



ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

โดย

นายกฤษณ์ย์ แก้วยศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกหนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

โดย

นายกฤตชัย แก้วยศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**EFFECT OF DRYING ON GERMINATED PADDY AND PARBOILED RICE USING
FLUIDIZATION TECHNIQUE**

By

Mr. Krittanai Kaewyot

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

Master of Science Program in BIOTECHNOLOGY

Department of Biotechnology

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2011

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ ผลของการอบแห้ง ข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกหนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไลเซชัน ” เสนอโดย นายกฤตณัย แก้วยศ เป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ฤวิจิตรจากรู
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ สมุหเสนีโต

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์โสชาติ)

28 / 5 / 55

..... กรรมการ

(ดร.กิตติศักดิ์ วรนนทกิตต์)

25 / 5 / 55

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์)

26 / 5 / 55

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ฤวิจิตรจากรู)

28 / 5 / 55

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ สมุหเสนีโต)

28 / 5 / 55

53401201 : สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

คำสำคัญ : การอบแห้ง/ข้าวเปลือกเริ่มงอก/ข้าวเปลือกนึ่ง/สารต้านอนุมูลอิสระ

กฤตณัย แก้วยศ : ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.ชัยงค์ เตชะไพโรจน์ , ผศ.ดร.ปราโมทย์ ภูมิวิจารณ์ และ ผศ.ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต. 80 หน้า.

ข้าวกล้องงอกและข้าวนึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของข้าวที่เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการอบแห้งข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพการหุงต้ม และคุณภาพทางเคมี โดยอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์พิษณุโลก 2 (ข้าวเปลือกเริ่มงอก) และข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ข้าวเปลือกนึ่ง) ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 110-150°C ให้ความชื้นหลังการอบแห้งประมาณ 19-21% db. จากผลการทดลองในส่วน of ข้าวกล้องงอกพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งทำให้ร้อยละต้นข้าวและเวลาในการหุงต้มเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณของแข็งละลายในน้ำ การขยายปริมาตร และร้อยละการแตกร้าวมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด %inhibition DPPH[•] FRAP value ปริมาณ GABA และปริมาณ γ -oryzanol มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อคุณภาพทางเคมี และจากผลการทดลองในส่วน of ข้าวนึ่งพบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่ 150°C ให้อัตราต้นข้าวสูงสุด ปริมาณการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งละลายน้ำ การขยายปริมาตร และร้อยละการแตกร้าวมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิง ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีพบว่า ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด %inhibition DPPH[•] FRAP value และปริมาณ γ -oryzanol ลดลงเมื่อผ่านกระบวนการแช่และกระบวนการอบแห้ง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการแช่และการอบแห้งส่งผลต่อการสลายตัวของสารต่าง ๆ

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....กฤตณัย แก้วยศ.....

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2. 3.

53401201 : MAJOR : BIOTECHNOLOGY

KEY WORD : DRYING/PARBOILED RICE/GERMINATED PADDY/ANTIOXIDANT

KRITTANAI KAEWYOT : EFFECT OF DRYING ON GERMINATED PADDY AND
PARBOILED RICE USING FLUIDIZATION TECHNIQUE. THESIS ADVISORS :
ASST.PROF.CHAIYONG TAECHAPAIROJ,Ph.D., ASST.PROF.PRAMOTE
KHUWIJITJARU,Ph.D. AND ASST.PROF.SUCHED SAMUHASANEETOO,Ph.D.. 80 pp.

Germinated brown rice and parboiled rice are nutrition-added products. Therefore, the purpose of this work was to investigate the effect of drying on physical quality, cooking quality and chemical quality of germinated brown rice and parboiled rice using fluidization technique. The germinated brown rice (Phitsanulok 2) and the parboiled rice (Khao Dawk Mali 105) were dried with the hot-air temperature of 110-150°C to the moisture content approximately of 19-21% db. The germinated brown rice results showed that head rice yield and cooking time increased with higher drying temperature, while solid loss, volume expansion and percent of fissure decreased. The total phenolic content, %inhibition DPPH^{*}, FRAP value, GABA contents and γ -oryzanol contents have not change when though the different drying temperatures. In addition, the parboiled rice results showed that drying temperature at 150°C for head rice yield were the highest. Water uptake, solid loss, volume expansion and percent of fissure decreased compared with the reference. Chemical quality analysis showed that total phenolic content, %inhibition DPPH^{*}, FRAP value and γ -oryzanol contents decreased when through soaking and drying processed. Shows that the temperature of soaking and drying temperature affects the decomposition of various substances.

Department of Biotechnology

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature *Krittanae KaeWyot*

Academic Year 2011

Thesis Advisors' signature 1. *Chaiyong* 2. *TaeChapairoj* 3. *Pramote*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้เนื่องด้วย ผศ.ดร.ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่ดีในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปราโมทย์ ฤวิตรจารย์ ผศ.ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต ผศ.ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ และ ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันกิตต์ สำหรับคำแนะนำในแง่มุมที่ต่างออกไป และตรวจสอบ แกไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ อ.จุนธิ วีระเจตปดิษฐ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการเขียนภาษาอังกฤษ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขการเขียนภาษาอังกฤษของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณประไพ บางเชย และ คุณนุชนาฏ เลี้ยงอำนาจ ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์การทำงานวิจัย

และขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวแก้วยศ สำหรับกำลังใจที่ดีที่สุดใน การศึกษาเล่าเรียน การทำงานวิจัย และการใช้ชีวิตตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
ข้าวกล้องงอก	3
ข้าวนี้้ง	5
ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าว	6
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับข้าวกล้องงอกและข้าวนี้้ง	11
การอบแห้ง.....	12
พื้นฐานการอบแห้งวัสดุ	13
การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	14
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	15
การเกิดเจลลิตีในเซชัน	16
การเกิดรีโทรเกรเดชัน	18
คุณภาพของข้าว	19
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	32
วัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์.....	32
วิธีการทดลอง.....	34
การแช่ข้าวเปลือก.....	34
การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	35

การหาความชื้นของข้าวเปลือก	36
การหาร้อยละต้นข้าว.....	36
การทดสอบคุณสมบัติความเป็นผลึก	37
เวลาในการหุงสุก	37
การหาปริมาณการดูดซับน้ำ.....	37
การหาปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ	37
การหาอัตราการขยายปริมาตร.....	38
การวิเคราะห์ร้อยละการแตกตัวของเมล็ด	38
การวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอล.....	38
การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH assay	38
การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP	38
การวิเคราะห์หาปริมาณ γ -aminobutyric acid.....	39
การวิเคราะห์หาปริมาณแกมมาออริซานอล	39
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	40
ข้าวเปลือกเริ่มงอก.....	40
การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มงอก	40
จลนพลศาสตร์การอบแห้ง.....	41
การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าว.....	42
การเปลี่ยนแปลงร้อยละการแตกข้าว	43
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก.....	43
คุณภาพทางการหุงต้ม	46
Total phenolic content (TPC)	47
DPPH radical scavenging activity	48
Ferric reducing antioxidant power (FRAP).....	48
γ -aminobutyric acid (GABA)	49
γ -oryzanol	50
ข้าวเปลือกนึ่ง	52
การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกนึ่ง.....	52
จลนพลศาสตร์การอบแห้ง.....	53
การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าว.....	54

การเปลี่ยนแปลงร้อยละการแตกข้าว	55
คุณภาพทางการหุงต้ม	56
Total phenolic content (TPC)	57
DPPH radical scavenging activity	58
Ferric reducing antioxidant power (FRAP).....	58
γ -oryzanol	59
5 สรุปผลการทดลอง.....	61
บรรณานุกรม	63
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก	69
ภาคผนวก ข	74
ภาคผนวก ค	76
ประวัติผู้วิจัย.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือก และส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ 14% ความชื้น	6
4.1	การเปลี่ยนแปลงร้อยละการแตกตัวของข้าวเปลือกเริ่มงอก ที่อบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	43
4.2	การเปลี่ยนแปลงร้อยละความเป็นผลึกของข้าวเปลือกเริ่มงอก ที่อบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	46
4.3	เวลาในการหุงต้ม ปริมาณการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ และการขยายปริมาตรของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้ง อุณหภูมิต่าง ๆ	47
4.4	ปริมาณ Total phenolic content , FRAP value และ % inhibition DPPH radical ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	48
4.5	ปริมาณ GABA ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	50
4.6	ปริมาณ γ -oryzanol ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้ง อุณหภูมิต่าง ๆ	51
4.7	การเปลี่ยนแปลงร้อยละการแตกตัวของข้าวเปลือกหนึ่งที่อบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ..	55
4.8	เวลาในการหุงต้ม ปริมาณการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ และการขยายปริมาตรของข้าวเปลือกหนึ่งที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ .	57
4.9	ปริมาณ Total phenolic content , FRAP value และ % inhibition DPPH radical ของข้าวเปลือกหนึ่งที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	59
4.10	ปริมาณ γ -oryzanol ของข้าวเปลือกหนึ่งที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	59

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	4
2.2 โครงสร้างของอะมิโลพลาสต์.....	7
2.3 โครงสร้างของเม็ดสตาrchภายในอะมิโลพลาสต์.....	7
2.4 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	8
2.5 ชั้นอนุโรน ชั้นแอนโดสเปิร์ม และองค์ประกอบของโปรตีน และไขมันในเมล็ดข้าว	10
2.6 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง.....	13
2.7 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง	14
2.8 การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด	14
2.9 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม	16
2.10 ระยะการเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดแป้ง	17
2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	19
2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง	19
2.13 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลในข้าว	21
2.14 สูตรโครงสร้างของ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl	23
2.15 สูตรโครงสร้างของ γ -oryzanol	26
2.16 โครงสร้างของ γ -aminobutyric acid (GABA).....	29
3.1 เครื่องแช่ข้าวเปลือก	34
3.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด	35
4.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มงอกในกระบวนการแช่	40
4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	41
4.3 การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าวกับความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มงอก ที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	42
4.4 รูปแบบ x-ray diffraction ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	45
4.5 ตัวอย่าง HPLC โครมาโตแกรมของ GABA ในตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มงอก.....	49
4.5 ตัวอย่าง HPLC โครมาโตแกรมของ γ -oryzanol ในตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มงอก	50
4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่ง.....	52

4.7	การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ.....	53
4.8	การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าวกับความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่ง ที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ	54
4.9	ตัวอย่าง HPLC โครมาโตแกรมของ γ -oryzanol ในตัวอย่างข้าวเปลือกหนึ่ง.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

คนไทยรับประทานข้าวเป็นอาหารหลักมาช้านาน จนทำให้คำว่ารับประทานข้าวหมายถึงการรับประทานอาหารประเภทอื่น ๆ ด้วย แต่ที่น่าเสียดายยังมีคนไทยอีกเป็นจำนวนมากไม่นิยมรับประทานข้าวกล้อง ด้วยเหตุผลส่วนต่างๆ บางคนบ่นว่าแข็ง สีไม่น่ารับประทาน หรือไม่สามารถเก็บไว้ได้นาน ทั้ง ๆ ที่ข้าวกล้องมีประโยชน์ต่อสุขภาพมากมาย เพราะนอกจากคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นหนึ่งในสารอาหารหลักสำหรับร่างกายแล้ว ข้าวกล้องยังอุดมไปด้วยใยอาหารและวิตามินมากมาย ไม่ว่าจะเป็นวิตามินเอ วิตามินซี วิตามินดี วิตามินอี รวมถึงโฟเลต โดยส่วนที่มีประโยชน์ส่วนใหญ่จะอยู่ในจมูกข้าวและผิวข้าวกล้อง นอกจากนี้ข้าวกล้องยังมีสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยลดคอเลสเตอรอล โดยลดการดูดซึมคอเลสเตอรอลจากอาหารที่เรารับประทานเข้าไป และยังช่วยให้ตับลดการสังเคราะห์คอเลสเตอรอล รวมถึงยังช่วยลดอาการร้อนวูบวาบของคนที่สูงอายุได้อีกด้วย (Adom and Liu, 2002)

การนำข้าวเปลือกมาผ่านกระบวนการงอกเพื่อแปรรูปข้าวกล้องเป็นข้าวกล้องงอก และการนำข้าวเปลือกมาผ่านกระบวนการแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงเพื่อแปรรูปเป็นข้าวหนึ่ง นอกจากจะทำให้ข้าวกล้องมีคุณค่าทางโภชนาการที่เพิ่มขึ้นแล้ว ยังเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย แต่เนื่องจากข้าวกล้องงอกและข้าวหนึ่งจะมีความชื้นที่สูงหลังกระบวนการแช่น้ำ และจะมีปริมาณของจุลินทรีย์ที่สูงซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของข้าวกล้อง ดังนั้นข้าวกล้องจึงต้องนำมาผ่านกระบวนการอบแห้ง เพื่อลดความชื้นภายในข้าวกล้อง เพื่อให้สามารถนำมาเก็บรักษาได้สะดวกขึ้น

การลดความชื้นหรือการอบแห้งเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยทั่วไปจะอาศัยอากาศหรือไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อัตราการอบแห้งจะช้าหรือเร็วเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง การอบแห้งจะช่วยรักษาวัสดุไว้ได้นานและป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสีย ความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกเท่ากับ 13-14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (Poomsa-ad et al., 2005; Prachayawarakorn et al., 2005) การเลือกกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาถึง ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุ แหล่งของพลังงานสำหรับการอบแห้ง ชนิดเครื่องอบแห้งและอื่นๆ ซึ่งกระบวนการอบแห้งที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี ทางเคมีกายภาพ รวมถึงคุณภาพการหุงต้ม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกหนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพการหุงต้ม และคุณภาพทางเคมี ซึ่งผลการวิจัยจากงานนี้คาดว่าจะทำให้ทราบสภาวะในการอบแห้งที่เหมาะสม อีกทั้งยังพบว่าข้าวที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังนับได้ว่าเป็นแป้งข้าวที่ดัดแปลงที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารโดยใช้เป็นส่วนผสมอาหาร ที่เป็นทางเลือกใหม่สำหรับปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีผลต่อคุณภาพต่าง ๆ ของข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกหนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของการอบแห้งในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดอุณหภูมิอากาศร้อน 110 , 130 และ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที และความสูงเบด 10 เซนติเมตร ที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวเปลือกเริ่มงอก (พันธุ์พิษณุโลก 2) ได้แก่ คุณภาพทางกายภาพ คุณสมบัติการหุงต้ม การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ปริมาณแกมมาออริซานอล และ ปริมาณ γ -aminobutyric acid

2. ศึกษาผลของการอบแห้งในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดอุณหภูมิอากาศร้อน 110 , 130 และ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที และความสูงเบด 10 เซนติเมตร ที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวเปลือกหนึ่ง (พันธุ์ดอกมะลิ 105) ได้แก่ คุณภาพทางกายภาพ คุณสมบัติการหุงต้ม การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน และ ปริมาณแกมมาออริซานอล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายผลของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่มีต่อคุณภาพต่าง ๆ ของข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกหนึ่ง

2. สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตข้าวกล้องงอกหรือข้าวหนึ่งที่มีคุณค่าทางโภชนาการในทางอุตสาหกรรม

บทที่ 2

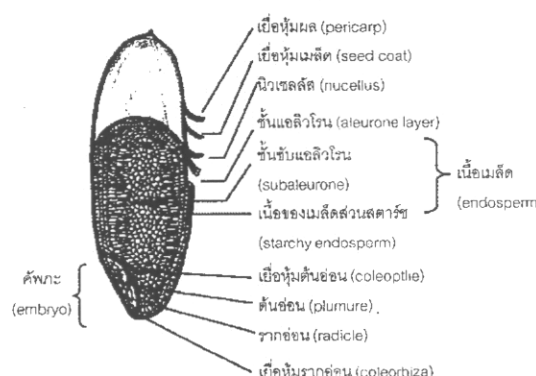
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว ได้แก่ ข้าวกล้องงอก ข้าวหนึ่ง การอบแห้ง พื้นฐานการอบแห้งวัสดุ การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน การเกิดเจลลิตีโนเซชัน การเกิดรีโทรกราเดชัน โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 3 รูปแบบ คือ การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ การวิเคราะห์คุณภาพการหุงต้ม และการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของข้าว ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

2.1 ข้าวกล้องงอก (อรอนงค์, 2547)

ข้าวกล้อง คือ เมล็ดข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสีหรือผ่านการขัดสีแค่บางส่วน ข้าวกล้องมีรสชาติมันปานกลางและมีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าข้าวสาร (ข้าวขาว) ข้าวทุกประเภทอาทิ ข้าวเมล็ดยาว ข้าวเมล็ดสั้น ข้าวเหนียว สามารถทำเป็นข้าวกล้องได้ทั้งสิ้น

ข้าวกล้องงอก (germinated brown rice) ถือเป็นนวัตกรรมหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากข้าวกล้องงอกเป็นการนำข้าวกล้องมาทำให้เกิดการงอกขึ้น โดยปกติแล้วในตัวข้าวกล้องเองประกอบด้วยสารอาหารที่มีคุณค่าจำนวนมาก เช่น โยอาหาร กรดไฟติก (Phytic acid) วิตามินซี วิตามินอี และสารกาบา (γ -aminobutyric acid, GABA) ซึ่งช่วยป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคกระเพาะ โรคเบาหวาน และช่วยในการควบคุมน้ำหนักเป็นต้น เมื่อนำข้าวกล้องมาแช่น้ำเพื่อทำให้งอก จะทำให้ข้าวกล้องมีสารอาหารโดยเฉพาะสารกาบาเพิ่มขึ้นซึ่งนอกจากจะได้ประโยชน์จากการที่มีปริมาณสารอาหารที่มีค่าสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้ข้าวกล้องงอกที่หุงสุกมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มรับประทานได้นุ่มกว่าข้าวกล้องธรรมดา และง่ายต่อการหุงรับประทานโดยไม่ต้องผสมกับข้าวขาวตามความนิยมของผู้บริโภคที่ชอบข้าวที่มีลักษณะนุ่ม โดยโครงสร้างของข้าวกล้องแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว (อรอนงค์, 2547)

1. เยื่อหุ้มผล เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ห่อหุ้มผลอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์เส้นใย 6 ชั้น มีสารสีหรือรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่าง ๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ น้ำตาลแดง น้ำตาลม่วง น้ำตาลจนเกือบดำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ

2. เยื่อหุ้มเมล็ด อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาว เรียงตามขวาง และมีผนังบางกัน ภายในเซลล์มีไขมันและสารสี เช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี

3. นิวเคลลัส (nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดอยู่กับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่พันธะระหว่างนิวเคลลัสกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดกันแน่น จึงแยกจากกันได้ง่าย

4. เยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) เป็นเยื่อชั้นถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น และมีลักษณะของเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดจะหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้อง ซึ่งความหนานี้จะแตกต่างกันไปตามพันธุ์ข้าว เช่น เมล็ดป้อม – ต้นจะมีเยื่อชั้นแอลิวโรนหนากว่าข้าวเมล็ดยาว เป็นต้น เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ดลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเยื่อหุ้มรากอ่อน ซึ่งอยู่ข้างในของเมล็ด จึงแบ่งลักษณะของเซลล์แอลิวโรนเป็น 2 ลักษณะ คือ เซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และมีไซโทพลาซึม (cytoplasm) อยู่หนาแน่น ในเซลล์ยังมีกลุ่มโปรตีนที่มีรูปร่าง (protein bodies) กลุ่มไขมัน (lipid bodies) และสารอื่น ๆ ส่วนเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง มีไซโทพลาซึมน้อย รูปร่างยาว มีกลุ่มไขมัน และกลุ่มโปรตีนน้อย มีเวสิเคิลมาก เป็นต้น ส่วนผนังเซลล์จะมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสประกอบอยู่

4.1 คัพภะ หรือเชื้อชีวิต จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของเมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน (radicle), ต้นอ่อน (plumule), เยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhizae), เยื่อหุ้ม

ต้นอ่อน (coleoptiles), ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (scutellum) ซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว คัพภะเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน จึงอุดมด้วยโปรตีนและไขมันในส่วนต่าง ๆ

4.2 เนื้อเมล็ด หรือเนื้อข้าว (endosperm) มีมากที่สุด ในเมล็ดข้าว (ประมาณ 80% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนชั้นชั้นแอลิวโรน (subaleurone layer) เป็นเซลล์ 2 ชั้น อยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด (starchy endosperm) ในชั้นชั้นแอลิวโรนจะมีกลุ่มโปรตีนอยู่ใน 3 ลักษณะ คือ ลักษณะกลมใหญ่ (ขนาด 1-2 ไมครอน) กลมเล็ก (ขนาด 0.5-0.75 ไมครอน) และเป็นผลึกติดกันขนาด 2-3.5 ไมครอน แต่ในส่วนเนื้อของเมล็ดจะมีกลุ่มโปรตีนลักษณะกลมใหญ่เท่านั้น แทรกอยู่ในระหว่างเม็ดสตาร์ช (starch granules) มีขนาด 3-9 ไมครอน ที่มีอยู่มากอัดแน่นรวมเป็นกลุ่มเม็ดสตาร์ช (compound granules) อยู่ในเซลล์พาราเอนไคมา (parenchyma cells) ที่มีผนังเซลล์บาง มีรูปร่างรี หรือสี่เหลี่ยม เข้าสู่ใจกลางเมล็ด โดยด้านนอกของเมล็ดจะรี และยาวมากกว่าด้านในของเมล็ด

2.2 ข้าวหนึ่ง

ข้าวหนึ่ง คือข้าวที่ได้จากการสีข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่น้ำ นึ่งและอบแห้ง ผลดีของการทำข้าวหนึ่งคือลดปริมาณข้าวหักระหว่างการขัดสี เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เช่นวิตามินบี และแร่ธาตุ บางชนิดซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวขณะแช่ข้าวเปลือก ข้าวหนึ่งมีลักษณะร่วนแข็งจึงนิยมกันแถบอินเดีย แอฟริกา และตะวันออกกลาง แม้ว่าข้าวหนึ่งเป็นข้าวที่ผ่านการขัดสี แต่ก็มีคุณค่าอาหารมากกว่าข้าวขาว ซึ่งกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการผลิตที่สำคัญหลักๆได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การแช่ (soaking or steeping) โดยการนำเมล็ดข้าวเปลือกไปแช่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3-6 ชั่วโมง หรือ 80 องศาเซลเซียส นาน 1-3 ชั่วโมง จะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกดูดความชื้นได้พอเหมาะ สีของข้าวหนึ่งจะสวดที่สุดตรงตามความต้องการของตลาด ในขั้นนี้จะทำให้ช่องว่างบริเวณเปลือกข้าวและในเมล็ดข้าวมีน้ำแทนที่อากาศเม็ดแป้งจะพองตัวขึ้นทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น

2. การนึ่ง (steaming) เมื่อเม็ดแป้งภายใน endosperm ของเมล็ดข้าวดูดซับน้ำไว้เพียงพอแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการให้ความร้อน เพื่อให้แป้งเกิดการกลายเป็นแป้งสุก (gelatinization) ความร้อนที่นิยมใช้อยู่ในรูปของไอน้ำ การนึ่งต้องทำให้ข้าวเปลือกทั้งเมล็ดได้รับไอร้อนอย่างสม่ำเสมอ ต้องได้รับอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งเท่าๆกันปกติการนึ่งภายใต้ความดันจะใช้เวลา 15-30 นาที (อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส)

3. การทำให้แห้ง (drying) ข้าวเปลือกหลังจากนึ่งแล้วจะมีความชื้นสูงถึง 45-50% จำเป็นต้องลดความชื้นของข้าวนึ่งลงจนถึงขีดที่เหมาะสมเพื่อการเก็บรักษาและการสีขัด โดยปกติจะต้องลดลงให้เหลือประมาณ 14-16% โดยไม่ทำให้เมล็ดข้าวเกิดรอยร้าว การทำให้แห้งทำได้โดยวิธีผึ่งลมในที่ร่ม หรือโดยใช้ลมร้อนเป่า ในการลดความชื้นของเมล็ดข้าวนึ่งนี้จะต้องทำเป็นสองระยะ คือ ในระยะแรกเมื่อความชื้นลดลง 19-20% ก็หยุดพักโดยเก็บเมล็ดไว้ในที่อุณหภูมิห้องสักระยะหนึ่ง จากนั้นจึงนำมาทำให้แห้งต่อจนได้ความชื้นที่ต้องการก่อนนำไปเก็บรักษา

