบา (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาตรสารมาตรฐานกาบา (ไมโครลิตร)	ปริมาณน้ำกลั่น (ไมโครลิตร)
0	0	1,000
20	200	800
40	400	600
60	600	400
80	800	200
100	1,000	0

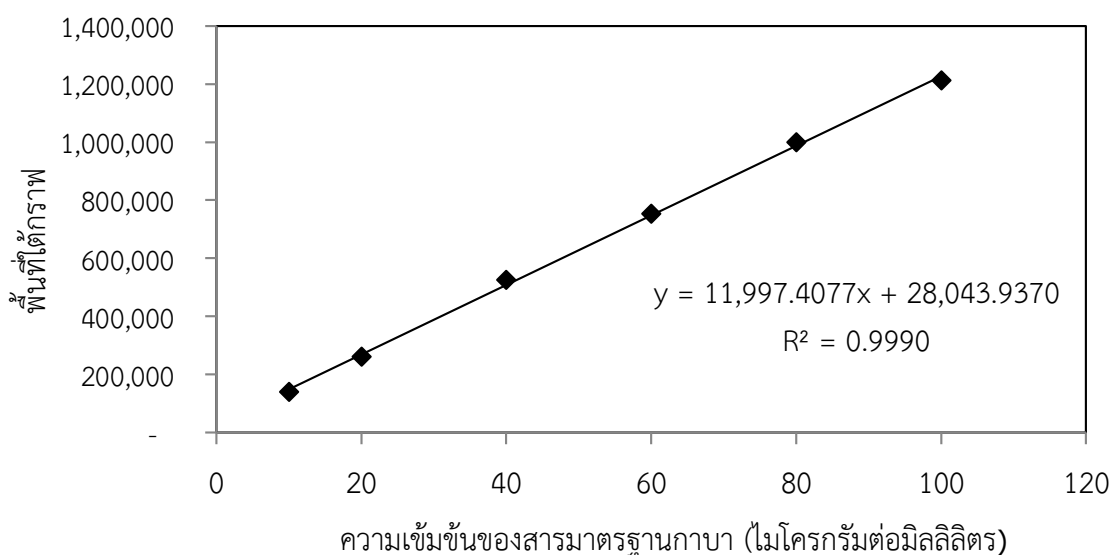
การทำอนุพันธ์จะใช้ตัวอย่าง หรือสารมาตรฐานกาบาปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารอนุพันธ์ 2-hydroxynaphthaldehyde (ร้อยละ 0.75 ละลายในเมทานอล) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 8.0 ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 60 วินาที แล้วนำไปทำปฏิกิริยาที่อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 80 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามกำหนดนำมาวางไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 5 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตรด้วยเอทานอลเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 25 สภาวะสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสารกาบาด้วย HPLC

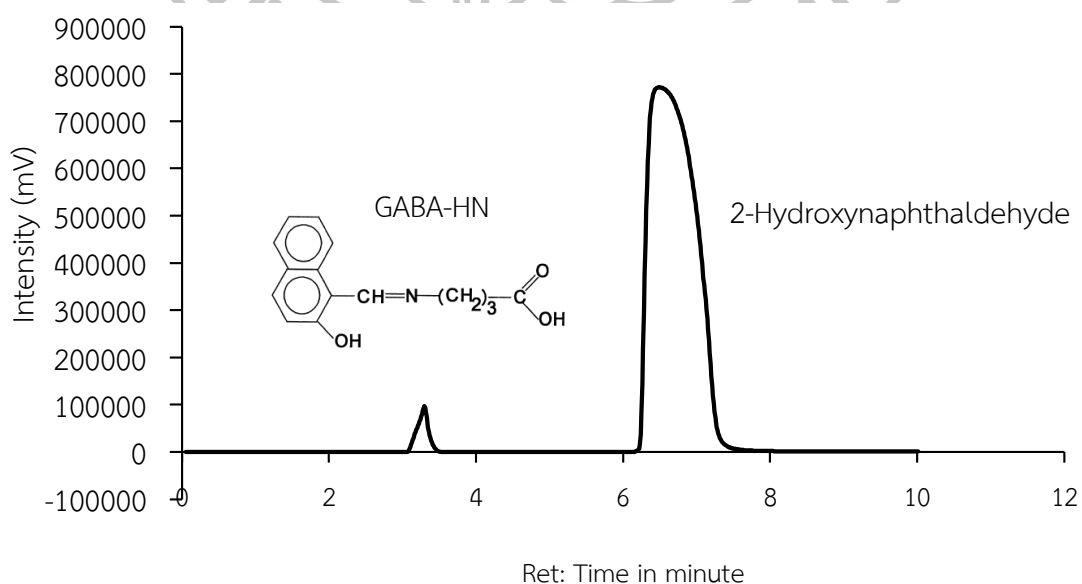
ตัวแปร	สภาวะที่เหมาะสม
คอลัมน์	C18; 5 μ m, 4.6x250 mm (Phenomenex)
ประเภทของเครื่องตรวจจับ	UV-visible detector
ความยาวคลื่นที่ตรวจจับ	254 นาโนเมตร
อุณหภูมิคอลัมน์	30 องศาเซลเซียส
ปริมาตรของสารที่ฉีดเข้าเครื่อง	10 ไมโครลิตร
อัตราการไหล	1.0 มิลลิลิตรต่อนาที
ระยะเวลาในการฉีด	25 นาที
สัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่	เอทานอลต่อน้ำ (62:38 v/v)

การวิเคราะห์สารสกัดตัวอย่าง

ปิเปตสารสกัดกาบาปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง ผสมกับสารอนุพันธ์ 2-hydroxynaphthaldehyde (ร้อยละ 0.75 ละลายในเมทานอล) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 8.0 ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 60 วินาที แล้วนำไปทำปฏิกิริยาที่อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลาที่อุณหภูมิ 80 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามกำหนดนำมาวางไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 5 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตรด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ตามสภาวะในตารางที่ 24



ภาพที่ 28 กราฟมาตรฐานสารกาบา



ภาพที่ 29 โครมาโตแกรมของสารกาบาในข้าวหอมนิล

5. การหาปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total monomeric anthocyanins) ด้วยวิธี pH-Differential Method (Lee และคณะ, 2005)

การเตรียมสารสกัด

1. นำตัวอย่างข้าวที่ทำการแกะเปลือกออกแล้ว และคัดเฉพาะข้าวที่มีความยาวของเมล็ด 8-10 ส่วน นำมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม ชั่งน้ำหนักข้าวที่ปั่นละเอียดปริมาณ 1 กรัม ลงในหลอดเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร

2. เติมน้ำที่ใช้ในการสกัด (เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 40 ต่อกรดไฮโดรคลอริก ในอัตราส่วน 98:2 ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาตร 20 มิลลิลิตรลงไปในหลอดตัวอย่าง

3. ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 10 นาที

4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่อุณหภูมิห้องที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 10 นาที

5. นำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องแยกสารแบบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที โดยกำหนดอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

6. เทสารละลายส่วนใสในขวดปรับปริมาตร 25 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรด้วยสารที่ใช้ในการสกัด

การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

1. เตรียม pH 1.0 buffer โดยชั่งโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl 0.025 M) 1.86 กรัมลงในบีกเกอร์แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบ 980 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ pH ให้ได้ (1.0 ± 0.05) ด้วย HCl (ปริมาตร 6.3 มิลลิลิตร) เทลงใน volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. เตรียม pH 4.5 buffer โดยชั่งโซเดียมอะซิเตทไดไฮเดรต ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.4 M) 54.43 กรัม ลงในบีกเกอร์แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบ 960 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ pH ให้ได้ (4.5 ± 0.05) ด้วย HCl (ปริมาตร 20 มิลลิลิตร) เทลงใน volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

การวิเคราะห์

1. ปิเปตสารสกัดเจือจางกับบัฟเฟอร์ pH 1.0 ในอัตราส่วน 1:10 นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้ง

520 และ 700 นาโนเมตร

2. ปิเปตสารสกัดเจือจางกับบัฟเฟอร์ pH 4.5 ในอัตราส่วน 1:10 นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้ง 520 และ 700 นาโนเมตร

3. ใช้ น้ำกลั่นเป็น Blank

4. คำนวณปริมาณแอนโทไซยานิน (cyanidine-3-glucoside equivalence, mg/l) ดังสูตร
สูตรการคำนวณ

$$\text{Monomeric anthocyanin} = \frac{A \times MW \times 10^3 \times DF}{\epsilon \times l}$$

เมื่อ $A = (A_{520\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH}1.0} - (A_{520\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH}4.5}$

$MW = 449.2 \text{ g/mol}$

$\epsilon = \text{molar extinction coefficient} = 26,900 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$DF = \text{dilution factor}$

$l = \text{pathlength; cm}$

6. การหาปริมาณแอนโทไซยานิน ด้วยวิธี HPLC (ดัดแปลงจาก Brown และ Shipley, 2011)

