JOHN F.KENNEDY LIBRARY
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
PATTANI THAILAND

การอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกสายพันธุ์พื้นเมืองของภาคใต้: หอมกระดังงาและชีบูกันตัง

Drying and Storage of Germinated Brown Rice Cultivated in Southern of Thailand: HawmKradang-Ngah and Seebukantang

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ฮารีซะ กอฮิง
Hareesah Kohing

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Applied Chemistry
Prince of Songkla University
2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกสายพันธุ์พื้นเมืองของภาคใต้: หอมกระดังงาและชีบูกันตัง

ผู้เขียน นางสาวฮารีซะ กอฮิง

สาขาวิชา เคมีประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(ดร.จุฑารัตน์ ทะสะระ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(ดร.วีรยา คุ้มเมือง)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล)

.....กรรมการ

(ดร.จุฑารัตน์ ทะสะระ)

.....กรรมการ

(ดร.วีรยา คุ้มเมือง)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล)

.....กรรมการ

(ดร.อรภรณ์ บัวหลวง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์

.....

(ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งสาง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

Prince of Songkla University Pattani Campus

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร.จุฑารัตน์ ทะสะระ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นางสาวฮารีซะ กอฮิง)

นักศึกษา

Prince of Songkla University Pattani Campus

ข้าพเจ้ารับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....ฮารีซะ.....

(นางสาวฮารีซะ กอฮิง)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ชื่อวิทยานิพนธ์ การอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกสายพันธุ์พื้นเมืองของภาคใต้: หอมกระดังงาและชีบูกันตัง

ผู้เขียน นางสาวฮารีซะ กอฮิง

สาขาวิชา เคมีประยุกต์

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกสองสายพันธุ์พื้นเมืองของภาคใต้: หอมกระดังงาและชีบูกันตัง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ความเร็วลม 0.5±0.1 m/s และรังสีอินฟราเรด (1,000W และ 1,500W) อุณหภูมิการอบแห้งที่ 60 75 และ 95 °C จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W อุณหภูมิการอบแห้งที่ 95 °C เนื่องจากเป็นสภาวะที่ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด และทำให้ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่สภาวะอื่น ๆ เมื่อนำข้าวกล้องงอกที่ได้จากการอบแห้งมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด สี สัญฐานวิทยาของข้าวกล้องงอกและคุณภาพในด้านการหุงต้ม พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 75 และ 95 °C ให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 75 และ 95 °C ให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี ดีพีพีเฮท เอบีทีเอส และ เอฟอาร์เอพี และปริมาณของสารกาบา แต่ในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อปริมาณโปรแอนโทไซยานิดิน และจากการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อสี และปริมาณของสารกาบา แต่ไม่มีผลต่อคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ และพบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณสารโปรแอนโทไซยานิดินและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาอีกด้วย ในขณะที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง

Prince of Songkla University Pattani Campus

Thesis Title	Drying and storage of germinated brown rice cultivated in Southern of Thailand: HawmKradang-Ngah and Seebukantang
Author	Miss Hareesah Kohing
Major program	Applied Chemistry
Academic Year	2017

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the optimum drying conditions and shelf life of germinated brown rice cultivated in Southern of Thailand: HawmKradang-Ngah and Seebukantang on their physical and chemical qualities. The drying process was using a hot air (Air velocity 0.5±0.1 m/s), Infrared radiation (1,000W and 1,500W) and drying temperature at 60, 75 and 95 °C. Results found that the optimum condition for drying two varieties of germinated brown rice (GBR) were hot air drying at 95 °C and infrared radiation power at 1,500W with the drying temperature at 95 °C. The optimum drying condition from this study give the shortest drying time and saving drying energy compare to the other drying conditions. Then, physical properties of two GBR varieties including: head rice yield, color, structure and cooking properties were established. It was found that the drying temperature at 60, 75 and 95 °C shown not significantly different ($p \geq 0.05$) in all physical properties. In chemical properties of two germinated brown rice varieties found that the drying temperature at 60, 75 and 95 °C shown not significantly different ($p \geq 0.05$) affected on the total phenolic content (TPC), total flavonoid content (TFC), antioxidant activities (DPPH, ABTS and FRAP) and the amount of γ-aminobutyric acid (GABA) but it was significantly different ($p \leq 0.05$) affected on proanthocyanidin content in Hawmkradang-Ngah GBR variety. In the study on shelf life of two GBR varieties for 3 months showed that the shelf life affected to the color and γ-aminobutyric- acid (GABA) content but not affected to the cooking properties. In addition, the shelf life affected to proanthocyanidin and antioxidant activities in Hawmkradang-Ngah. Although, the storage properties did not affected to the antioxidant capability in Seebukantang GBR variety.

Prince of Songkla University Pattani Campus

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.จุฑารัตน์ ทะสะระ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และขอขอบคุณ ดร.วีรยา คุ้มเมือง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยชี้แนะแนวทางในการศึกษาค้นคว้างานวิจัย และให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล ภาควิชาฟิสิกส์ และรศ.ดร.สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และภาควิชาวิศกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องอบแห้งและอุปกรณ์ต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยข้าวปัตตานีที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าวเปลือกสายพันธุ์หอมกระดังงา และสายพันธุ์ซีบูกันตัง

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ สำหรับการค้นคว้าวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2561

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนค่าธรรมเนียมการศึกษา จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2559

ขอขอบคุณทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ขอขอบคุณ แผนกวิชาเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี สถานที่ให้ความรู้และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคคลในครอบครัว เพื่อน ๆ ตลอดจนบุคคลต่าง ๆ ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลืออีกมากมายเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ฮารีซะ กอฮิง

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ 5

ABSTRACT 6

กิตติกรรมประกาศ 7

สารบัญ 8

สารบัญตาราง 11

สารบัญรูป 13

บทที่ 1 บทนำ **1**

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิจัย 4

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 4

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 5

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **6**

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6

2.1.1 ข้าว 6

2.1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว 9

2.1.3 คุณภาพของข้าว 10

2.1.4 ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice) 15

2.1.5 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวกล้องงอก 18

2.1.6 สารต้านอนุมูลอิสระ 24

2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการงอกของเมล็ด 28

2.1.8 การนึ่งข้าวเปลือก (Rice parboiling) 28

2.1.9 การอบแห้งข้าวเปลือก 29

2.1.10 สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying kinetics equation) 33

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 39

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย **45**

3.1 วัตถุดิบ 45

3.2 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือ 45

3.2.1 สารเคมี 45

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ 46

3.3 วิธีการทดลอง 50

3.3.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก 50

3.3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานของการอบแห้ง 51

3.3.3 การอบแห้ง 52

3.3.4 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ 54

3.3.5 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี 56

3.4.4 การเก็บรักษา 60

บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง 62

4.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของการอบแห้ง 62

4.1.1 การหาความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density, ρ) 62

4.1.2 การหาสัดส่วนช่องว่างของอากาศ (Void fraction, % ε) 63

4.2 ผลการทดลองหาจลนพลศาสตร์และสมการการอบแห้งทางคณิตศาสตร์ 66

4.2.1 ผลการอบแห้ง 66

4.2.2 สมการการอบแห้งทางคณิตศาสตร์ 72

4.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 76

4.4 ผลการทดสอบทางกายภาพ 77

4.4.1 ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด (Head rice yield) 77

4.4.2 ร้อยละท้องไข่ (White belly) 77

4.4.3 สี (Color) 78

4.4.4 ศึกษาสัณฐานวิทยาของข้าวกล้องงอก 82

4.4.5 การทดสอบคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวกล้องงอก 84

4.5 ผลการทดสอบทางเคมี 88

4.5.1 ปริมาณแอนโทไซยานิน และโปรแอนโทไซยานิดิน 88

4.5.2 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด 89

4.5.3 ความสามารถรวมในการรีดิวซ์ Total Antioxidant Capacity (TAC) 94

4.5.4 ปริมาณสารกาบา (γ-aminobutyric acid, GABA) 98

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6 การเก็บรักษาข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และซีบูกันตัง 100
4.6.1 การเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างการเก็บรักษา 100
4.6.2 คุณภาพด้านการหุงต้มในระหว่างการเก็บรักษา 102
4.6.3 ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดินในข้าวกล้องงอกในระหว่างการเก็บรักษา 104
4.6.4 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในระหว่างการเก็บรักษา 105
4.6.5 ความสามารถรวมในการรีดิวซ์ของข้าวกล้องงอกในระหว่างการเก็บรักษา 109
4.6.6 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกในระหว่างการเก็บรักษา 113
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 116
5.1 สรุปผลการทดลอง 116
5.2 ข้อเสนอแนะ 117
บรรณานุกรม 118
ภาคผนวก 130
ประวัติผู้เขียน 159

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณคาทางโภชนาการของข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและข้าวพันธุชีบูกันตัง	7
2.2	คุณคาทางเคมีของข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและข้าวพันธุชีบูกันตัง	8
2.3	คุณภาพทางกายภาพของข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและขวพันธุชีบูกันตัง	8
2.4	การจำแนกรูปร่างเมล็ดจากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง	11
2.5	การแบ่งชนิดข้าวตามอุณหภูมิแป้งสุกและการประมาณด้วยค่าการสลายของเมล็ดในด่างที่สัมพันธ์กับระยะเวลาในการหุงต้ม	12
2.6	คุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้อง 100 กรัม	17
2.7	คุณค่าทางโภชนาการระหว่างข้าวกล้อง และข้าวขาว 100 กรัม	18
2.8	แสดงตัวอย่างสมการอบแห้งเอมพิริเคิลที่ใช้ในการทำนายการอบแห้ง	37
4.1	รูปแบบสมการเอมพิริเคิล	72
4.2	ค่าคงที่ของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่มีความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง 60-95 °C	74
4.3	ค่าคงที่ของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังที่มีความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง 60-95 °C	75
4.4	ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้ง	78
4.5	การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด	80
4.6	การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด	81
4.7	คุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่อบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด	86
4.8	คุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังที่อบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด	87
4.9	ปริมาณสารโปรแอนโทไซยานิดินในข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด	89
4.10	ค่าสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน	101

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.11 ค่าสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน 102

4.12 ปริมาณสารโปรแอนโทไซยานิดินในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน 105

Prince of Songkla University
Pattani Campus

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของเมล็ดข้าว	10
2.2	โครงสร้างอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin)	13
2.3	โครงสร้างโดยทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก	19
2.4	การจำแนกสารประกอบฟีนอลิก	20
2.5	โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoid compounds)	21
2.6	โครงสร้าง proanthocyanidin	22
2.7	การสังเคราะห์ Anthocyanins และ Proanthocyanidins	23
2.8	การสังเคราะห์ γ-aminobutyric acid (GABA)	24
2.9	การเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบ	30
3.1	เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด	47
3.2	เครื่องวัดสี รุ่น Hunter lab system CIELAB; color flex 4510	47
3.3	เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น LIBRA S22	47
3.4	เครื่องกะเทาะข้าว (รุ่น P-1 จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วนจำกัดเจ็กเซ่งฮวด)	48
3.5	เครื่องเขย่าสาร (Lab Companion รุ่น SI-600R)	48
3.6	เครื่องระเหยสารแบบสุญญากาศ Heidolph รุ่น Hei-VAP Advantage	49
3.7	ขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างของข้าวกล้องงอก	50
3.8	ลักษณะของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้ง (ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และ (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง	53
3.9	การเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอกในการศึกษาผลการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	61
3.10	ลักษณะการบรรจุข้าวกล้องงอกแบบสุญญากาศเพื่อการเก็บรักษา (ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และ (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง	61
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของข้าวกล้องงอก (ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และ (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง	64
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างของอากาศกับความชื้นของของข้าวกล้องงอก (ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และ (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง	65