2.3 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าว

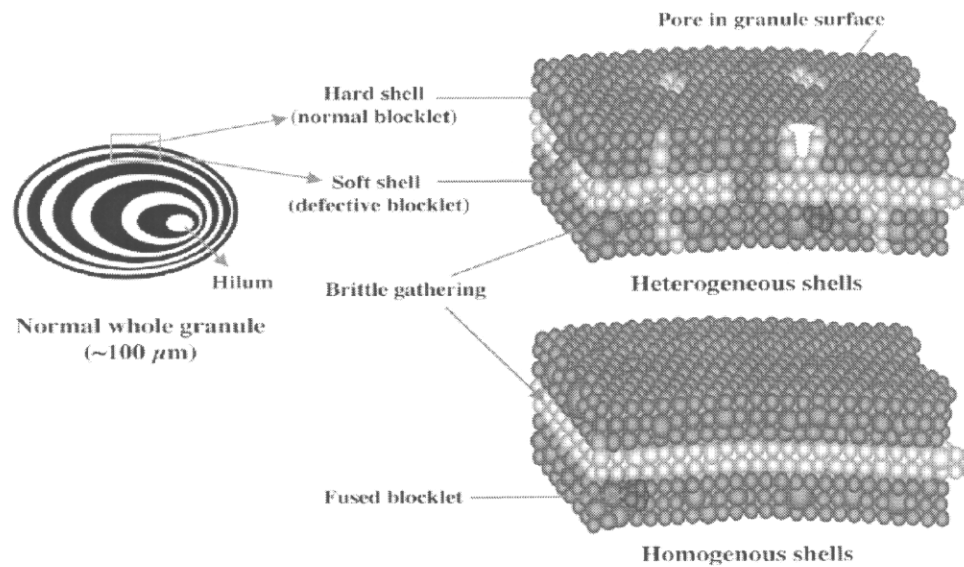
เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือก และส่วนที่ได้จากการกะเทาะเปลือก ขัดขาว และขัดมัน พบว่าแต่ละส่วนมีองค์ประกอบทางเคมี คือ โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า คาร์โบไฮเดรตที่ร่างกายย่อยได้ และเส้นใยอาหาร (ด้วยวิธีใช้สารชักฟอกที่เป็นกลาง) แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ 14% ความชื้น (Julaino, 1993)

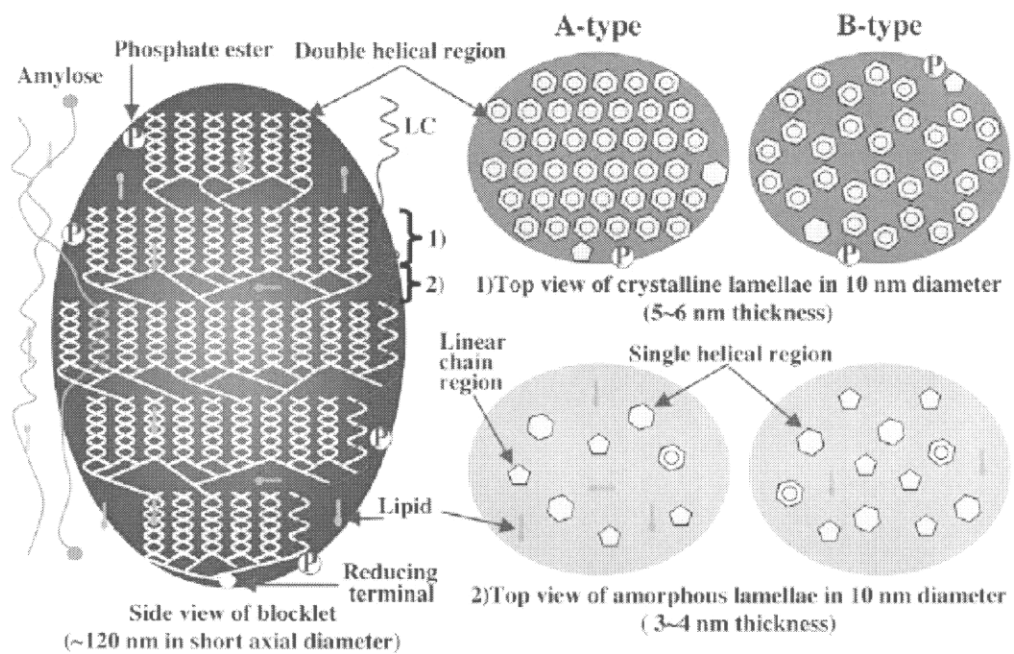
ส่วนของข้าว	โปรตีน (ก.)	ไขมัน (ก.)	เส้นใย (ก.)	เถ้า (ก.)	คาร์โบไฮเดรต (ก.)	เส้นใยอาหาร (ก.)
ข้าวเปลือก	5.8-7.7	1.5-2.3	7.2-10.4	2.9-5.2	64-73	16.4-19.2
ข้าวกล้อง	7.1-8.3	1.6-2.8	0.6-1.0	1.0-1.5	2.9-3.9	2.9-3.9
ข้าวสาร	6.3-7.1	0.3-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	77-89	0.7-2.3
รำข้าว	11.3-14.9	15.0-19.7	7.0-11.4	6.6-9.9	34-62	24-29
แกลบ	2.0-2.8	0.3-0.8	34.5-45.9	13.2-21.0	22-34	66-74

2.3.1 คาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวเป็นประเภทสตาร์ช (starch) พบมากที่สุดในส่วนเนื้อเมล็ดข้าวประมาณ 90% มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบเหลี่ยมขนาด 3-9 μm รวมกันอยู่เป็นกลุ่มภายในอะมิโลพลาสต์ (amiloplast) ที่มีลักษณะกลมหรือรี มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7-39 μm โดยภายในแต่ละอะมิโนพลาสต์มีเม็ดสตาร์ช รวมกันอยู่ประมาณ 20-60 เม็ด และระหว่างเม็ดสตาร์ชมีกลุ่มของโปรตีนแทรกอยู่ โครงสร้างของอะมิโลพลาสต์และโครงสร้างของสตาร์ชในอะมิโลสพลาสต์แสดงในภาพที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

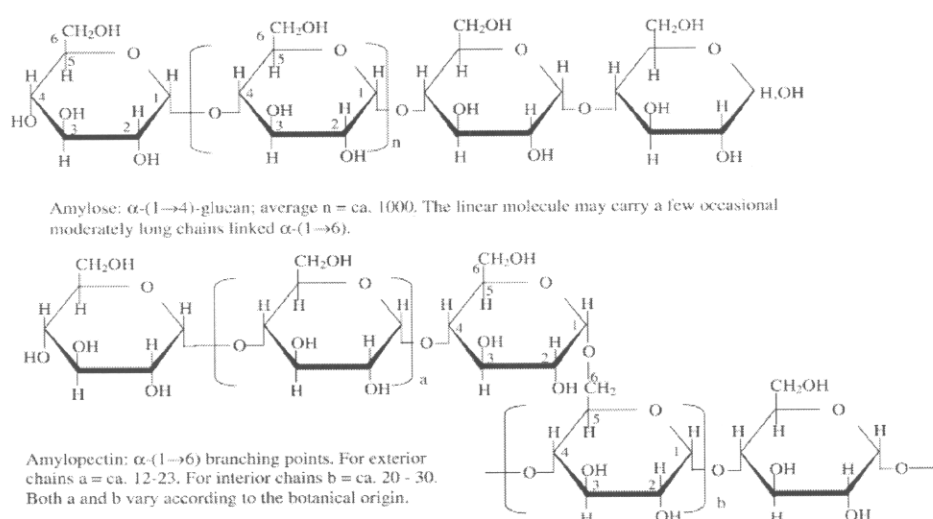


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลพลาสต์ (Tang et al., 2006)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ภายในอะมิโลพลาสต์ (Tang et al., 2006)

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แบ่งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) แบ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกทิน) วางตัวในแนวระนาบ



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน (Tester et al., 2004)

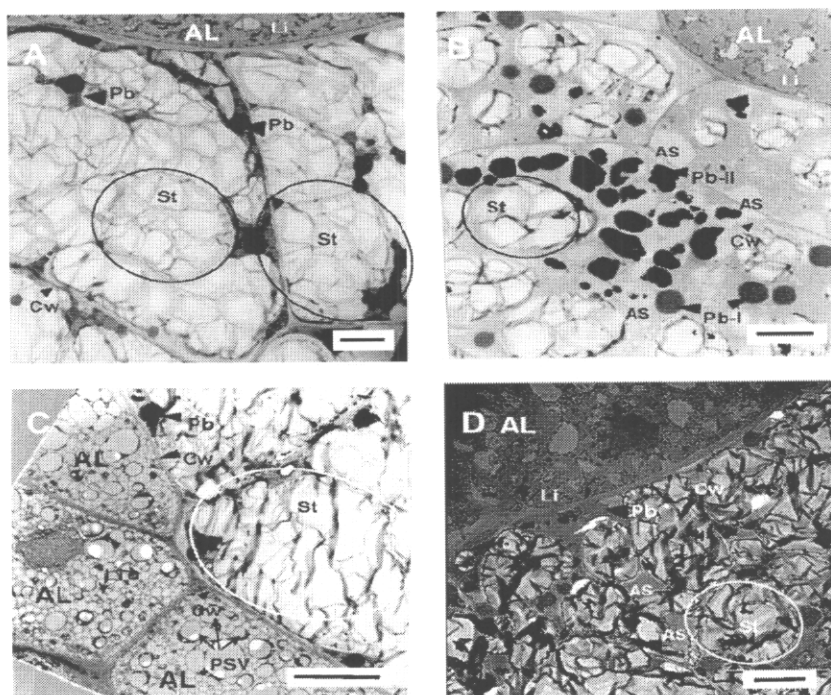
อะไมโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1, 4 (α -1, 4) แสดงในภาพที่ 2.4 อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารอินทรีย์ นอกจากนี้อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

อะไมโลเพกทิน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก α -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น แสดงในภาพที่ 2.4 มีขนาดโมเลกุล (Degree of Polymerization) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกัน

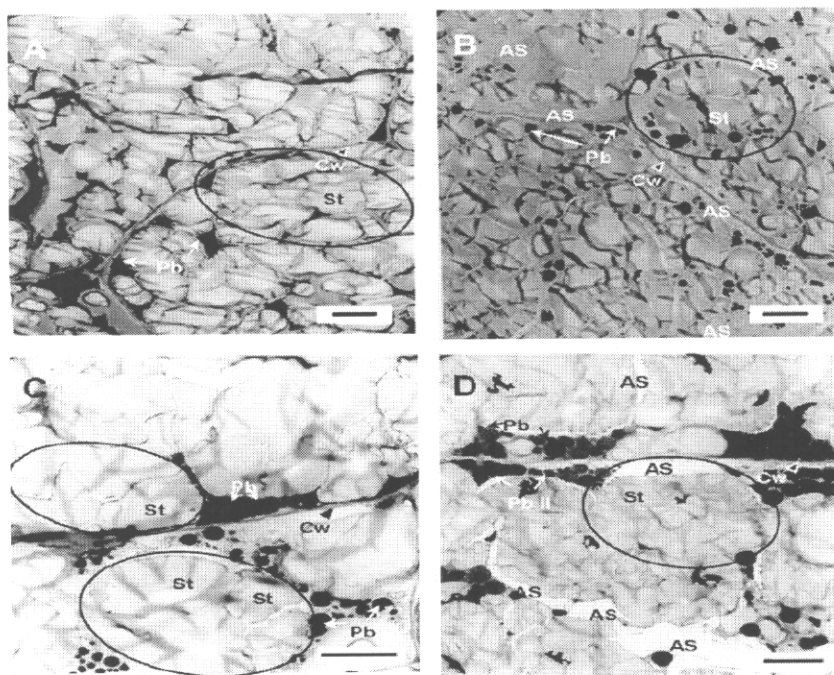
ด้วยพันธะกลูโคซิดิก α -1, 6 (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) เนื่องจากอะไมโลเพกทินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีสาขามาก ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลจับกันเองจึงน้อยลง เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลเพกทินสูง สตาร์ชเปียกที่ได้จะไม่มีสีและมีความหนืดสูง เมื่อลดอุณหภูมิลงโมเลกุลอยู่ในแบบระกระระกะจึงรวมตัวกันยากและคืนตัวน้อย (Donald, 2004) เมื่อย้อมสีด้วยน้ำยาไอโอดีน สีของสตาร์ชเป็นสีน้ำตาลแดง (red brown)

2.3.2 โปรตีน

โปรตีนเป็นองค์ประกอบที่มีมากเป็นอันดับสองในเมล็ดข้าว ประมาณ 6-9 % ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ข้าวกล้องมีปริมาณโปรตีนมากกว่าข้าวขาวเล็กน้อย เนื่องจากโปรตีนอยู่หนาแน่นบริเวณผิวนอกของเมล็ด โปรตีนอยู่ในรูปเม็ดโปรตีน (protein body) และอยู่รวมกันเป็นกลุ่มแทรกอยู่ระหว่างองค์ประกอบของสตาร์ช (Kang et al., 2006) แสดงในภาพที่ 2.5 โปรตีนในข้าวประกอบด้วยอัลบูมิน (albumin) โกลบูลิน (globulin) โปรลามิน (prolamin) และกลูทีลิน (glutelin) ข้าวมีโปรตีนกลูทีลินอยู่ประมาณ 80% ของโปรตีนทั้งหมด โกลบูลินประมาณ 10% อัลบูมินประมาณ 5% และโปรลามินไม่เกิน 5% (Hoseney, 1998) โดยโปรตีนช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเมล็ดข้าวโดยการยึดเหนี่ยวองค์ประกอบภายในสตาร์ช



(a) Low – magnification TEM



(b) High – magnification TEM

TEM = Transmission Electron Microscopy , AL = aleurone cells , AS = air space , CW = cell wall , Li = lipid bodies , Pb = protein bodies , Pb-I = prolamin , Pb-II = glutelin , St = starch granules

ภาพที่ 2.5 ชั้นออลูโรน ชั้นแอนโดสเปิร์ม และองค์ประกอบของโปรตีนและไขมันในเมล็ดข้าว

(Kang et al., 2006)

2.3.3 ไขมัน

ไขมันเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเพียงเล็กน้อย ประมาณ 3% ส่วนใหญ่อยู่ในชั้นแอลิวโรนจึงพบในข้าวกล้องมากกว่าข้าวขาว ไขมันที่พบส่วนมากเป็นไขมันเกาะเกี่ยว (bound lipid) กับสารอื่น ไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็ดสตาร์ช 3 ลักษณะคือ ไขมันอยู่ติดกับโปรตีน ซึ่งอยู่ที่ผิวเม็ดสตาร์ชภายนอกหรืออาจรวมอยู่กับกับโครงสร้างของอะไมโลเพกทินภายนอก ลักษณะที่สองคือไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชโดยเกาะเกี่ยวกับสตาร์ช และลักษณะที่สามคือไขมันที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชแต่ไม่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (ภาพที่ 2.5)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับข้าวกล้องอกและข้าวหนึ่ง

จากงานวิจัยของ Oh et al. (2003) นำข้าวกล้องแช่น้ำกลั่นจนกระทั่งเริ่มออกเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วตรวจสอบปริมาณ GABA และกรดอะมิโนของตัวอย่าง ปรากฏว่าข้าวกล้องเริ่มงอกมีปริมาณ GABA สูงกว่าข้าวกล้องปกติ 5.2 เท่า และกิจกรรมของเอนไซม์กลูตาเมตคาร์บอกซิเลสของข้าวกล้องปกติมีค่าต่ำกว่า และกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวเพิ่มขึ้นระหว่างข้าวกล้องเริ่มงอก โดยข้าวกล้องเริ่มงอกมีกิจกรรมของเอนไซม์กลูตาเมตคาร์บอกซิเลสสูงขึ้นจากเดิม 1.3 เท่า ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณกรดกลูตาเมตของข้าวกล้องเริ่มงอกที่ต่ำกว่าข้าวกล้องปกติ 3.0 เท่า ในขณะที่ Ito and Ishikawa (2004) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารอาหารระหว่างการงอกข้าวกล้องโดยพบว่า GABA เส้นใยอาหาร อินซิทอล กรดเฟอริลิก กรดไฟติก ทอโคไทรอินอล แมกนีเซียม สังกะสี และแกมมาออริซานอลเพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกัน Kayahara and Tukahara (2000) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารอาหารในข้าวกล้องเริ่มงอก โดยเฉพาะ GABA มีปริมาณสูงกว่าข้าวขาว 10 เท่า ส่วนเส้นใยอาหาร วิตามินอี ไนอะซิน และไลซีนมีปริมาณสูงกว่าข้าวขาว 4 เท่า นอกจากนี้ยังพบวิตามินบี 1 วิตามินบี 6 และแมกนีเซียมมีปริมาณสูงกว่าข้าวขาว 3 เท่า

นอกจากนี้ สมคิด และคณะ (2549) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่ที่มีผลต่อการผลิตข้าวหนึ่ง รวมถึงศึกษาจนผลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่ใช้น้ำร้อนยวดยิ่งในการลดความชื้น โดยนำข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มาทำการแช่น้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 0-8 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก และก่อนการอบแห้งนำข้าวเปลือกผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 3, 5 และ 7 ชั่วโมง อุณหภูมิน้ำแช่เริ่มต้น 80-90 องศาเซลเซียส ข้าวเปลือกหลังแช่น้ำมีความชื้นประมาณ 35-45% db. จากนั้นนำมาลดความชื้นจนเหลือ 16-25% db. ในการอบแห้งใช้ความสูงของข้าวเปลือก 10 เซนติเมตร อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำในระบบอบแห้ง 160 kPa ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 3.8 เมตรต่อวินาที จากการทดลองในช่วงของการศึกษาการดูดซับความชื้นพบว่าปริมาณความชื้นเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการแช่ที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิน้ำแช่เริ่มต้นที่สูงขึ้น เป็นผลให้ร้อยละข้าวต้นมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความขาวและค่า white belly ของข้าวมีค่าลดลง สำหรับคุณภาพของข้าวหลังการอบแห้งพบว่าร้อยละต้นข้าวมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการแช่ที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิน้ำแช่เริ่มต้นที่สูงขึ้น โดยร้อยละต้นข้าวมีค่ามากที่สุดที่ความชื้นประมาณ 20% db. สำหรับระยะเวลาการแช่ที่ 7 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิน้ำแช่เริ่มต้น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ร้อยละต้นข้าวมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความขาวและร้อยละ white belly มีค่าลดลงตามระยะเวลาในการอบแห้ง คุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวที่ผ่านการแช่ที่ระยะเวลา

เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิน้ำแช่เริ่มต้นที่สูงใช้ระยะเวลาในการหุงต้มที่นานขึ้น ในขณะที่การดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวหุงสุก อัตราการบีบตัวและการย่อยของข้าวหุงสุกมีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งและความร่วนรวมถึงการเกิดเจลลิตในเซชันมีค่ามากขึ้น และการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งก็เพียงพอต่อการผลิตข้าวหนึ่งที่มีคุณภาพตามมาตรฐานการส่งออก และยังเป็นการลดระยะเวลากระบวนการผลิตข้าวหนึ่งลงได้

2.5 การอบแห้ง

การอบแห้งคือกระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ผลผลิตทางเกษตรส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยว ทำให้เก็บรักษาไม่ได้ นาน การอบแห้งช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น ผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญ ๆ และต้องทำการอบแห้งได้แก่ ธัญพืชชนิดต่าง ๆ เช่น ข้าว เป็นต้น (สมชาติ, 2540)

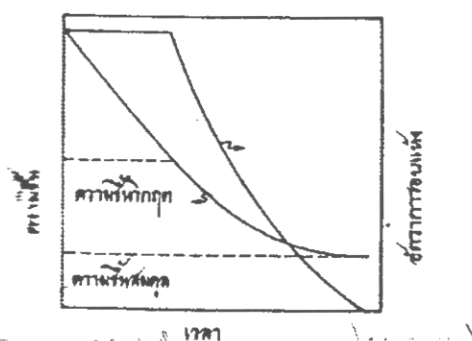
ประโยชน์ของการอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารสามารถสรุปได้ตามลำดับความสำคัญ ดังต่อไปนี้

1. เพื่อการรักษานอมอาหาร อาหารที่แห้งแล้วสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสีย เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีน้อย
2. เพื่อลดปริมาตรและน้ำหนัก อาหารที่แห้งแล้วจะมีปริมาตรและน้ำหนักที่ลดลง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษาและการขนส่ง
3. เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตดีขึ้น ในกรณีนี้อาจไม่จริงเสมอไปทั้งนี้ขึ้นกับกระบวนการผลิตนั้นๆ

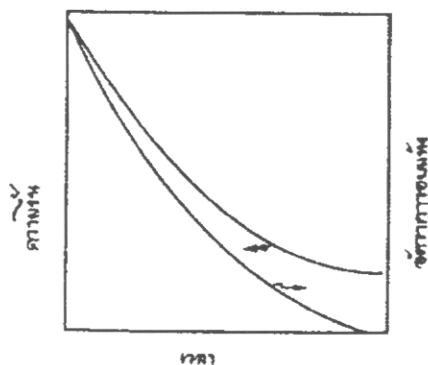
ในกรณีของเมล็ดพืชเกษตรกรสามารถเก็บเกี่ยวเมื่อเมล็ดพืชยังมีความชื้นสูงอยู่ ทำให้ลดการสูญเสียของเมล็ดพืชอันเนื่องจากการร่วงหล่นก่อนและหลังระหว่างการเก็บเกี่ยว การเก็บเกี่ยวที่เร็วขึ้นอาจช่วยให้เกษตรกรสามารถปลูกพืชครั้งที่สองอย่างได้ผล การอบแห้งที่ถูกหลักยังสามารถช่วยให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดสูง ทำให้สามารถนำไปเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมล็ดพืชที่อบแห้งแล้วมีคุณภาพสูงและสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ทำให้เกษตรกรสามารถรอเวลาขาย ในขณะที่ผลผลิตมีราคาดี (สมชาติ, 2540)

2.6 พื้นฐานการอบแห้งวัสดุ

ในการอบแห้งวัสดุทั่ว ๆ ไปนั้น มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำ ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศที่จากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิจะสูงขึ้นและความเข้มข้นจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ภาพที่ 2.6 และ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา ภายใต้อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศคงที่ ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต วัสดุการเกษตรส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถแบ่งการอบแห้งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกในขณะที่มีความชื้นสูงอยู่ การอบแห้งมักเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อวัสดุมีความชื้นลดต่ำลงจนถึงความชื้นวิกฤต น้ำจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือไอน้ำ แล้วจึงระเหย แล้วเคลื่อนที่ไปยังกระแสอากาศ เป็นที่เข้าใจกันว่า การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวจะเกิดขึ้นในระยะแรกขณะที่วัสดุยังมีความชื้นพอประมาณ เมื่อความชื้นลดต่ำลงมากแล้วน้ำอาจเคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำ และโมเลกุลของน้ำที่เกาะภายในผนังของช่องว่างอาจมีความหนาเพียงสองสามชั้นของโมเลกุล (สมชาติ, 2540)



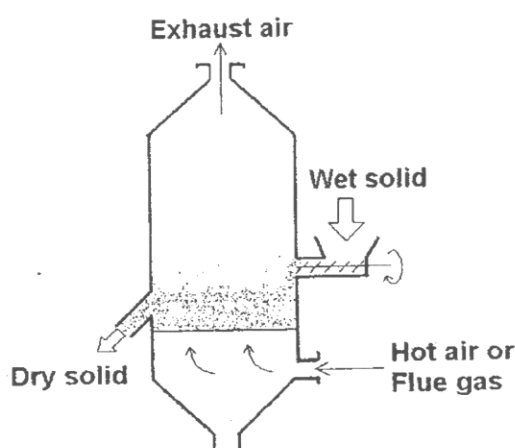
ภาพที่ 2.6 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง (สมชาติ, 2540)



ภาพที่ 2.7 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (สมชาติ, 2540)

2.7 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน (Fluidization Technique)

ฟลูอิดไดเซชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับกระแสอากาศ ก๊าซหรือของไหลที่มีความเร็วสูง จนทำให้เม็ดของแข็งเหล่านี้ยกตัวได้อย่างอิสระ และมีสมบัติคล้ายของไหล ในกระบวนการฟลูอิดไดเซชันเริ่มแรกเม็ดหรือชิ้นของแข็งดังกล่าวถูกวางไว้บนตะแกรงในหอทดลองซึ่งมักจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ของไหล เช่น ก๊าซหรือของเหลว ถูกปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง แล้วไหลออกทางส่วนบนของหอทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ เม็ดของแข็งจะเริ่มยกตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระ ไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบดหรือภายในหอทดลอง หรือระหว่างเบดต่อบีได้ เราจึงเรียกพฤติกรรมในสถานะนี้ว่า ฟลูอิดไดเซชัน แสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

(Mujumdar and Suvachittanont, 2000)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