การเตรียมสารสกัด

ใช้สารสกัดจากข้อ 5

การเตรียมสารมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside

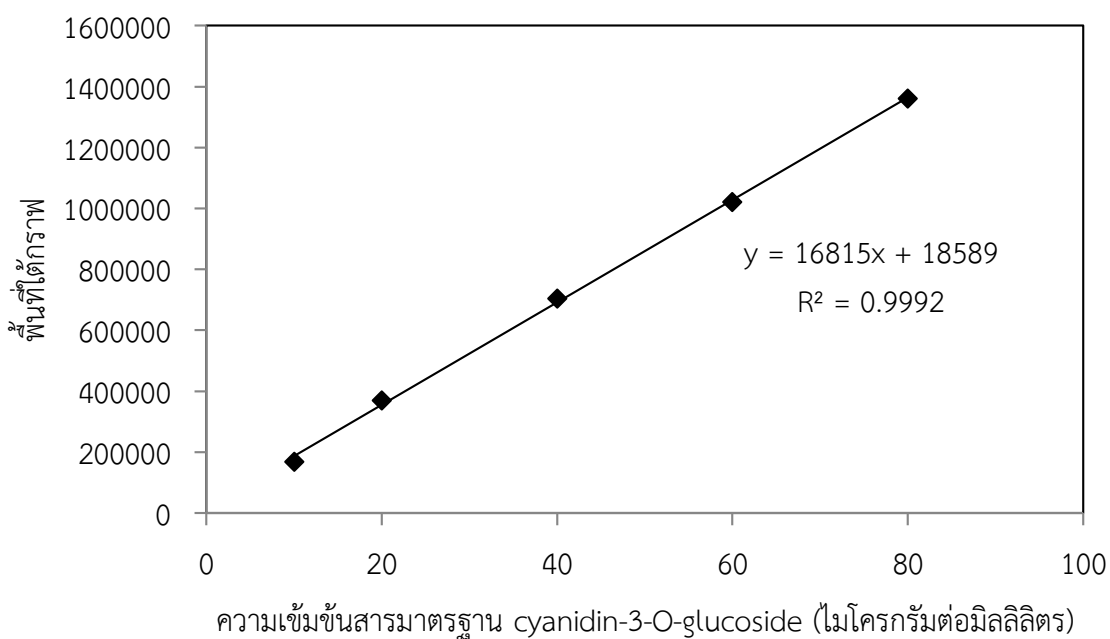
ชั่งสารมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside ด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง จำนวน 0.0100 ± 0.0010 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ละลายสารมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside ด้วยเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 40 ต่อกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 98:2 ปริมาตร/ปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร (stock solution) ทำการเจือจางสารมาตรฐานเพื่อให้มีความเข้มข้นของสารมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside เป็น 10, 20, 40, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside ที่ความเข้มข้นต่างๆ

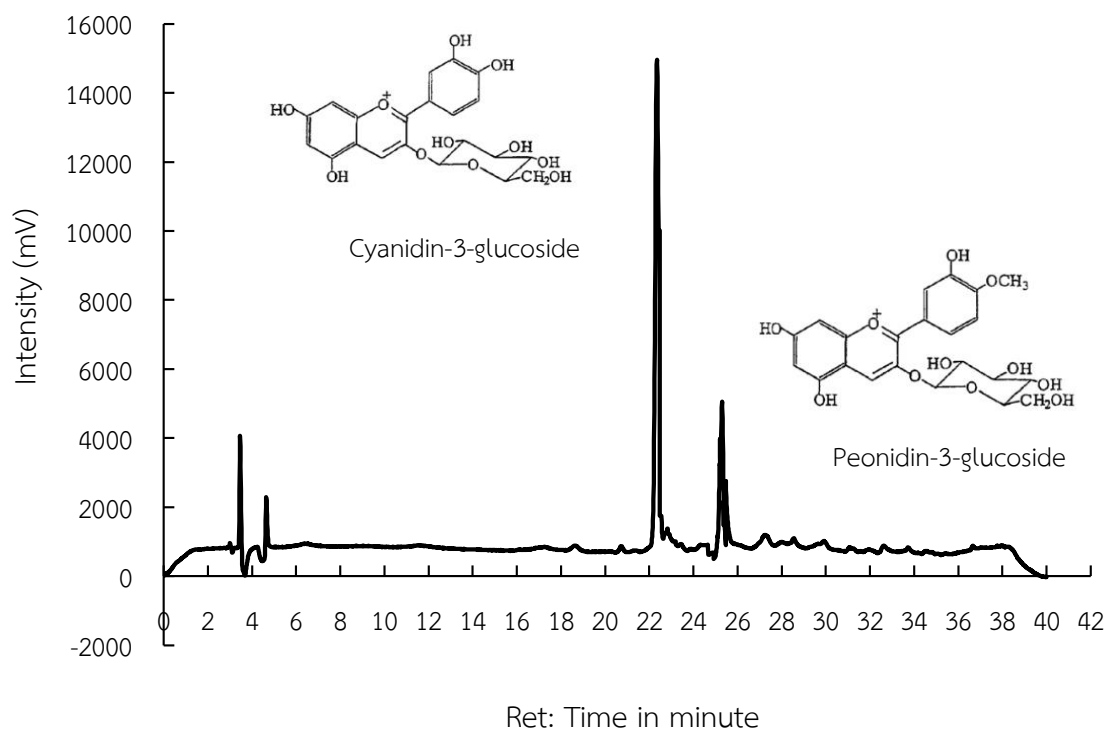
ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาตรสารมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside (ไมโครลิตร)	ปริมาณน้ำกลั่น (ไมโครลิตร)
0	0	1,000
20	200	800
40	400	600
60	600	400
80	800	200
100	1,000	0

ตารางที่ 27 สภาวะสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินด้วย HPLC

ตัวแปร	สภาวะที่เหมาะสม
คอลัมน์	C18; 5µm, 4.6x250 mm (Phenomenex)
ประเภทของเครื่องตรวจจับ	UV-visible detector
ความยาวคลื่นที่ตรวจจับ	520 นาโนเมตร
อุณหภูมิคอลัมน์	25 องศาเซลเซียส
ปริมาตรของสารที่ฉีดเข้าเครื่อง	10 ไมโครลิตร
อัตราการไหล	0.9 มิลลิลิตรต่อนาที
ระยะเวลาในการฉีด	35 นาที
สัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่	เฟสเคลื่อนที่ A: น้ำต่อกรดฟอสฟอริก (99.5: 0.5 v/v) เฟสเคลื่อนที่ B: น้ำต่ออะซิโตรไนไตรต่อกรดอะซิติกต่อกรดฟอสฟอริก (50: 48.5: 1: 0.5 v/v/v/v)
โหมด low pressure gradient	เวลา, นาที/ความเข้มข้นของเฟสเคลื่อนที่ B: 1-28 (10), 28-32 (50), 32-35 (75), 35-40 (10)



ภาพที่ 30 กราฟมาตรฐาน cyaniding-3-glucoside



ภาพที่ 31 โครมาโตแกรมของ cyanidin 3-glucoside และ peonidin 3-glucoside ในข้าวหอมนิล

7. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (ดัดแปลงจาก Singleton and Rossi, 1965)

การเตรียมสารสกัด

1. นำตัวอย่างข้าวที่ทำการกะเทาะเปลือกออกแล้ว และคัดเฉพาะข้าวที่มีความยาวของเมล็ด 8-10 ส่วน นำมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม ซึ่งน้ำหนักข้าวที่ปั่นละเอียดปริมาณ 5 กรัม ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นปริมาณ 20 มิลลิลิตรลงไปในช่วงตัวอย่าง
3. ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮมोजิไนเซอร์ โดยใช้ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่อุณหภูมิห้อง ที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. เทสารละลายกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.4 แบบสุญญากาศด้วย Buchner funnel นำตะกอนที่เหลือไปสกัดซ้ำอีกครั้ง
6. นำสารละลายส่วนที่ผ่านการกรอง ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มาทำการระเหยด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนที่อุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารสกัดระเหยออกหมด
7. ใช้เมทานอลละลายตัวอย่าง และปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร นำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -22 องศาเซลเซียส จนกระทั่งทำการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