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.3 ปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ (ค) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W 67

4.4 ปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ (ค) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W 68

4.5 ปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา (ก) อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (ข) อุณหภูมิอบแห้ง 75 °Cและ (ค) อุณหภูมิอบแห้ง 95 °C 70

4.6 ปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง (ก) อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (ข)อุณหภูมิอบแห้ง 75 °C และ (ค) อุณหภูมิอบแห้ง 95 °C 71

4.7 อุณหภูมิการอบแห้งต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่มีความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง 76

4.8 การเปลี่ยนแปลงสีของข้าว (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง 79

4.9 ลักษณะโครงสร้างของข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่กำลังขยาย x1,000 และ (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตังที่กำลังขยาย x1,000 82

4.10 ลักษณะโครงสร้างของข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่กำลังขยาย x1,000 และ (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตังที่กำลังขยาย x1,000 83

4.11 ลักษณะโครงสร้างของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W อุณหภูมิ 95 °C ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่กำลังขยาย x1,000 และ (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตังที่กำลังขยาย x1,000 83

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	ลักษณะโครงสร้างของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 95 °Cด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่กำลังขยาย x1,000 และ (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตังที่กำลังขยาย x1,000	84
4.13	ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	92
4.14	ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	93
4.15	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	95
4.16	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	96
4.17	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	97
4.18	ปริมาณของสารกาบาจากข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	99
4.19	ระยะเวลาการหุงต้มของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่เก็บรักษา 3 เดือน	103
4.20	ปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน	103
4.21	ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุกของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน	104
4.22	ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้ง และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	107

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.23 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้ง และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 108

4.24 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 110

4.25 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 111

4.26 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 112

4.27 ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 114

Prince of Songkla University Pattani Campus

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ภาคใต้ตอนล่าง (ปัตตานี ยะลา และนราธิวาส) มีปัญหาที่เกี่ยวข้องกับข้าวที่สำคัญ คือ ปัญหานาร้าง คือ การปล่อยทิ้งให้พื้นที่นาว่างเปล่า ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาทางภัยธรรมชาติ สภาพของดิน น้ำท่วม ข้าวราคาตกต่ำ รวมถึงคนรุ่นใหม่ในชุมชนหันเหไปทำอาชีพอื่นที่ให้ผลตอบแทนดีกว่า แม้ว่าในพื้นที่จะสามารถซื้อข้าวจากพื้นที่อื่นได้แต่ก็ทำให้ชุมชนเกิดความอ่อนแอไม่สามารถพึ่งพาตนเองได้ รัฐบาลโดยทางจังหวัดได้พยายามส่งเสริมให้ชาวนาในพื้นที่หันกลับมาทำนาและใช้ประโยชน์จากพื้นที่นาร้างให้มากขึ้น โดยการส่งเสริมให้ปลูกข้าวที่เหมาะสมกับพื้นที่ และมีหน่วยงานจากภาคส่วนต่าง ๆ เข้าไปให้คำแนะนำช่วยเหลือ เพื่อเป็นพลังขับเคลื่อนให้มีการผลิตข้าวในพื้นที่และเกิดความมั่นคงด้านอาหารต่อไป

อย่างไรก็ตามในบางพื้นที่ของภาคใต้ตอนล่างยังคงมีการปลูกข้าวพื้นเมือง เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่มีความจำเพาะต่อลักษณะของพื้นที่ ทั้งยังเป็นการพึ่งตนเองอีกด้วย เช่น ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง ซึ่งเป็นข้าวที่ยังเป็นที่นิยมปลูกในพื้นที่จังหวัดนราธิวาสในชุมชนไทยพุทธและมุสลิม ตามลำดับ จากการศึกษาข้อมูลและวางแผนการดำเนินงานพัฒนาข้าวในพื้นที่พิเศษ 5 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ภายใต้โครงการวิจัยและพัฒนาพันธุ์ข้าวภาคใต้ โดยศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี พบว่า เกษตรกรยังมีความต้องการพันธุ์ข้าวพื้นเมืองเพื่อการเพาะปลูกถึง 75% โดยพันธุ์ข้าวที่นิยมปลูกมากที่สุดคือ ข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง และข้าวพันธุ์หอมกระดังงา ข้าวเจ้าพันธุ์หอมกระดังงาและข้าวเจ้าพันธุ์ชีบูกันตังกำลังเป็นที่นิยมของตลาดไทยและมาเลเซีย ทำให้ไม่เพียงพอต่อการบริโภค จึงมีการส่งเสริมให้ขยายพื้นที่ปลูกเพื่อสร้างรายได้ให้แก่คนในชุมชนและยังมีความพยายามที่จะผลักดันให้ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาเป็นข้าวที่เป็นตัวบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI, Geographical Indications) ของจังหวัดนราธิวาสอีกด้วย ปัจจุบันกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรบ้านโคกอิฐ-โคกใน ได้นำข้าวหอมกระดังงามาแปรรูปเป็นข้าวกล้อง และข้าวซ้อมมือเพื่อเพิ่มมูลค่า ซึ่งพบว่าเป็นที่ต้องการของตลาด และผู้บริโภคที่ใส่ใจในเรื่องของสุขภาพ เนื่องจากข้าวหอมกระดังงามีคุณค่าทางโภชนาการที่สูง โดยเฉพาะวิตามินอี วิตามินบี1 และสารกาบา (GABA) การเพิ่มมูลค่าข้าวในห่วงโซ่การผลิตข้าว เป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยสร้างแรงจูงใจให้ชาวนาและผู้เกี่ยวข้อง มองเห็น

Prince of Songkla University Pattani Campus

ความสำคัญและคุณค่าของข้าวที่ควรจะรักษาให้คงอยู่กับพื้นที่ต่อไปทั้งในขณะนี้ยังไม่มีงานวิจัยใด ๆ ที่ศึกษาการเพิ่มมูลค่าจากข้าวดังกล่าว

การเพิ่มมูลค่าข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังอีกทางหนึ่ง คือ การผลิตเป็นข้าวกล้องงอก ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) คือข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการทำให้งอกโดยแช่ข้าวกล้องหรือข้าวเปลือกในน้ำแล้วเพาะจนเกิดรากที่มีความยาวประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร แล้วนำไปลดความชื้นเพื่อให้แห้ง (มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 4003-2555) โดยส่วนที่งอกออกมาของข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องเป็นส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าวหรือคัพภะ (Embryo) ที่มีกรดแกมม่าอะมิโนบิวริทิก (γ-Aminobutyric acid) หรือ GABA ซึ่งเป็นสารในกลุ่มโปรตีนที่ช่วยบำรุงเซลล์ประสาท ทำให้สมองเกิดการผ่อนคลายและช่วยป้องกันการทำลายสมองซึ่งเป็นสาเหตุของโรคสูญเสียความทรงจำหรือโรคอัลไซเมอร์อยู่ในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยสารอาหารอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก เช่น เส้นใยอาหาร (Fiber) กรดไฟติก (Phytic acid) กรดเฟอรูลิก (Ferulic acid) วิตามินต่าง ๆ เช่น วิตามินซี (Ascorbic acid) และวิตามินอี (Tocopherol) แกมม่าโอไรซานอล (γ-oryzanol) รวมทั้งกรดไขมัน (Fatty acid) และกรดอะมิโน (Amino acid) ชนิดต่าง ๆ ซึ่งช่วยป้องกันโรคต่าง ๆ เช่น มะเร็ง เบาหวาน และช่วยในการควบคุมน้ำหนักตัวและ แร่ธาตุต่าง ๆ เช่น แมกนีเซียม (Mg) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) และ ซีลีเนียม (Se) เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำข้าวกล้องมาผ่านกระบวนการงอกจะทำให้ปริมาณของสารต่าง ๆ เหล่านี้เพิ่มขึ้นจากเดิม (Chalermchaiwat *et al.*; Kim *et al.*, 2012; Moongngarm and Saetung, 2010) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารกาบา (GABA) ที่จะมีปริมาณมากขึ้นกว่าเดิม เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องในระหว่างกระบวนการงอก โดยมีเอนไซม์ไฮโดรไลติกเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวของสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น starch non-starch-polysaccharide โปรตีนให้กลายเป็นสารชีวโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่าง ๆ กรดอะมิโน และเปปไทด์ ซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์ต่อผู้บริโภค เป็นต้น นอกจากจะได้ประโยชน์จากปริมาณสารอาหารที่สูงขึ้นแล้วข้าวกล้องงอกหุงสุกยังลดความรู้สึกเนื้อสัมผัสในด้านความแข็งเมื่อเทียบกับข้าวกล้องทั่วไป เพราะข้าวกล้องงอกหุงสุกมีเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่ม รับประทานได้ง่ายกว่าตลอดจนมีผลดีต่อระบบขับถ่ายเพราะมีเส้นใยอาหารสูง (Sirisoontaralak *et al.*, 2015) ในกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกสามารถผลิตได้ทั้งจากข้าวกล้องหรือข้าวเปลือก แต่จากการศึกษาพบว่าการผลิตข้าวกล้องงอกจากข้าวเปลือกจะให้คุณค่าทางโภชนาการที่สูงกว่าการผลิตข้าวกล้องงอกจากข้าวกล้อง แต่ให้ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดต่ำ (อุมา และลำพึง, 2550) โดยทั่วไปนั้นหลังจากการเพาะงอกข้าวเปลือกแล้วจะนำข้าวเปลือกงอกไปผ่านกระบวนการนึ่ง แล้วนำมาลดความชื้นด้วยการตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์หรือการใช้ลมร้อน ซึ่งการนำข้าวเปลือกงอกมาผ่านกระบวนการนึ่งจะทำให้ได้ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดที่สูง (ศิริรัตนาพร และคณะ, 25552) จากนั้นจึงนำข้าวเปลือกไปกะเทาะ