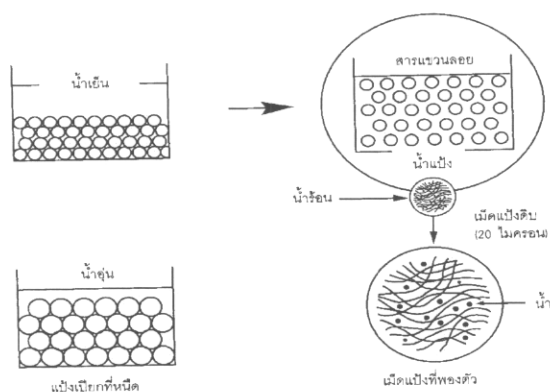
จากงานวิจัยของ Swasdisevi et al. (2010) ได้ศึกษาผลของเวลา pre-steamed และ อุณหภูมิในการอบแห้งที่มีผลต่อคุณภาพของ partial-parboiled rice โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบลมร้อน ในการเพิ่มเวลาการ pre-steamed ข้าวเปลือกพบว่า head rice yield, pasting temperature และ degree of gelatinization เพิ่มขึ้น แต่ white belly ลดลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าเปอร์เซ็นต์ water uptake ของข้าวที่ผ่านการ pre-steamed มีค่าลดลง และเปอร์เซ็นต์ solid loss, stickiness ไม่เปลี่ยนแปลง ผลของความแข็งของข้าวที่ผ่านการ pre-steamed มีค่าสูงกว่าข้าวอ้างอิงและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง สภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ partial-parboiled rice โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบลมร้อน คือ แช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไป pre-steamed ที่ 102 องศาเซลเซียส นาน 70 วินาที หลังจากนั้นนำไปอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที และเก็บไว้ในที่อับอากาศนาน 30 นาที จากนั้นนำข้าวออกมาผึ่งลมจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 14-16% db. และ Jaiboon et al. (2009) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้ง (90, 110, 130 องศาเซลเซียส) แบบฟลูอิดไดเซชันและเวลาในการเก็บที่อับอากาศ (30-120 นาที) ที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวเหนียว คือ ร้อยละต้นข้าว, คุณสมบัติทางความร้อน, คุณสมบัติความหนืด, สี, ความโปร่งแสงของเมล็ด และ microstructure ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ร้อยละข้าวต้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งต่ำกว่าข้าวอ้างอิงอย่างน้อยสำคัญ โดยอุณหภูมิในการอบแห้งนำไปสู่ร้อยละข้าวต้นที่สูงขึ้น ในขณะที่เวลาในการเก็บที่อับอากาศไม่ส่งผลร้อยละข้าวต้น ยกเว้นการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงยังส่งผลต่อลักษณะของเมล็ดแป้งและ pasting properties ซึ่งเมล็ดข้าวเหนียวยังเปลี่ยนแปลงจากเมล็ดที่ทึบแสงเป็นเมล็ดที่โปร่งแสงเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ Jaisut et al. (2009) ได้ศึกษาการเร่งอายุของข้าวกล้องหอมมะลิด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันอุณหภูมิสูง เนื่องจากข้าวกล้องที่เก็บเกี่ยวใหม่ ๆ หลังจากการทำให้สุกจะมีลักษณะคล้ายแป้งเปียกและฟูเพียงเล็กน้อย ซึ่งลักษณะนี้เป็นลักษณะที่ไม่พึงปรารถนาของข้าวกล้อง ซึ่งข้าวกล้องจะต้องมีการเก็บไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 3-6 เดือน แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องมีอายุการเก็บรักษาสั้น (3-6 เดือน) เนื่องจากการสะสมของกรดไขมันอิสระ ที่นำไปสู่ความเหม็นหืนระหว่างการเก็บรักษา ในงานวิจัยนี้ศึกษา การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่อุณหภูมิสูง รวมไปถึงขั้นตอนการเก็บไว้ในที่อับอากาศเพื่อทดสอบปัญหาข้างต้น โดยคุณภาพของข้าวที่อบแห้งอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และ 150 องศาเซลเซียส และเก็บไว้ในที่อับอากาศ 30-120 นาที เป็นตัวเปรียบเทียบ จากนั้นนำไปเก็บไว้ในที่มีอากาศไหลเวียน (อุณหภูมิประมาณ 30

องศาเซลเซียส) นาน 7 เดือน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติในการหุงต้มและการรับประทานข้าวกล้องที่ได้จากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน เช่น hardness, solid loss, volume expansion และ elongation ratio ซึ่งเปลี่ยนไปตามอายุของข้าวกล้อง อุณหภูมิในการอบแห้งและเวลาในการเก็บที่อุณหภูมิห้องมีผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญ โดยโครงสร้างของข้าวกล้องเมื่อทำให้สุกด้วยความร้อนจะแข็งขึ้นมากกว่าข้างกล้องอ้างอิงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ข้าวกล้องที่ผ่านความร้อนปริมาณของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่ค่า glycemic index ลดลงจากระดับสูงไประดับกลาง

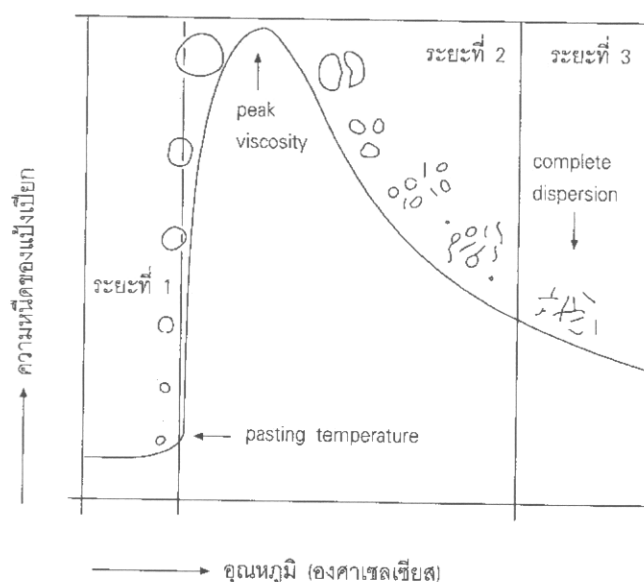
2.9 การเกิดเจลลิตินในเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายน้ำได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach et al., 1959) แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลิตินในเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลิตินในซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืดมักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)



ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

การเกิดเจลาติในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ (ดังภาพ 2.10) คือระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (micelles) ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลาติในเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างที่เกิดการบิดแสงโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาติในเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่าง ๆ ได้ดีกว่า



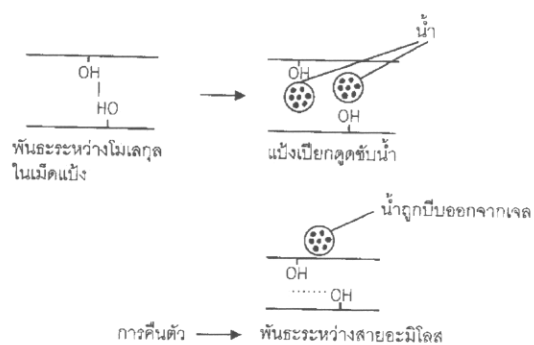
ภาพที่ 2.10 ระยะการเกิดเจลาติในเซชันของเม็ดแป้ง (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

2.10 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

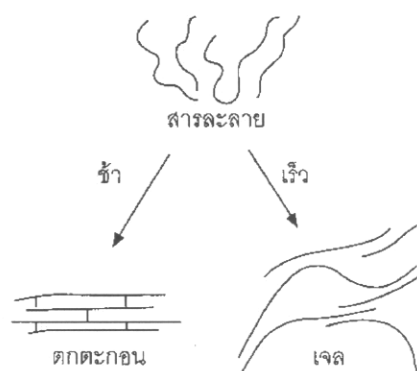
เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทิไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการคูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) (Smith, 1979) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะหนาแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.11

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลของน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด – เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้งในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดีในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย (Swinkels, 1985)



ภาพที่ 2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)



ภาพที่ 2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

2.11 คุณภาพของข้าว

คุณภาพของข้าวทำการวิเคราะห์ 3 รูปแบบคือ

1. การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ
2. การวิเคราะห์คุณภาพการหุงต้ม
3. การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

2.11.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ร้อยละต้นข้าว ร้อยละการแตกข้าว ร้อยละเยื่อ
มีดังต่อไปนี้

2.11.1.1 ร้อยละต้นข้าว (Head rice yield, HRY)

ร้อยละต้นข้าวเป็นตัวบ่งบอกคุณภาพการสี (milling quality) ซึ่งเป็นคุณภาพทางกายภาพที่สำคัญในการกำหนดราคาข้าว โดยดูจากปริมาณข้าวเมล็ดเต็ม (whole grain) และต้นข้าว (head rice) โดยข้าวที่มีคุณภาพการสีดีเป็นข้าวที่เมื่อผ่านการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวสูง มีปริมาณข้าวหักน้อย ในการสีข้าวเป็นการทำให้เปลือก รำ และคัพพะออกจากเมล็ดข้าว โดยเริ่มจากการกะเทาะ (hulling) ทำให้เปลือกข้าวหลุดออกจากเมล็ดได้เกลบและข้าวกล้อง แล้วจึงนำไปทำการขัดขาว (whitening) เพื่อให้รำหลุดออกจากเมล็ดข้าวกล้องจนกลายเป็นข้าวสาร โดยทั่วไปการสีข้าวจะได้เกลบ 20-30% รำ 8-11% และส่วนที่เหลือคือข้าวสารประมาณ 66-72% ของข้าวเปลือก (อรอนงค์, 2547) จากนั้นข้าวสารที่ได้จากการขัดขาวจะถูกนำไปคัดแยก (grading) เพื่อแยกข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหักขนาดต่าง ๆ ออกจากกัน ปริมาณของแต่ละส่วนมีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้าวเปลือกก่อนนำมาสี แสดงดังสมการ (2.1)

$$\text{ร้อยละข้าวต้น (\%HRY)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด} \times 100}{\text{น้ำหนักของข้าวเปลือก}} \quad (2.1)$$

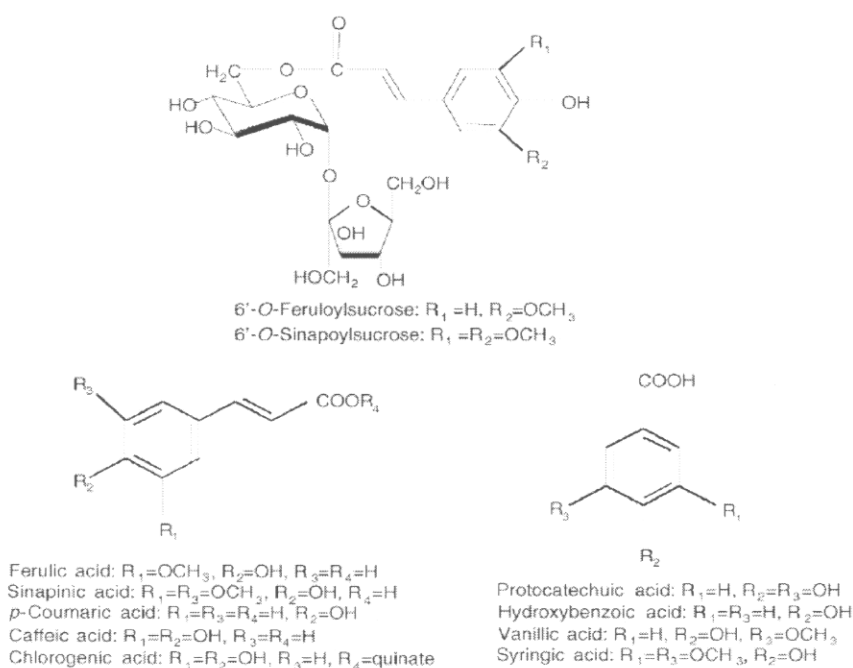
2.11.2 การวิเคราะห์คุณภาพการหุงต้ม

คุณภาพการหุงต้มของข้าวได้แก่ เวลาในการหุงต้ม (cooking time) ปริมาณการดูดซับน้ำ (water uptake) ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ (solid loss) และการขยายปริมาตร (volume expansion) เป็นปัจจัยที่สำคัญทำให้ลักษณะของข้าวสุกมีความแตกต่างกัน มัทนียา (2548) ได้ศึกษาการเร่งข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่า โดยใช้ข้าวหอมมะลิที่ความชื้นเริ่มต้น 21.9 และ 24.9% db. ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที และเป่าด้วยอากาศแวดล้อม 30 นาที ผลการทดลองพบว่าสมบัติภายในเมล็ดข้าวภายหลังการอบแห้งได้แก่ การดูดซับน้ำของข้าวสุกและปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำข้าวสุก มีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับข้าวที่เก็บตามธรรมชาติภายใต้อากาศแวดล้อม โดยมีค่าการดูดซับน้ำของข้าวสุกเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำข้าวสุกมีค่าลดลง

2.11.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

2.11.3.1 สารประกอบฟีนอลในพืชและคุณสมบัติการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

สารประกอบฟีนอล (phenolic compound) เป็นสารที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในกระบวนการเติบโตและการขยายพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด ดังนั้นรูปแบบของสารประกอบฟีนอลที่ทราบโครงสร้างแน่นอนแล้วมากกว่า 8,000 ชนิด (Bravo, 1999) ตั้งแต่กลุ่มที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก (phenolic acid) ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นโพลิเมอร์ เช่น ลิกนิน (lignins)



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลในข้าว (Tian et al., 2005)

โครงสร้างพื้นฐานของสารประกอบฟีนอลแสดงในภาพที่ 2.13 จะเกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลน้ำตาลตั้งแต่ 1 โมเลกุลขึ้นไปรวมกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH – group) โดยน้ำตาลดังกล่าวอาจเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) น้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) หรือโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) ก็ได้ แต่น้ำตาลชนิดที่พบมากที่สุดโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลคือ กลูโคส (glucose) นอกจากนี้ยังพบว่าการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลด้วยกันเอง หรือสารประกอบฟีนอลกับสารประกอบอื่น ๆ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) กรดอินทรีย์ (organic acid) อะมีน (amine) และไขมันอีกด้วย

คุณสมบัติที่ได้รับความสนใจอย่างมากของสารประกอบฟีนอล คือการเป็นสารต้านออกซิเดชัน และสารต้านการกลายพันธุ์ (anti mutate) ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระ (free radical) และการใช้สารประกอบฟีนอลในการป้องกันโรคต่างๆ โดยเฉพาะโรคหัวใจขาดเลือด และมะเร็ง โดยสารประกอบฟีนอลจะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ และไอออนของโลหะที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและโมเลกุลอื่นๆ ด้วยการให้อะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระอย่างรวดเร็วดังแสดงในสมการ (2.2), (2.3)



เมื่อ $\text{ROO}^\bullet, \text{RO}^\bullet$ คือ free radical , PPH คือ polyphenolic compound

เมื่อสารประกอบฟีนอลให้อะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระไปแล้ว อนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลจะค่อนข้างมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยาอย่างอื่นต่อไป ยิ่งไปกว่านั้น อนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลบางชนิดยังคงสามารถรวมกับอนุมูลอิสระอื่นได้อีกด้วย จึงทำให้สารประกอบฟีนอลเหล่านั้นลดจำนวนอนุมูลอิสระลงได้ 2 เท่า ดังแสดงในสมการ (2.4) , (2.5) (วิวัฒน์, 2545)



สารประกอบฟีนอลที่ถูกพบว่ามีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันนั้น สามารถพบได้ในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เมล็ด (ได้แก่ ถั่วเหลือง ถั่วลิสง เมล็ดฝ้าย ข้าว และงา) ผล (ได้แก่ องุ่น ส้ม และพริกไทยดำ) ใบ (ได้แก่ ชา และเครื่องเทศต่างๆ) และส่วนอื่นๆ (ได้แก่ มันเทศ และหัวหอม) และหนึ่งในสารประกอบฟีนอลที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ flavonoids (ได้แก่ flavones, flavonols, isoflavones, catechins, flavonones และ chalcones) และ cinnamon acid derivatives (caffeic acid, ferulic acid, chlorogenic acid และอื่นๆ) โดยสามารถพบได้ในทุกส่วนของพืชแต่ละมีความแตกต่างกันออกไปในด้านของชนิดและปริมาณ

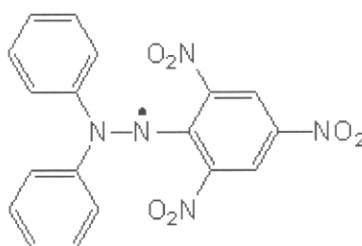
ในอาหารและเครื่องดื่มที่มาจากพืช เช่น ผัก ผลไม้ ธัญพืชต่างๆ น้ำผลไม้ ไวน์ เบียร์ ชา และกาแฟจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลในปริมาณที่แตกต่างกัน เนื่องจากการสร้างสารประกอบฟีนอลของพืชจะมีทั้งปัจจัยทางด้านพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังพอว่าวิธีการเพาะปลูก ระดับความสูง กระบวนการแปรรูปหรือแม้แต่วิธีการเก็บรักษาก็ล้วนมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งสิ้น (วิวัฒน์, 2545)

คุณสมบัติของสารประกอบฟีนอลทางเคมีที่ใช้มีความหมายว่า เป็นตัวกำจัดอนุมูลอิสระ (radical) ซึ่งนั่นคือ ความสามารถในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอล สำหรับสารประกอบฟีนอล สามารถนิยามความหมายของคำว่า สารต้านออกซิเดชัน ได้โดยอาศัยหลักพื้นฐาน 2 ข้อ ดังนี้ คือ (Rice-Evans et al., 1996)

1. ที่ความเข้มข้นต่ำๆ สารตั้งต้นก็จะถูกชะลอ หรือสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้
2. อนุมูลอิสระที่ถูกกำจัดออกไปแล้วจะต้องมีความเสถียร (stable)

2.11.3.2 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging capacity assay (DPPH assay)

DPPH assay เป็นวิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ซึ่งใช้ reagent คือ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (ภาพที่ 2.14) เป็น stable radical ในตัวทำละลาย methanol ซึ่งสารละลายนี้มีสีม่วง ซึ่งดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 517 nm



รูปที่ 2.14 สูตรโครงสร้างของ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl

(http://www.merck-chemicals.com/life-science-research/dpph-free-radical/EMD_BIO-300267/p_7_ab.s1LILUAAEWIWEfVhTm)

โดย DPPH[•] จะเกิดปฏิกิริยากับ antioxidant (AH) หรือกับ radical species (R[•]) ได้ดังสมการ (2.6), (2.7)



ถ้าตัวอย่างมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้สูง ความเข้มของสารละลายสีม่วงก็จะลดลง ซึ่งจะรายงานผลการทดลองเป็นค่า 50% effective concentration (EC₅₀) ซึ่งหมายถึงปริมาณสารต้านออกซิเดชันที่ทำให้ความเข้มข้นของ DPPH เหลืออยู่ 50% (Lo and Cheung, 2005)

การศึกษาความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ในสารตัวอย่างนิยมรายงานเป็นค่า EC₅₀ ทำโดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % Remaining DPPH กับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน/ตัวอย่าง เพื่อหาค่า EC₅₀ โดยคำนวณ % Remaining DPPH ตามสมการ (2.8)

$$\% \text{ Remaining DPPH} = \left(\frac{Abs_{sample}}{Abs_{control}} \right) \times 100 \quad (2.8)$$

นอกจากนี้แล้วก็ยังมีรายงานในรูปของค่า IC₅₀ ด้วย ซึ่งทำโดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % Inhibition DPPH กับความเข้มข้นของสารตัวอย่าง เพื่อหาค่า IC₅₀ โดยคำนวณ % Inhibition DPPH ตามสมการ (2.9) (Duan et al., 2006)

$$\% \text{ Inhibition DPPH} = \left(\frac{Abs_{control} - Abs_{sample}}{Abs_{control}} \right) \times 100 \quad (2.9)$$

DPPH assay เป็นวิธีที่มีข้อดีคือ เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว ง่ายต่อการวิเคราะห์ ให้ความถูกต้องและมี reproducibility สูง แต่ก็มีข้อเสียคือ ไม่สามารถใช้วิธีนี้วิเคราะห์ antioxidant activity ของเลือดได้ เพราะต้องวัดในปฏิกิริยาที่เป็น alcohol ซึ่งทำให้โปรตีนตกตะกอนได้

2.11.3.3 Ferric reducing antioxidant power (FRAP assay)

หลักการของ FRAP assay จะเป็นการหาปริมาณ total antioxidant concentration โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยา reduction ของ Fe^{3+} ซึ่งอยู่ในรูปของ Ferric tripyridyltriazine (Fe^{3+} -TPTZ) complex ซึ่งเป็นสารละลายไม่มีสีถูกรีดิวซ์ด้วยสารต้านอนุมูลอิสระกลายเป็น Ferrous tripyridyltriazine (Fe^{2+} -TPTZ) complex ซึ่งเป็นสารละลายสีฟ้าเข้มหรือสีน้ำเงินในสารละลายที่มี pH ต่ำ ซึ่ง Fe^{3+} -TPTZ สามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 593 nm ดังสมการ (2.10) (Benzie and Strain, 1996)



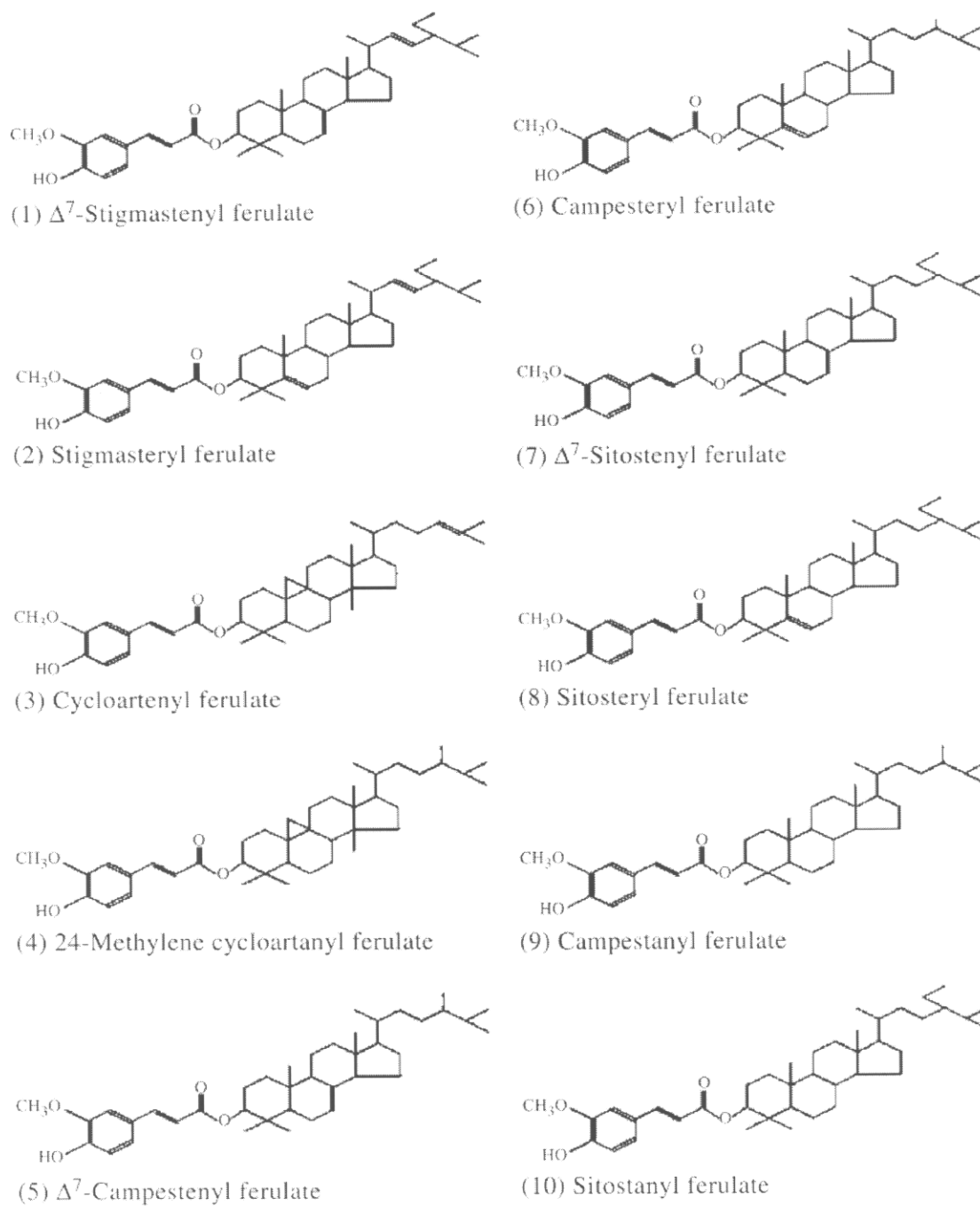
สารตัวอย่างที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีจะหมายถึงมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดี จะเกิด Fe^{2+} -TPTZ มากและสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 nm ได้สูงมากขึ้น FRAP assay เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาปรับใช้กับตัวอย่างที่เป็นของเหลวทางชีวภาพ เช่น น้ำเลือด อาหาร สารสกัดจากพืช และน้ำผลไม้ เป็นต้น