การเตรียมสารมาตรฐานกรดแกลลิก

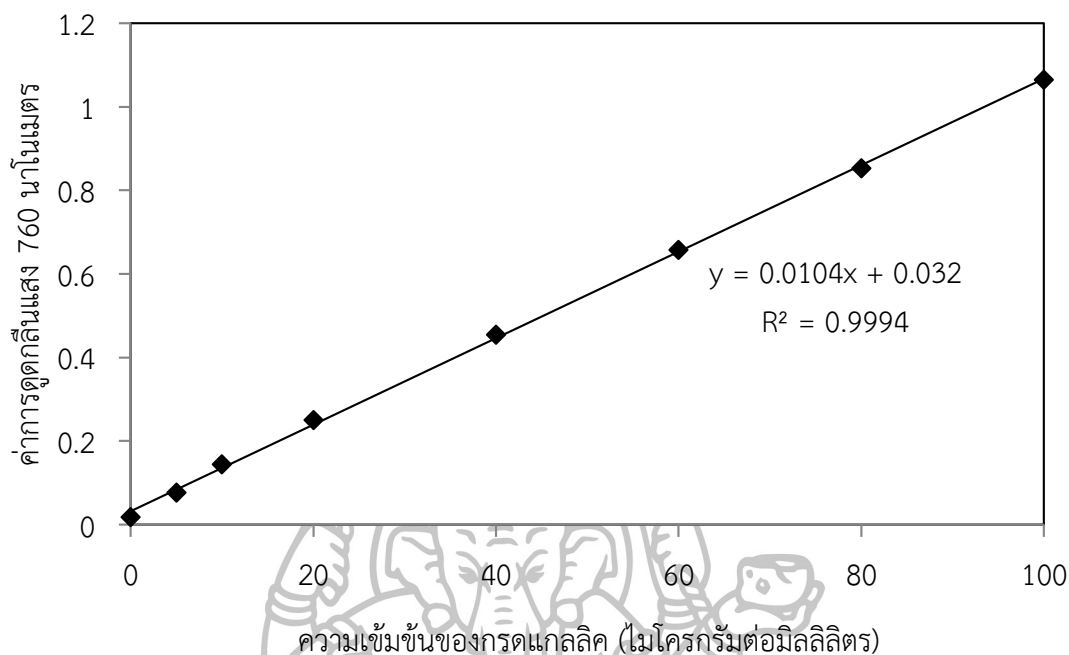
ชั่งสารมาตรฐานกรดแกลลิกด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง จำนวน 0.0100 ± 0.0010 กรัม บันทึกรหัสน้ำหนักที่แน่นอน ละลายสารมาตรฐานกรดแกลลิกด้วยเมทานอลปรับปริมาตรด้วยเมทานอลเป็น 100 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร (stock solution) ทำการเจือจางสารมาตรฐานที่เตรียมไว้โดยการปิเปตสารละลายมาตรฐาน ปริมาตร 0, 0.5, 1, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง แล้วปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้ครบ 100 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของสารมาตรฐานกรดแกลลิกเป็น 0, 5, 10, 20, 40, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงดังตารางที่ 28

ตารางที่ 28 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของกรดแกลลิก (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาตรกรดแกลลิก (ไมโครลิตร)	ปริมาณน้ำกลั่น (ไมโครลิตร)
0	0	1,000
20	200	800
40	400	600
60	600	400
80	800	200
100	1,000	0

การเตรียมกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก

ปิเปตสารมาตรฐานกรดแกลลิกแต่ละความเข้มข้น ปริมาตร 0.40 มิลลิลิตร เติมสาร Folin-Ciocalteu's phenol (ความเข้มข้นร้อยละ 10) ปริมาณ 2.0 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 7.5 (มวล/ปริมาตร) ปริมาณ 1.6 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร เป็นเวลา 60 วินาที ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 120 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตร โดยใช้เมทานอลเป็น Blank นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ในแต่ละความเข้มข้น ไปพล็อตกราฟมาตรฐานต่อไป



ภาพที่ 32 กราฟมาตรฐานสารละลายกรดแกลลิก

การวิเคราะห์สารสกัดตัวอย่าง

ปิเปตสารสกัดข้าวหอมนิลออกจากข้อ 1.7 ปริมาตร 0.40 มิลลิลิตร เติมนสาร Folin-Ciocalteu's phenol (ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์) ปริมาณ 2.0 มิลลิลิตร และเติมนสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 7.5 (มวล/ปริมาตร) ปริมาณ 1.6 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร เป็นเวลา 60 วินาที ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 120 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตร โดยใช้เมทานอลเป็น Blank

8. DPPH Method (Brand-Williams และคณะ, 1995)

การเตรียมสารสกัด

ใช้สารสกัดจากข้อ 7

การเตรียมสารละลาย

เตรียม 2, 2 diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ที่ความเข้มข้น 6×10^{-5} โมลาร์ โดยการชั่ง DPPH จำนวน 0.0118 กรัม ในปิเกตอร์ขนาดเล็ก เติมนเมทานอลลงไปเล็กน้อยค่อยๆ ทำการคนให้ละลาย แล้วค่อยๆ เพิ่มปริมาณเมทานอล เมื่อละลายหมดแล้วเทใส่ขวดปรับปริมาตร 500 มิลลิลิตรที่มีการห่อหุ้มด้วยวัสดุป้องกันแสง จากนั้นปรับปริมาตรด้วยเมทานอลจนครบ 500 มิลลิลิตร

การเตรียมสารมาตรฐาน

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox ที่ความเข้มข้นต่างๆ 0-250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยการชั่งสาร Trolox 0.0250 ± 0.0010 กรัม ละลายด้วยเมทานอล ปรับปริมาตรให้เป็น 50

มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร ทำการเจือจางสารมาตรฐานด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน แสดงดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ Trolox (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาตร Trolox (ไมโครลิตร)	ปริมาณน้ำกลั่น (ไมโครลิตร)
0	0	1,000
20	100	900
40	200	800
60	300	700
80	400	600
100	500	500

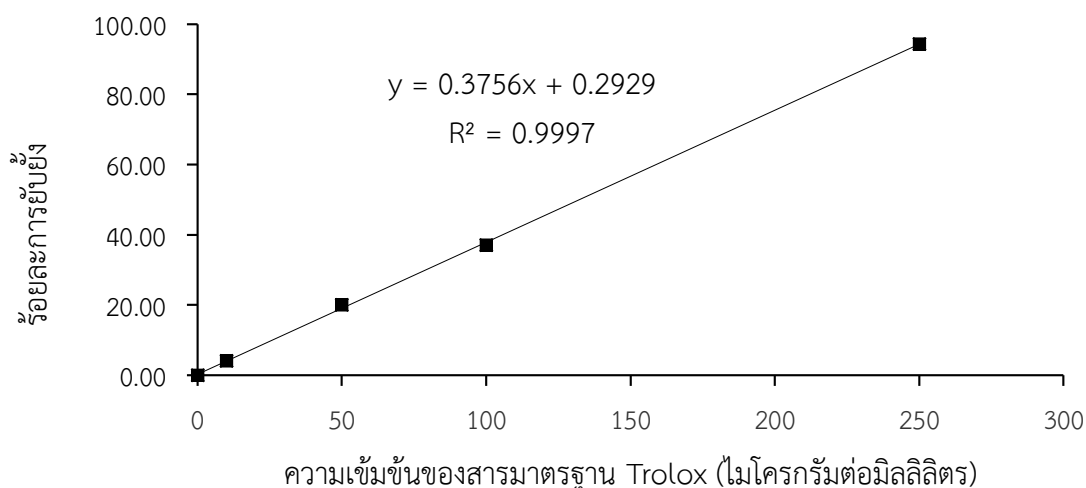
2. ปิเปตสารละลาย DPPH ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายมาตรฐาน Trolox แต่ละความเข้มข้น ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร (ทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง)

3. สำหรับหลอดควบคุมใช้เมทานอลปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แทนสารละลายมาตรฐาน Trolox ส่วนหลอดแปลงก็ใช้เมทานอล

4. คำนวณหาร้อยละของการยับยั้ง (% inhibition) จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละของการยับยั้ง} = \left[\frac{A_{517\text{control}} - A_{517\text{test sample}}}{A_{517\text{control}}} \right] \times 100$$

5. นำร้อยละของการยับยั้งคำนวณได้ของแต่ละของการยับยั้ง และความเข้มข้นไปเขียนกราฟมาตรฐานต่อไปนี้



ภาพที่ 33 กราฟมาตรฐานสารละลาย Trolox

9. FRAP Method (Benzie และ Strain, 1996)

การเตรียมสารสกัด

ใช้สารสกัดจากข้อ 7

การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 300 โมลาร์ pH 3.6

ชั่งสาร sodium acetate trihydrate ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 3.1 กรัม ละลายในกรดอะซิติก ปริมาตร 16 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรครบ 1000 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร วัดค่าความเป็นกรดต่าง เก็บสารละลายไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 40 มิลลิโมลาร์

เตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยการปิเปตกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 37 ปริมาตร 8.3 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น ทำการเจือจางให้มีความเข้มข้น 40 มิลลิโมลาร์ โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น

3. สารละลาย TPTZ ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์

ชั่งสาร TPTZ จำนวน 0.0312 กรัม ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 40 มิลลิโมลาร์ โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เมื่อสารละลายหมดแล้วทำการปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร

4. สารละลายไอร์ออน (II) คลอไรด์ (FeCl_2) ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์

ชั่งไอร์ออน (II) คลอไรด์ ($\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.054 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 10 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร

5. การเตรียม FRAP reagent

เตรียม FRAP reagent โดยผสมสารละลายดังนี้ TPTZ ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตรผสมกับ สารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 300 โมลาร์ pH 3.6 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และผสมกับสารละลาย ไอร์ออน (II) คลอไรด์ ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งสารละลายที่ได้ควรมีเป็นสีฟางข้าว ในการวิเคราะห์จะต้องทำการเตรียม FRAP reagent ใหม่ทุกครั้ง

6. การเตรียมสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) ซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