Prince of Songkla University Pattani Campus

เปลือก (Varanyanond *et al.*, 2005) แต่ปัญหาหลักสำคัญของกระบวนการผลิต คือ ข้าวเปลือกงอกที่ผ่านกระบวนการนึ่งจะมีความชื้นสูงทำให้ข้าวเสื่อมสภาพทางกายภาพได้ง่าย และเพื่อต้องการรักษาคุณภาพของข้าวเปลือกงอกที่ผ่านกระบวนการนึ่งให้สามารถเก็บรักษาให้นานขึ้น และมีร้อยละข้าวเต็มเมล็ดที่สูง จึงต้องทำการอบแห้ง เพื่อลดความชื้นให้อยู่ในช่วง 14-16% มาตรฐานแห้ง ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่ปลอดภัยในการเก็บรักษา (สมชาติ, 2540) จากเดิมกระบวนการอบแห้งจะใช้การตากลานด้วยแสงอาทิตย์ตามธรรมชาติแต่ใช้ระยะเวลานาน ปัจจุบันจึงได้มีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามาใช้ในการอบแห้งมากขึ้น เช่น การอบแห้งโดยใช้เครื่องอินฟราเรดแบบสั่น (Vibratory infrared dryer) ทำให้ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด และเกิดความเป็นเจลหรือเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) ในข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง ตลอดจนใช้แหล่งพลังงานที่แตกต่างกัน เช่น ลมร้อน อินฟราเรด เป็นต้น ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งโดยเฉพาะอุณหภูมิจะส่งผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกโดยตรงทั้งในด้านเคมีกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Chungcharoen *et al.*, 2015; Srisang *et al.*, 2011) นอกจากสภาวะในการอบแห้งต้องเหมาะสมแล้ว พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกหลังการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อให้คงคุณค่าทางโภชนาการยังมีค่อนข้างน้อย งานวิจัยส่วนใหญ่เน้นไปที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง (Choi *et al.*, 2015; Smanalieva *et al.*, 2015) และข้าวกล้อง (Zhou *et al.*, 2014) ต่อคุณภาพข้าว พบว่าเมื่อ เก็บรักษาไว้เป็นเวลานานคุณภาพและปริมาณสารสำคัญต่าง ๆของข้าวมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน จึงเป็นประเด็นที่ต้องทำการศึกษาเนื่องจากการจะสนับสนุนการผลิตข้าวกล้องงอกในเชิงอุตสาหกรรม หรือส่งออกไปยังต่างประเทศซึ่งต้องใช้เวลานานกว่าผลิตภัณฑ์จะถึงมือผู้บริโภค

ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกพันธุ์พื้นเมืองที่นิยมเพาะปลูกในพื้นที่สามจังหวัดชายแดนใต้ของประเทศไทย ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของข้าวกล้องงอกก่อน และหลังการอบแห้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานทั้งในด้านโภชนาการ การผลิตและคุณภาพ ตลอดจนระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เหมาะสมเพื่อให้คงคุณค่าทางโภชนาการสูงสุด เพื่อใช้ในการพัฒนาการผลิตข้าวกล้องงอกสายพันธุ์พื้นเมืองของภาคใต้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของวิจัย

1.2.1 ศึกษาวิธีการและสภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมสำหรับข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและซีบูกันตัง

1.2.2 ศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เหมาะสมเพื่อให้คงคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของข้าวกล้องงอกภายหลังการอบแห้ง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานของการอบแห้ง ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างของอากาศของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และพันธุ์ซีบูกันตัง

1.3.2 ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดัง และพันธุ์ซีบูกันตังด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดในช่วง 1,000-1,500W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 60-100˚C

1.3.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และพันธุ์ซีบูกันตัง

1.3.3 วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ซีบูกันตัง ได้แก่

-ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด (Head rice yield)

-สี (Color)

-ร้อยละท้องไข่ (White belly)

-ศึกษาสัณฐานวิทยาของข้าวกล้องงอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

-เวลาในการหุงต้ม (Cooking time)

-ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water uptake)

-ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก (Solid loss)

1.3.4 วิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ซีบูกันตัง ได้แก่

-ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

-ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total flavonoid content)

-ปริมาณแอนโทไซยานิน (Anthocyanin)

-ปริมาณสารกาบา (γ-aminobutyric acid, GABA)

Prince of Songkla University Pattani Campus

-ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดิน (Proanthocyanidin)

-ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP

1.3.5 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตัง โดยพิจารณาด้านคุณภาพต่าง ๆ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

1.3.6 ศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตัง

1.4.2 ทราบระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เหมาะสมเพื่อให้คงคุณภาพของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตัง ภายหลังการอบแห้ง

1.4.3 ได้ข้อมูลสนับสนุนการประชาสัมพันธ์การบริโภคข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ที่เพิ่งได้รับการรับรองพันธุ์และมีความพยายามที่จะผลักดันให้เป็นข้าวที่เป็นตัวบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ หรือที่เรียกว่าข้าวจีไอ (GI, Geographical Indications) และพันธุ์ชีบูกันตัง ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดนราธิวาส สนับสนุนการสร้างรายได้จากการผลิตข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังให้เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายมากขึ้น และเพิ่มโอกาสในการส่งออกข้าวกล้องงอกพันธุ์นี้ไปยังประเทศเพื่อนบ้าน

1.4.4 อนุรักษ์และส่งเสริมให้มีการเพาะปลูกข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตัง ให้เกิดความภาคภูมิใจและเห็นถึงคุณค่าของข้าวพันธุ์ที่เป็นมรดกที่มีคุณค่าของท้องถิ่นเป็นสิ่งที่แสดงถึงวิถีชีวิตวัฒนธรรมของชุมชนที่ไม่สามารถพบในท้องถิ่นอื่น ๆ

Prince of Songkla University Pattani Campus

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ข้าว

ข้าวเป็นธัญพืชที่ใช้เป็นอาหารสำคัญอย่างหนึ่งของโลก ตามหลักวิชาพฤกษศาสตร์ ข้าวเป็นพืชจากพวกใบเลี้ยงเดี่ยวในวงศ์ (family) *Gramineae* อยู่ในสกุล (Genus) *Oryza* ชื่อเฉพาะของข้าว คือ sativa ดังนั้นข้าวจึงมีชื่อในภาษาละตินว่า *Oryza sativa* ทั้งนี้ประเทศไทยถือเป็นประเทศหนึ่งที่ปลูกข้าวมากเป็นอันดับต้นของเอเชียและยังเป็นประเทศผู้ส่งออกรายใหญ่รองจากอินเดีย (กรมการข้าว, 2550) ข้าวจำแนกออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามถิ่นกำเนิดและความนิยมในการบริโภคได้ 2 ชนิดคือ

1. *Oryza glaberrima* มีถิ่นกำเนิดและบริโภคกันในประเทศทวีปแอฟริกาเท่านั้น
2. *Oryza sativa* มีถิ่นกำเนิดและปลูกเป็นพืชอาหารทั่วไปในทวีปเอเชีย

ส่วนใหญ่ในทวีปเอเชียนิยมปลูกและบริโภคข้าวตระกูล *Oryza sativa* โดยเฉพาะข้าวเมล็ดยาว (Indica) อีกทั้งยังสามารถจำแนกชนิดของข้าวตามปริมาณอะไมโลสได้ดังนี้ (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560)

1. ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ อยู่ในช่วง 10-19% ข้าวในกลุ่มนี้เมื่อหุงสุกจะมีลักษณะนุ่มเหนียว เช่น ข้าวสังข์หยด ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวปทุมธานี 1 เป็นต้น
2. ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลปานกลาง อยู่ในช่วง 20-25% ข้าวในกลุ่มนี้เมื่อหุงสุกจะมีลักษณะค่อนข้างนุ่มเหนียว เช่น ข้าวสุพรรบุรี 60 ข้าวเล็บนกปัตตานี และข้าวหอมกระดังงา เป็นต้น
3. ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง มีปริมาณมากกว่า 25% ข้าวในกลุ่มนี้เมื่อหุงสุกจะมีลักษณะร่วน ค่อนข้างแข็ง เช่น ข้าวนางพญา 123 ข้าวสุพรรบุรี 1 และข้าวชีบูกันตัง เป็นต้น

Prince of Songkla University Pattani Campus

ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและชีบูกันตัง (นิธิศ และคณะ, 2553)

ข้าวพันธุหอมกระดังงา เป็นพันธุขาวพื้นเมืองที่มีการปลูกในจังหวัดนราธิวาส ปลูกในฤดูนาป พื้นที่ปลูกสวนใหญ่อยู่ที่อำเภอตากใบ ซึ่งทางรัฐบาลพยายามพลักดันให้ข้าวพันธุ์กระดังงาเป็นข้าวที่เป็นตัวบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indications, GI) ของจังหวัดนราธิวาส ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา เป็นข้าวเจาสีแดงไวต่อชวงแสง มีลักษณะทรงกอตั้ง ความยาวลำตนประมาณ 131 เซนติเมตร. ลำตนคอนขางแข็ง ปล้องจะมีลักษณะเป็นสีเขียวมีเสนมวง แผ่นใบสีเขียวยาว 59.2 เซนติเมตร. กว้าง 1.4 เซนติเมตร. ยอดดอกมีสีมวง ยอดเกสรตัวเมียสีขาว กลีบรองดอกสีมวง คอรวงยาว ลักษณะของรวงค่อนข้างแน่น โดยพบว่ามีจำนวนรวงตอกอ 10 รวง รวงยาว 28 เซนติเมตร ลักษณะของเปลือกเมล็ดมีสีฟาง ลักษณะเด่นของข้าวสายพันธุ์นี้ คือ มีกลิ่นหอมคล้ายดอกกระดังงา มีคุณคาทางโภชนาการสูง ข้าวซอมมือเมื่อหุงสุกจะมีความนุ่มและหอม

ข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง เป็นพันธุขาวพื้นเมืองของจังหวัดนราธิวาส ปลูกในฤดูนาป เป็นข้าวเจาไม่ไวต่อชวงแสง มีลักษณะทรงกอตั้ง ลำตนคอนขางแข็ง ความยาวลำตนประมาณ 86.4 เซนติเมตร ปล้องมีสีเขียว แผ่นใบสีเขียวยาว 40.4 เซนติเมตร. กว้าง 1.2 เซนติเมตร ยอดดอกสีเขียวอ่อน ยอดเกสรตัวเมียสีขาว กลีบรองดอกสีฟาง คอรวงสั้น เปลือกเมล็ดสีฟางรองน้ำตาล ลักษณะของรวงแน่นปานกลาง โดยพบว่าจำนวนรวงตอกอ 17 รวง รวงยาว 23.2 เซนติเมตร

ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูง (ตารางที่ 2.1) เป็นที่นิยมของกลุ่มผู้บริโภคข้าวเพื่อสุขภาพ ส่วนคุณภาพทางกายภาพและเคมีของข้าวทั้งสองสายพันธุ์แสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.1 คุณคาทางโภชนาการของข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและข้าวพันธุชีบูกันตัง

Nutrition/ข้าว100 กรัม	หอมกระดังงา	ชีบูกันตัง
พลังงาน (Kcal)	346.22	349.3
ความชื้น (กรัม)	11.14	10.62
โปรตีน (กรัม)	9.03	7.31
ไขมัน (กรัม)	1.86	2.14
คารโบไฮเดรท (กรัม)	73.34	75.20
ใยอาหาร (กรัม)	3.83	3.45
เถ้า (กรัม)	0.80	1.28

ที่มา : ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี (2553)

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 2.2 คุณคาทางเคมีของข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและข้าวพันธุซีบูกันตัง

คุณลักษณะ	หอมกระดังงา	ซีบูกันตัง
คุณภาพทางเคมี		
ปริมาณอะมิโลส (%)	22.69	28.51
คาการสลายเมล็ดในด่าง	5.0	5.0
อุณหภูมิแปงสุก	ปานกลาง	ปานกลาง
ค่าความคงตัวแปงสุก	73 (แป้งสุกอ่อน)	87 (แป้งสุกอ่อน)
อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก	1.66	1.69
กลิ่นหอม	หอม	ไม่หอม