2.11.3.4 γ -oryzanol

สารแกมมาออริซานอล (γ -oryzanol) ทำหน้าที่เพิ่มระดับไขมันชนิดดี (HDL) ให้แก่ร่างกายซึ่งไขมันชนิดนี้จะไปขจัดไขมันชนิดไม่ดี (LDL) และไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ในเส้นเลือด ทำให้ลดการติดตันของเส้นเลือด เพิ่มการไหลเวียนของโลหิตและยังฤทธิ์ในการลดความเครียด ทำให้อวัยวะสำคัญต่างๆ เช่น ตับ ไต หัว สมอง ตับอ่อน ฯลฯ มีเลือดไปเลี้ยงมากขึ้น และส่วนที่เสื่อมสภาพก็กลับฟื้นตัวและทำงานได้อีกครั้ง ช่วยลดอัตราการเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ โรคตับ โรคเบาหวาน เป็นต้น

นอกจากนี้ยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิตามิน E ถึง 6 เท่า และมีความเสถียรที่สุดเมื่อเทียบกับวิตามิน C และ E ซึ่งอนุมูลอิสระนั้นเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคมะเร็งและโรคหลอดเลือดหัวใจตีตัน นอกจากนี้ยังป้องกันแสง UV ได้อีกด้วย

γ -oryzanol เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่พบได้สูงในรำข้าว แสดงดังภาพที่ 2.15 โครงสร้างจะคล้ายการผสม ferulic acid ester ของ triterpene alcohol กับ phytosterols โดย γ -oryzanol จัดเป็นสาร hypolipidemic และ antiatherogenic เนื่องจากมีฤทธิ์ลดเกล็ดเลือดเกาะผนังหลอดเลือด ยับยั้งการเกิดพังผืดในหลอดเลือด aortic และยับยั้งเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส



ภาพที่ 2.15 สูตรโครงสร้างของ γ -oryzanol (Imsanguan et al., 2008)

2.11.3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระในข้าว

จากงานวิจัยของ Tananuwong and Tewaruth (2010) ได้ศึกษาสภาวะในการสกัดที่เหมาะสมของข้าวเหนียวดำ (Kam Doi Saked) และเพื่อตรวจสอบการประยุกต์ใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระในน้ำมันที่อุดมไปด้วยมายองเนส โดยแปงข้าวเหนียวดำจะถูกสกัดด้วยสารละลาย acetone-water ในอัตราส่วน 70:30 (v/v) ที่ pH 2.0 และ pH 6.8 นาน 2, 4 และ 8 ชั่วโมง โดยวิเคราะห์ total phenolic content (TPC) , total monomeric anthocyanin content (TMA) วิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP) และ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) โดยการสกัดที่ pH 6.8 นาน 4 ชั่วโมง พบว่า มี antioxidant activity มากที่สุดเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP และ DPPH และนำสารสกัดที่แยกแยะให้ลงไป ในน้ำมันปลาที่อุดมไปด้วยมายองเนสที่ 500 mg/kg และ 1000 mg/kg Conjugated diene hydroperoxides (CDH), thiobarbituric acid reactive substance (TBARs) และสีในระบบ CIELAB ของตัวอย่างมายองเนสที่เก็บที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน ก่อนทำการวิเคราะห์ พบว่าตัวอย่างที่บรรจุด้วย 1000 mg/kg ของสารสกัดพบว่า CDH และ TBARs มีค่าเพิ่มขึ้นแต่มีค่าสีขาวที่ลดลง อันเนื่องมาจาก anthocyanin และ Maillard reaction ในขณะที่ Chotimarkorn et al. (2008) ได้ศึกษาสารสกัดที่มีอยู่ในรำข้าว จากรำข้าว 5 สายพันธุ์ที่ปลูกมากที่สุดในประเทศไทย ซึ่งมีส่วนประกอบของสารต้านอนุมูลอิสระอยู่มากมาย antioxidant activity ของสารสกัดจากรำข้าวได้ศึกษาโดยใช้ระบบ *in vitro* รวมไปถึง 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl free radical-scavenging (DPPH), total reducing power, ferrous ion-chelating activity และ lipid peroxidation inhibition วิเคราะห์โดย colorimetric assay ส่วน total phenolic and flavonoid contents, γ -oryzanol, tocopherol และ tocotrienol isomer contents วิเคราะห์โดย HPLC สารสกัดจากรำข้าวให้ผลการทดลอง คือ DPPH free radical-scavenging (EC_{50} 0.38-0.74 mg/ml), reducing sugar (EC_{50} 0.10-0.53 mg/ml), ferrous ion-chelating activity (EC_{50} 0.11-0.55 mg/ml) และ inhibition of lipid peroxidation (EC_{50} 0.14-0.57 mg/ml) total phenolic and flavonoid contents, γ -oryzanol, tocopherol และ tocotrienol contents ของสารสกัดจากรำข้าวอยู่ในช่วง 2.2-3.2, 0.03-0.10, 0.56-1.08, 0.35-0.77 และ 0.22-0.46 mg/g rice bran ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่า methanolic component ของสารสกัดจากรำข้าวอาจจะมีสารต้านอนุมูลอิสระที่มีคุณภาพ

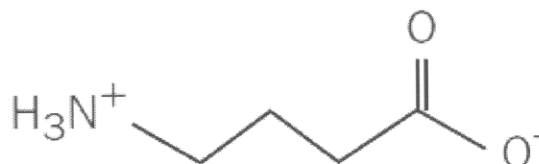
นอกจากนี้ Vichapong et al. (2010) ได้ศึกษาทฤษฎีในการวิเคราะห์ phenolic compound ในพันธุ์ข้าวที่ได้รับการพัฒนา โดยวิธีการประกอบด้วยการสกัด phenolic compound จากข้าว ก่อนการวิเคราะห์ด้วย HPLC โดย HPLC ที่ใช้เป็นแบบ reverse phase HPLC และใช้

photodiode array เป็น detector ซึ่งสภาวะในการแยกจะถูกปรับให้เหมาะสม ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม phenolic compound ทั้ง 12 ตัว ใช้เวลาในการแยก 24 นาที Pressurized liquid extraction (PLE) ใช้ในการสกัด phenolic compound จากข้าวภายใต้สภาวะที่เหมาะสมคือ สกัดด้วย 70% methanol และเวลาที่ใช้ในการสกัด 15 นาที ในขณะที่ bound phenolic compounds ถูกสกัดด้วย alkaline hydrolysis นาน 15 นาที ข้าว 6 สายพันธุ์ของไทยทั้งข้าวที่มีสีและไม่มีสี ซึ่งทั้งหมดจะใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบ phenolic compound ทั้ง 12 ตัวถูกตรวจสอบเป็น free phenolic compound ในทุกตัวอย่าง โดย Ferulic acid มีมากที่สุดในทุกตัวอย่าง ในขณะที่ ferulic acid และ *p*-coumaric acid ถูกพบเป็น bound phenolic acid ในบางตัวอย่าง ปริมาณ phenolic compound , total flavonoid และ antioxidant activity ในข้าวที่มีสีน้ำตาลสูงกว่าข้าวที่ไม่มีสี และจากงานวิจัยของ Butsat and Siriamornpun (2010) ได้ศึกษา 4 ส่วนของข้าวหอมมะลิ 105 คือ รำข้าว แกลบ ข้าวกล้อง และข้าวขาว ที่เก็บรวบรวมจากสถานที่ปลูกที่แตกต่างกัน 3 สถานที่ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ phenolic acid compound, γ -oryzanol และ tocopherol รวมไปถึงการวิเคราะห์ antioxidant activity โดยใช้วิธี DPPH และ FRAP เพื่อใช้เปรียบเทียบในส่วนต่างๆ ของข้าว พบว่า ในส่วนของรำข้าวที่มีปริมาณ γ -oryzanol และ tocopherols ที่สูง ในทางกลับกันในส่วนของแกลบพบว่า ความเข้มข้นของ phenolic acid มีค่าสูงมากกว่าในส่วนอื่น ๆ phenolic acid ทั้ง 3 รูปแบบที่พบในทุก ๆ ส่วนของข้าว นั่นคือ ferulic acid, vanillic acid และ *p*-conmaric acid ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามสถานที่ปลูก โดย ferulic acid พบมากในรำ ในขณะที่ vanillic acid และ *p*-conmaric acid จะพบมากในแกลบ สารต้านอนุมูลอิสระในแต่ละส่วนของข้าวขึ้นอยู่กับสถานที่ปลูกและส่วนประกอบของสารต้านอนุมูลอิสระ ทางผู้วิจัยได้เสนอการเปลี่ยนแปลงปริมาณ phenolic acid ที่เป็นผลมาจากสถานที่ปลูก ซึ่งในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า รำข้าวและแกลบถือได้ว่าเป็นแหล่งที่มีคุณค่าของส่วนประกอบที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ

2.11.3.6 γ -aminobutyric acid (GABA)

GABA เป็น non-protein amino acid ประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม โดยที่หมู่แอมิโนจับตัวกับ γ -carbon มากกว่า α -carbon ดังภาพที่ 2.16 ทำให้ฟอร์มตัวอยู่ในรูปอิสระ ละลายน้ำได้ดี และมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เมื่อละลายน้ำ รวมถึงมีโครงสร้างที่เป็นวงกลมเหมือนกับโปรตีน นอกจากนี้ GABA เป็นสารประกอบซิลเวอร์ไอออนิก (zwitterionic) ระหว่างค่า pKa 4.03 และ 10.56 (Shelp et al., 1999) ในพืชโดยทั่วไปมี GABA

เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อได้รับความเครียด เช่น ความร้อน ออกซิเจนที่มาก และฮอร์โมน จะเกิดการสะสมของ GABA มากขึ้น



ภาพที่ 2.16 โครงสร้างของ gamma-aminobutyric acid (GABA)

การสังเคราะห์ GABA

Lui et al. (2005) ได้รายงานผลการสังเคราะห์ GABA ในพืชประกอบด้วยเอนไซม์หลัก ๆ 3 เอนไซม์ด้วยกัน

1. ปฏิกิริยา decarboxylation ของ L-glutamic acid เพื่อเปลี่ยนเป็น GABA และ CO_2 กระตุ้นการทำงานโดยเอนไซม์ *cytosolic enzyme glutamate decarboxylase* (GAD, EC 4.1.1.15) ทำให้ cytoplasmic มีสภาพเป็นกรดกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ GAD โดยทั่วไป pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ประมาณ 5.8 ดังแสดงในสมการ (2.11) (Patterson and Graham, 1987)



2. *GABA transaminase* (GABA-T, EC 2.6.1.19) เป็นเอนไซม์ในไมโทคอนเดรีย กระตุ้นให้ GABA เปลี่ยนเป็น succinic semialdehyde เพื่อใช้ในวัฏจักร pyruvate หรือ α -ketoglutarate โดยเอนไซม์นี้สามารถทำงานได้ดีในสภาพที่ pH เป็นเบส (Patterson and Graham, 1987) การสะสม GABA ที่ถูกกระตุ้นด้วย cytosolic acidification บางครั้งยับยั้งเอนไซม์ *GABA transaminase* ดังแสดงในสมการ (2.12)



3. เอนไซม์ *succinic semialdehyde dehydrogenase* (SSADH, EC 1.2.1.16) ออกซิไดส์ succinic semialdehyde เปลี่ยนเป็น succinate ซึ่งเป็นปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เอนไซม์นี้สามารถทำงานได้ดีในสภาพที่มี pH ประมาณ 9 (Shelp et al., 1999)

การเปลี่ยนกลูตามेटเป็นซัคซินเนตโดยเอนไซม์ *glutamate decarboxylase* (GAD, EC 4.1.1.15) *GABA transaminase* (GABA-T, EC 2.6.1.19) และ *succinic semialdehyde dehydrogenase* (SSADH, EC 1.2.1.16) เรียกว่า GABA shunt ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งให้กลูตามेटสามารถเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ได้

2.13.3.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ GABA

จากงานวิจัยของ Watchraprapaiboon et al. (2007) พบว่า ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 แช่น้ำที่มี pH เท่ากับ 6 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้มีปริมาณ GABA, กรดไฟติก และวิตามินบี 1 เท่ากับ 16.50, 501.06 และ 0.526 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ส่วนในข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 มีปริมาณ GABA, กรดไฟติก และวิตามินบี 1 เท่ากับ 14.51, 486.03 และ 0.436 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่ง Chung et al. (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะในการแช่ข้าว (เวลา, อุณหภูมิ และสารละลายที่ใช้ในการแช่ข้าว) และสภาวะไร้อากาศต่อปริมาณ GABA ในข้าวบาร์เลย์ที่เริ่มงอก โดยนำเมล็ดข้าวบาร์เลย์แช่น้ำหรือสารละลายบัฟเฟอร์ (pH 6.0, 50 mmol/L sodium acetate) เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกัน (5, 15 หรือ 35 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปทำการเพาะงอกที่ 15 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ได้ความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการงอก (36-44 g/100 g) นั่นคือ ถ้าใช้อุณหภูมิต่อระยะเวลาในการแช่นาน (ที่อุณหภูมิ 5 และ 15 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการแช่ 16 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามที่ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสูงเกินไปมีผลทำให้ร้อยละในการงอกจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 5 และ 15 องศาเซลเซียส สำหรับปริมาณ GABA เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการงอกนานขึ้นและปริมาณ GABA ในสารละลายบัฟเฟอร์จะมีมากกว่าในน้ำ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า GAD เป็นเอนไซม์ควบคุมปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ GABA ที่สภาวะ pH 6.0 สำหรับการงอกข้าวบาร์เลย์โดยการเก็บในสภาวะมืดไร้อากาศ พบว่าปริมาณ GABA สูงถึง 14.3

mg/100mg หลังจากการเก็บไว้ในสภาวะนี้ 12 ชั่วโมง ซึ่งให้ปริมาณ GABA สูงถึง 4 เท่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม จากการทดลองเห็นได้ว่า สภาวะในการแช่ข้าวบาร์เลย์ก่อนการออกมีผลต่อปริมาณ GABA อย่างมากและการงอกในสภาวะไร้อากาศมีผลทำให้ปริมาณ GABA เพิ่มขึ้นด้วย

นอกจากนี้ Limure et al. (2009) ได้ศึกษาวิธีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ GABA จาก sodium glutamate โดยใช้รำข้าวบาร์เลย์ที่ปราศจากบัพเฟอร์หรือโคเอนไซม์ใด ๆ โดยทางผู้วิจัยได้กำหนดสภาวะของปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมในการผลิต GABA จากข้าวบาร์เลย์ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 20 องศาเซลเซียส, ความเข้มข้นข้าวบาร์เลย์เริ่มต้น 150 mg/ml, ความเข้มข้นของ sodium glutamate 10 mM และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง โดยภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการใช้รำข้าวบาร์เลย์ ได้ความเข้มข้นของ GABA ถึง 11.0 mM (ปริมาณ GABA ภายในข้าวบาร์เลย์) จาก 10.0 mM sodium glutamate แต่ปริมาณ GABA จากข้าวบาร์เลย์และรำข้าวเริ่มต้นมีค่า 3.9 และ 0.8 mM ตามลำดับ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำเบียร์ โดยเตรียมน้ำเบียร์จากรำข้าวบาร์เลย์ น้ำเบียร์ที่ได้มีปริมาณ GABA สูงถึง 257 µg/ml โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำเบียร์

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบ

ข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์พิษณุโลก 2 และพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก จ.พิษณุโลก เก็บเกี่ยวเมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554 ข้าวเปลือกที่ได้จะนำไปเก็บในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนทำการทดลองข้าวเปลือกทั้งหมดจะถูกทิ้งไว้ให้เท่ากับอุณหภูมิห้องก่อน และนำไปทำความสะอาด เพื่อแยกแกลบและเมล็ดที่ลีบออก หลังจากนั้นจึงนำมาทำการทดลองได้

3.1.2 สารเคมี

	ยี่ห้อ/ประเทศ
1. 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH)	Aldrich/USA
2. Methanol	RCI Labscan/Thailand
3. Sodium acetate trihydrate	RCI Labscan/Thailand
4. Acetic acid	Lab scan/Ireland
5. 2,4,6-tri-2-pyridyl-2-triazine (TPTZ)	Fluka/Germany
6. Hydro colic acid (HCl)	Merck/Germany
7. Ferric chloride ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	Aldrich/USA
8. Gallic acid (99%)	Fluka/Germany
9. Sodium carbonate (Na_2CO_3)	Riedel-de Haen/Germany
10. Folin Ciocalteu reagent	Sigma/USA
11. Sodium tetraborate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	Ajax Finechem/New Zealand
12. 2-Hydroxy-naphthaldehyde (HN)	Aldrich/USA
13. Ethanol	RCI Labscan/Thailand
14. Gamma-aminobutyric acid (>99%)	Sigma/USA
15. Sodium acetate trihydrate	Sigma/USA
16. Acetonitrile	RCI Labscan/Thailand
17. Gamma-oryzanol (97%)	Wako/Japan

18. Acetone	RCI Labscan/Thailand
19. Trifluoroacetic acid	Fisher Scientific/UK

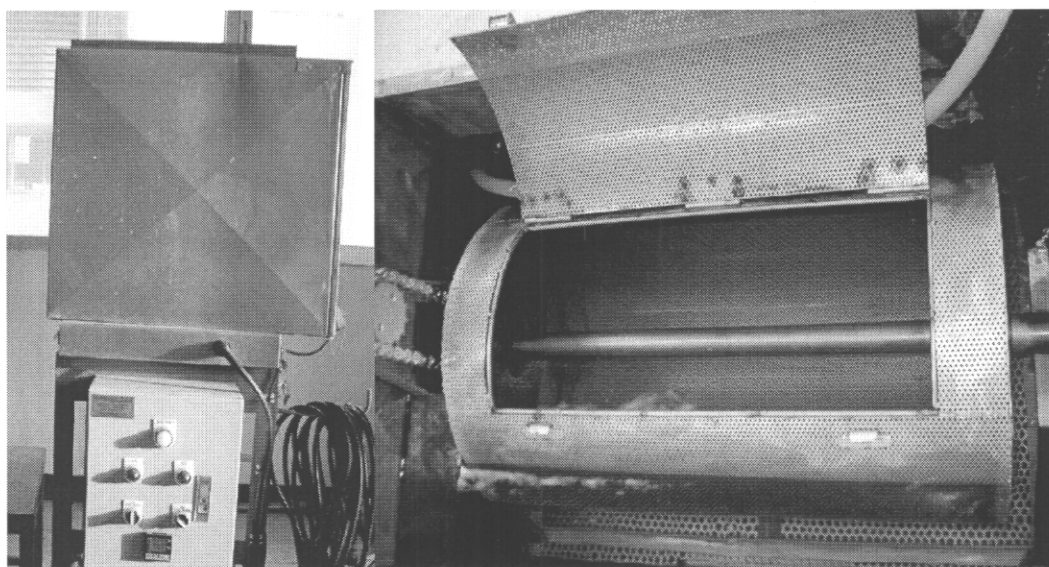
3.1.3 อุปกรณ์

	ยี่ห้อ/ประเทศ
1. เครื่องชั่ง	Denver Instrument
2. เครื่องชั่ง	Sartorius/Germany
3. เครื่องแก้วต่าง ๆ	SCHOTT/Germany
4. เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก	Satake/Thailand
5. เครื่องแยกเมล็ดข้าว	Satake/Thailand
6. เครื่องขัดสีเมล็ดข้าว	Satake/Thailand
7. ตู้อบ (Hot Air Oven)	Memmert/Germany
8. Data logger	BrainChlid
9. นาฬิกาจับเวลา	SPORT TIMER
10. โถดูดความชื้น (Desiccator)	-
11. อ่างน้ำร้อน (Water bath)	Memmert/Germany
12. ชุดกรอง HPLC	SCHOTT/Germany
13. เครื่อง High pressure liquid chromatography (HPLC)	Shimadzu/Japan
14. Spectrophotometer	Libra S22/England
15. เครื่องแช่ข้าวเปลือก	Scan Engineering/Thailand
16. เครื่องบดข้าว	Kenwood/China

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การแช่ข้าวเปลือก

เครื่องแช่ข้าวเปลือก มีลักษณะแสดงในรูปที่ 3.1 ในเครื่องแช่เป็นรูปทรงลูกบาศก์ทำด้วยสแตนเลสตีลมีฝาปิด กว้าง 57 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ปริมาตร 199,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีถังตะแกรงทรงกระบอกอยู่ภายในควบคุมอุณหภูมิในการแช่ข้าว 30 องศาเซลเซียส ± 1 องศาเซลเซียส มีระบบหมุนเวียนน้ำภายในถังแช่ให้มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ



ภาพที่ 3.1 เครื่องแช่ข้าวเปลือก

ขั้นตอนการแช่ข้าวเปลือกเพื่อให้เกิดการงอก

1. นำเมล็ดข้าวเปลือก (พันธุ์พิษณุโลก 2) ที่ผ่านการทำความสะอาด แยกแกลบและเมล็ดข้าวลีบออกแล้วมานำแช่น้ำในเครื่องแช่ข้าว ตั้งอุณหภูมิเครื่องแช่ที่ 30 องศาเซลเซียส
2. แช่ข้าวเปลือกตัวอย่างที่เวลาในการแช่ 50-55 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการงอก
3. เปิดปุ่มระบบน้ำวน เพื่อให้อุณหภูมิในถังสม่ำเสมอ
4. เปลี่ยนน้ำที่แช่ทุก ๆ 6 ชั่วโมง โดยเปิดวาล์วน้ำทั้งด้านล่างและเปิดน้ำใสด้านบนถัง เพื่อป้องกันการเกิดการหมัก
5. เมื่อครบกำหนดเวลาในการแช่แล้วเทน้ำออกให้หมดและพักทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนนำไปอบแห้งโดยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด

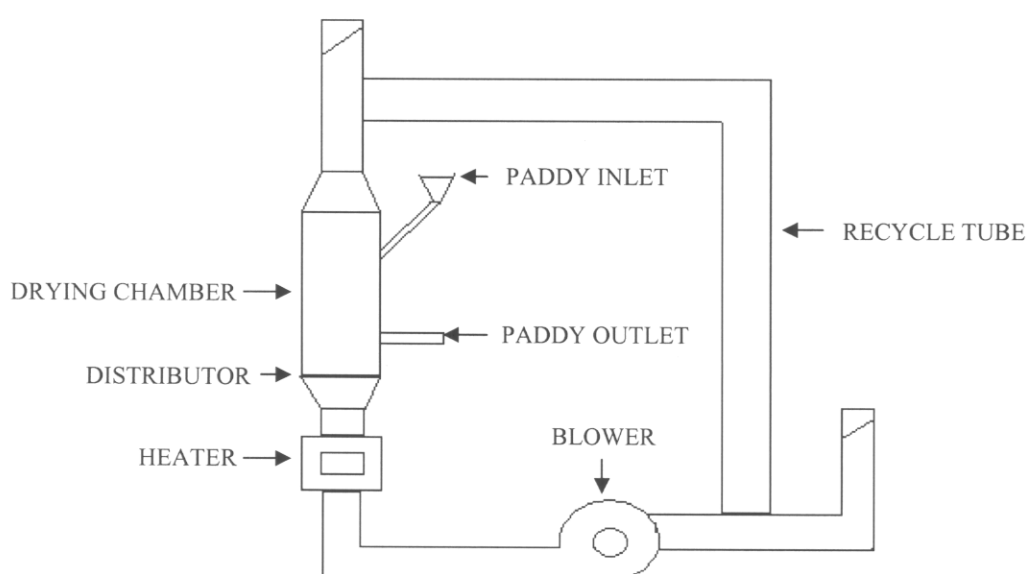
ขั้นตอนการแช่ข้าวเปลือกหนึ่ง

1. นำเมล็ดข้าวเปลือก (พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105) ที่ผ่านการทำความสะอาด แยกแกลบและเมล็ดข้าวลีบออกแล้วมาแช่น้ำในเครื่องแช่ข้าว ตั้งอุณหภูมิเครื่องแช่ที่ 70 องศาเซลเซียส
2. แช่ข้าวเปลือกตัวอย่างที่เวลาในการแช่ 5 ชั่วโมง
3. เมื่อครบกำหนดเวลาในการแช่แล้วเทน้ำออกให้หมดและพักทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนนำไปอบแห้งโดยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด

3.2.2 การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดชนิดอบแห้งเป็นวงวน โดยสามารถอบแห้งแบบใช้อากาศร้อน หรือทำงานแบบใช้อากาศร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ ลักษณะรายละเอียดของเครื่องอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีอุปกรณ์หลัก ๆ ประกอบไปด้วย

1. อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater)
2. พัดลม (Blower) เป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า
3. ห้องอบแห้ง เป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลสสตีล (Stainless steel)
4. เครื่องดักฝุ่น (Cyclone) เป็นแบบ Reverse flow ทำด้วยสแตนเลสสตีล



ภาพที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

โดยชั่งข้าวเปลือกขึ้น 1.4 กิโลกรัม มาอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด แบบลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศร้อน 2.5 เมตรต่อวินาที และความสูงเบด 10 เซนติเมตร ความชื้นหลังผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าไม่ต่ำกว่า 19-21% db. แล้วจึงนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือประมาณ 16% db. (เวลาที่ใช้ในการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมประมาณ 7 วัน) นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งไปเก็บในถุงพลาสติกเข้าห้องเย็นอุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ ก่อนทำการทดสอบคุณภาพ

3.2.3 การหาความชื้นของข้าวเปลือก (AACC, 1995)

การหาความชื้นของข้าวเปลือก โดยชั่งน้ำหนักของข้าวเปลือกจำนวน 50 กรัม ใส่ในกระป๋องความชื้น (moisture can) นำเข้าสู่ตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำมาใส่โถดูดความชื้น 45 นาที ชั่งน้ำหนักอีกครั้งแล้วคำนวณเป็นความชื้นมาตรฐานแห่ง ดังสมการ (3.1) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

$$M_d = \left(\frac{w - d}{d} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ	M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห่ง
	w	=	มวลของวัสดุ, กรัม
	d	=	มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), กรัม

3.2.4 การหาร้อยละต้นข้าว

การหาร้อยละต้นข้าว (Head rice yield) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำข้าวเปลือกจำนวน 250 กรัม มากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะ แล้วนำไปขัดสี จากนั้นนำไปคัดแยกเมล็ดเต็มด้วยเครื่องคัดขนาด ร้อยละต้นข้าวคือข้าวขาวที่มีความยาวของเมล็ดมากกว่า 75% ของความยาวทั้งหมด คำนวณจากน้ำหนักข้าวขาวที่คัดขนาดแล้วหารด้วยข้าวเปลือกเริ่มต้น ดังสมการ (3.2) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

$$\text{Head rice yield (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก (กรัม)}} \quad (3.2)$$

3.2.5 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นผลึก

วิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometry (XRD) (MiniFlexII, Rigaku, Japan) โดยวิธีของ Srisang et al. (2011) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.6 เวลาในการหุงสุก (Cooking time) (Soponronnarit et al., 2008)

นำข้าวที่ผ่านกระบวนการคัดแยกข้าวเมล็ดเต็มมาแล้วมา 2 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นใส่หลอดทดลอง 20 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำเดือดประมาณ 10 นาที จากนั้นนำเมล็ดข้าวมากด โดยใช้กระจกใส 2 แผ่นกดลงบนเมล็ดข้าวที่ต้มแล้วทำการกดทุกๆ 1 นาที จนสังเกตได้ว่าเมล็ดข้าวที่กดนั้นไม่มีแกนสีขาวเหลืออยู่และตรงนั้นคือ ระยะเวลาในการหุงต้ม (Cooking time) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.7 การหาปริมาณการดูดซับน้ำ (Water uptake) (Soponronnarit et al., 2008)

ชั่งเมล็ดข้าวจำนวน 2 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดจนถึงเวลา cooking time ยกหลอดขึ้นจากน้ำเดือด เทน้ำทิ้ง รอให้เย็นและนำข้าวที่หุงสุกแล้วไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำมาคำนวณหา Water uptake ดังสมการ (3.5) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

$$\text{Water uptake (\%)} = \left(\frac{W_c - W_{uc}}{W_{uc}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ W_c = น้ำหนักเมล็ดข้าวที่ผ่านการหุง (กรัม)
 W_{uc} = น้ำหนักเมล็ดข้าวที่ยังไม่ผ่านการหุง (กรัม)

3.2.8 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ (Solid loss) (Soponronnarit et al., 2008)

ชั่งเมล็ดข้าวจำนวน 2 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดจนถึงเวลาหุงสุก จากนั้นเทน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวใส่ภาชนะที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน รอให้เย็นแล้วนำน้ำนั้นไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาใส่ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 45 นาที ชั่งน้ำหนักของภาชนะหลังอบ แล้วนำมาคำนวณหา Solid loss ดังสมการ (3.6) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

$$\text{Solid loss (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักภาชนะหลังอบ} - \text{น้ำหนักภาชนะเริ่มต้น}) \times 100}{\text{น้ำหนักข้าวตัวอย่าง}} \quad (3.6)$$

3.2.9 การหาอัตราการขยายปริมาตร (Volume expansion) (Soponronnarit et al., 2008)

ชั่งเมล็ดข้าวจำนวน 2 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดจนถึงเวลาหุงสุก ทำการวัดความสูงของข้าวในหลอดทดลองทั้งก่อนและหลังการหุงต้มแล้วนำมาคำนวณหา %volume expansion ดังสมการ (3.7) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

$$\text{Volume expansion (\%)} = \frac{\text{ความสูงข้าวที่ผ่านการหุง} - \text{ความสูงข้าวที่ยังไม่ผ่านการหุง} \times 100}{\text{ความสูงข้าวที่ยังไม่ผ่านการหุง}} \quad (3.7)$$

3.2.10 การวิเคราะห์ร้อยละการแตกตัวของเมล็ด

การวิเคราะห์ร้อยละการแตกตัวของเมล็ด ตามวิธีการของ Srisang et al. (2011) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.11 การวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอล โดยใช้ Folin – Ciocalteu method

การวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอล โดยใช้ Folin – Ciocalteu method ตามวิธีการของ Skerget et al. (2005) ดังแสดงในภาคผนวก ก1 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.12 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH assay

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH assay ตามวิธีการของ Maisuthisakul et al. (2007) ดังแสดงในภาคผนวก ก2 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.13 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP assay ตามวิธีการของ Benzie and Strain (1996) ดังแสดงในภาคผนวก ก3 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.14 การวิเคราะห์หาปริมาณ GABA

การวิเคราะห์หาปริมาณ gamma-aminobutyric acid โดยใช้เครื่อง High pressure liquid chromatography (HPLC) คัดแปลงจากวิธีการของ Khuhawar and Rajper (2003) ดังแสดงในภาคผนวก ก4 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.15 การวิเคราะห์หาปริมาณแกมมาออริซานอล (γ -oryzanol)

การวิเคราะห์หาปริมาณ γ -oryzanol โดยใช้เครื่อง High pressure liquid chromatography (HPLC) คัดแปลงจากวิธีการของ Xu and Godber (1999) ดังแสดงในภาคผนวก ก 5 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

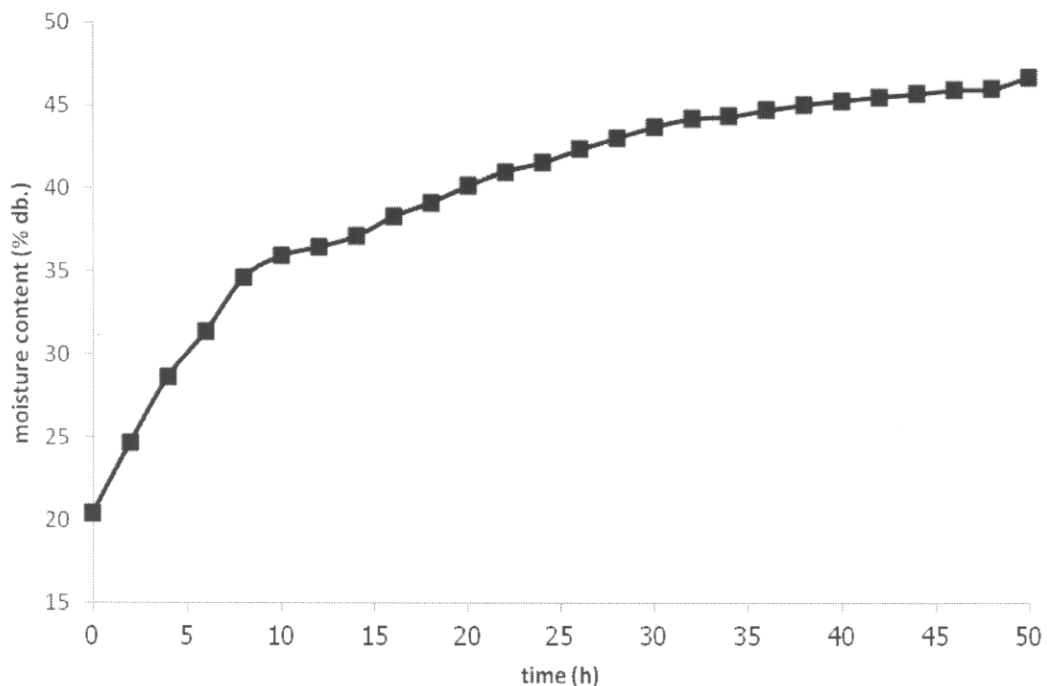
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ข้าวเปลือกเริ่มงอก (พันธุ์พิษณุโลก 2)

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มงอก

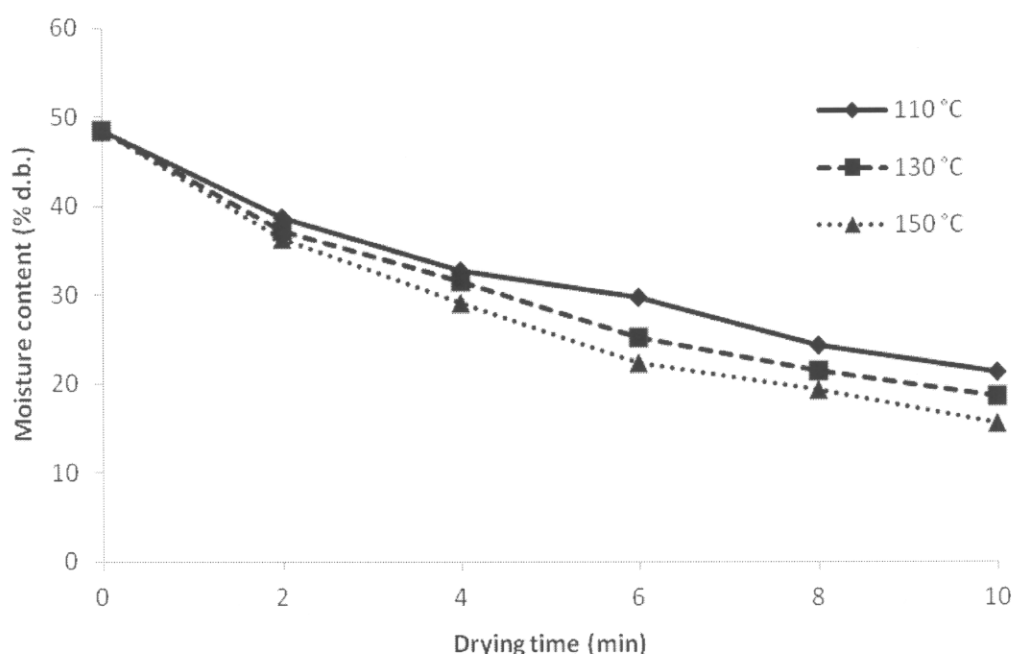
ภาพที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่อแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 50 ชั่วโมง พบว่าอัตราการดูดซับน้ำในช่วง 10 ชั่วโมงแรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงชั่วโมงที่ 35 จึงเริ่มค่อนข้างคงที่ ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำภายในและภายนอกข้าวเปลือก ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล โดยในช่วงแรกปริมาณน้ำภายในเมล็ดข้าวเปลือกกับปริมาณน้ำภายนอกเมล็ดมีค่าแตกต่างกันมาก ส่งผลให้การถ่ายเทมวลเข้าสู่ข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำภายในเมล็ดข้าวเปลือกกับปริมาณน้ำภายนอกเมล็ดมีค่าแตกต่างกันน้อยลง ส่งผลให้อัตราการดูดซับน้ำในข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเริ่มคงที่ ซึ่งระยะเวลาในการงอกของข้าวพิษณุโลก 2 อยู่ที่ประมาณ 50-52 ชั่วโมง โดยมีความยาวของคัพพะประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มงอกในกระบวนการแช่

4.1.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จากผลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 48.5% db. ที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และต้องการลดความชื้นหลังจากการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบดจนเหลือความชื้นประมาณ 19 – 21% db. ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Srisang et al. (2011) และ Jaiboon et al. (2009) ซึ่งพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งเกิดเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิเมล็ดกับอุณหภูมิในการอบแห้ง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้สามารถระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบได้อย่างรวดเร็ว โดยจากผลการทดลองได้ทำการเลือกความชื้นหลังการอบแห้ง (19 – 21% db.) ของแต่ละอุณหภูมิไปทำการวิเคราะห์ร้อยละต้นข้าวคือ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (เวลาอบแห้ง 10, 11, 12 นาที), 130 องศาเซลเซียส (เวลาอบแห้ง 8, 9, 10 นาที) และ 150 องศาเซลเซียส (เวลาอบแห้ง 6, 7, 8 นาที)

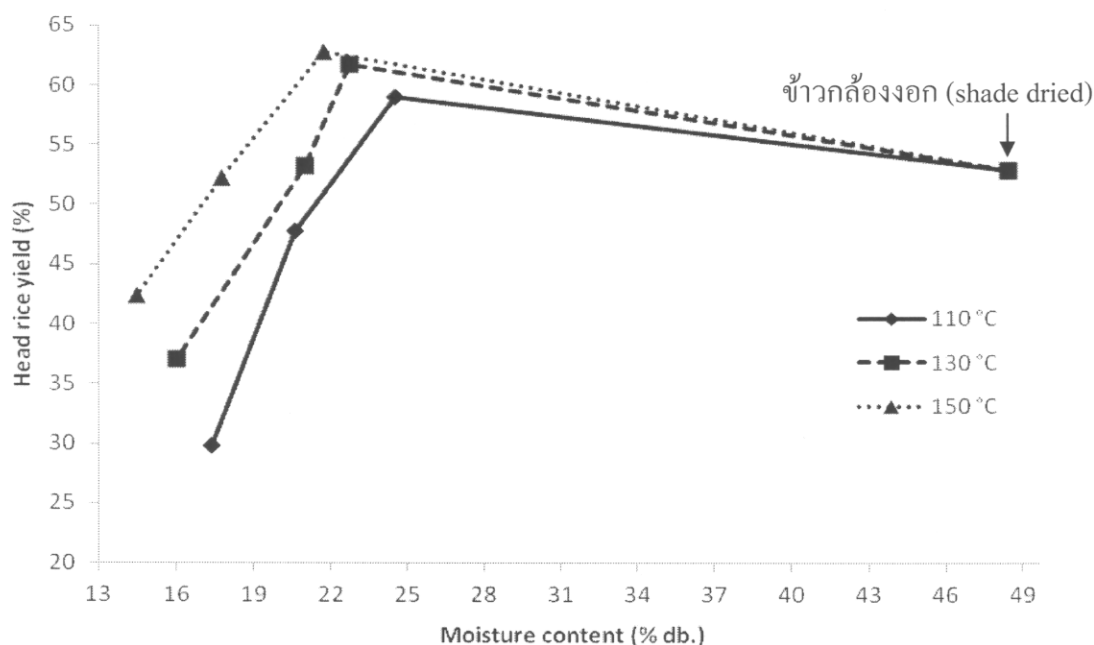


ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

4.1.3 คุณภาพทางกายภาพ

4.1.3.1 การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าว

ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับอุณหภูมิในการอบแห้งที่ความชื้นต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นร้อยละต้นข้าวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนถึงค่าสูงสุดได้ที่ประมาณ 62.75% ซึ่งสูงกว่าข้าวกล้องงอก (shade dried) การที่ร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นนั้นเกิดมาจากการเกิดเจลาติไนซ์ (gelatinization) ในเมล็ดข้าวเปลือก โดยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีอุณหภูมิของเมล็ดสูงกว่าจะเกิดเจลาติไนซ์ได้ดี ทำให้ได้ปริมาณของต้นข้าวมากกว่าเนื่องจากเมื่อแป้งได้รับความร้อน ส่วนที่เป็นอะไมโลสจะละลายและดูดซับน้ำได้มาก ทำให้เกิดการพองตัวได้มากขึ้นโมเลกุลจะเข้ามาใกล้ชิดกันและยึดเข้าด้วยกันทำให้โครงสร้างภายในโมเลกุลแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้รอยร้าวหรือรอยแตกภายในเมล็ดข้าวสามารถประสานกันอย่างสนิท (Swasdisevi et al., 2010) แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการอบแห้งเดียวกัน พบว่าความชื้นภายในเมล็ดที่ต่ำกว่า 21% db. จะส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวต่ำลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดเป็นความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าวและหัก เมื่อนำไปสีจึงได้ร้อยละต้นข้าวที่ลดลง และจากผลการทดลองเลือกร้อยละต้นข้าวสูงสุดของแต่ละอุณหภูมิในการอบแห้งไปวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าวกับความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มออกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ (ข้าวกล้อง ร้อยละต้นข้าวเท่ากับ 55.36% ที่ความชื้น 13.14% db.)

4.1.3.2 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการแตกร้าว

ในส่วนของการร้อยละการแตกร้าวดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า หลังจากกระบวนการอบแห้งส่งผลให้ร้อยละการแตกร้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งร้อยละการแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการแช่น้ำทำให้เกิดความเครียด (stress formation) ภายในเมล็ด (Yamaguchi et al., 1984) แต่เมื่อทำการอบแห้งส่งผลให้ร้อยละการแตกร้าวลดน้อยลงและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งร้อยละการแตกร้าวก็ยิ่งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisang et al. (2011) เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งส่งผลทำให้เกิดเจลลิตินในชั้นภายในเมล็ดแป้ง ซึ่งทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดแป้งมีการผสานกันได้สนิทขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละต้นข้าวที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการแตกร้าวของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่อบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

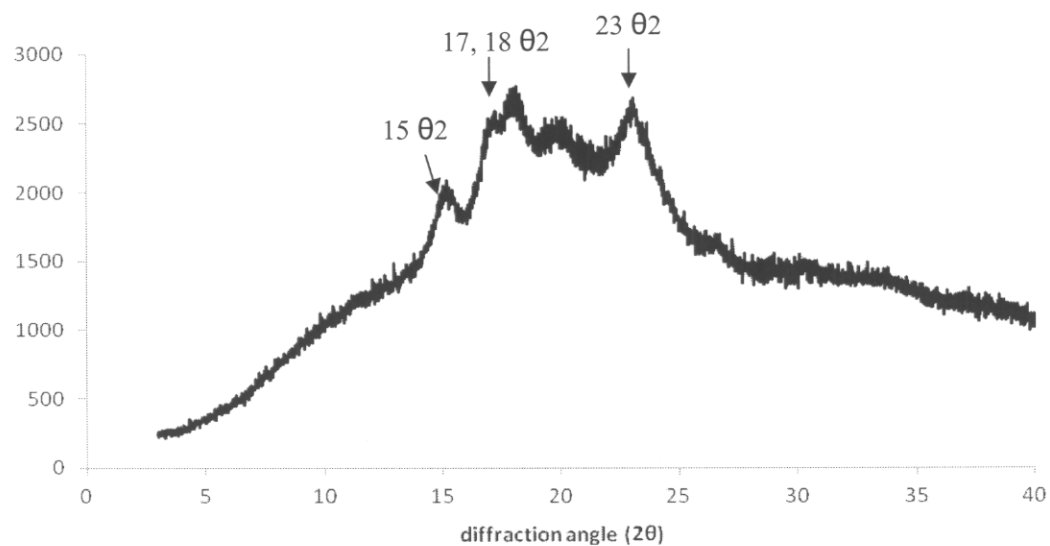
อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการแตกร้าว
ข้าวกล้อง	2.33 ± 0.29^b
ข้าวกล้องงอก (shade dried)	3.16 ± 0.61^a
110 องศาเซลเซียส	2.17 ± 0.14^b
130 องศาเซลเซียส	1.67 ± 0.04^c
150 องศาเซลเซียส	1.33 ± 0.29^d

*อักษรเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

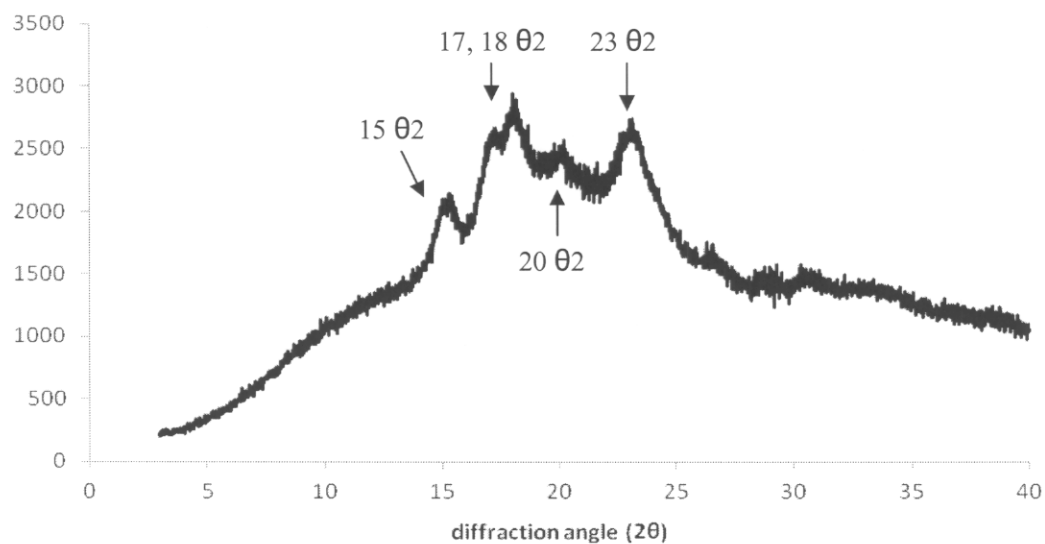
4.1.3.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก

ภาพที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์รูปแบบ X-ray diffraction ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งและข้าวกล้อง และผลการคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึกจากพื้นที่ใต้กราฟ X-ray diffraction แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความเป็นผลึกไม่แตกต่างกัน นั่นคือค่าร้อยละความเป็นผลึกของข้าวกล้องอยู่ที่ร้อยละ 19.54 ซึ่งมีความเป็นผลึกอยู่ในระดับสูง และเมื่อผ่านกระบวนการงอกและการอบแห้งค่าร้อยละความเป็นผลึกของข้าวกล้องงอก อยู่ในช่วงร้อยละ 19.02-19.04 แต่เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ไม่พบค่าร้อยละความเป็นผลึก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisang et al. (2011) ที่รายงานไว้ว่า ไม่พบร้อยละความเป็นผลึกของข้าวกล้องงอกจากข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณารูปแบบโครงสร้างผลึกจากลักษณะของพีคที่ได้จากรูปแบบ X-ray diffraction ในภาพที่ 4.4 พบว่าสสารข้าวกล้องมีโครงสร้างผลึกชนิด A ซึ่งมีพีคปรากฏอยู่ 4 พีคหลัก คือตำแหน่ง 15 (1 พีค) 17 และ 18 (2 พีคเชื่อมกัน) และ 23 (1 พีค)02 ซึ่งเป็น