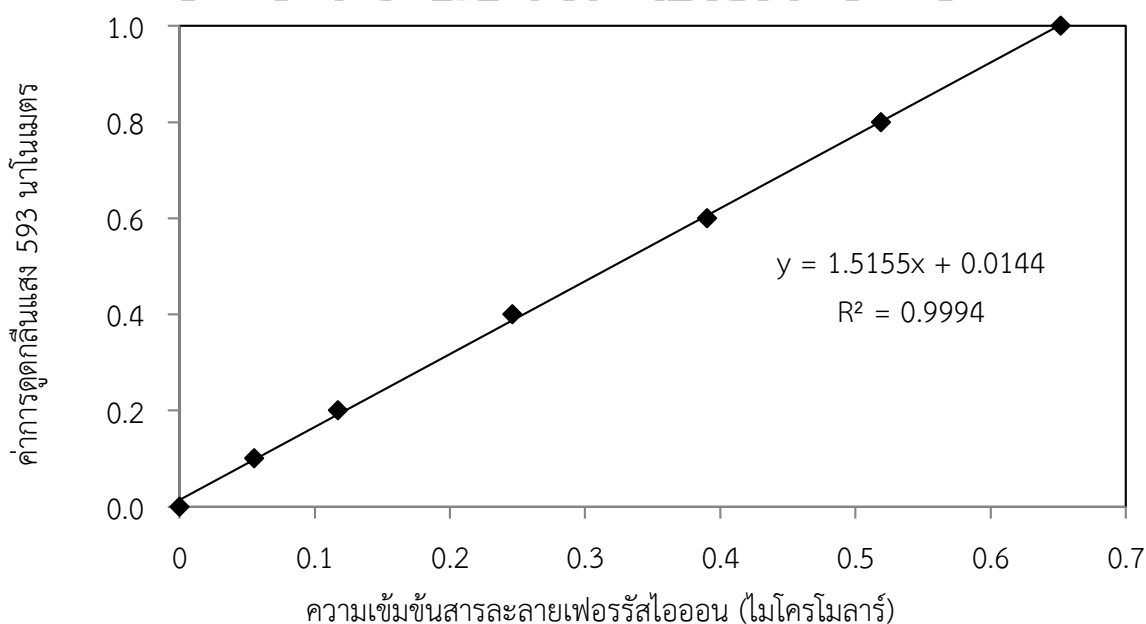
ซิงไอร์ออน (II) ซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.1390 กรัม จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตรและเจือจางสารละลายมาตรฐานให้มีความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ แสดงดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสไอออนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน (ไมโครโมลต่อลิตร)	ปริมาตร $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (มิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำกลั่น (ไมโครลิตร)
0	0	10
0.1	1	9
0.2	2	8
0.4	4	6
0.6	6	4
0.8	8	2
1.0	10	0

7. การเตรียมกราฟมาตรฐานเฟอร์รัสไอออน ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้ด้วยไมโครปิเปต ปริมาตร 100 ไมโครลิตร จากนั้นเติมสารละลาย FRAP reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น Blank



ภาพที่ 34 กราฟมาตรฐานสารละลายเฟอร์รัสไอออน

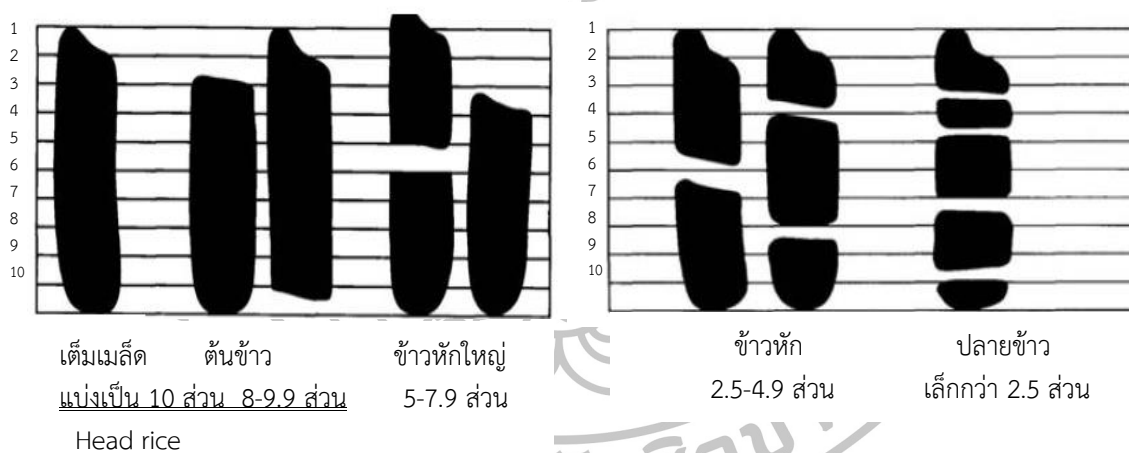
การวิเคราะห์สารสกัดตัวอย่าง

ปิเปตสารสกัดจากตัวอย่าง ปริมาตร 100 ไมโครลิตร จากนั้นเติมสารละลาย FRAP reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น Blank

10. การหาร้อยละต้นข้าว (Head rice yield) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตร, 2555)

ต้นข้าว (Head rice) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวมากกว่าข้าวหักแต่ไม่ถึงความยาวของข้าวเต็มเมล็ด และรวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ไม่ถึงร้อยละ 80 ของเนื้อเมล็ด การหาร้อยละต้นข้าวทำได้โดยสุ่มตัวอย่างข้าวหอมนิลฮางอก นำมาชั่งน้ำหนัก 250 กรัม ผ่านเข้าเครื่องมากะเทาะเปลือก จากนั้นนำไปคัดแยกเมล็ดด้วยเครื่องคัดขนาด เพื่อคัดปริมาณต้นข้าว (ภาพที่ 27)

$$\text{Head rice yield (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักต้นข้าว (กรัม)}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก (กรัม)}} \times 100$$



ภาพที่ 35 ขนาดของเมล็ดข้าว

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรฯ, 2555

11. การหาร้อยละข้าวหัก (broken rice) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตร, 2555)

ข้าวหัก (Broken rice) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 2.5 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึงความยาวของเมล็ดต้นข้าว และรวมถึงเมล็ดข้าวที่แตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ไม่ถึงร้อยละ 80 ของเมล็ด

การหาร้อยละข้าวหักทำได้โดยสุ่มตัวอย่างข้าวหอมนิลฮางอก นำมาชั่งน้ำหนัก 250 กรัม ผ่านเข้าเครื่องมากะเทาะเปลือก จากนั้นนำไปคัดแยกเมล็ดด้วยเครื่องคัดขนาด เพื่อคัดข้าวเมล็ดหัก

$$\text{Broken rice yield (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวหัก (กรัม)}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก (กรัม)}} \times 100$$

12. ระยะเวลาในการหุงต้ม (ดัดแปลงจาก Juliano และ Bechtel, 1985)

หาระดับการสุกของข้าวหอมนิลฮางงอก เพื่อหาเวลาที่ใช้ในการหุงข้าวสุก โดยเปรียบเทียบกับข้าวกล้องหอมนิล (ตัวอย่างควบคุม) โดยทำการชั่งตัวอย่างข้าวที่ทำการกะเทาะเปลือกออกแล้ว และคัดเฉพาะข้าวเต็มเมล็ด จำนวน 2 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 98 ± 1 องศาเซลเซียส ที่เวลา 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 และ 30 นาที นำเมล็ดข้าว 10 เมล็ดที่สุกที่เวลาต่างๆ มาวางลงบนแผ่นกระดาษ แล้วใช้แผ่นกระดาษอีกหนึ่งแผ่นกดทับลงเพื่อบีบจำนวนจุดไตขุนขาว แล้วทำการคำนวณหาระดับการสุกของข้าวหอมนิลฮางงอกจากสูตร

$$\% \text{degree of cooking} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดข้าวทั้งหมด} - \text{จำนวนเมล็ดข้าวที่มีจุดไตขุนขาวเหลืออยู่}}{\text{จำนวนเมล็ดข้าวทั้งหมด}} \times 100$$

13. อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (ดัดแปลงจาก อรอนงค์, 2550)

ทำการชั่งตัวอย่างข้าวที่ทำการกะเทาะเปลือกออกแล้วและคัดเฉพาะข้าวเต็มเมล็ด จำนวน 10 เมล็ด ทำการวัดความยาวของเมล็ดข้าวกล้องหอมนิลด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ทำการสุ่มตัวอย่าง 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำข้าวไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 98 ± 1 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่ทำให้ข้าวเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นทำการวัดความยาวของเมล็ดข้าวหลังจากที่หุงสุกแล้วโดยเลือกวัดจากเมล็ดที่ตรง แล้วคำนวณอัตราการยืดตัวของข้าวสุกจากสมการ

$$\text{อัตราการยืดตัวของข้าวสุก} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสุก}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสาร}}$$

14. การอุ้มน้ำของข้าวสุก (ดัดแปลงจาก Oko และคณะ, 2012)