ที่มา : ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี (2553)

ตารางที่ 2.3 คุณภาพทางกายภาพของข้าวพันธุ์หอมกระดังงาและขวพันธุซีบูกันตัง

คุณลักษณะ	หอมกระดังงา	ซีบูกันตัง
คุณภาพทางกายภาพ		
ขนาดข้าวเปลือก		
ความยาว (มิลลิเมตร)	8.97	8.41
ความมกว้าง (มิลลิเมตร)	2.75	2.48
ความหนา (มิลลิเมตร)	2.00	1.85
ขนาดข้าวกลอง		
ความยาว (มิลลิเมตร)	6.33	6.20
ควานมกว้าง (มิลลิเมตร)	2.28	2.13
ความหนา (มิลลิเมตร)	1.73	1.62
ความยาว/ความกว้าง	2.78	2.91
รูปร่างเมล็ด	ปานกลาง	ปานกลาง
ท้องไข่	1.30	1.53
น้ำหนักกิโลกรัมต่อถัง	12.04	11.62
น้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด (กรัม)	23.03	19.43
สีข้าวกลอง	สีแดง	สีขาว
สีข้าวเปลือก	ฟาง	ฟาง/รองน้ำตาล10%

ที่มา : ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี (2553)

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

โครงสร้างของเมล็ดข้าวดังแสดงในรูปที่ 2.1 และสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท (งามชื่น, 2542) ดังนี้

1. เปลือกนอก (Husk หรือ Hull) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มผลทั้งหมด เปลือกนอกนี้มีลักษณะสาก สีน้ำตาล มีปริมาณเซลลูโลส (cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เปลือกนอกนี้จะมีสองฝาประกบกัน คือ เปลือกฝาใหญ่ (lemma) และเปลือกฝาเล็ก (palea) เมื่อทำการขัดสี ส่วนนี้เรียกว่า แกลบ ซึ่งมีประมาณ 20% ของข้าวเปลือก

2. จมูกข้าว หรือ คัพภะ (germ หรือ embryo) เป็นส่วนที่จะงอกออกมาเป็นต้นใหม่ ในส่วนนี้จะอุดมไปด้วยสารอาหาร แร่ธาตุ และวิตามินต่าง ๆ เพื่อการเจริญเติบโต สารอาหารที่มีมากคือ โปรตีนซึ่งจะพบอยู่ในรูป protein bodies ไขมันพบอยู่ในรูป lipid bodies วิตามินที่พบมากคือ วิตามินบี (thiamine) วิตามินอี (tocopherol)

3. ข้าวกล้อง (Brown rice) เมื่อแกะเปลือกนอกออกจะได้เมล็ดที่เรียกว่าข้าวกล้อง มีสีต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ซึ่งสารสีเหล่านี้อยู่ในชั้นเยื่อหุ้มผลและเยื่อหุ้มเมล็ด เมื่อทำการขัดสีจะได้เป็นข้าวสารและได้ในส่วนของรำ ซึ่งมีคุณค่าทางอาหารมากมาย ซึ่งมีประมาณ 11% ของข้าวเปลือก ในส่วนนี้จะประกอบด้วย

2.1 เยื่อหุ้มผล (pericarp) เป็นส่วนผิวนอกของข้าวกล้อง จะพบว่ามีสีต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของข้าว

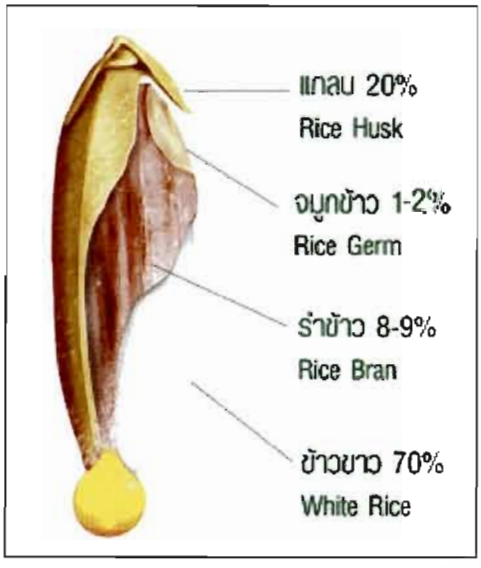
2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat หรือ tegmen) เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผล ประกอบด้วยเนื้อเยื่อสองชั้นเรียงกันเป็นแถว ในส่วนนี้จะพบสารประเภท ไขมัน

2.3 เยื่ออะลิวโรน (aleurone layer) เป็นเยื่อที่ห่อหุ้มเนื้อเมล็ดข้าวสาร (Endosperm) และจมูกข้าว (Embryo) เป็นเนื้อเยื่อที่มีชีวิตเก็บสะสมโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ และมีธาตุฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และโพแทสเซียม

4. เนื้อเมล็ด (endosperm) หรือส่วนที่เรียกว่าข้าวสาร เนื้อเมล็ดจะประกอบไปด้วยโปรตีนบางส่วนและแป้งซึ่งแป้งจะมีมากถึง 69% แป้งในเมล็ดข้าวจะมี 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลแพคติน (Amylopectin)

เมื่อพิจารณาส่วนประกอบของข้าวกล้อง จะพบว่าชั้นของเยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) และเยื่ออะลิวโรน (aleurone layer) อุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ดังนั้นการบริโภคข้าวกล้องมีคุณค่าทางอาหาร แต่เนื้อข้าวจะกระด้างกว่าข้าวขัดขาว ทั้งนี้เพราะเส้นใยจากเซลลูโลส และโปรตีนในข้าวกล้องจะขัดขวางไม่ให้น้ำซึมผ่านเข้าไปภายในเมล็ดได้ง่าย จึงทำให้ข้าวกระด้างและใช้เวลาหุงต้มนานกว่าการหุงข้าวขัดขาว

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว
(ที่มา https://productherb.blogspot.com/2015/)

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.1.3 คุณภาพของข้าว

คุณภาพของข้าวขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์หรือการบริโภค ส่วนใหญ่จะใช้ในรูปของข้าวที่หุงเต็มเมล็ด ดังนั้นคุณภาพทางกายภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญ คุณภาพของเมล็ดข้าวสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.3.1 คุณภาพทางกายภาพ

คุณภาพทางกายภาพ หมายถึง คุณลักษณะภายนอกของเมล็ดที่สามารถมองเห็นได้ สัมผัส และวัดได้ โดยพิจารณาลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

1. สีของเปลือก (Hull pigment) เป็นลักษณะประจำของแต่ละพันธุ์ ส่วนใหญ่มีสีฟางข้าวหรือสีน้ำตาล พันธุ์ข้าวที่ดีควรมีเปลือกสีอ่อน เพราะเปลือกสีเข้ม เมื่อนำไปสีจะได้เปอร์เซ็นต์แกลบสูง

2. สีของเมล็ดข้าว (Pericarp pigment) ส่วนใหญ่มีสีขาว นอกจากนี้ข้าวบางพันธุ์มีสีแดงน้ำตาลหรือสีม่วงจนเกือบดำ ข้าวกล้องที่มีสีเหล่านี้ถือว่าเป็นข้าวคุณภาพเฉพาะและนิยมบริโภคเพื่อคุณภาพทางด้านโภชนาการ

3. ขนาดรูปร่างของเมล็ด (Grain dimension) ในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพพื้นที่เพาะปลูก ขนาดรูปร่างเมล็ดได้แก่ ความยาว ความกว้าง ความหนา และรูปร่างของเมล็ด ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การจำแนกรูปร่างเมล็ดจากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (เครือวัลย์, 2540)

ขนาดของเมล็ด	ความยาว (มิลลิเมตร)
เรียว (Slender)	มากกว่า 3.0 ขึ้นไป
ปานกลาง (Medium)	2.0-3.0
ป้อม (Bold)	2.0 ลงมา

4. ความขาวของข้าวสาร (Milled rice whiteness) ความขาวของเมล็ดมีระดับที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการสี องค์ประกอบทางเคมี ระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวเปลือก เป็นต้น ดังนั้นความขาวของข้าวสารจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของข้าว

5. ความเลื่อมมันของเมล็ดข้าว ข้าวกล้องที่มีความเลื่อมมันดี เมื่อนำไปสีจะทำให้ข้าวไม่หัก ได้ข้าวเต็มเมล็ดมาก

6. ความใสของข้าวสาร (Grain translucency) เป็นลักษณะความโปร่งแสง จะสังเกตเห็นความแตกต่างในเมล็ดข้าวเจ้า ส่วนในเมล็ดข้าวเหนียวจะมีลักษณะขุ่นอย่างเดียว ความใสของเมล็ดข้าวสารจะต่างจากท้องไข่ที่มีลักษณะเฉพาะจุด

7. ข้าวท้องไข่ (Chalky grain) เป็นจุดขุ่นข้าวทึบแสงภายในเมล็ดข้าวเจ้า ซึ่งเกิดจากการจับตัวอย่างหลวมๆระหว่างผลึกแป้ง กลุ่มแป้ง และโปรตีน ทำให้เกิดช่องอากาศเล็ก ๆ ภายในเมล็ด จึงเห็นเป็นลักษณะทึบแสง

8. ข้าวเต็มเมล็ด (Head rice) คือ เมล็ดข้าวที่มีความยาวมากกว่า 8 ส่วนใน 10 ส่วน ของความยาวเมล็ด ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดจะขึ้นอยู่กับชนิดของข้าว คือ เมื่อนำข้าวเมล็ดสั้นไปขัดสี ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่ได้จะสูงกว่าข้าวเมล็ดยาว เนื่องจากข้าวเมล็ดสั้นมีความหนาแน่นมากกว่าจึงทำให้ทนต่อการขัดสีได้สูงกว่าข้าวเมล็ดยาว

คุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)

คุณภาพการหุงต้มเป็นคุณภาพที่ผู้บริโภคใช้ในการตัดสินใจซื้อ เนื่องจากความชอบข้าวสุกของแต่ละคนแตกต่างกัน ปัจจัยที่ทำให้ข้าวพันธุ์ต่าง ๆ มีคุณภาพแตกต่างกันดังนี้

Prince of Songkla University Pattani Campus

1. ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว คือ ความชื้นในเมล็ดข้าวทั้งในข้าวเปลือกและข้าวสาร ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำคัญในการเลือกซื้อขายข้าว เนื่องจากปริมาณความชื้นสามารถบ่งชี้อายุการเก็บรักษาข้าวหรือบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการเก็บรักษาให้ข้าวมีคุณภาพดี (อรอนงค์, 2547)

2. ระยะเวลาในการหุงต้ม (Cooking time) การต้มเมล็ดข้าวให้สุกใช้เวลาแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแป้งสุกการประเมินหาอุณหภูมิแป้งสุก โดยใช้วิธีการสลายเมล็ดข้าวในด่างการแบ่งชนิดข้าวตามอุณหภูมิแป้งสุกได้ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การแบ่งชนิดข้าวตามอุณหภูมิแป้งสุกและการประมาณด้วยค่าการสลายของเมล็ดในด่างที่สัมพันธ์กับระยะเวลาในการหุงต้ม (Juliano, 1985)