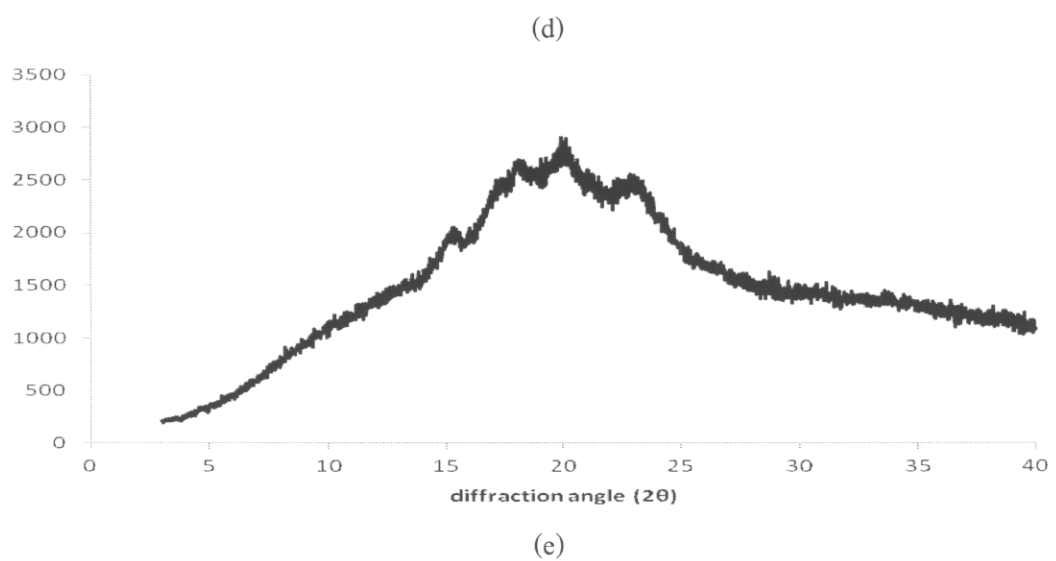
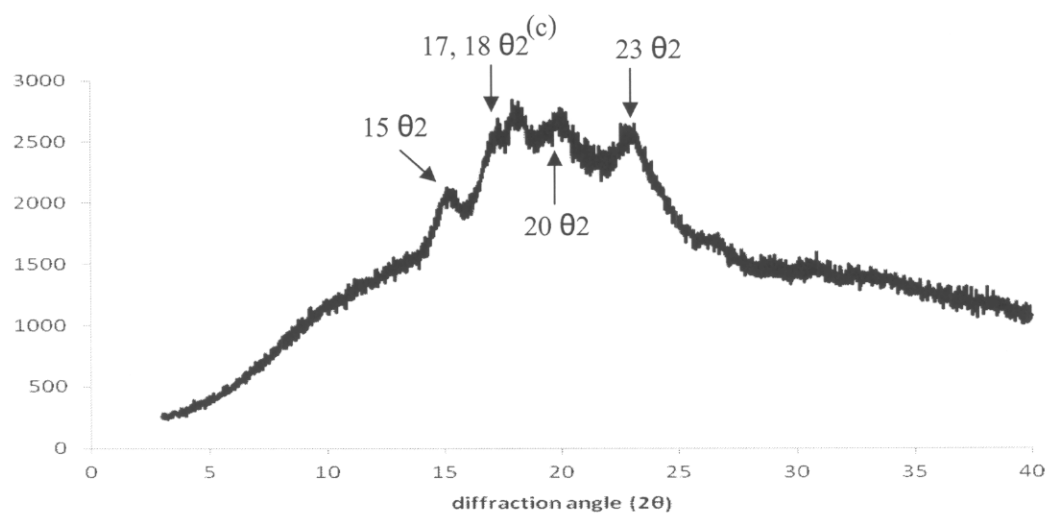
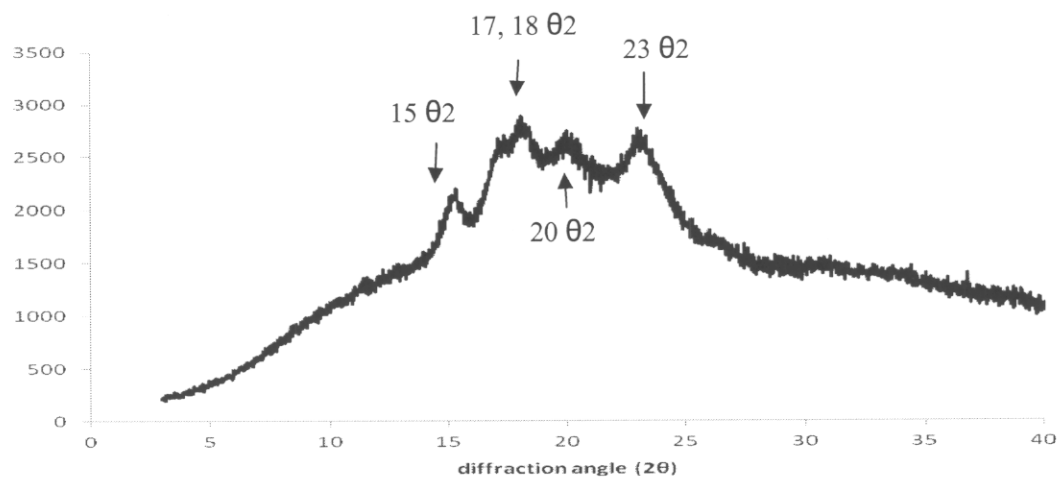
โครงสร้างที่พบทั่วไปในสสารจากธาตุพืช หลังกระบวนการอบแห้งจะเห็นว่ายังคงมีฟิสิกปรากฏตำแหน่งเดิมทั้ง 3 ฟิสิก และยังพบฟิสิกปรากฏใหม่ 1 ฟิสิก ที่ตำแหน่ง $20\ 2\theta$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งจะทำให้มีโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jacobs and Delcour (1998) ที่กล่าวว่าการดัดแปลงสสารด้วยความร้อนจะทำให้เกิดรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ V เกิดขึ้นซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโนไลค์กับไขมัน



(a)



(b)



ภาพที่ 4.4 รูปแบบ x-ray diffraction ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ
 (a = ข้าวอ้างอิง, b = ข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการอบแห้ง, c = 110 องศาเซลเซียส,
 d = 130 องศาเซลเซียส และ e = 150 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงร้อยละความเป็นผลึกของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่อบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	Degree of crystallinity of A type (%)	Degree of crystallinity of V type (%)	Total degree of crystallinity (%)
ข้าวกล้อง	19.54±0.41 ^a	ND	19.54±0.41 ^a
ข้าวกล้องงอก (shade dried)	14.68±0.09 ^b	4.40±0.04 ^a	19.08±0.13 ^a
110 องศาเซลเซียส	14.45±0.06 ^b	4.59±0.34 ^a	19.04±0.40 ^a
130 องศาเซลเซียส	14.46±0.30 ^b	4.56±0.08 ^a	19.02±0.38 ^a
150 องศาเซลเซียส	ND	ND	ND

*อักษรภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ND = not detected

4.1.4 คุณภาพทางการหุงต้ม

4.1.4.1 การเปลี่ยนแปลงการดูดซับน้ำของข้าวสุก ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ และการเปลี่ยนแปลงขยายปริมาตร

จากตารางที่ 4.3 แสดงเวลาในการหุงต้ม ปริมาณในการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งละลายในน้ำและการเปลี่ยนแปลงการขยายปริมาตรของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้ง พบว่าเวลาในการหุงต้มของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง สำหรับปริมาณในการดูดซับน้ำ พบว่าปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง เนื่องจากเกิดเจลลิตีไนซ์ภายในเมล็ดข้าวส่งผลให้โครงสร้างภายในผนังกันแน่น ทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปภายในได้ช้ากว่าข้าวอ้างอิง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการอบแห้งพบว่า การดูดซับน้ำของข้าวสุกมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

ส่วนปริมาณของแข็งละลายในน้ำ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ละลายออกมาของข้าวที่ผ่านการอบแห้งต่ำกว่าข้าวกล้อง เนื่องจากการเกิดเจลลิตีไนซ์ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ strength และ tightness ในเมล็ดข้าว (Swasdisevi et al., 2010) และอัตราการขยายปริมาตรของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าไม่แตกต่างกับข้าวอ้างอิง เนื่องจากความร้อนที่ได้จากการอบแห้งมีผลทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลี่ยนแปลงโดยข้าวจะมี cell walls ที่อ่อนแอหรือเปราะจึงทำให้มี cell walls รูปร่างลักษณะเป็น hexagonal น้อย ดังนั้นเมื่อนำมาหุงต้มจึงทำให้ข้าวที่ผ่านการอบแห้งดูดซับน้ำ

ได้น้อยกว่าข้าวอ้างอิง คาดว่าน้ำจะแทรกเข้าไปอยู่ใน hexagonal ได้น้อย (Desikacher and Surahmany, 1959) เป็นผลให้การขยายปริมาตรและปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำลดลง

ตารางที่ 4.3 เวลาในการหุงต้ม ปริมาณการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ และการขยายปริมาตรของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	Cooking time (min)	Water uptake (%)	Solid loss (%)	Volume expansion (%)
ข้าวกล้อง	25 ^a	207.17±13.90 ^a	2.50±0.50 ^a	440.00±52.92 ^a
ข้าวกล้องงอก (shade dried)	25 ^a	175.17±5.06 ^b	2.17±0.58 ^b	446.67±46.19 ^a
110 องศาเซลเซียส	29 ^b	176.33±4.04 ^b	2.00±0.50 ^b	433.33±11.55 ^a
130 องศาเซลเซียส	30 ^c	177.83±6.75 ^b	1.83±0.29 ^{bc}	430.33±11.55 ^a
150 องศาเซลเซียส	32 ^d	181.83±11.86 ^b	1.67±0.29 ^c	426.67±23.09 ^a

*อักษรภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.5 คุณภาพทางเคมี

4.1.5.1 Total phenolic content (TPC)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด พบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าไม่แตกต่างกับข้าวกล้อง โดยมีค่าอยู่ที่ 1.35-1.36 mg GAE/g dry weight ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้น จึงไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก โดย Larrauri et al. (1997) ได้รายงานผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อ stability ของ polyphenols และ antioxidant activity ของเปลือกงุ่น เมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 3.5 ชั่วโมง และ 140 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ส่งผลให้ total polyphenols ลดลงไป 18.6 และ 32.6% ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวใช้เวลาในการอบแห้งที่นาน จึงส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกลดลง แต่ในงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 6-10 นาที คาดว่าจึงไม่ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด

4.1.5.2 DPPH radical scavenging activity

DPPH assay เป็นวิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ซึ่งใช้ reagent คือ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl เป็น stable radical ในตัวทำละลาย methanol ซึ่งสารละลายนี้มีสีม่วง ถ้าตัวอย่างมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้สูง ความเข้มของสารละลายสีม่วงก็จะลดลง (Lo and Cheung, 2005; Duan et al., 2006) จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 แสดงค่า %inhibition ที่เกิดจากปฏิกิริยาของ DPPH[•] พบว่าค่า %inhibition ของข้าวกล้องงอก (shade dried) และข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งมีค่าไม่แตกต่างกับข้าวกล้อง โดยมีค่า %inhibition อยู่ที่ 79-81% แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อ %inhibition ซึ่งค่า %inhibition ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Butsat and Siriamornpun (2010) โดยรายงานค่า %inhibition ของ DPPH[•] ของข้าวสายพันธุ์ต่าง ๆ 3 สายพันธุ์ ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 68-80%

4.1.5.3 Ferric reducing antioxidant power (FRAP)

ปริมาณ FRAP value ในหน่วย $\mu\text{mol FeSO}_4/\text{g dry weight}$ แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณ FRAP ของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าไม่แตกต่างกับข้าวกล้อง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 26.86-26.99 $\mu\text{mol FeSO}_4/\text{g dry weight}$ ซึ่งแสดงว่าเกิดปฏิกิริยา reduction ของ Fe^{3+} ที่อยู่ในรูป Fe^{3+} -TPTZ เมื่อถูกรีดิวซ์จะเกิดเป็น Fe^{2+} -TPTZ ซึ่งถ้าเกิด Fe^{2+} -TPTZ มากแสดงว่ามีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดี (Benzie and Strain, 1996) และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการอบแห้งยังพบว่าอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อปริมาณ FRAP value

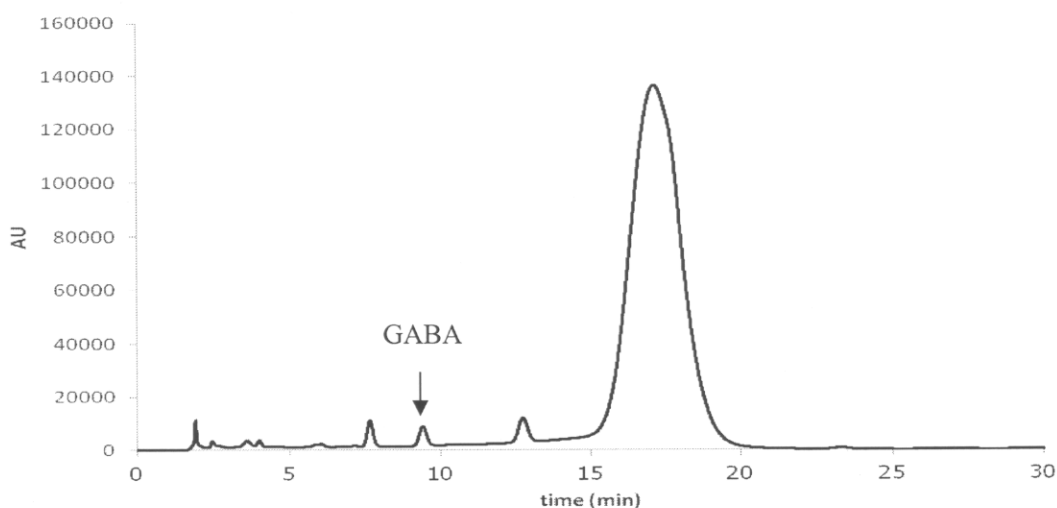
ตารางที่ 4.4 ปริมาณ Total phenolic content , FRAP value และ % Inhibition DPPH radical ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	TPC (mg GAE/g)	% inhibition DPPH [•]	FRAP ($\mu\text{mol FeSO}_4/\text{g}$)
ข้าวกล้อง	1.47±0.03 ^a	81.23±0.53 ^a	26.91±3.62 ^a
ข้าวกล้องงอก (shade dried)	1.36±0.12 ^a	79.42±3.66 ^a	26.90±3.61 ^a
110 องศาเซลเซียส	1.35±0.02 ^a	80.68±1.73 ^a	26.86±1.72 ^a
130 องศาเซลเซียส	1.36±0.01 ^a	80.90±1.98 ^a	26.92±3.91 ^a
150 องศาเซลเซียส	1.36±0.02 ^a	79.11±0.78 ^a	26.99±3.79 ^a

*อักษรภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.5.4 Gamma-aminobutyric acid (GABA)

ภาพที่ 4.5 แสดงโครมาโตแกรมของ GABA ในตัวอย่าง และตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณ GABA ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณ GABA ของข้าวกล้องเพิ่มขึ้นจาก 8.75 mg/100 g dry weight เป็น 20.81 mg/100 g dry weight สำหรับข้าวกล้องงอก (shade dried) เพิ่มขึ้น 2.38 เท่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ GABA เกิดขึ้นเนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกอยู่ในสภาพที่ได้รับความเครียดโดยการไม่มีอากาศหรือขาดออกซิเจน ทำให้เกิดการกระตุ้นให้มีการเพิ่มระยะ Ca^{2+} /calmodulin-dependent activity ของ glutamate decarboxylase (GAD) จึงส่งผลให้มีการเปลี่ยน glutamate ไปเป็น GABA ได้มากขึ้น (Shelp et al., 1999) นอกจากนี้ปริมาณ GABA ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งมีปริมาณไม่แตกต่างกับข้าวกล้องงอก (shade dried) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งในช่วง 110-150 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของ GABA ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisang et al. (2011) โดยรายงานไว้ว่าปริมาณ GABA ของข้าวกล้องงอกไม่ลดลงเมื่ออบแห้งอุณหภูมิ 130-150 องศาเซลเซียส และ Lide (2006) ได้รายงานไว้ว่า GABA จะสลายที่อุณหภูมิ 203 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อปริมาณ GABA



ภาพที่ 4.5 ตัวอย่าง HPLC โครมาโตแกรมของ GABA ในตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มงอก

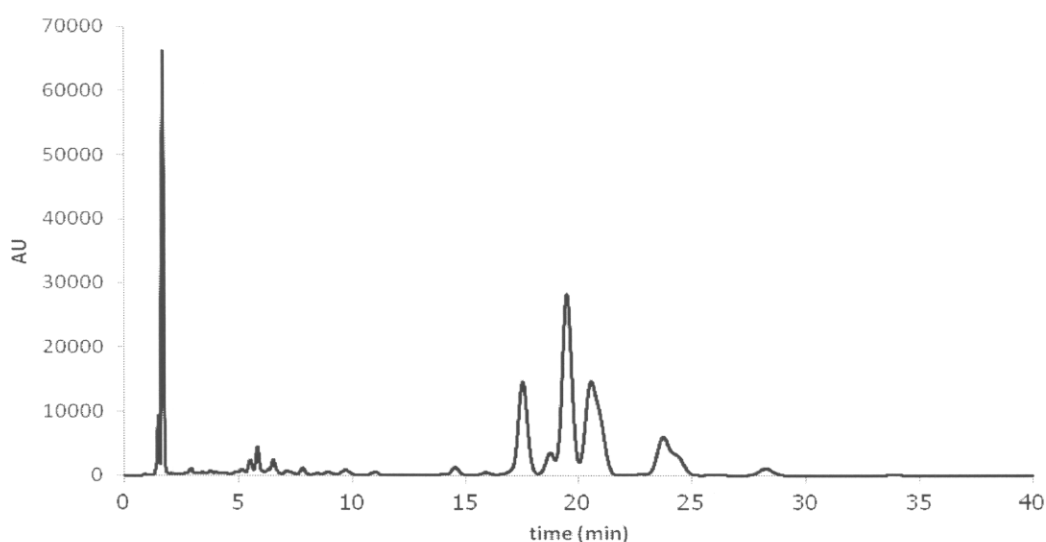
ตารางที่ 4.5 ปริมาณ GABA ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	GABA content (mg/100 g dry weight)
ข้าวกล้อง	8.75±2.30 ^b
ข้าวกล้องงอก (shade dried)	20.81±2.03 ^a
110 องศาเซลเซียส	20.58±4.41 ^a
130 องศาเซลเซียส	20.86±2.84 ^a
150 องศาเซลเซียส	20.71±4.12 ^a

*อักษรเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.5.5 γ -oryzanol

เมื่อทำการวิเคราะห์ γ -oryzanol ของตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มงอกด้วยเครื่อง HPLC แล้วพบว่า peak ของ γ -oryzanol เกิดขึ้น 4 peak ซึ่งพีคดังกล่าวเกิดในช่วงเวลา 17 – 24 นาที (ภาพที่ 4.6) โดยมี cycloartenyl ferulate, 24-methylene cycloartenyl ferulate, campesteryl ferulate และ sitosteryl ferulate ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ γ -oryzanol (Xu and Godber, 1999) โดยปริมาณ γ -oryzanol ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5 จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณ γ -oryzanol ของตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าประมาณ 28 mg/100 g dry weight ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของ γ -oryzanol



ภาพที่ 4.6 ตัวอย่าง HPLC โครมาโตแกรมของ γ -oryzanol ในตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มงอก

ตารางที่ 4.6 ปริมาณ γ -oryzanol ของข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

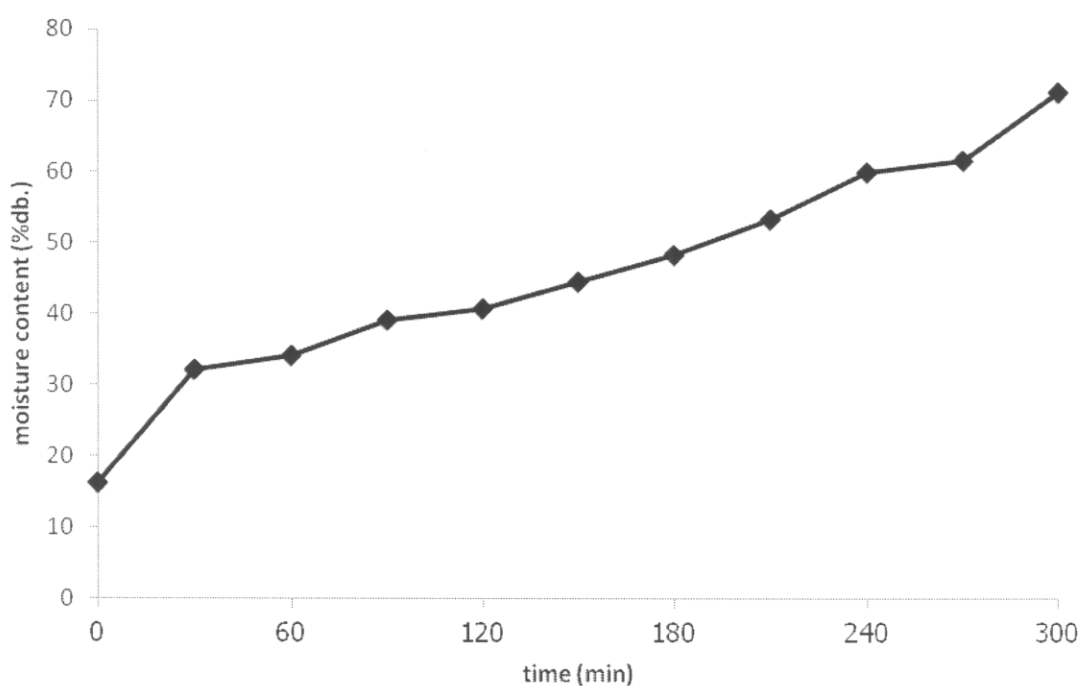
อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	γ -oryzanol (mg/100 g dry weight)
ข้าวกล้อง	28.9 $\pm$ 0.3 ^a
ข้าวกล้องงอก (shade dried)	28.3 $\pm$ 5.3 ^a
110 องศาเซลเซียส	28.4 $\pm$ 3.1 ^a
130 องศาเซลเซียส	28.5 $\pm$ 1.3 ^a
150 องศาเซลเซียส	28.8 $\pm$ 2.9 ^a

*อักษรเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2 ข้าวเปลือกนึ่ง (พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105)

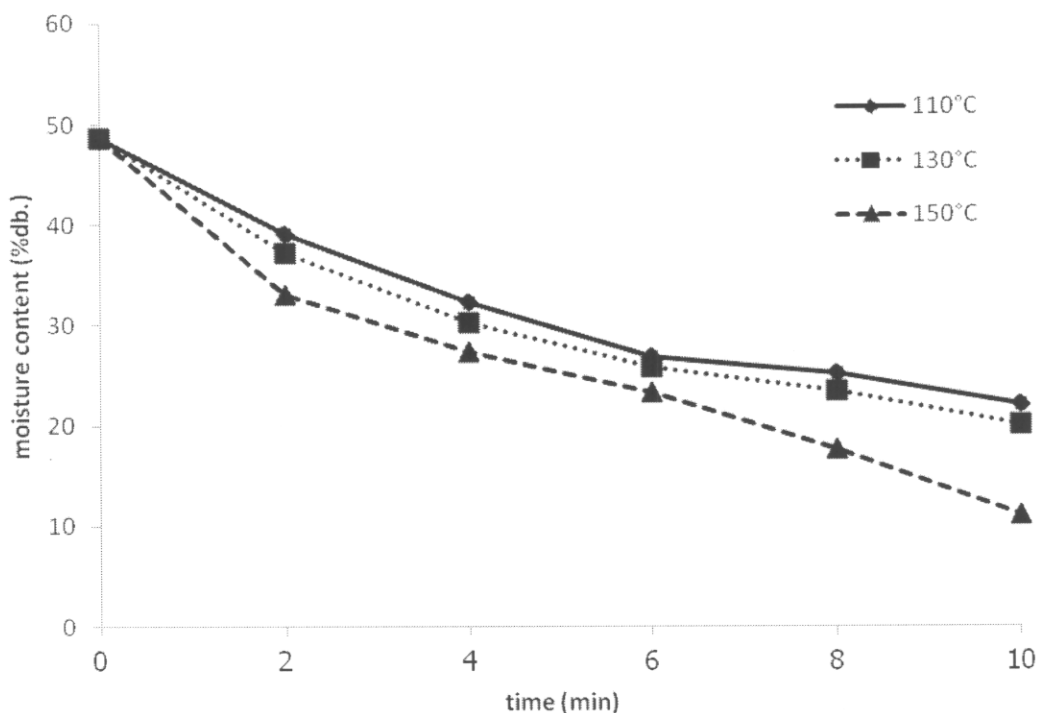
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกนึ่ง

ภาพที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่อแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าอัตราการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากความแตกต่างระหว่างความชื้นภายในข้าวเปลือกกับความชื้นในน้ำ และอุณหภูมิของน้ำที่สูง ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล ส่งผลให้การถ่ายเทมวลเข้าสู่ข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งระยะเวลาในการแช่ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อยู่ประมาณ 5 ชั่วโมง โดยถ้าแช่นานกว่านี้เมล็ดข้าวจะเกิดการแตกปริออก



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกนึ่งในกระบวนการแช่

4.2.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

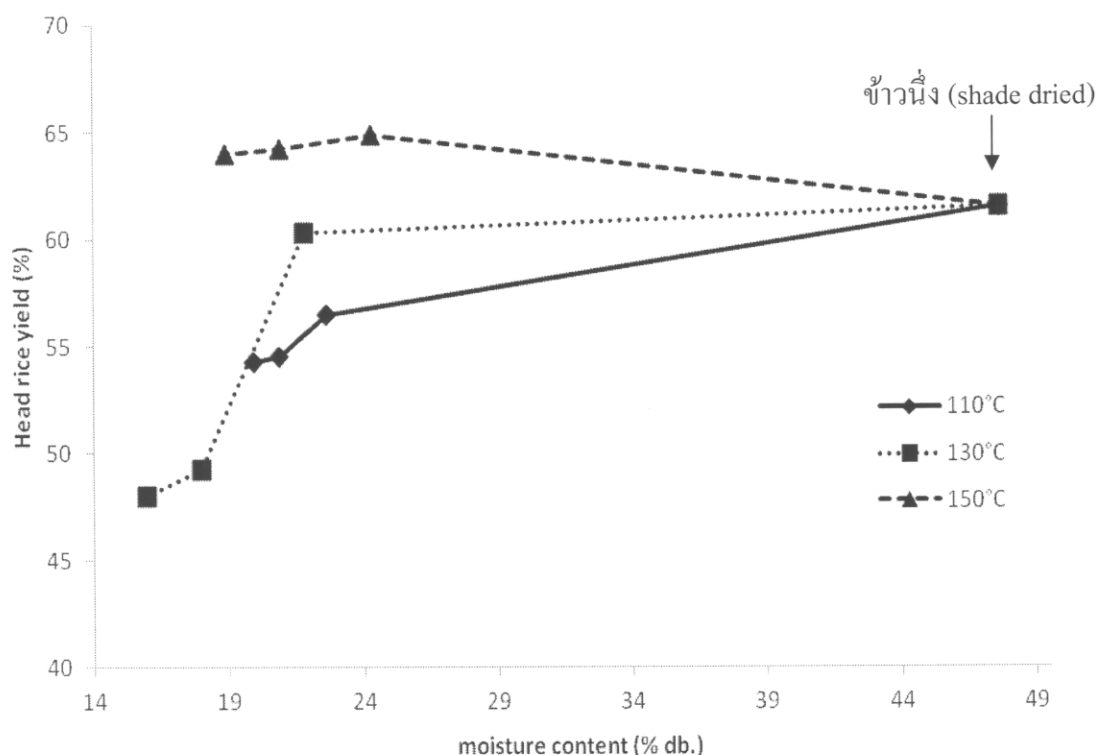


ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งทีผ่านารอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

จากผลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้น 48.7% db. ที่อุณหภูมิ 110 , 130 และ 150 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.7 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่อบแห้งอุณหภูมิต่ำ และต้องการลดความชื้นหลังจากการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์ เบดจนเหลือความชื้นประมาณ 19-21% db. ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Swasdisevi et al. (2011) และ Jaiboon et al. (2009) ซึ่งพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งเกิดเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่ลัดกับอุณหภูมิในการอบแห้ง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้สามารถระเหยนํ้าออกจากวัตถุดิบได้อย่างรวดเร็ว โดยจากผลการทดลองได้ทำการเลือกความชื้นหลังการอบแห้ง (19-21% db.) ของแต่ละอุณหภูมิไปทำการวิเคราะห์หรรยาละด้นข้าวคือ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (เวลาอบแห้ง 10, 11, 12 นาที), 130 องศาเซลเซียส (เวลาอบแห้ง 8, 9, 10 นาที) และ 150 องศาเซลเซียส (เวลาอบแห้ง 6, 7, 8 นาที)

4.2.3 คุณภาพทางกายภาพ

4.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าว



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าวกับความชื้นของข้าวเปลือกนี้

ที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ (ข้าวกล้องร้อยละต้นข้าวเท่ากับ 43.11% ที่ความชื้น 16.2% db.)

ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับอุณหภูมิในการอบแห้งที่ความชื้นต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า ข้าวนี้ (shade dried) ร้อยละต้นข้าว (61.51%) สูงกว่าข้าวกล้อง และเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และ 130 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าร้อยละต้นข้าวลดลง มีเพียงการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เท่านั้นที่ส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้น แต่การอบแห้งในทุกอุณหภูมิยังมีปริมาณร้อยละต้นข้าวสูงกว่าข้าวกล้อง (43.11%) ซึ่งร้อยละต้นข้าวที่เพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นนั้นเกิดมาจากการเกิดเจลาคีโนส ในเมล็ดข้าวเปลือก โดยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีอุณหภูมิของเมล็ดสูงกว่าจะเกิดเจลาคีโนสได้ดี ทำให้ได้ปริมาณของต้นข้าวมากกว่าเนื่องจากเมื่อแป้งได้รับความร้อน ส่วนที่เป็นอะมิโลสจะละลายและดูดซับน้ำได้มาก ทำให้เกิดการพองตัวได้มากขึ้น โมเลกุลจะเข้ามาใกล้ชิดกันและยึดเข้าด้วยกัน ทำให้โครงสร้างภายในโมเลกุลแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้รอยร้าวหรือรอยแตกภายในเมล็ดข้าวสามารถประสานกันอย่างสนิท (Swasdisevi et al., 2010; Taechapairoj et al., 2006) แต่เมื่อพิจารณาที่

อุณหภูมิในการอบแห้งเดียวกัน พบว่าความชื้นภายในเมล็ดที่ต่ำกว่าประมาณ 22% db. ส่งผลให้ ร้อยละต้นข้าวต่ำลง เนื่องจากเกิดเป็นความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลางของ เมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอย แตกร้าวและหัก เมื่อนำไปสีจึงได้ร้อยละต้นข้าวที่ลดลง และจากผลการทดลองเลือกร้อยละต้นข้าว สูงสุดของแต่ละอุณหภูมิในการอบแห้งไปวิเคราะห์ต่อไป

4.2.3.2 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการแตกร้าว

ในส่วนของการร้อยละการแตกร้าวดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า หลังจากกระบวนการแช่ ส่งผลให้ร้อยละการแตกร้าวลดลง และเมื่อทำการอบแห้งส่งผลให้ร้อยละการแตกร้าวยังลดน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisang et al. (2011) ยกเว้นการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ที่ให้ร้อยละการแตกร้าวไม่แตกต่างกับข้าวหนึ่ง (shade dried) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการ อบแห้งส่งผลให้ร้อยละการแตกร้าวลดลง ยกเว้นอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้นเพียง เล็กน้อยแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งส่งผลทำให้เกิดเจลาติ นในชั้นภายในเมล็ดแป้ง ซึ่งทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดแป้งมีการผสานกันได้สนิทขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ ส่งผลต่อร้อยละต้นข้าวที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการแตกร้าวของข้าวเปลือกหนึ่งที่อบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการแตกร้าว
ข้าวกล้อง	5.50±0.87 ^a
ข้าวหนึ่ง (shade dried)	2.50±0.50 ^{bc}
110 องศาเซลเซียส	3.50±0.87 ^b
130 องศาเซลเซียส	1.67±0.29 ^c
150 องศาเซลเซียส	1.83±0.58 ^c

*อักษรเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.4 คุณภาพทางการหุงต้ม

4.2.4.1 การเปลี่ยนแปลงการดูดซับน้ำของข้าวสุก ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ และการเปลี่ยนแปลงขยายปริมาตร

จากตารางที่ 4.8 แสดงเวลาในการหุงต้ม ปริมาณในการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งละลายในน้ำและการเปลี่ยนแปลงการขยายปริมาตรของข้าวเปลือกหนึ่งที่ผ่านการอบแห้ง พบว่าเวลาในการหุงต้มของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง สำหรับปริมาณในการดูดซับน้ำ พบว่าปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง เนื่องจากเกิดเจลาตินในซ์ภายในเมล็ดข้าวส่งผลให้โครงสร้างภายในฝักกันแน่น ทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปภายในได้น้อยกว่าข้าวกล้อง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการอบแห้งพบว่า การดูดซับน้ำของข้าวสุกมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

ส่วนปริมาณของแข็งละลายในน้ำ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ละลายออกมาของข้าวนึ่ง (shade dried) และข้าวเปลือกหนึ่งที่ผ่านการอบแห้งต่ำกว่าข้าวกล้อง เนื่องจากการเกิดเจลาตินในซ์ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ strength และ tightness ในเมล็ดข้าว (Swasdisevi et al., 2010) ทำให้ของแข็งที่ละลายในน้ำลดน้อยลง และอัตราการขยายปริมาตรของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง เนื่องจากความร้อนที่ได้จากการอบแห้งมีผลทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลี่ยนแปลงโดยข้าวจะมี cell walls ที่อ่อนแอหรือเปราะจึงทำให้มี cell walls รูปร่างลักษณะเป็น hexagonal น้อย ดังนั้นเมื่อนำมาหุงต้มจึงทำให้ข้าวที่ผ่านการอบแห้งดูดซับน้ำได้น้อยกว่าข้าวอ้างอิง คาดว่าน้ำจะแทรกเข้าไปอยู่ใน hexagonal ได้ต่ำ (Desikacher and Surahmanyen, 1959) เป็นผลให้การขยายปริมาตรและปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำลดลง

ตารางที่ 4.8 เวลาในการหุงต้ม ปริมาณการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ และการขยาย ปริมาตรของข้าวเปลือกหนึ่งผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	Cooking time (min)	Water uptake (%)	Solid loss (%)	Volume expansion (%)
ข้าวกล้อง	26	172.00±1.80 ^a	3.83±0.29 ^a	130.30±5.25 ^a
ข้าวหนึ่ง (shade dried)	27	170.17±2.36 ^a	3.33±0.29 ^b	125.15±2.25 ^{ab}
110 องศาเซลเซียส	29	166.67±1.26 ^b	3.17±0.58 ^b	124.24±3.65 ^b
130 องศาเซลเซียส	29	163.02±1.01 ^c	2.83±0.29 ^b	121.82±6.39 ^b
150 องศาเซลเซียส	30	160.67±0.58 ^d	1.83±0.29 ^c	121.21±5.25 ^b

*อักษรภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.5 คุณภาพทางเคมี

4.2.5.1 Total phenolic content (TPC)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.9 แสดง Total phenolic content พบว่า ปริมาณฟีนอลิก ทั้งหมดของข้าวหนึ่ง (shade dried) มีค่าต่ำกว่าข้าวอ้างอิงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ที่ 1.00 mg GAE/g dry weight และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการอบแห้งพบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่า ลดลงอยู่ที่ 0.82 mg GAE/g dry weight โดยที่อุณหภูมิในการอบแห้งทุกอุณหภูมิให้ค่าปริมาณ ฟีนอลิกทั้งหมดไม่แตกต่างกัน โดย Mail-lard and Berset (1995) ได้อธิบายสามสมมติฐานการ ลดลงของปริมาณฟีนอลิกที่การอบแห้งอุณหภูมิสูงคือ การลดลงของ bound phenolic acid การ หลุดจากอนุพันธ์ของ bound phenolic acid และการสลายตัวบางส่วนของลิกนินที่นำไปสู่การ สลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก โดยที่สารประกอบฟีนอลมีความสำคัญอย่างยิ่งในโครงสร้าง ของพืชเพราะสารประกอบฟีนอลิกจะแสดงฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยยับยั้งอนุมูลอิสระของ ไขมันหรือการป้องกันการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ที่จะเปลี่ยนไปเป็นอนุมูลอิสระ (Pokorny, 2001)

4.2.5.2 DPPH radical scavenging activity

DPPH assay เป็นวิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ซึ่งใช้ reagent คือ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl เป็น stable radical ในตัวทำละลาย methanol ซึ่งสารละลายนี้มีสีม่วง ถ้าตัวอย่างมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้สูง ความเข้มของสารละลายสีม่วงก็จะลดลง (Lo and Cheung, 2005 ; Duan et al., 2006) จากผลการทดลองในตารางที่ 4.9 แสดงค่า %Inhibition DPPH[•] ที่เกิดจากปฏิกิริยาของ DPPH[•] พบว่าค่า %Inhibition DPPH[•] ของข้าวเหนียว (shade dried) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง (86.41%) และเมื่อพิจารณาอนุมูลอิสระในการอบแห้งทุกอนุมูลอิสระพบว่าต่ำกว่าข้าวเหนียว (shade dried) และข้าวกล้อง โดยมีค่า %Inhibition DPPH[•] อยู่ที่ 60.12-60.90% แสดงให้เห็นว่าอนุมูลอิสระในการแช่และอนุมูลอิสระในการอบแห้งส่งผลให้ %Inhibition DPPH[•] ลดลง

4.2.5.3 Ferric reducing antioxidant power (FRAP)

ปริมาณ FRAP value ในหน่วย $\mu\text{mol FeSO}_4/\text{g dry weight}$ แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าปริมาณ FRAP ของข้าวเหนียว (shade dried) มีค่าลดลง ($25.95 \mu\text{mol FeSO}_4/\text{g dry weight}$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง ($31.80 \mu\text{mol FeSO}_4/\text{g dry weight}$) และเมื่อพิจารณาอนุมูลอิสระในการอบแห้ง พบว่าเมื่ออนุมูลอิสระในการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ FRAP ลดลงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วง $20.83-24.60 \mu\text{mol FeSO}_4/\text{g dry weight}$ แสดงให้เห็นว่าอนุมูลอิสระในการแช่และอนุมูลอิสระในการอบแห้งส่งผลต่อปริมาณ FRAP ให้น้อยลง ซึ่งปริมาณ FRAP คือการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Fe^{3+} ที่อยู่ในรูป Fe^{3+} -TPTZ เมื่อถูกรีดิวซ์จะเกิดเป็น Fe^{2+} -TPTZ ซึ่งถ้าเกิด Fe^{2+} -TPTZ มากแสดงว่ามีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดี (Benzie and Strain, 1996) นั่นคือให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 593 nm ที่มาก

ตารางที่ 4.9 ปริมาณ Total phenolic content , FRAP value และ % Inhibition DPPH radical ของข้าวเปลือกหนึ่งที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	TPC (mg GAE/g)	% inhibition DPPH [*]	FRAP ($\mu\text{mol FeSO}_4/\text{g}$)
ข้าวกล้อง	1.26 $\pm$ 0.01 ^a	86.41 $\pm$ 1.11 ^a	31.80 $\pm$ 0.32 ^a
ข้าวหนึ่ง (shade dried)	1.00 $\pm$ 0.04 ^b	67.84 $\pm$ 0.61 ^b	25.95 $\pm$ 0.92 ^b
110 องศาเซลเซียส	0.82 $\pm$ 0.02 ^c	60.12 $\pm$ 1.45 ^c	24.60 $\pm$ 0.54 ^b
130 องศาเซลเซียส	0.82 $\pm$ 0.01 ^c	60.31 $\pm$ 0.74 ^c	24.55 $\pm$ 1.27 ^b
150 องศาเซลเซียส	0.83 $\pm$ 0.02 ^c	60.90 $\pm$ 0.61 ^c	20.83 $\pm$ 0.83 ^c

*อักขระภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.5.4 Gamma-oryzanol

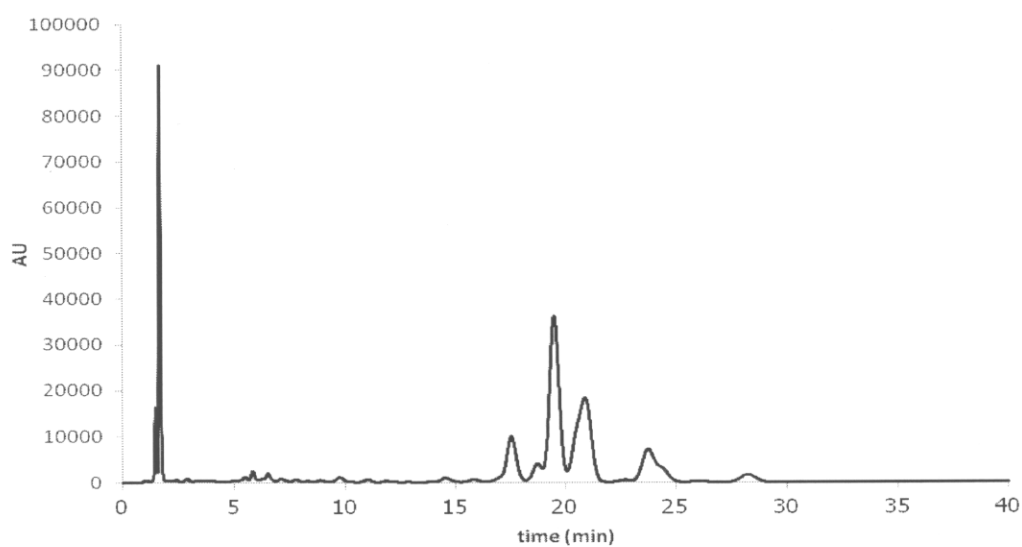
ตารางที่ 4.10 ปริมาณ γ -oryzanol ของข้าวเปลือกหนึ่งที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	γ -oryzanol (mg/100 g dry weight)
ข้าวกล้อง	39.08 $\pm$ 0.76 ^a
ข้าวหนึ่ง (shade dried)	28.26 $\pm$ 1.09 ^b
110 องศาเซลเซียส	28.12 $\pm$ 0.34 ^b
130 องศาเซลเซียส	28.19 $\pm$ 1.24 ^b
150 องศาเซลเซียส	27.31 $\pm$ 0.36 ^b

*อักขระเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อทำการวิเคราะห์ γ -oryzanol ของตัวอย่างข้าวเปลือกหนึ่งด้วยเครื่อง HPLC แล้วพบว่า มี peak ของ γ -oryzanol เกิดขึ้น 4 peak ซึ่งพิกัดก่่าวเกิดในช่วงเวลา 17 – 24 นาที (ภาพที่ 4.9) โดยมี cycloartenyl ferulate, 24-methylene cycloartenyl ferulate, campesteryl ferulate และ sitosteryl ferulate ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ γ -oryzanol (Xu and Godber, 1999) โดยปริมาณ γ -oryzanol ของข้าวเปลือกหนึ่งที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณ γ -oryzanol ของตัวอย่างข้าวหนึ่ง (shade dried) มีปริมาณ 28.26 mg/100 g dry weight ซึ่งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่มีปริมาณ γ -oryzanol อยู่ที่ 39.08 mg/100 g dry weight โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pascual et al. (2011) ซึ่งพบว่าเมื่อผ่านกระบวนการ parboiled ทำให้ปริมาณ γ -oryzanol ลดลงประมาณ 20% และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ในการ

อบแห้งพบว่า มีปริมาณ γ -oryzanol ไม่แตกต่างกับข้าวหนึ่ง (shade dried) โดยมีปริมาณอยู่ในช่วง 27.31-28.19 mg/100 g dry weight ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการแช่ส่งผลต่อการสลายตัวของ γ -oryzanol แต่อุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของ γ -oryzanol



ภาพที่ 4.10 ตัวอย่าง HPLC โครมาโตแกรมของ γ -oryzanol ในตัวอย่างข้าวเปลือกหนึ่ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้ง (110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส) ที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวเปลือกเริ่มงอกและข้าวเปลือกหนึ่ง ในส่วนของข้าวเปลือกเริ่มงอกพบว่า ร้อยละต้นข้าวสูงขึ้นเมื่อเพื่ออุณหภูมิในการอบแห้ง โดยให้ร้อยละต้นข้าวสูงสุดอยู่ที่ 62.75% ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส ส่วนร้อยละการแตกรามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ร้อยละความเป็นผลึกมีค่าไม่แตกต่างกัน และเปลี่ยนโครงสร้างผลึกชนิด A เป็นชนิด V นอกจากนี้คุณภาพหุงต้มพบว่า เวลาในการหุงต้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ และการขยายปริมาตรลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีพบว่า ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด %inhibition DPPH ปริมาณ FRAP ปริมาณ GABA และปริมาณ γ -oryzanol มีค่าไม่แตกต่างกับข้าวกล้อง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบแห้งไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของสารต่าง ๆ ของข้าวเปลือกเริ่มงอก โดยสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกคือ หลังจากกระบวนการรอกนำไปอบแห้งอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 6 นาที หลังจากนั้นนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนกระทั่งความชื้นเหลือประมาณ 14-16% db.

ในส่วนของข้าวเปลือกหนึ่งพบว่า ร้อยละต้นข้าวสูงขึ้นเมื่อผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง โดยที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณร้อยละต้นข้าวสูงขึ้นมากกว่าข้าวหนึ่ง (shade dried) ส่วนร้อยละการแตกรามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น นอกจากนี้คุณภาพการหุงต้มพบว่า เวลาในการหุงต้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง ส่วนปริมาณการดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ และการขยายปริมาตรลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีพบว่า ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด %inhibition DPPH ปริมาณ FRAP และปริมาณ γ -oryzanol ของข้าวหนึ่ง (shade dried) และผ่านการอบแห้งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลต่อการสลายตัวของสารต่าง ๆ ของข้าวเปลือกหนึ่ง โดยสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวเปลือกหนึ่งคือ หลังจากกระบวนการแช่น้ำอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบแห้งอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 6 นาที หลังจากนั้นนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนกระทั่งความชื้นเหลือประมาณ 14-16% db.

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดลองในส่วนของ antioxidant activity เพิ่มเติม เนื่องจากอนุมูลอิสระมีหลายชนิด อาทิเช่น ABTS, HOSC เป็นต้น
2. ควรมีการทดลองเพิ่มเติมในส่วนของ Differential scanning calorimetry (DSC) และการทดสอบสี
3. ควรมีการเปรียบเทียบข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ในการทดลอง เนื่องจากคุณสมบัติของข้าวแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546. เทคโนโลยีแป้ง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 303 หน้า
- มัทนียา เชื้อวเวช, 2548. การเร่งความเก่าของข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคในการอบแบบฟลูอิดไคซ์เบด ร่วมกับการเทมเปอร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 80 หน้า
- วิวัฒน์ หวังเจริญ, 2545. บทบาทของสารประกอบฟีนอลต่อสุขภาพ. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. วารสารอาหาร 32(4), หน้า 245 – 253.
- สมคิด โฆษิตพันธุ์วงศ์, 2549. อิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิของการแช่ที่มีผลต่อการผลิตข้าวหนึ่ง โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไคซ์ชันที่ใช้ไอน้ำร้อนขุดย้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 99 หน้า
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 338 หน้า
- อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 366 หน้า
- AACC., 1995. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists. American Association of Cereal Chemists, 9th ed, St. Paul.
- Adom, K.K. And Liu, R.H., 2002. Antioxidant activity of grains. Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 50, pp. 6182-6187.
- Benzie, Iris, F.F. and Strain, J.J., 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “Antioxidant power”: the FRAP assay. Analytical Biochemistry, vol. 239, pp. 787-799.
- Bravo, L., 1999. Polyphenol: Chemistry, Dietary Sources, Metabolism, and Nutritional Significant. Nutrition Reviews, vol. 56, pp. 317-333.
- Butsat, S. and Siriamornpun, S., 2010. Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk, bran and endosperm of Thai rice. Food Chemistry, vol. 119, pp. 606–613.

- Chotimarkorn, C., Benjakul, S. and Silalai, N., 2008. Antioxidant components and properties of five long-grained rice bran extracts from commercial available cultivars in Thailand. *Food Chemistry*, vol. 111, pp. 636–641.
- Chung, H.J., Jang, S.H., Cho, H.Y. and Lim, S.T., 2009. Effects of steeping and anaerobic treatment on GABA (γ -aminobutyric acid) content in germinated waxy hull-less barley. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 42, pp. 1712-1716.
- Desikachar, H.S.R. and Subrahmanyam, V., 1959. Expansion of new and old rice during cooked. *Cereal Chemistry*, vol. 36, pp. 385–391.
- Donald, A.M., 2004. “ Understanding Starch Structure and Functionality” In, *Starch in Food : Structure, Function and Application*. Eliasson, A. C. (Ed.), Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 156-184.
- Duan, X.J., Zhang, W.W., Li, X.M. and Wang, B.G., 2006. Evaluation of antioxidant property of extract and fractions obtained from a red alga, *Polysiphonia urceolata*. *Food Chemistry*, vol. 95, pp. 37–43.
- Hoseney, R.C., 1998. *Principles of Cereal Science and Technology*, 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, Minnesota, pp. 18-19.
- http://www.merck-chemicals.com/life-science-research/dpph-free-radical/EMD_BIO300267/p_7_ab.s1LILUAAAEWIWEfVhTm , เข้าถึงเมื่อวันที่ 4 เมษายน 2555
- Iimure, T., Kihara, M. Hirota, N. Zhou, T. Hayashi, K. and Ito, K., 2009. A method for production of γ -amino butyric acid (GABA) using barley bran supplemented with glutamate. *Food Research International*, vol. 42, pp. 319–323.
- Imsanguana, P., Roaysubtaweea, A., Boriraka, R., Pongamphaia, S., Douglasa, S. and Douglas, P.L., 2008. Extraction of α -tocopherol and γ -oryzanol from rice bran. *LWT*, vol. 41, pp.1417–1424.
- Ito, S. and Ishikawa, Y., 2004. Marketing of value-added rice products in Japan: germinated brown rice and rice bread. *FAO International Rice Year, 2004 Symposium Rome, Italy*. February 12, 2004.
- Jacobs, H. and Delcour, J.A., 1998. Hydrothermal modification of granular starch with retention of the granular structure: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 46, pp. 2894-2905.