ทำการชั่งตัวอย่างข้าวที่ทำการกะเทาะเปลือกออกแล้วและคัดเฉพาะข้าวเต็มเมล็ด จำนวน 2 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 98 ± 1 องศาเซลเซียสตามเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นเทน้ำใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วทำการชั่งน้ำหนักข้าวหุงสุก หลังจากนั้นคำนวณผลต่างของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของข้าวสุกกับข้าวกล้องจากสมการ

$$\text{อัตราการอุ้มน้ำของข้าวสุก} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสุก (กรัม)}}{\text{น้ำหนักข้าวกล้อง (กรัม)}}$$

15. ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก (ดัดแปลงจาก Oko และคณะ, 2012)

ทำทำการชั่งตัวอย่างข้าวที่ทำการกะเทาะเปลือกออกแล้วและคัดเฉพาะข้าวเต็มเมล็ด จำนวน 2 กรัมเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 98 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ชั่งน้ำหนักงานเพาะเชื้อ จดบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน หลังจากนั้นนำน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการหุงข้าวรินใส่จานเพาะเชื้อที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักอีกครั้ง จากนั้นนำงานเพาะเชื้อไปทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักงานเพาะเชื้อพร้อมกับของแข็ง คำนวณผลต่างของน้ำหนักเป็นปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก

16. ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้วยเครื่อง Texture Analyzer (ดัดแปลงจาก Juliano และ Bechtel, 1985)

การเตรียมตัวอย่าง

ทำทำการชั่งตัวอย่างข้าวที่ทำการกะเทาะเปลือกออกแล้วและคัดเฉพาะข้าวเต็มเมล็ด จำนวน 2 กรัมเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 98 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวสุก

1. เสียบปลั๊กเครื่องสำรองไฟ เปิดสวิตช์เครื่องตรงปุ่ม on อุปกรณ์เครื่องวัดเนื้อสัมผัส และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการทำงาน
2. เปิดคอมพิวเตอร์ และเปิดสวิตช์ของฐานทดสอบที่อยู่ด้านหลังเครื่อง
3. เปิดโปรแกรม Texture expert จะปรากฏหน้าต่างลงชื่อเข้าใช้งาน กดตกลง จากนั้นเข้าไปที่ file เลือก new project เลือก restart
4. เลือก T.A. แล้วเลือก calibration force เพื่อทำการทดสอบการทำงานของเครื่อง หน้าต่างจะขึ้นเตือนให้ตรวจสอบว่ามีวัตถุขวางหัววัดหรือไม่ ถ้าตรวจสอบว่าไม่มีให้กดตกลง จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างใหม่แจ้งให้วางตุ้มน้ำหนัก จากนั้นยกตุ้มน้ำหนักวางลงบนคานวัด จากนั้นกดตอบตกลงเมื่อหน้าจอปรากฏข้อความ calibration successful กดตกลงแล้วเอาตุ้มน้ำหนักลง จากนั้นจะเป็นการทำ probe calibration โดยกำหนดระยะทางให้มีความสูงกว่าขึ้นตัวอย่าง 2 เซนติเมตร สวมหัววัดขนาด P/25 จากนั้นตอบตกลง หัววัดจะเลื่อนลงมาแตะกับตัวฐานแล้วกลับไปยังตำแหน่งที่กำหนด
5. เลือกคำสั่งเพื่อตั้งค่าต่างๆ ในการวัด โดยดัดแปลงจาก Juliano และ Bechtel, (1985) กำหนดให้ความเร็วก่อนการวัด เท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที กดตัวอย่างลงไป 2 มิลลิเมตร ความเร็วหลังการวัด เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นกดบันทึกวิธีการไว้ในแฟ้มที่ต้องการ
6. เลือก run a test เพื่อทำการวัดตัวอย่าง โดยวางตัวอย่างไว้ได้ตำแหน่งหัววัด วัดครั้งละ 3 เมล็ด จำนวน 5 ซ้ำต่อตัวอย่าง ทำการตั้งชื่อไฟล์ของการวัดตัวอย่างเพื่อบันทึกข้อมูล จากนั้นตอบตกลง หัววัดจะเลื่อนลงมากดตัวอย่างตามค่าที่ตั้งไว้
7. ข้อมูลที่ได้จะเป็นกราฟ ซึ่งหาค่าได้จากการใช้คำสั่ง process data

8. กำหนดค่าใน Procees data หรือการเขียน Macro ซึ่งใช้ในการหาค่าจากกราฟ ออกมาเป็นตัวเลข โดยกด edit ที่แถบคำสั่ง กำหนดค่าให้โปรแกรมเลือกพิกที่สูงที่สุดพิกแรก ที่แสดงค่า hardness (N) จะได้ค่าของทุกซ้ำของตัวอย่างออกมา

17. การวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และราทั้งหมด (Yeast and Mold) ตามวิธีของ AOAC, 2000

อาหารเลี้ยงเชื้อและสารละลายสำหรับเจือจาง

-อาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar

-Peptone

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) ปริมาณ 23.5 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1000 มิลลิลิตร นำไปต้มจนอาหารเลี้ยงเชื้อละลายจนหมด จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดันอุณหภูมิ 121-124 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที อาหารเลี้ยงเชื้อที่ได้จะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 0.7 ± 0.2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

การเตรียมสารละลายสำหรับเจือจาง

ชั่งเปปโตเนปริมาณ 25 หรือ 50 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 250 หรือ 500 มิลลิลิตรตามลำดับ จะได้สารละลายเปปโตเนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ใช้ในการเจือจางตัวอย่างวิธีการวิเคราะห์

1. ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างข้าวหอมนิลสาขงอกที่ละลายด้วยเปปโตเน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายบัฟเฟอร์เปปโตเน 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม (Vortex mixer) จะได้สารละลายตัวอย่างที่เจือจาง 1:100 หรือ 10^{-1}
2. ใช้ปิเปตดูดสารละลายจากข้อ 1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายบัฟเฟอร์เปปโตเน 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม (Vortex mixer) จะได้สารละลายตัวอย่างที่เจือจาง 1:100 หรือ 10^{-2} ทำเช่นเดียวกันจนได้สารละลายเจือจาง 10^{-6}
3. ใช้ปิเปตดูดสารละลายตัวอย่างที่ระดับความเจือจาง 10^{-3} - 10^{-6} ลงในจานเพาะเชื้อจานละ 1 มิลลิลิตร โดยแต่ละระดับความเจือจางจะทำ 2 จาน โดยเริ่มจากระดับความเข้มข้นต่ำสุด
4. เทอาหารเลี้ยงเชื้อ PCA ที่ยังเหลวอยู่ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส ลงในจานเพาะเชื้อที่มีสารละลายตัวอย่าง ปริมาณ 15-20 มิลลิลิตร ภายใน 1-5 นาที
5. ผสมสารละลายตัวอย่างและอาหารเลี้ยงเชื้อให้เข้ากันดี วางทิ้งไว้ให้อาหารแข็งตัวจากนั้นคว่ำจานอาหารเลี้ยงเชื้อลง แล้วนำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 1 ชั่วโมง

การตรวจนับโคโลนีและการรายงานผล

หลังจากบ่มจานเพาะเชื้อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ตรวจนับจำนวนโคโลนีบนจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนีอยู่ระหว่าง 30-300 โคโลนี หาค่าจำนวนโคโลนีเฉลี่ยจากทั้งสองจานเพาะเชื้อ รายงานตรวจนับในหน่วยจำนวนโคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (CFU/g)

อาหารเลี้ยงเชื้อและสารละลายสำหรับเชื้อจาง

-อาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar

- Peptone

-สารละลายทาร์ทริกความเข้มข้นร้อยละ 10

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) ปริมาณ 39.0 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1000 มิลลิลิตร นำไปต้มจนอาหารเลี้ยงเชื้อละลายจนหมด จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดันที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ปรับความเป็นกรด-ด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อให้เท่ากับ 3.5 โดยเติมสารละลายกรดทาร์ทริกความเข้มข้นร้อยละ 10 ลงไป

การเตรียมสารละลายสำหรับเชื้อจาง

ชั่งเปปโตรปริมาณ 25 หรือ 50 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 250 หรือ 500 มิลลิลิตรตามลำดับ จะได้สารละลายเปปโตนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ใช้ในการเชื้อจางตัวอย่างวิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่าง ผสมกับเปปโตนในอัตราส่วน 1:9 น้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำไปตีปั่นเป็นนัยเครื่อง Stomacher blender ประมาณ 3 นาทีเวลา จากนั้นใช้ปิเปตดูดตัวอย่างข้าวหอมนิลฮางงอกที่ละลายด้วยเปปโตน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายบัฟเฟอร์เปปโตน 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม (Vortex mixer) จะได้สารละลายตัวอย่างที่เชื้อจาง 1:10 หรือ 10^{-1}
2. ใช้ปิเปตดูดสารละลายจากข้อ 1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายบัฟเฟอร์เปปโตน 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม (Vortex mixer) จะได้สารละลายตัวอย่างที่เชื้อจาง 1:100 หรือ 10^{-2} จนได้ระดับเชื้อจางของสารละลายเท่ากับ 10^{-6}
3. ใช้ปิเปตดูดสารละลายตัวอย่างที่ระดับความเชื้อจาง 10^{-3} - 10^{-6} ลงในจานเพาะเชื้อ จานละ 1 มิลลิลิตร โคนในแต่ละระดับความเชื้อจางจะทำ 2 จานโดยเริ่มจากระดับความเข้มข้นต่ำสุด
4. เทอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่ยังเหลวอยู่ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส ลงในจานเพาะเชื้อที่มีสารละลายตัวอย่าง ปริมาณจานละ 15-20 มิลลิลิตร ภายใน 1-5 นาที
5. ผสมสารละลายตัวอย่างและอาหารเลี้ยงเชื้อให้เข้ากันดี วางทิ้งไว้ให้อาหารแข็งตัว จากนั้นคว่ำจานอาหารเลี้ยงเชื้อลง แล้วนำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 5 วัน