อุณหภูมิแป้งสุก (°C)	ประเภทอุณหภูมิแป้งสุก	ค่าการสลายเมล็ดในด่าง	ระยะเวลาในการหุงต้ม (นาที)
ต่ำกว่า 70	ต่ำ	6-7	12-16
70-74	ปานกลาง	4-5	16-24
มากกว่า 75	สูง	1-3	มากกว่า 24

Prince of Songkla University Pattani Campus

3. การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (Elongation ratio during cooking) เมล็ดข้าวมีการขยายตัวทุกด้านในระหว่างการหุงต้ม โดยเฉพาะด้านยาว ซึ่งข้าวสุกที่ยืดตัวได้มากและไม่เหนียวติดกันเป็นข้าวที่หุงขึ้นหม้อช่วยให้ข้าวนุ่มมากขึ้น เพราะการขยายตัวทำให้เนื้อข้าวโปร่งไม่อัดแน่น

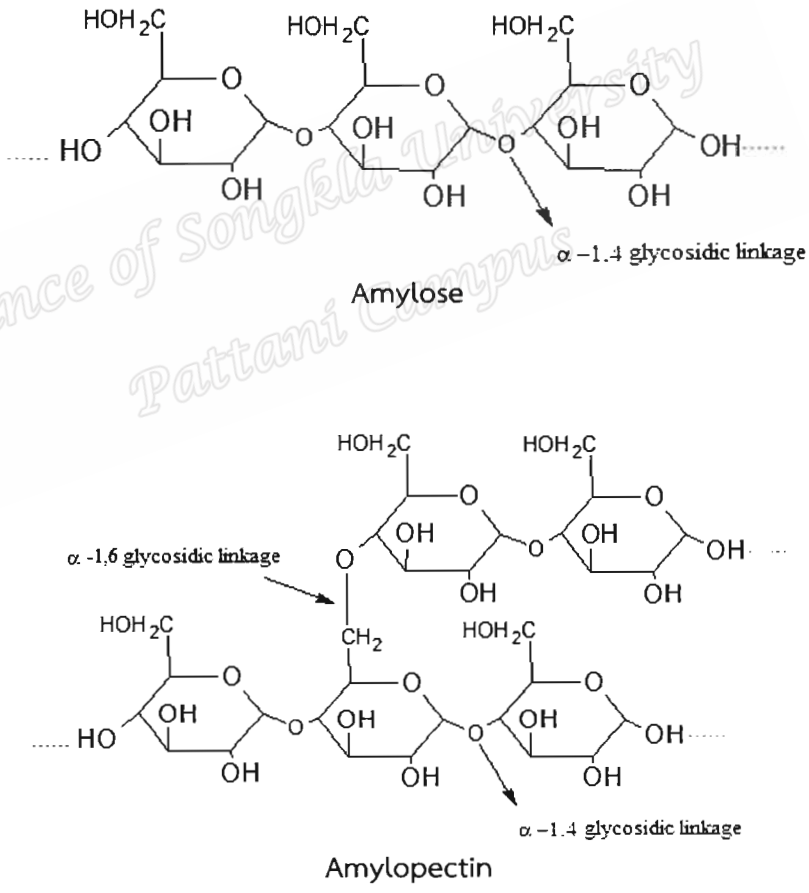
4. ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (Texture analysis) เป็นสมบัติที่สำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกประกอบไปด้วยสมบัติ 2 ประการ คือ ความแข็ง (Hardness) เป็นสมบัติในการต้านทานแรงที่มากระทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเหนียว (Stickiness) เป็นสมบัติในการเกาะกันของเมล็ดข้าว

2.1.3.2 คุณทางเคมีของข้าว

นอกจากคุณภาพทางกายภาพแล้วพบว่าคุณภาพทางเคมีหรือคุณภาพทางโภชนาการก็เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ช่วยให้ผู้บริโภคตัดสินใจในการเลือกซื้อข้าว คุณสมบัติทางเคมีของข้าวประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และแรธาตุต่าง ๆ เป็นต้น โดยปริมาณของสารเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของข้าว ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของข้าวทั้งในลักษณะข้าวเปลือก และข้าวกล้อง ข้าวสาร (อรอนงค์, 2547)

คาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดข้าว ซึ่งจะมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักในสัดส่วนที่แตกต่างกัน สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาร์ไรด์ที่พบมากที่สุดในเมล็ดของข้าวโดยประมาณ 90% มีลักษณะรูปร่างเหลี่ยมหลายเหลี่ยมรวมกันอยู่ในอะไมโลพลาสหรือคลอโรพลาสต์ของเซลล์ (ณัฏฐา และศรวณีย์, 2557) โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชจะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาว ซึ่งโมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยไปด้วยอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) โดยอะมิโลส (Amylose) เป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ในขณะที่อะไมโลเพกติน (Amylopectin) เป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin)

Prince of Songkla University Pattani Campus

ลักษณะของเมล็ดข้าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลส ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจะอยู่ในช่วง 0–2% จะเป็นข้าวเหนียว ส่วนในข้าวเจ้าจะแบ่งออกได้อีกเป็นข้าวที่มีอะไมโลสต่ำ กลาง และสูง เม็ดสตาร์ชจะไม่ละลายในน้ำเย็น แต่เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนผสมกับน้ำ เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเข้าไป พองตัวมากขึ้นจนแตกออก ทำให้เกิดความหนืดข้น เรียกว่า เจลลาติไนเซชัน ลักษณะเหล่านี้มีผลต่อการนำไปแปรรูป (ธนาภร, 2559)

โปรตีน

ปริมาณโปรตีนในข้าวแต่ละชนิดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และโดยทั่วไปจะมีปริมาณน้อยกว่าในธัญพืชชนิดอื่น ปริมาณโปรตีนที่มีในข้าวจะเกิดขึ้นกับส่วนต่าง ๆ ของเมล็ด โดยมีมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ดและเนื้อเมล็ดด้านนอก โปรตีนที่พบมากที่สุดในเมล็ดข้าว คือ ออริซานิน (Oryzanin) ซึ่งเป็นโปรตีนหลักที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนสะสม (storage protein) (Cagampang *et al.*, 1996) โปรตีนที่มีอยู่ในเนื้อเมล็ดจะแทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช โปรตีนที่เชื่อมโยงกับเม็ดสตาร์ชอาจมีผลต่อการเกิดเจลาติไนซ์ของเม็ดสตาร์ช โดยทำให้การพองตัวของเม็ดสตาร์ชไม่เสียรูปร่างได้ง่ายและทำให้โมเลกุลของอะไมโลสไม่ซึมผ่านออกไป มีผลต่อลักษณะความอ่อน หรือแข็งของเจลเมื่อเย็นลง ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่มีลักษณะนุ่ม เหนียวหรือร่วน (เชาวนีพร และคณะ, 2559)

ไขมัน

ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณ 1-3% โดยพบมากที่สุดในส่วนของคัพภะ หรือจมูกข้าว รองลงมา คือส่วนเปลือก และมีในส่วนเนื้อเมล็ดน้อยที่สุด จึงทำให้ในข้าวกล้องมีไขมันมากกว่าข้าวสารหรือข้าวขัดขาว (สุนทร, 2553) โดยไขมันมีความสัมพันธ์กับเมล็ดสตาร์ช 3.ลักษณะ คือ ไขมันอยู่ชิดกันกับโปรตีน ซึ่งอยู่ที่ผิวของเม็ดสตาร์ชภายนอกหรืออาจรวมอยู่กับโครงสร้างของอะไมโลแพกตินสายนอก ลักษณะที่สองไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชโดยเกาะอยู่กับเม็ดสตาร์ช และลักษณะที่สามอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช แต่ไม่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (เชาวนีพร และคณะ, 2559) โดยส่วนใหญ่จะพบไขมันประเภท ไตรกลีเซอไรด์ รองลงมาคือ ฟอสฟอลิพิด (phospholipid) ไกลโคลิพิด (glycolipid) เป็นต้น ไขมันภายนอกและภายในเม็ดสตาร์ชจะเป็นไขมันประเภทสารประกอบมอโนแอซิล (monoacyl) ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว โดยมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่าส่วนข้าวกล้องจะมีไขมันประเภทไม่มีขั้วมาก (neutral lipids) มีไกลโคลิพิด (glycolipid) และฟอสฟอลิพิด (phospholipid) น้อย (ณัฏฐา และศรวณีย์, 2557)

Prince of Songkla University Pattani Campus

แร่ธาตุ

แร่ธาตุเป็นสารอาหารที่สำคัญ จำเป็นต้องได้รับในแต่ละวัน แต่ในปริมาณที่น้อยกว่าคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน แร่ธาตุเป็นสารอาหารที่ไม่ให้พลังงานเหมือนกับสารอาหารทั้ง 3 ชนิด แต่ทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างร่างกาย และทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ในร่างกายให้เป็นปกติเช่น การเต้นของหัวใจ การส่งสัญญาณประสาท การยืดหดตัวของกล้ามเนื้อ การรักษาดุลยภาพของน้ำในร่างกาย และการขนส่งออกซิเจนจากปอดไปยังเซลล์ต่าง ๆ เป็นต้น แร่ธาตุจึงเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย (กัญญา และกันยรัตน์, 2557)

2.1.4 ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice)

ข้าวกล้องงอกหรือข้าวกาบา (Germinated brown riceหรือ GABA-rice) ถือเป็นนวัตกรรมหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice) เป็นการนำข้าวกล้องหรือข้าวเปลือกมาแช่น้ำ ทำให้งอกเป็นตุ่มสีขาวขึ้นมาที่เมล็ดข้าว ซึ่งโดยปกติแล้วในตัวข้าวกล้องเองประกอบด้วยคุณค่าทางโภชนาการที่สูงกว่าข้าวขาว (ตารางที่ 2.6 และ 2.7) และสารอาหารอื่น ๆ เช่น ใยอาหาร กรดไฟติก (Phytic acid) วิตามินซี วิตามินอี และ GABA (Gamma aminobutyric acid) ซึ่งช่วยป้องกันโรคต่าง ๆ เช่นโรคมะเร็ง เบาหวาน และช่วยในการควบคุมน้ำหนักตัว เป็นต้น โดยทั่วไปเมื่อนำข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องมาแช่น้ำเพื่อทำให้งอก จะทำให้เกิดสารอาหารโดยเฉพาะ GABA เพิ่มขึ้นซึ่งนอกจากจะได้ประโยชน์จากการที่มีปริมาณสารอาหารที่สูงขึ้นแล้วยังทำให้ข้าวกล้องงอกที่หุงสุกมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มรับประทานได้ง่ายกว่าข้าวกล้องธรรมดาอีกด้วยจึงง่ายแก่การหุงรับประทานได้โดยไม่ต้องผสมกับข้าวขาวตามความนิยมของผู้บริโภค