- Jaiboon, P., Prachayawarakorn, S., Devahastin, S. and Soponronnarit, S., 2009. Effects of fluidized bed drying temperature and tempering time on quality of waxy rice. *Journal of Food Engineering*, vol. 95, pp. 517–524.
- Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S., 2009. Accelerated aging of jasmine brown rice by high-temperature fluidization technique. *Food Research International*, vol. 42, pp. 674–681.
- Juliano, B.O., 1993. *Rice in Human Nutrition*. FAO Food and Nutrition Series, No.26. The International Rice Research Institute (IRRI), Laguna and Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO), Rome.
- Kang, H. J., Hwang, I. K., Soo Kim, K. and Choi, H. C., 2006. Comparison of the Physicochemical properties and ultrastructure of Japonica and Indica rice grains. *Journal of Agric. Food Chem*, vol. 54, pp. 4833–4838.
- Khuhawar, M.Y. and Rajper, A.D., 2003. Liquid chromatographic determination of γ -aminobutyric acid in cerebrospinal fluid using 2-hydroxynaphthaldehyde as derivatizing reagent. *Journal of Chromatography B*, vol. 788, pp. 413–418.
- Leach, H.W., McCowen, L.D., and Schooch, T.J., 1959 Structure of the starch granule I . Swelling and solubility patterns of various starches., *Cereal Chem*, vol. 36, pp. 534–544.
- Lide, R.D., 2006. *Handbook of Chemistry and Physics*. 87th ed. CRC Press, New York.
- Lo, K.M. and Cheung, C.K., 2005. Antioxidant activity of extracts from the fruiting bodies of *Agrocybe aegerita* var. *alba*. *Food Chemistry*, vol. 89, pp. 533–539.
- Maisuthisakul, P., Suttajit, M. and Pongsawatmanit, R., 2007. Assessment of phenolic content and free radical-scavenging capacity of some Thai indigenous plants. *Food Chemistry*, vol. 100, pp. 1409–1418.
- Maillard, M. N., Berset, C., 1995. Evolution of antioxidant activity during kilning: Role of insoluble bound phenolic acids of barley and malt. *Agricultural Food Chemistry*, vol. 43, pp. 1789–1793.
- Mujumdar A.S. and Suvachittanont S., 2000. *Developments in Drying : Volume I*. Kasetsart University Press, Bangkok, Thailand., 268p.

- Oh, S.H., Soh, J.R. and Cha, Y.S., 2003. Germinated brown rice extract shows a nutraceutical effect in the recovery of chronic alcohol-related symptoms. *Journal Medical Food*, vol. 6, pp. 115-121.
- Pascual, C.S.C.I., Massaretto, I.L., Kawassaki, F., Barros, R.M.C., Noldin, J.A. and Marquez, U.M.L., 2011. Effects of parboiling, storage and cooking on the levels of tocopherols, tocotrienols and γ -oryzanol in brown rice (*Oryza sativa* L.). *Food Research International*, article inpress.
- Patterson, B.D. and Graham, D., 1987. Temperature and metabolism. *The Biochemistry of Plants*, D.D. Davies. Ed., vol. 12, pp. 153-199.
- Pokorny, J., 2001. Introduction. In J. Pokorny, N. Yanishlieva, & M.H.Gordon (Eds.), *Antioxidants in food: practical applications* (pp. 1–3). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Poomsa-ad, N., Terdyothin, A., Prachayawarakorn, S., and Soponronnarit, S., 2005. Investigations on head-rice yield and operating time in the fluidised-bed drying process: experiment and simulation. *Journal of Stored Products Research*. vol. 41, pp. 387-400.
- Prachayawarakorn, S., Poomsa-ad, N., and Soponronnarit, S., 2005. Quality maintenance and economy with high-temperature paddy-drying processes. *Journal of Stored Products Research*. vol. 41, pp. 333-351.
- Rice-Evans, C.A., Miller, N.J. and Paganga, G., 1996. Structure-Antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free Radical Biology Medicine*, vol. 20, No. 7, pp. 161-177.
- Shelp, B.J., Brown, A.W. and Mclean, M.D., 1999. Metabolism and functions of gamma – aminobutyric acid. *Trends in Plant Science*, vol. 4, pp. 446-452.
- Skerget, M., Kotnik, P., Hadolin, M., Hras, A.R., Simonic, M. and Knez, Z., 2005. Phenols, proanthocyanidins, flavones and flavonols in some plant materials and their antioxidant activities. *Food Chemistry*, vol. 89, pp. 191–198.
- Soponronnarit, S., Chiawwet, M., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P. and Taechapairoj, C., 2008. Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice. *Journal of Food Engineering*, vol. 85, pp. 268–276.
- Smith, R.J., 1979. *Food Carbohydrate*. The AVI Publishing Co., Westport, Connecticut., 416 p.

- Srisang, N., Varanyanond, W., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S., 2011. Effect of heating media and operating on drying kinetics and quality of germinated brown rice. *Journal of Food Engineering*, vol. 107, pp. 385-392.
- Swasdisevi, T., Sriariyakula, W., Tia, W., Soponronnarit, S., 2010. Effect of pre-steaming on production of partially-parboiled rice using hot-air fluidization technique. *Journal of Food Engineering*, vol. 96, pp. 455-462.
- Swinkels, J.J.M., 1985a. Composition and properties of commercial native starches. *Starch/Starke*, vol. 37, pp. 1-5.
- Taechapairoj, C., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S., 2006. Modelling of parboiled rice in superheated-steam fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, vol. 76, pp. 411-419.
- Tananuwong, K. and Tewaruth, W., 2010. Extraction and application of antioxidants from black glutinous rice. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 43, pp. 476-481.
- Tang, H., Mitsunaga, T. and Kawamura, Y., 2006. Molecular arrangement in blocklets and starch granule architecture. *Carbohydrate Polymers*, vol. 63, pp. 555-560.
- Tester, R. F., Karkalas, J. and Qi, X., 2004. Starch composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, vol. 39, pp. 151-165.
- Tian, S., Nakamura, K., Cui, T. and Kayahara, H., 2005. High-performance liquid chromatographic determination of phenolic compounds in rice. *Journal of Chromatography A*, vol. 1063, pp. 121-128.
- Vichapong, J., Sookserm, M., Srijesdaruk, V., Swatsitang, P. and Srijaranai, S., 2010. High performance liquid chromatographic analysis of phenolic compounds and their antioxidant activities in rice varieties. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 43, pp. 1325-1330.
- Xu, Z. and Godber, J.S., 1999. Purification and identification of components of γ -oryzanol in rice brain oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 47, pp. 2724-2728.
- Yamaguchi, S., Wakabarashi, K. and Yamazowa, S., 1984. Change of cracked rice percentage and internal stress of brown rice kernels during drying operation. In: *Proceedings of the Fourth International Drying Symposium*, Kyoto, Japan.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอล โดยใช้ Folin-Ciocalteu method ดัดแปลงจากวิธีการของ Skerget et al., 2005

สารเคมี

1. Folin-Ciocalteu reagent
2. Sodium Carbonated (Na_2CO_3)
3. Methanol
4. Gallic acid

วิธีการ

1. ปิเปตตัวอย่างข้าวที่ได้จากการสกัด 0.5 มิลลิลิตร เติม Folin-Ciocalteu reagent (เจือจาง 10 เท่า) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร
2. ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
3. เติมสารละลาย 7.5% (w/v) Na_2CO_3 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร
4. นำไป incubated ที่ 50°C นาน 5 นาที
5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 nm ด้วยเครื่อง spectrophotometer
6. ใช้ methanol เป็น blank
7. ใช้ gallic acid เป็นสารมาตรฐาน

2. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity

ดัดแปลงจากวิธีการของ Maisuthisakul et al., 2007

สารเคมี

1. 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ความเข้มข้น 6×10^{-5} M
2. Ethanol

วิธีการ

1. ปิเปตตัวอย่างที่ได้จากการสกัดปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 6×10^{-5} M ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร
2. เก็บไว้ในที่มืด 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
3. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm ด้วยเครื่อง spectrophotometer
4. ใช้ ethanol เป็น blank

การคำนวณ

$$\% \text{ Inhibition} = (A_0 - A_{\text{ext}}) / A_0 \times 100$$

โดยที่ A_0 = ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ที่ 0 นาที

A_{ext} = ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ที่ 120 นาที

3. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP assay ดัดแปลงจากวิธีการของ Benzie and Strain, 1996

สารเคมี

1. 300 mM acetate buffer pH 3.6
2. 2,4,6-tri-2-pyridyl-2-triazine (TPTZ)
3. 20 mM ferric chloride (FeCl_3)
4. 40 mM hydrochloric (HCl)
5. Methanol
6. Acetic acid
7. Ferrous sulfate heptahydrate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

วิธีการ

1. นำ 300 mM acetate buffer pH 3.6 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร , TPTZ ใน 40 mM HCl ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร และ 20 mM FeCl_3 ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ผสมรวมกันเป็น FRAP reagent แล้วนำไปอุ่น 37°C 15 นาที
2. ปิเปิด FRAP reagent ปริมาตร 950 μl เติมลงในตัวอย่างปริมาตร 50 μl
3. ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
4. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 nm ด้วยเครื่อง spectrophotometer
5. ใช้ acetate buffer pH 3.6 เป็น blank
6. ใช้ FRAP reagent 950 μl + methanol 50 μl เป็น control
7. ใช้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เป็นสารมาตรฐาน

4. การวิเคราะห์หาปริมาณ gamma-aminobutyric acid (GABA) ตามวิธี Khuhawar and Rajper, 2003

สารเคมี

1. Borax buffer pH 8.0
2. 2-Hydroxy-naphthaldehyde (HN)
3. Methanol
4. Trifluoroacetic acid (TFA)
5. γ -aminobutyric acid (GABA)

วิธีการ

1. นำสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐาน 1 มิลลิลิตร เติม borax buffer pH 8.0 ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร
2. เติม derivatizing reagent HN (0.3% w/v ใน methanol) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
3. นำสารละลายไปอุ่นที่ 80°C นาน 10 นาที
4. ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรให้เป็น 5 มิลลิลิตร ด้วย methanol

สถานะที่ใช้

1. Column : Inertsil ODS-3 ขนาด 4.6 x 250 mm
2. Mobile phase : methanol / H₂O + 0.1% TFA อัตราส่วน 40/60
3. Flow rate : 1.5 ml/min
4. Volume injection : 20 μ l
5. Detector : UV 330 nm

5. การวิเคราะห์หาปริมาณแกมมาออริซานอล (γ -oryzanol) ดัดแปลงจากวิธีการของ Xu and Godber, 1999

สารเคมี

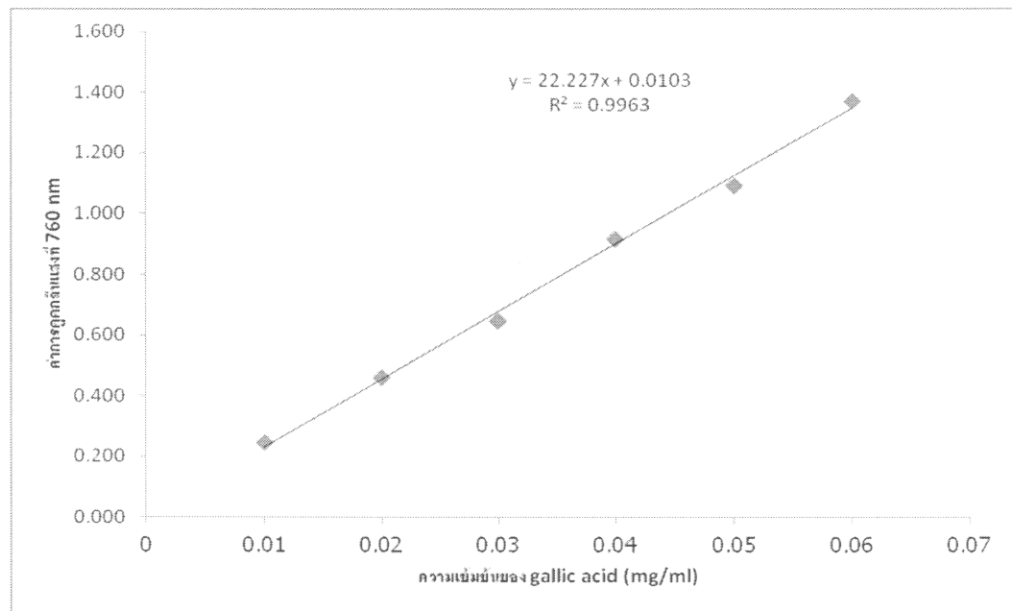
1. Methanol
2. Acetonitrile
3. Acetic acid
4. γ -oryzanol

สภาวะที่ใช้

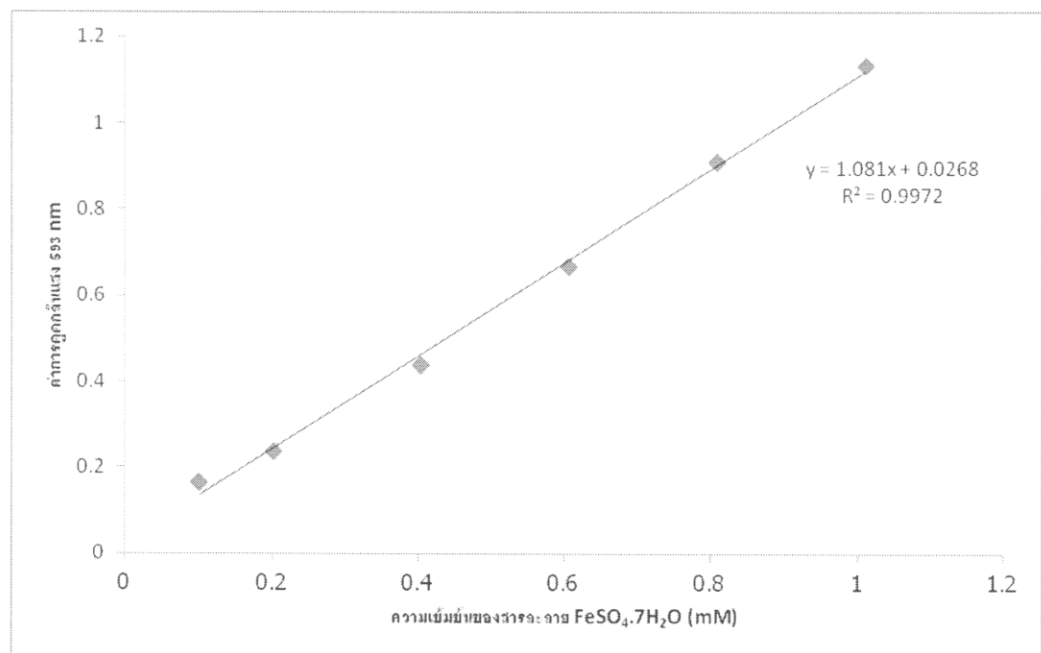
1. Column : Inertsil ODS-3 ขนาด 4.6 x 250 mm
2. Mobile phase : methanol / acetonitrile / acetic acid อัตราส่วน 25/72/3
3. Flow rate : 1.8 ml/min
4. Volume injection : 20 μ l
5. Detector : UV 330 nm

ภาคผนวก ข
กราฟมาตรฐานต่างๆ

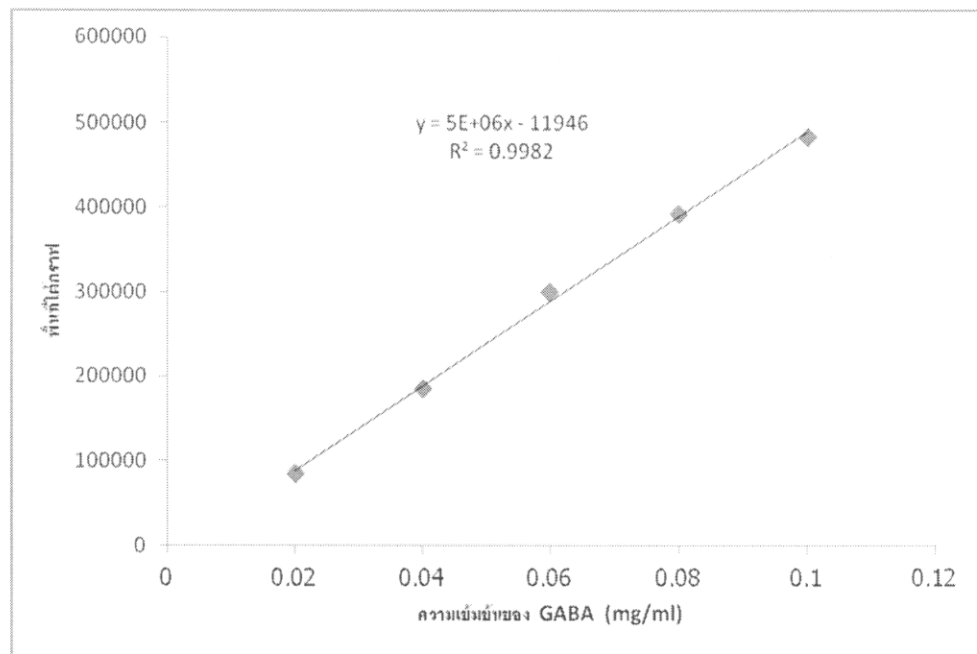
1. กราฟมาตรฐานของ gallic acid



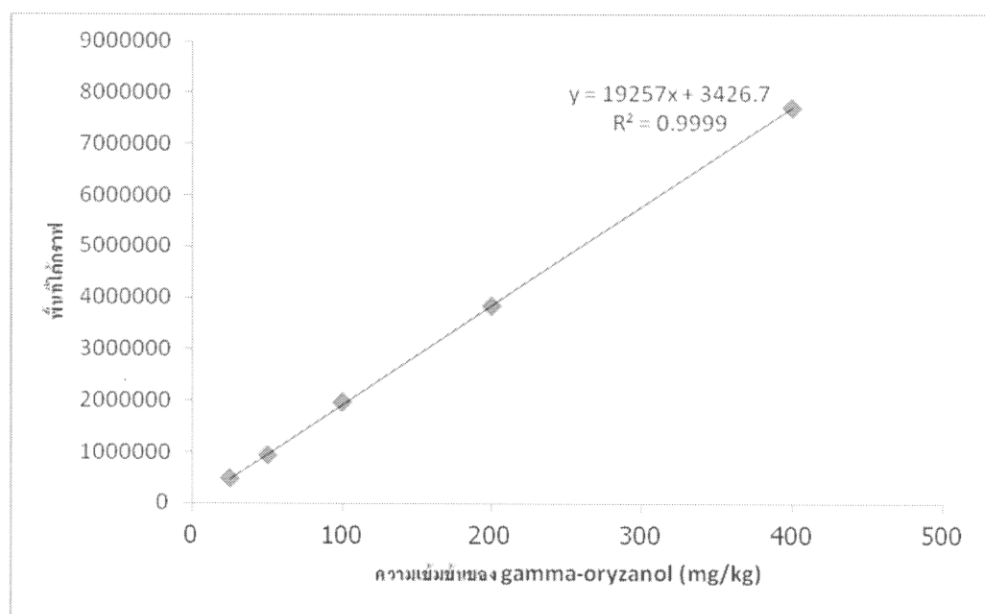
2. กราฟมาตรฐานของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$



3. กราฟมาตรฐานของ GABA



4. กราฟมาตรฐานของ γ -oryzanol



ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณความเข้มข้นของ gallic acid ของสารตัวอย่าง ในหน่วย mg GAE/g dry weight

จากกราฟมาตรฐานของ gallic acid คือ

$$y = 22.227x + 0.0103$$

แทนค่าค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างลงใน y

$$y = 22.227x + 0.0103$$

$$0.704 = 22.227x + 0.0103$$

$$x = 0.1579 \text{ mg/ml (คูณ dilution แล้ว)}$$

สารสกัดตัวอย่างเข้มข้น 0.11 g/ml มี gallic acid เท่ากับ 0.1579 mg/ml

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ สารสกัดตัวอย่าง 0.11 g มีค่า gallic acid equivalent} & \quad 0.1579 \text{ mg} \\ \text{สารสกัดตัวอย่าง 1 g มีค่า gallic acid equivalent} & \quad \frac{1g \times 0.1579mg}{0.11g} \\ & = 1.4355 \text{ mg} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นสารสกัดจากข้าวมีค่า 1.4355 mg GAE / g dry weight

2. การคำนวณความเข้มข้นของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ของสารตัวอย่าง

จากกราฟมาตรฐานของ gallic acid คือ

$$y = 1.081x + 0.0268$$

แทนค่าค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างลงใน y

$$y = 1.081x + 0.0268$$

$$0.731 = 1.081x + 0.0268$$

$$x = 3.3286 \text{ mM (คูณ dilution แล้ว)}$$

สารสกัดตัวอย่างเข้มข้น 111.11 g/l มี gallic acid เท่ากับ 3.3286 mM

นั่นคือ สารสกัดตัวอย่าง 111.11 g มีค่า gallic acid equivalent 3.3286 mmol

$$\begin{aligned} \text{สารสกัดตัวอย่าง 1 g มีค่า gallic acid equivalent} & \quad \frac{1\text{g} \times 3.3286\text{mmol}}{111.11\text{g}} \\ & = 0.0299 \text{ mmol} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นสารสกัดจากข้าวมีค่า FRAP values $29.95 \mu\text{mol} / \text{g dry weight}$

3. การคำนวณหาปริมาณ gamma-aminobutyric acid ในตัวอย่าง

จากกราฟมาตรฐานของ GABA คือ

$$y = 5E+06x - 11946$$

แทนค่าพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างลงใน y

$$y = 5E+06x + 11946$$

$$155637 = 5E+06x + 11946$$

$$x = 0.0335 \text{ mg/ml}$$

เนื่องจาก 1 ml มีปริมาณ GABA 0.0335 mg
ปริมาตรก่อนฉีด 5 ml มีปริมาณ GABA $(5 \text{ ml} \times 0.0335 \text{ mg})/1 \text{ ml}$
 $= 0.1675 \text{ mg}$

เพราะฉะนั้น ตัวอย่างที่นำมาทำ derivative 1 ml มีปริมาณ GABA 0.1675 mg
ทำการ evap ตัวอย่างเหลือ 5 ml มีปริมาณ GABA $(5 \text{ ml} \times 0.1675 \text{ mg})/1 \text{ ml}$
 $= 0.8375 \text{ mg}$

เนื่องจากตัวอย่างข้าวเริ่มต้น 4.35 g มีปริมาณ GABA 0.8375 mg
ถ้าข้าว 100 g มีปริมาณ GABA $(100 \text{ g} \times 0.8375 \text{ mg})/4.35 \text{ g}$
 $= 19.25 \text{ mg}$

เพราะฉะนั้นตัวอย่างมีปริมาณ GABA 19.25 mg/100 g dry weight

4. การคำนวณหาปริมาณ γ -oryzanol ในตัวอย่าง

จากกราฟมาตรฐานของ γ -oryzanol คือ

$$y = 19257x - 3426.7$$

แทนค่าพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างลงใน y

$$y = 19257x - 3426.7$$

$$1466422 = 19257x - 3426.7$$

$$x = 75.97 \text{ mg/l}$$

เนื่องจาก 1000 ml มีปริมาณ γ -oryzanol 75.97 mg

สารสกัดตัวอย่าง 5 ml มีปริมาณ γ -oryzanol $(5 \text{ ml} \times 75.97 \text{ mg})/1000 \text{ ml}$
 $= 0.3799 \text{ mg}$

เนื่องจากตัวอย่างข้าวเริ่มต้น 1.8 g มีปริมาณ γ -oryzanol 0.3799 mg

ถ้าข้าว 1 g มีปริมาณ γ -oryzanol $(1 \text{ g} \times 0.3799 \text{ mg})/1.8 \text{ g}$
 $= 0.2111 \text{ mg}$

เพราะฉะนั้นตัวอย่างมีปริมาณ γ -oryzanol 0.211 mg/g dry weight

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	กฤตณัย แก้วยศ
ที่อยู่	53/1 หมู่ 4 ต.บึงน้ำเต้า อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์ 67110
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2552	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2553	ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผลงานทางวิชาการ	เรื่อง “อิทธิพลของการอบแห้งข้าวเปลือกเริ่มออกต่อสารต้านอนุมูลอิสระ โดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน” ในงานประชุมวิชาการเครื่องข่ายพลังงาน แห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 (oral presentation)