การตรวจนับโคโลนีและการรายงานผล

หลังจากบ่มจานเพาะเชื้อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ตรวจนับจำนวนโคโลนีบนจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนีอยู่ระหว่าง 30-300 โคโลนี หาค่าจำนวนโคโลนีเฉลี่ยจากทั้งสองจานเพาะเชื้อรายงานการตรวจนับในหน่วยจำนวนโคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (CFU/g)



ตารางที่ 31 ค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวหอมนิลฮางอก

ชื่อ แบบจำลอง	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ค่าคงที่ในแบบจำลอง			ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที		ค่าคงที่ในแบบจำลอง			ความเร็วลม 1.0 เมตร ต่อวินาที	
					R ²	RMSE				R ²	RMSE
Newton	40	k=0.26071			0.9965	0.0263923	k=0.400587			0.9987	0.012349
	45	k=0.36120			0.9970	0.0236054	k=0.598989			0.9977	0.020181
	50	k=0.48824			0.9938	0.0385145	k=0.7995			0.9966	0.022696
	55	k=0.63273			0.9926	0.0366178	k=0.98954			0.9978	0.018956
	60	k=0.72042			0.9948	0.0319201	k=1.23268			0.9963	0.023366
Page	40	k=0.20787	n=1.17636		0.9996	0.005230	k=0.377812	n=1.06195		0.9992	0.007609
	45	k=0.31041	n=1.15117		0.9994	0.0065167	k=0.557425	n=1.13032		0.9998	0.003814
	50	k=0.40329	n=1.25967		0.9995	0.0063066	k=0.770166	n=1.14893		0.9996	0.005552
	55	k=0.55906	n=1.24932		0.9995	0.0065045	k=0.977687	n=1.11919		0.9996	0.005670
	60	k=0.66790	n=1.21283		0.9996	0.0060135	k=1.272985	n=1.15291		0.9996	0.006762
Modified Page	40	k=0.22132	n=1.17799		0.9965	0.0263923	k=0.37726	n=1.06176		0.9987	0.012349
	45	k=0.31353	n=1.15201		0.9970	0.0236054	k=0.53511	n=1.11937		0.9977	0.020181
	50	k=0.38899	n=1.25515		0.9938	0.0385145	k=0.71767	n=1.11407		0.9966	0.022696
	55	k=0.51455	n=1.22969		0.9926	0.0366178	k=0.92134	n=1.07012		0.9979	0.018956
	60	k=0.60981	n=1.18137		0.9948	0.0319201	k=1.17708	n=1.04724		0.9963	0.023366

ชื่อ แบบจำลอง	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ค่าคงที่ในแบบจำลอง			ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที		ค่าคงที่ในแบบจำลอง			ความเร็วลม 1.0 เมตร ต่อวินาที	
					R ²	RMSE				R ²	RMSE
Logarithmic	40	k=0.20044	a=1.20631	c=-0.18680	0.9992	0.007318	k=0.38810	n=1.03806	c=-0.02440	0.9988	0.009386
	45	k=0.29271	a=1.15512	c=-0.13897	0.9990	0.0083501	k=0.51653	n=1.10576	c=-0.09101	0.9991	0.008542
	50	k=0.37358	a=1.22760	c=-0.19120	0.9975	0.0143589	k=0.65184	n=1.13541	c=-0.12497	0.9989	0.009294
	55	k=0.44649	a=1.25157	c=-0.23321	0.9984	0.0115523	k=0.85080	n=1.09895	c=-0.087348	0.9991	0.008423
	60	k=0.55205	a=1.19771	c=-0.17621	0.9985	0.0110483	k=0.94907	n=1.17441	c=-0.16647	0.9994	0.006673



ตารางที่ 32 พารามิเตอร์ทางสถิติในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวหอมนิลฮางอกด้วยการตากแดด และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

Model name	การทำแห้ง	พารามิเตอร์ทางสถิติ	
		R ²	RMSE
Newton	ตากแดด	0.9570	0.00505
	อุโมงค์ลม	0.9589	0.23222
	เรือนกระจก	0.9641	0.22491
Page	ตากแดด	0.9943	0.08192
	อุโมงค์ลม	0.9932	0.08426
	เรือนกระจก	0.9962	0.69953
Modified Page	ตากแดด	0.9570	0.26662
	อุโมงค์ลม	0.9589	0.23222
	เรือนกระจก	0.9641	0.07952
Logarithmic	ตากแดด	0.9787	0.05359
	อุโมงค์ลม	0.9784	0.50547
	เรือนกระจก	0.9801	0.05033

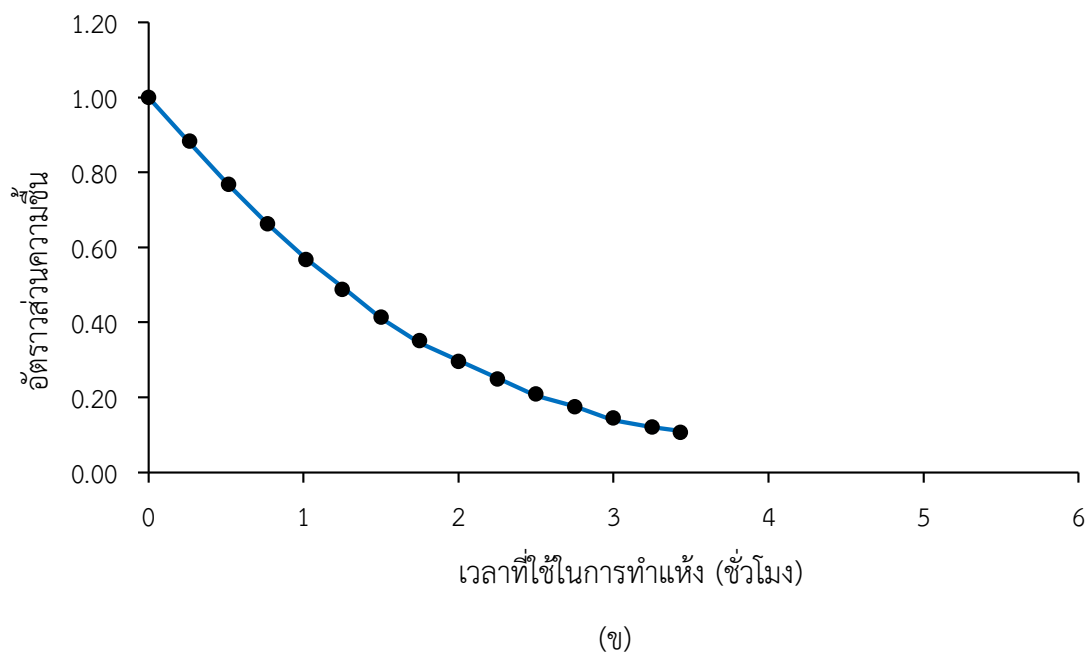
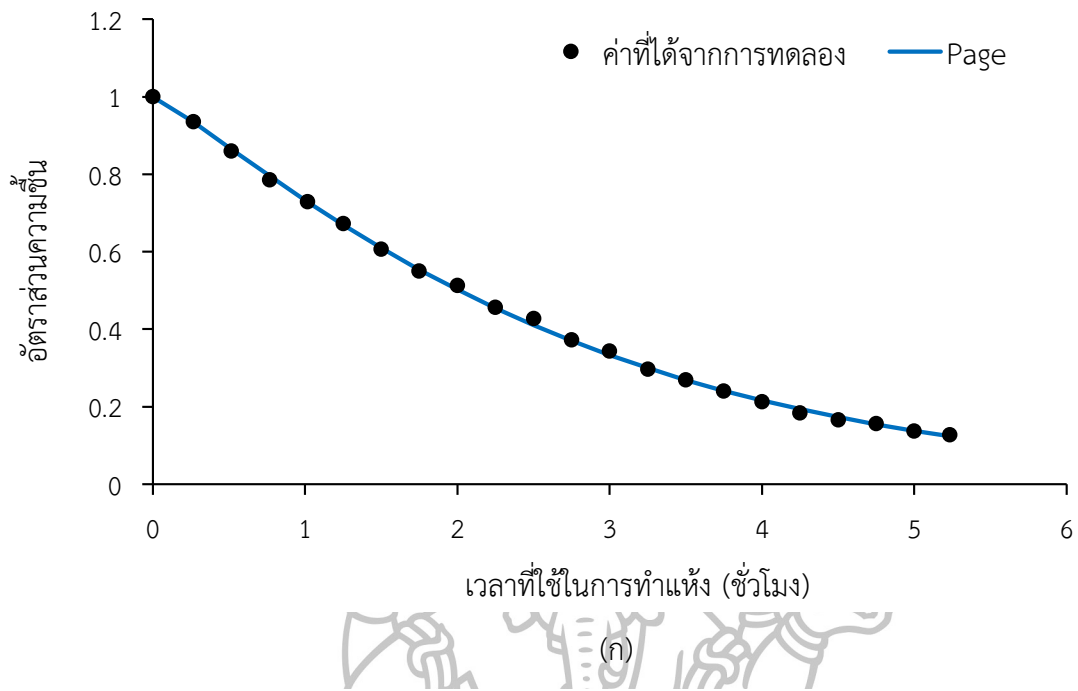
ตารางที่ 33 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพทางกายภาพและเคมีของข้าวหอมนิลยางอกที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