ข้าวเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีการเจริญเติบโตจะมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี การเปลี่ยนแปลงจะเริ่มขึ้นเมื่อน้ำได้แทรกเข้าไปในเมล็ดข้าวโดยจะกระตุ้นให้เอนไซม์ภายในเมล็ดข้าวเกิดการทำงาน เมื่อเมล็ดข้าวเริ่มงอก (Malting) สารอาหารที่ถูกเก็บไว้ในเมล็ดข้าวก็จะถูกย่อยสลายไปตามกระบวนการทางชีวเคมีจนเกิดเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลเล็กลง (Oligosaccharide) และน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) นอกจากนี้โปรตีนภายในเมล็ดข้าวก็จะถูกย่อยให้เกิดเป็นกรดอะมิโน และเปปไทด์ รวมทั้งยังพบการการสะสมสารเคมีสำคัญต่าง ๆ เช่น แกมม่าออริซานอล (gamma-Orazynol) โทโคฟีรอล (Tocopherol) โทโคไตรอีนอล (Tocotrienol) และโดยเฉพาะสารแกมม่าอะมิโนบิวทิริกแอซิด (Gamma-Aminobutyric acid) หรือที่รู้จักกันว่า "สารกาบา" (GABA)

จากงานวิจัยของ Kayahara and Tukahara (2000) ได้รายงานว่า การรับประทานข้าวกล้องงอกอย่างต่อเนื่องจะส่งผลดีต่อ สมอง ป้องกันอาการปวดหัว บรรเทาอาการท้องผูก ป้องกันมะเร็งในลำไส้ ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันโรคหัวใจ ลดความดัน โลหิต นอกจากนี้ข้าวกล้องงอกยังประกอบด้วยสาร phytic acid ที่ช่วยต่อต้านการเกิดอนุมูลอิสระ inositols เร่งกระบวนการเผาผลาญไขมันป้องกันการเกิดภาวะหลอดเลือดหัวใจตีบตัน สารประกอบของวิตามินอี (tocotrienols) ปกป้องผิวหนังจากรังสีUV และ prolylendopeptide ป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์อีกด้วย เพราะฉะนั้นการส่งเสริมบริโภคข้าวกล้องงอกจะทำให้คนไทยมีสุขภาพดีขึ้น และจากงานวิจัยของ Osawa *et al*., (2004) พบว่าการนำข้าวกล้องงอกให้ผู้ป่วยที่มีความดันโลหิตสูงรับประทานใน 4 สัปดาห์ สามารถลดความดันโลหิตคนไข้ได้

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก ทำได้ 2 วิธีหลัก ๆ คือ โดยการนำข้าวกล้องมาผ่านกระบวนการงอกและการนำข้าวเปลือกมาผ่านกระบวนการงอกหรือที่เรียกว่าการทำ “ข้าวมอลต์” ซึ่งมีรายงานว่าได้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากกว่าการทำข้าวกล้องงอกจากข้าวกล้องโดยเฉพาะปริมาณวิตามินบี 2 (Puangwerakul, 2008) ข้าวมอลต์มีวิธีการทำคล้ายกับข้าวกล้อง คือนำเอาข้าวเปลือกมาผ่านกระบวนการทำให้เกิดการงอก (Malting process) ที่ประกอบด้วยการแช่ข้าวเปลือก เพาะให้งอก นึ่ง และการทำให้แห้ง เช่น การคั่วก่อนที่จะนำมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องสีข้าว (มหาวิทยาลัยรังสิตและสำนักงานวิจัยและพัฒนาการเกษตร, 2553 และนงนุช, 2555) จากการศึกษา พบว่าการผลิตข้าวกล้องงอกจากข้าวเปลือกจะให้คุณค่าทางโภชนาการที่สูงกว่าการผลิตข้าวกล้องงอกจากข้าวกล้อง แต่ให้ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดต่ำ (อุมา และลำพึง, 2550) แต่เมื่อนำมาผ่านกระบวนการนึ่งจะทำให้ข้าวกล้องงอกมีร้อยละข้าวเต็มเมล็ดที่สูงกว่าข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านกระบวนการนึ่ง อีกทั้งยังพบว่าผลจากการผ่านกระบวนการเหล่านี้จะทำให้ได้ข้าวมอลต์ที่มีรสหวานจากการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล ทำให้ข้าวมอลต์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีรสชาติดี และมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวและยังทำให้เกิดการสร้างวิตามินบีเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากวิตามินบีต่าง ๆ ยังคงอยู่หรือที่มีมากขึ้น ถูกสะสมกักเก็บอยู่ในเมล็ดข้าวนั้น ๆ

การผลิตข้าวมอลต์จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณ์ และสร้างมูลค่าเพิ่มด้วยวิธีที่ทำได้ง่ายลงทุนต่ำ สามารถเก็บรักษาได้ง่ายในลักษณะข้าวเปลือกมอลต์ จึงช่วยลดการสูญเสียและการสูญสลายของสารอาหารได้ตลอดอายุการเก็บรักษาเป็นการเพิ่มทางเลือกในการแปรรูปข้าวแก่เกษตรกรที่สามารถดำเนินการได้จริงระดับครัวเรือน ดังนั้นในการทำวิจัยในครั้งนี้จะทำการเพาะข้าวเปลือกให้เป็นข้าวเปลือกงอกแบบวิธีที่เรียกว่า การมอลต์ข้าว มีรายงานการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวกล้องงอกออกมาเป็นจำนวนมาก เช่น การศึกษาปริมาณของสารฟีนอลิก รวมทั้งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ เช่น ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด วิตามินอี วิตามินบี 1 (วรัมพร และคณะ, 2012) กรดไฟติก

สารแกมม่าโอไรซานอล (Cho *et al.*, 2012) กรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ และสารกาบา (Kim *et al.*, 2012; Vichapong *et al.*, 2010) ยกตัวอย่างเช่น Moongngarm and Saetung (2010) ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณโปรตีน ปริมาณกรดอะมิโนอิสระรวม วิตามินอี สารแกมม่าโอไรซานอล ไทอามีน ไนเอซิน และปริมาณของไพริออกซินใน 1) ข้าวมอลต์ 2) ข้าวกล้องงอก 3) สารสกัดจากข้าวกล้องงอก และ 4) ในข้าวกล้องที่ยังไม่ผ่านการงอก จากรายงานพบว่าในข้าวมอลต์และสารสกัดจากข้าวกล้องมีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากกว่าในข้าวกล้องงอกและในข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก โดยในข้าวมอลต์และสารสกัดจากข้าวกล้องงอกจะมีปริมาณของสารกาบาและกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ อยู่ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอกและในข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก กระบวนการงอกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวมอลต์และสารสกัดจากข้าวกล้องอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดต่าง ๆ เช่น สารประกอบฟีนอลิก วิตามินอี สารโอไรซานอลที่ผสมกันอยู่ทำให้ข้าวมอลต์และสารสกัดจากข้าวกล้องงอก ที่อาจจะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารหรืออุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้อีก เพราะสารอาหารเหล่านี้เป็นสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อผู้บริโภค และเมื่อเปรียบเทียบข้าวมอลต์และข้าวกล้องงอกพบว่าการทำข้าวมอลต์จะใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าอัตราการงอกสูงกว่าและการทำข้าวมอลต์ยังสามารถพัฒนาไปในระดับกึ่งอุตสาหกรรมและระดับอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 2.6 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้อง 100 กรัม

คุณค่าทางโภชนาการ	ข้าวกล้อง
1. ความชื้น (กรัม)	11.17
2. โปรตีน (กรัม)	8.34
3. ไขมัน (กรัม)	2.27
4. คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	76.89
5. ใยอาหาร (กรัม)	5.12
6. เถ้า (กรัม)	1.33
7. ค่าพลังงาน (กิโลแคลอรี)	361.35

ที่มา : สำนักพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว กรมการข้าว (2550)

ตารางที่ 2.7 คุณค่าทางโภชนาการระหว่างข้าวกล้อง และข้าวขาว 100 กรัม

คุณค่าทางอาหาร	ข้าวกล้อง	ข้าวขาว	ดีกว่า %
1. โปรตีน	7.6	6.4	19
2.Thiamine(B1) (มิลลิกรัม)	0.34	0.07	385
3.Riboflavin (B2) (มิลลิกรัม)	0.05	0.03	66
4. Niacin (B3) (มิลลิกรัม)	0.62	0.11	463
5. Pantothenic acid (B5) (มิลลิกรัม)	1.5	0.25	81
6. Folic acid (มิลลิกรัม)	20	3	455
7. แคลเซียม (มิลลิกรัม)	32	24	33
8. เหล็ก (มิลลิกรัม)	1.6	0.8	100
9. แมกนีเซียม (มิลลิกรัม)	52	14	271
10. แมงกานีส (มิลลิกรัม)	1.5	0.9	67
11. สังกะสี (มิลลิกรัม)	1.9	1.5	27
12. โคบอลต์ (ไมโครกรัม)	4.2	0.9	367
13. ทองแดง (ไมโครกรัม)	360	230	57
14. ไอโอดีน (ไมโครกรัม)	2.2	2	10

ที่มา : สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร (2542)

Prince of Songkla University Pattani Campus

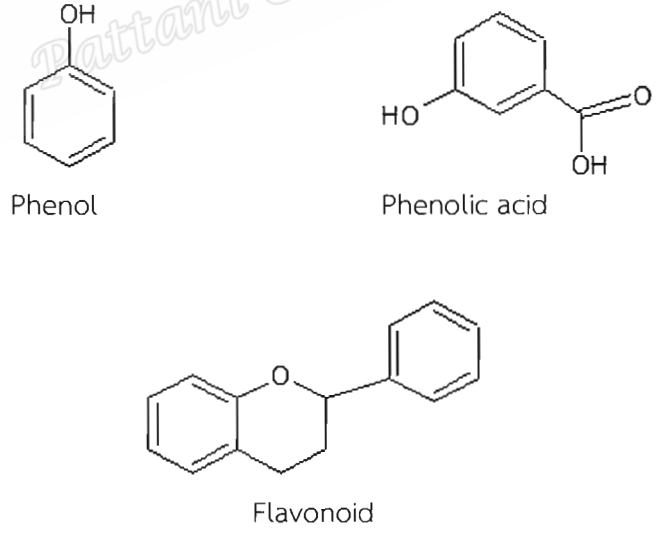
2.1.5 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวกล้องงอก

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในข้าวกล้องงอกมีมากมายหลายชนิด เช่น สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) สารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) โทโคฟีรอล (Tocopherol) ออไรซานอล (Oryzanol) กาบา (γ-aminobutyric acid) เป็นต้น (Carlos, 2007) อีกทั้งยังพบสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanins) และสารโปรแอนโทไซยานิดิน (Proanthocyanidins) ในข้าวกล้องงอกที่มีสี โดยจะพบสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanins) ในข้าวกล้องงอกที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีม่วงดำ และพบสารโปรแอนโทไซยานิดิน (Proanthocyanidins) ในข้าวกล้องงอกที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลแดง (Yu-Ping and Hsi-Mei, 2016) สารเหล่านี้จะมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลิสระ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของข้าว