	HRY	BRY	GABA	แอนโทไซยานิน HPLC method	pH-differential method	DPPH	TPC	FRAP	Grain elongation	Water uptake ratio	Cooking loss
BRY	-0.952**										
GABA	-0.231	-0.371									
แอนโทไซยานิน HPLC method	-0.469*	0.490*	0.204								
pH-differential method	-0.161	0.355	0.144	0.457*							
DPPH	0.267	0.171	0.157	-0.261	0.195						
TPC	-0.390	0.553*	0.402	0.257	0.513*	0.247					
FRAP	-0.268	0.351	0.447*	0.082	0.352	0.383	0.722**				
Grain elongation	0.520*	-0.493*	-0.074	-0.051	-0.036	-0.091	-0.144	-0.132			
Water uptake ratio	-0.001	-0.029	-0.078	0.371	-0.074	-0.159	0.011	-0.022	0.019		
Cooking loss	0.183	-0.044	-0.060	-0.475*	0.117	0.300	0.342	0.278	-0.067	-0.364	
Texture	0.617**	-0.616**	-0.032	-0.418*	-0.349	0.128	-0.376	-0.220	0.370	0.500	0.200

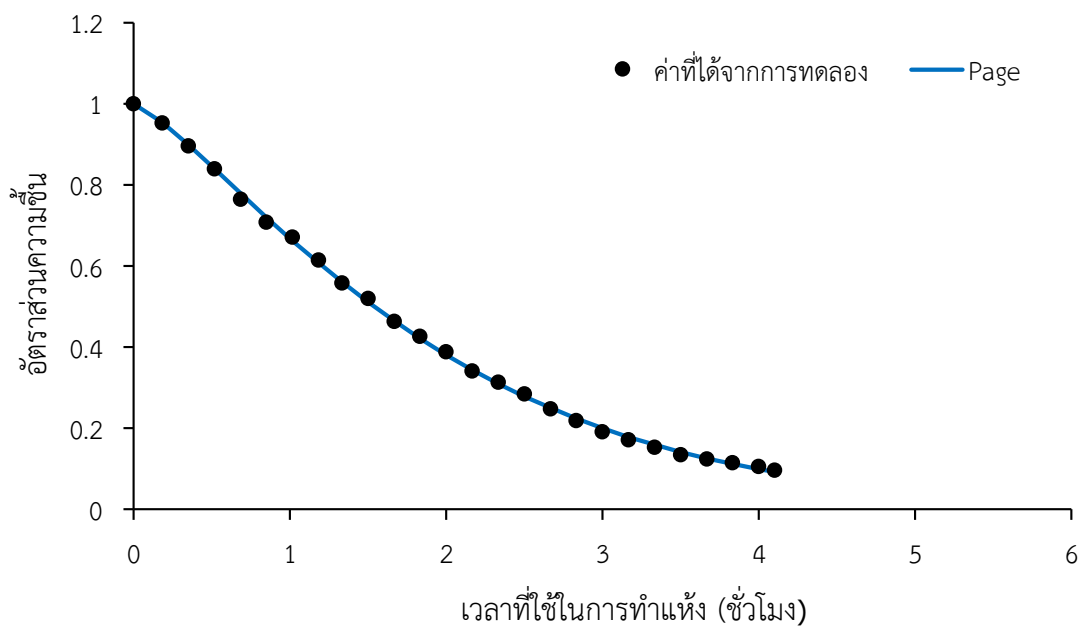
** หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$)

*หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

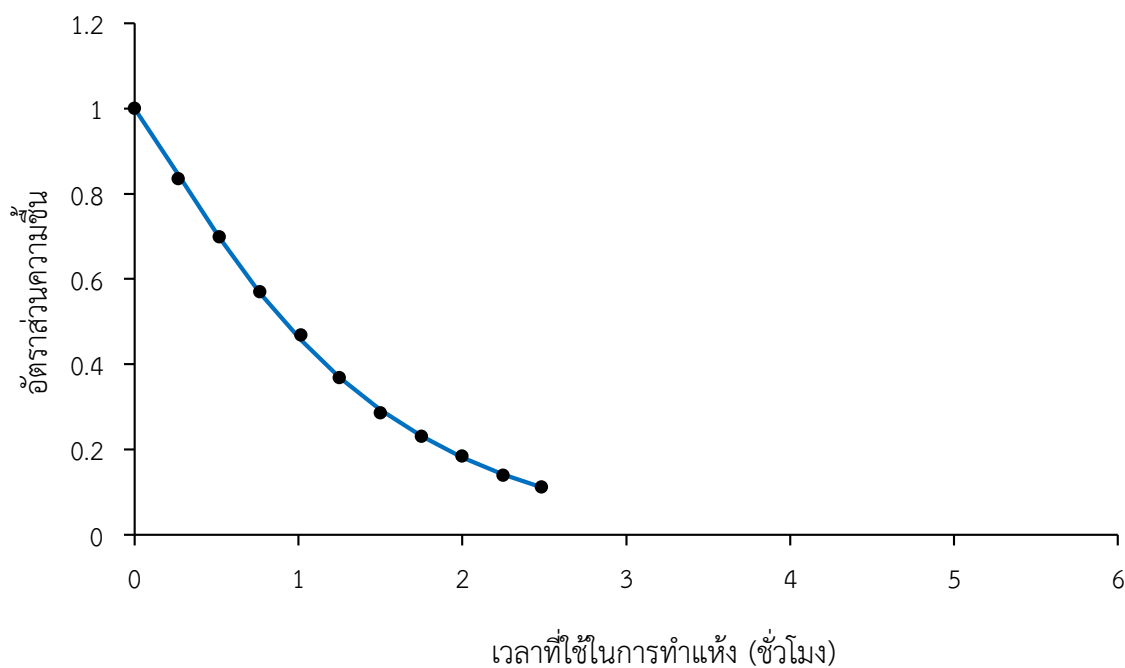




ภาพที่ 36 อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลฮ้างอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

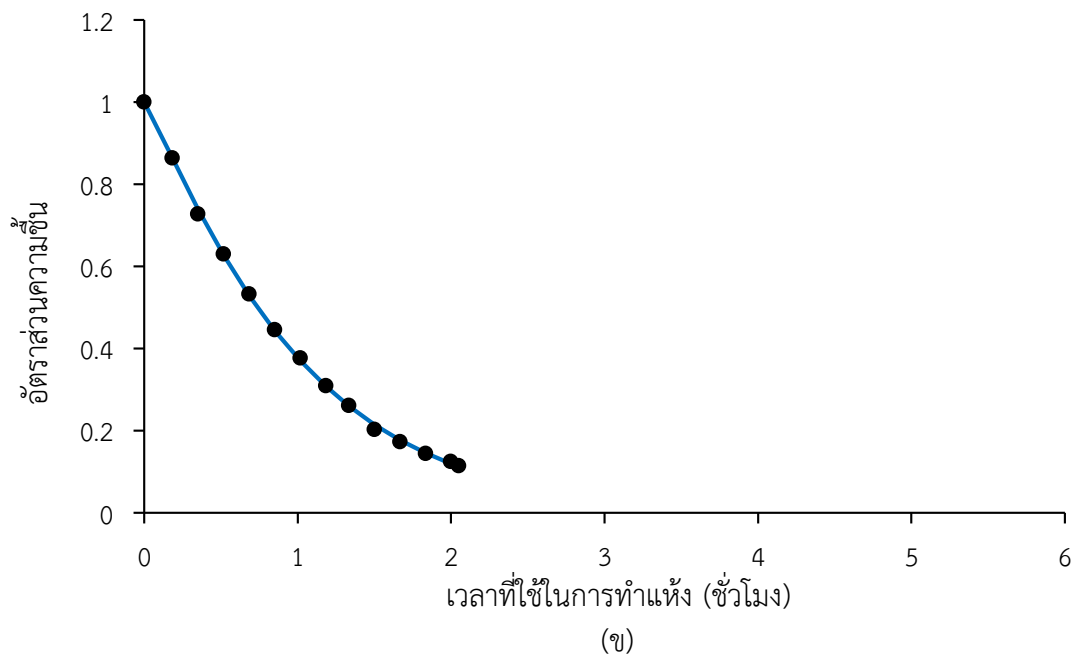
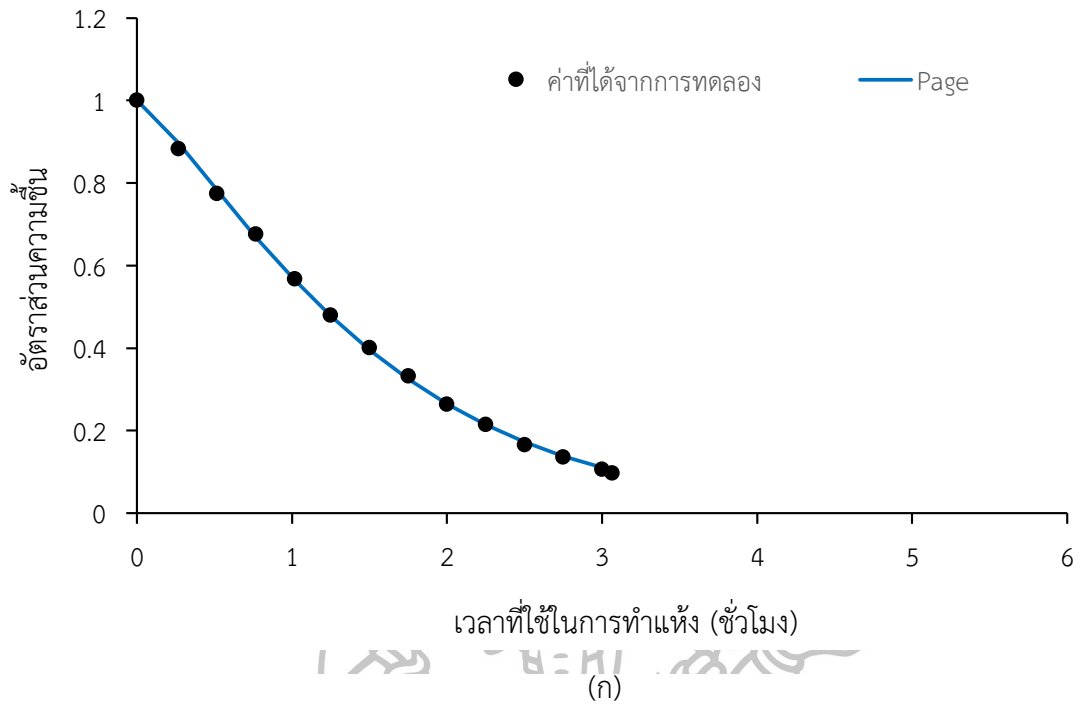


(ก)

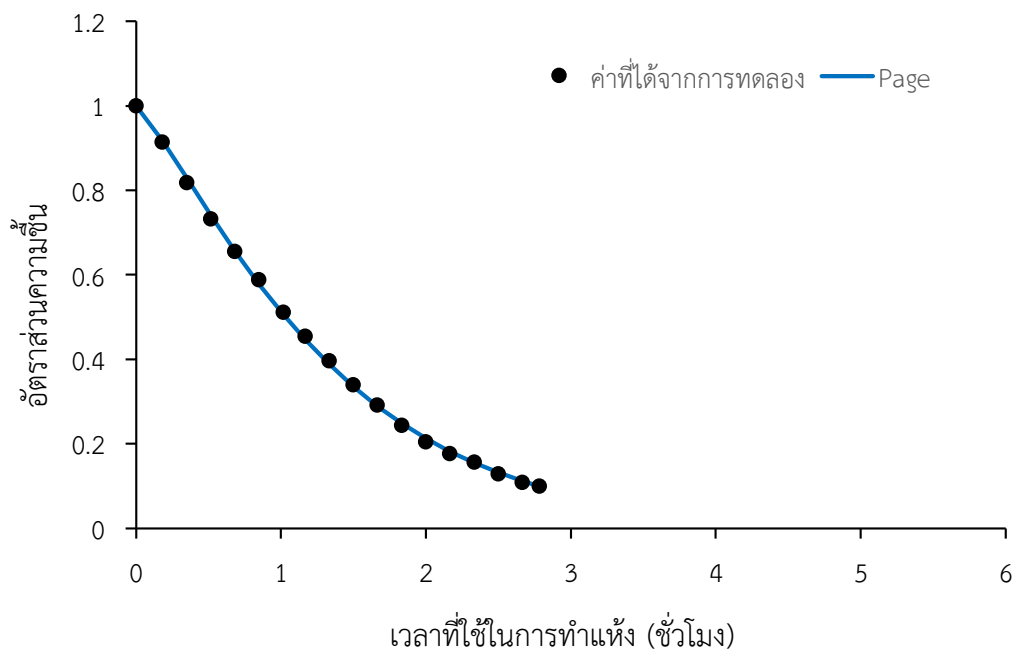


(ข)

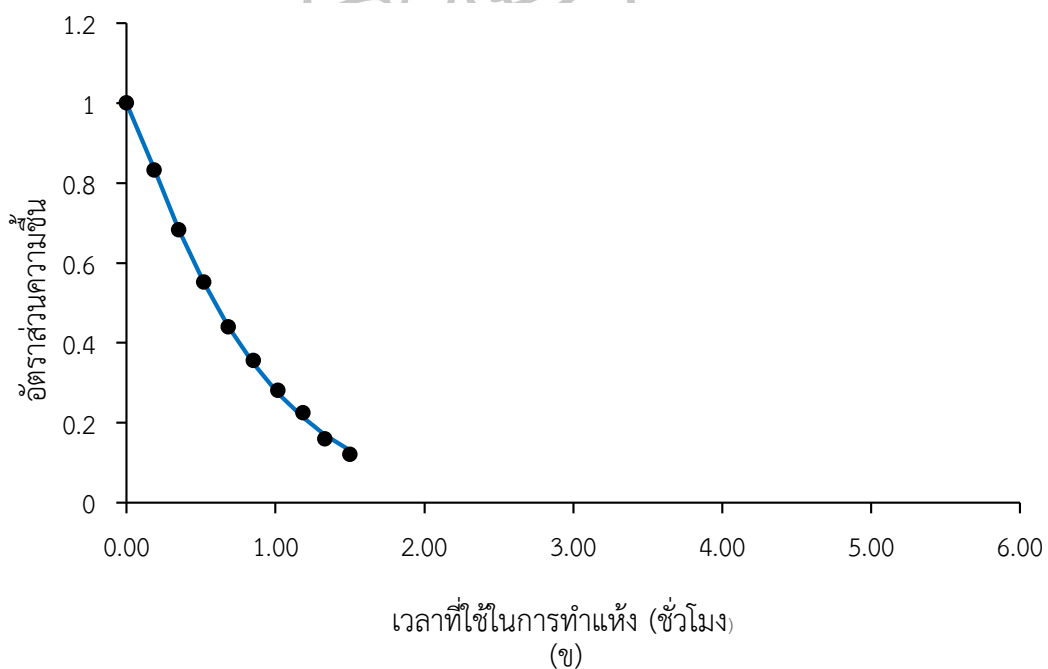
ภาพที่ 37 อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลยางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 38 อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลยางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



(ก)



ภาพที่ 39 อัตราส่วนความชื้นของข้าวหอมนิลยางอกกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Page (ก) ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นางสาวสุกัญญา แซ่เตียว
 (ภาษาอังกฤษ) Miss SUKANYA SAETIEW
 ที่อยู่ 23/177 หมู่บ้านเทพพานิช หมู่ที่ 1 ตำบลโพไร่หวาน อำเภอเมือง
 จังหวัดเพชรบุรี รหัสไปรษณีย์ 76000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
 อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

พ.ศ. 2556 ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต
 สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
 อุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การนำเสนอผลงาน

Sukanya Saetiew, Pramote Khuwijitjaru, Eakapan Kaewmaneechai and Busarakorn Mahayothee. 2016. Bioactive compounds retention in solar dried germinated parboiled brown rice. In the 20th International Drying Symposium 2016 (IDS 2016) during 7-10 August 2016. Gifu, Japan (Poster presentation)

สุกัญญา แซ่เตียว ปราโมทย์ คุวิจิตรจาร์ เอกพันธ์ แก้วมณีชัย และ บุศราภรณ์ มหาโยธี. 2559. จลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของข้าวฮางอกด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยและสร้างสรรค์ระดับชาติ และนานาชาติ "ศิลปากรวิจัยและสร้างสรรค์ ครั้งที่ 9 : บูรณาการศาสตร์และศิลป์" 11-21 กุมภาพันธ์ 2559, ณ ศูนย์ศิลปวัฒนธรรมเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา และหอศิลป์สนามจันทร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม (ภาคบรรยาย)

ปราโมทย์ คุวิจิตรจาร์ **สุกัญญา แซ่เตียว** บุศราภรณ์ มหาโยธี และชัชยงค์ เตชะไพโรจน์. 2558. ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งข้าวฮางอก. การประชุมใหญ่ โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาครั้งที่ 3 "ประทีปถิ่น ประเทศไทยสร้างคุณค่างานวิจัยก้าวไกลสู่สากล". 9 - 11 มีนาคม 2558 , มหาวิทยาลัยราชภัฏ นครศรีธรรมราช (ภาคโปสเตอร์)