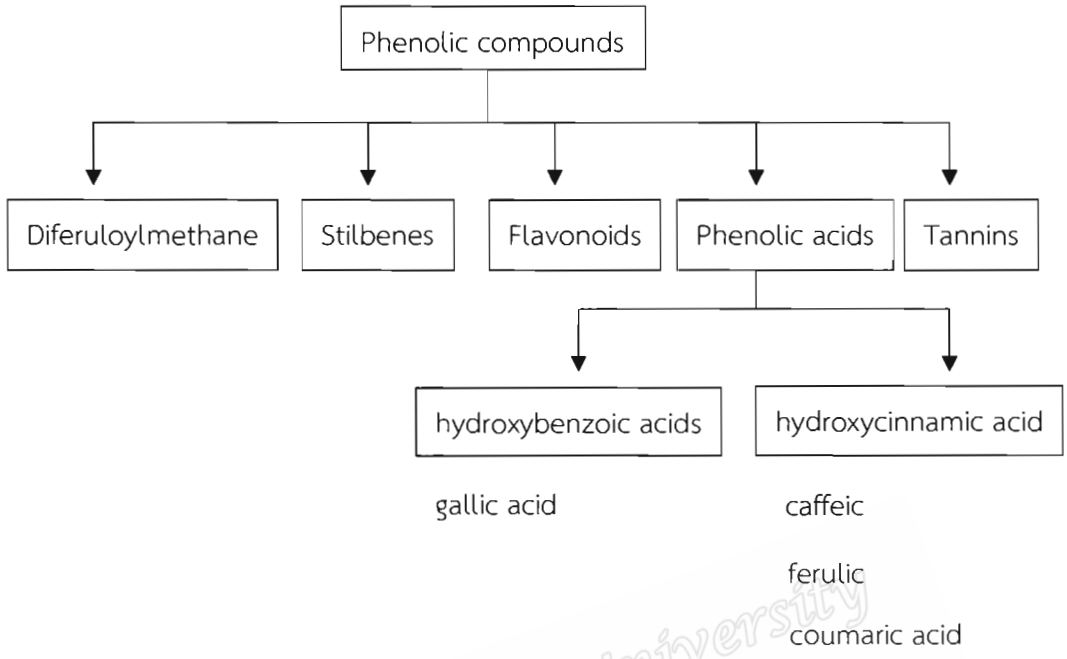
สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound)

สารประกอบฟนอลิกพบได้มากในธรรมชาติได้แก พืชผัก ผลไม้ ชาเขียว ชาดำ ช็อกโกแลต และไวนแดง เป็นต้น ปจจุบันพบสารประกอบฟนอลิกมากกวา 8,000 ชนิด ในธรรมชาติโดยมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันไปตั้งแต่โมเลกุลอย่างง่าย เชน กรดฟนอลิก (Phenolic acid) ฟนิลโปรพานอยด์ (Phenylpropanoids) และฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ไปจนถึงโครงสร้างโพลิเมอรที่ซับซ้อน เชน ลิกนิน (Lignin) เมลานิน (Melanin) และแทนนิน (Tannin) เป็นต้น โครงสร้างโดยทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก ดังรูปที่ 2.3 ปริมาณสารกลุ่มฟนอลิกในธรรมชาติจะมีปริมาณที่แตกต่างกันไปตามชนิดของพืช วิธีการปลูก กระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา การใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปมีส่วนทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลง (เนตรนภา และเฉลิม, 2557) สารประกอบฟนอลิกมีบทบาทสำคัญเนื่องจากมีฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรีย ไวรัส การอักเสบ การแพ สลายลิ่มเลือด รวมทั้งยังเป็นสารต่านการกอมะเร็ง เป็นต้น (ปริยานุช, 2551) สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารประกอบที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกและมีหมู่ไฮดรอกซิลลอย่างน้อย1 หมู่ สารประกอบฟีนอลิกมีมากมายหลายชนิดสามารถจำแนกได้ดังรูปที่ 2.4

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโดยทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก



รูปที่ 2.4 การจำแนกสารประกอบฟีนอลิก (ลือชัย, 2555)

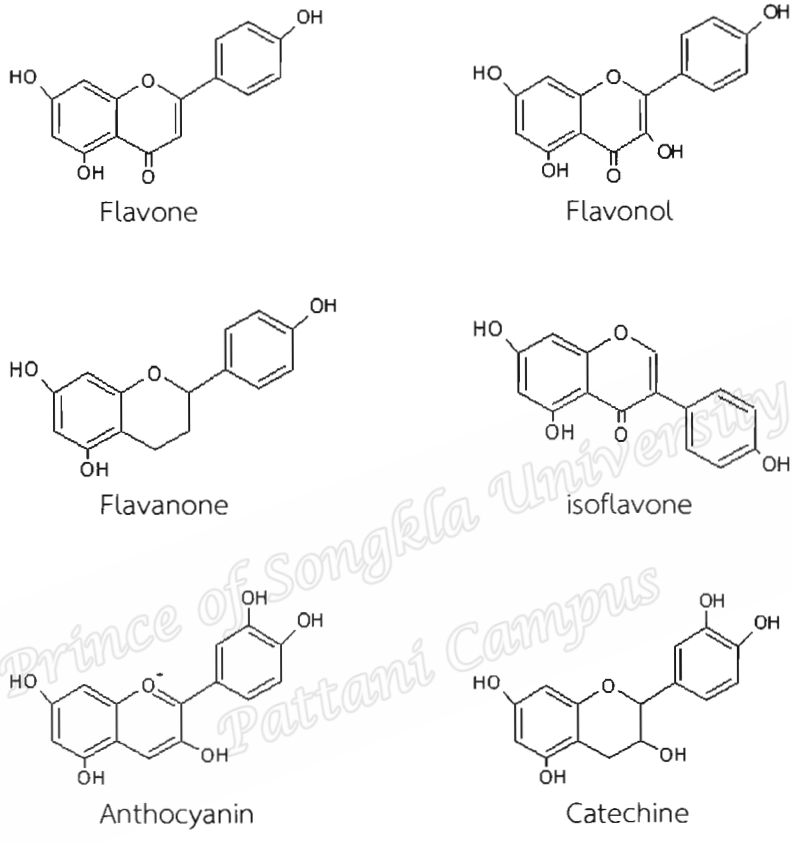
Prince of Songkla University Pattani Campus

สารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoid compound)

ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) เป็นสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ประเภทพอลิฟีนอล (polyphenol) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) รวมอยู่ในโมเลกุลตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป (รูปที่ 2.3) สามารถละลายในน้ำ ส่วนใหญ่มักพบอยู่รวมกับน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) สารประกอบฟลาโวนอยด์ ได้แก่ flavonol, flavanone, flavone, isoflavone, catechin และ anthocyanins เป็นต้น (Xiao *et al*., 2013) โดยมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.5 สารประกอบฟลาโวนอยด์สามารถพบได้ใน พืช ผักและผลไม้ เช่น ถั่วเหลือง กระชายดำ สารสกัดจากเมล็ดองุ่น รวมทั้งเครื่องดื่มต่าง ๆ เช่น ชา และไวน์เป็นต้น จะเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชั่น (hydroxylation reaction) และปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชั่น (esterification reaction) กับน้ำตาลและบางครั้งก็มีหมู่เอซิล (acyl group) อยู่ในโมเลกุลด้วยเช่นเดียวกับแอนโทไซยานิน (anthocyanin) สารประกอบฟลาโวนอย์ทนต่อความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ได้ดีกว่าแอนโทไซยานิน (anthocyanin) (ณัฏฐิกา, 2548) สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์จัดเป็น nutraceutical

JOHN F.KENNEDY LIBRARY
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
PATTANI THAILAND

ที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) โดยทำหน้าที่ในการหน่วงเหนี่ยวหรือเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) จึงช่วยหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระได้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoid compounds) (Xiao *et al.*, 2013)

แอนโทไซยานิดิน (Anthocyanin) และโปรแอนโทไซยานิดิน (Proanthocyanidin)

ข้าวประกอบด้วยสารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoid) 3 กลุ่ม คือ แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) (รงควัตถุสีม่วงถึงม่วงดำ) ฟลาโวนอล (flavonols) (รงควัตถุไม่มีสีถึงเหลืองอ่อน) และโปรแอนโทไซยานิดิน (proanthocyanidin) (รงควัตถุสีแดงและสีน้ำตาล) แอนโทไซยานิน

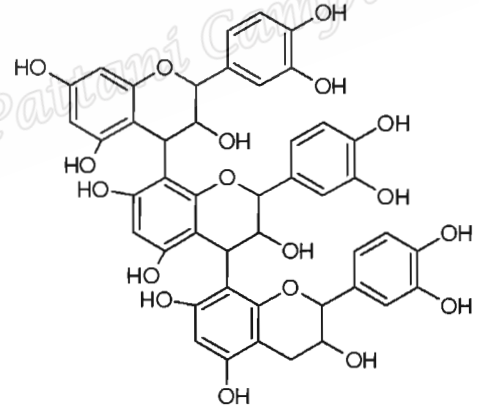
Prince of Songkla University Pattani Campus

15/3
2561

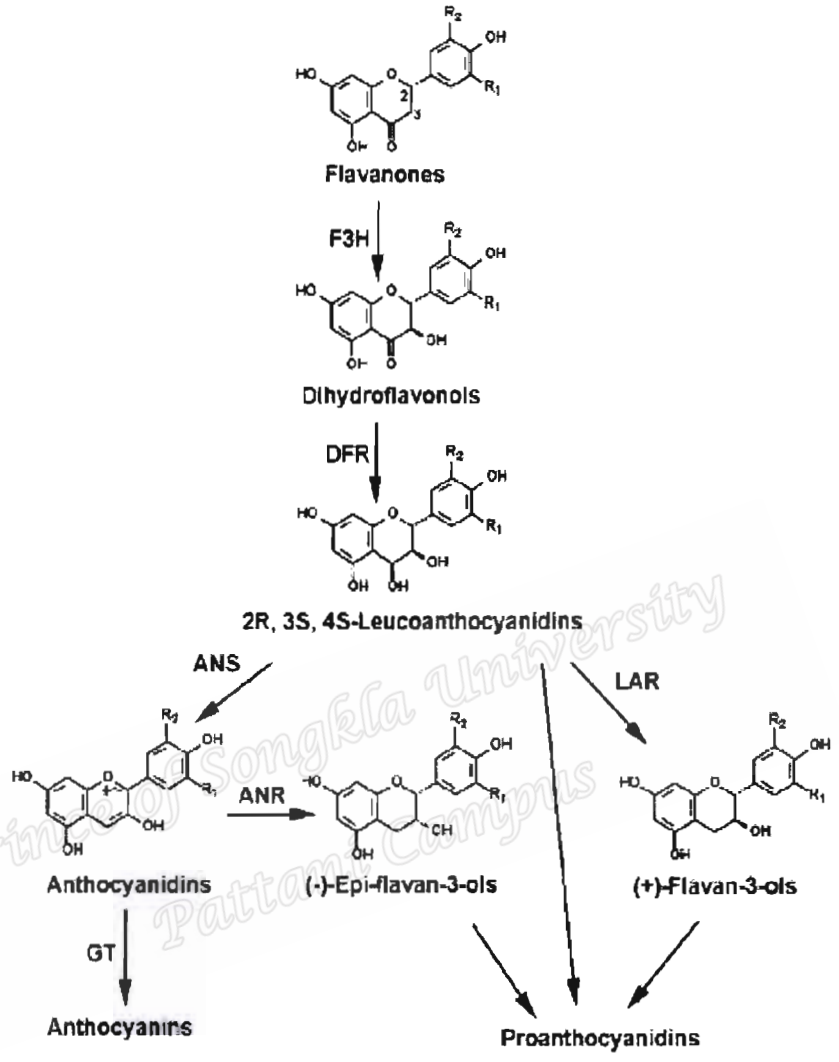
(Anthocyanin) จะถูกสังเคราะห์ในเนื้อเยื่อพืช ส่วนโปรแอนโทไซยานิดิน (proanthocyanidin) ถูกสังเคราะห์ในเยื้อหุ้มเมล็ด (pericarp) (Finocchiaro *et al*, 2010)

แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) มีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยคาร์บอน 6 อะตอม คาร์บอน 3 อะตอม คาร์บอน 6 อะตอม (C-6-C-3-C-6) เชื่อมต่อกันดังรูปที่ 2.5 แอนโทไซยานินมีหลายชนิดโดยชนิดที่พบมาก คือ cyanidin-3-glucoside และ peonidin 3-glucoside ส่วนโปรแอนโทไซยานิดิน (proanthocyanidin) มีขนาดโมเลกุลใหญ่เป็น oligomer หรือ polymer ของสาร monomeric flavan-3-ol จึงอาจเรียก oligomeric proanthocyanidins (OPCs) มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.6 การสังเคราะห์สารทั้งสองชนิดจะใช้ Flavanone ในการเป็นสารตั้งต้นโดยจะผ่านกระบวนการต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.7 (Xie and Dixon, 2005) สารทั้งสองชนิดมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตและทำลายเซลล์มะเร็ง ป้องกันไวรัส ลดอัตราการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน แก่ช้าลง ผิวดูอ่อนวัย และลดอาการผมหงอกก่อนวัย แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) และโปรแอนโทไซยานิดิน (proanthocyanidin) มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี สลายตัวได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับด้วยความร้อน ออกซิเจน และแสง เมื่อโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีด้วย (Lazze *et al*., 2004)

Prince of Songkla University Pattani Campus



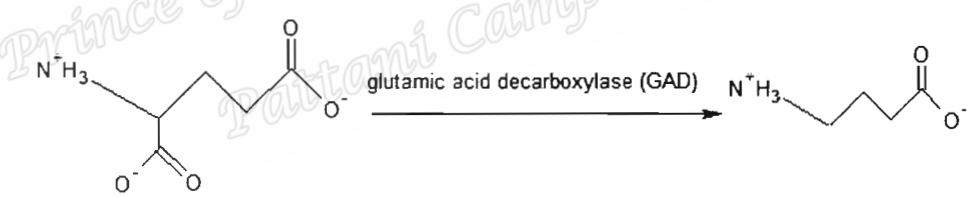
รูปที่ 2.6 โครงสร้าง proanthocyanidin (Natural Product, 2559)



รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์ Anthocyanins และ Proanthocyanidins (Xie and Dixon, 2005) Flavanone 3-hydroxylase (F3H); Dihydroflavonol reductase (DFR); Anthocyanidins synthase (ANS); Anthocyanidin reductase (ANR); Leucoanthocyanidin reductase (LAR); anthocyanidin glycosyltransferase (GT).

γ-aminobutyric acid (GABA)

แกมมาอะมิโนบิวทิริกเอซิด (γ-aminobutyric acid) หรือ กาบา (GABA) เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดหนึ่งที่พบในข้าว พืชตระกูลถั่ว และธัญพืช เป็นต้น โดยพบว่าในเมล็ดที่เริ่มงอกจะพบสารในกลุ่มนี้มากขึ้นเนื่องจากเป็นสารที่มีเกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายในเมล็ด และถูกสังเคราะห์จากกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ของกรดกลูตามิก (Glutamic Acid) ด้วยเอนไซม์กลูตาเมทดีคาร์บอกซิเลส (Glutamate Decarboxylase) และใช้วิตามินบีหกในรูปไพริดอกซอลฟอสเฟต (pyridoxal phosphate; PLP) เป็นโคแฟคเตอร์ซึ่งจะเปลี่ยนจากกรดแอลกลูตามิก (L-glutamic Acid) เป็นแกมมาอะมิโนบิวทิริกเอซิด (γ-aminobutyric acid) หรือ กาบา (GABA) (จันทรพร, 2558) ดังรูปที่ 2.8 สารกาบามีหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทประเภทยับยั้ง (inhibitory neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง เพื่อรักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุนจากความกังวลและความเครียด ทำให้สมองเกิดการผ่อนคลาย ช่วยกระตุ้นการทำงานของต่อมไร้ท่อ ในการผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต ช่วยป้องกันการสะสมของไขมัน lipotropic ในร่างกาย (Powers *et al.*, 2008)



รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์ γ-aminobutyric acid (GABA)

2.1.6 สารต้านอนุมูลอิสระ

โดยทั่วอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกายจะมาจากกระบวนการเผาพลาญสารอาหาร ซึ่งจะทำให้ได้อนุมูลอิสระ (free radicals) เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังได้รับจากมลภาวะต่าง ๆ เช่น แสงอัลตราไวโอเลต ultraviolet ควันไฟ มลพิษทางอากาศ หรือควันจากการสูบบุหรี่ เป็นต้น (ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร ออนไลน์, 2554) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกายจะมีความเป็นพิษต่อเซลล์สูงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลภายในเซลล์ เช่น ลิปิด โปรตีน กรดนิวคลีอิก

Prince of Songkla University Pattani Campus

เป็นต้น ทำให้โปรตีนเสียสภาพทางธรรมชาติ (lipid peroxidation) และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารพันธุกรรมเป็นสาเหตุให้ร่างกายเกิดความผิดปกติต่าง ๆ เช่น โรคชรา โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคเสื่อมของระบบต่าง ๆ ในร่างกาย รวมถึงกระตุ้นการพัฒนาของเซลล์มะเร็งในร่างกาย เป็นต้น อนุมูลอิสระสามารถถูกกำจัดด้วยสารที่เรียกว่า สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) ซึ่งจะไปจับกับอนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระมีความเสถียร ส่งผลให้หยุดกระบวนการเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ได้ (เจนจิราและประสงค์, 2554)

สารตานอนุมูลอิสระมีมากมายหลายชนิดโดยจะทำหน้าที่แตกต่างกันไป ซึ่งมีทั้งที่เป็นเอนไซมและไม่เป็นเอนไซม สารประกอบที่ละลายในน้ำและสารประกอบที่ละลายในไขมัน โดยสารตานอนุมูลอิสระเหลานี้มีกลไกในการทำงานหลายแบบดังนี้

1. ดักจับอนุมูลอิสระ (radical scavenging)

เป็นการยับยั้งอนุมูลอิสระโดยการทำให้โมเลกุลของอนุมูลอิสระมีความเสถียร โดยการให้ไฮโดรเจนหรืออิเล็คตรอนแก่อนุมูลอิสระ (Valacchi *et al*., 2004) ดังสมการที่ 1 สารที่มีกลไกการออกฤทธิ์แบบนี้ได้แก่ Butylated hydroxyl anisole (BHA) Vitamin E (alpha-tocopherol) เป็นต้น

Prince of Songkla University Pattani Campus

$$R^{\bullet} + AH \longrightarrow RH + A^{\bullet} \qquad (1)$$

2. ยับยั้งการทำงานของซิงเกล็ทออกซิเจน (Singlet oxygen quenching, $^1O_2$*)

เป็นยับยั้งการทำงานของซิงเกล็ทออกซิเจน โดยการเปลี่ยนซิงเกล็ทออกซิเจน ($^1O_2$*) ให้อยู่ในรูปทริปเปล็ท (triplet oxygen, ($^3O_2$)) (Sies *et al*., 1992) ดังสมการที่ 2 สารที่มีกลไกการออกฤทธิ์แบบนี้ได้แก่ carotenoids

$$^1O^{\bullet}_2 + {}^1\text{Carotenoids} \longrightarrow {}^3O_2 + {}^3\text{Carotenoids}^{\bullet} \qquad (2)$$

3. จับกับโลหะ (metal chelation)

โลหะที่มีผลต่อการเกิดอนุมูลอิสระคือ Fe^{2+} และ Cu^{2+} ซึ่งจะไปเร่งให้เกิดปฏิกิริยา oxidation ในร่างกายเกิดเป็นอนุมูลอิสระหลายประเภท ดังนั้นจึงต้องมีสารไปจับกับโลหะหนักเหล่านี้ เพื่อชะลอการเกิดอนุมูลอิสระในร่างกายได้ สารที่มีกลไกการออกฤทธิ์แบบนี้ได้แก่ flavonoids, phosphoric acid, citric acid และ ascorbic acid เป็นต้น (Sanchez-Moreno *et al*., 2000)

4. หยุดปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ (chain-breaking)

สารที่มีกลไกการออกฤทธิ์แบบนี้ได้แก่ วิตามินอี (α-tocopherol) โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็คตรอน (electron-acceptor antioxidants) จากอนุมูล peroxyl (ROO•) (Burton and Traber, 1990)

5.เสริมฤทธิ์ (synergism)

สารที่ช่วยในการสนับสนุนให้สารต้านอนุมูลอิสระทำงานได้ดีขึ้น เช่น การทำงานร่วมกันระหว่างวิตามินอี (α-tocopherol) กับวิตามินซี (ascorbic acid) โดยที่วิตามินซี ให้ไฮโดรเจนแก่วิตามินอี เพื่อให้ทำงานได้ดีขึ้นกว่าเดิม (Frankel, 1998)

6. ยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ (enzyme inhibition)

เป็นการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ลิโพออกซีจีเนส (lipoxygenase) โดยจะเข้าไปจับกับไอออนของเหล็กซึ่งเป็นโคแฟกเตอร์ (cofactor) ส่งผลให้เอ็นไซม์ดังกล่าวหยุดทำงาน สารที่มีกลไกการออกฤทธิ์แบบนี้ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกบางชนิด เช่น ฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก (phenolic acid) และแกลเลต (gallates) (Puerta, 1999)

การวิเคราะห์หาความสามารถในการตานออกซิเดชัน (Total Antioxidant Capacity, TAC)

การวิเคราะห์หาความสามารถในการต้านออกซิเดชัน มีหลายวิธี (Dejian and Boxin, 2005) ได้แก

1. การวิเคราะห์จากการส่งผ่านอะตอมไฮโดรเจน (Hydrogen atom transfer, HAT) เชน

- วิธี Oxygen radical absorbance capacity assay (ORAC)
- วิธี Total radical – trapping antioxidant parameter (TRAP)

วิธี oxygen radical absorbance capacity (ORAC) assay และ total radical trapping antioxidant parameter (TRAP) assay เป็นวิธีการวัดปริมาณอะตอมไฮโดรเจนที่มีการแลกเปลี่ยน โดยจะทำการวัดการเรืองแสงของสารฟลูออเรสเซนตที่ลดลงเมื่อเกิดการออกซิเดชัน เมื่อมีสารตานออกซิเดชันในระบบสารต้านออกซิเดชันจะไปแย่งจับกับสารเรืองแสง สงผลใหความเข้มของสารฟลูออเรสเซนซลดลง (วิจิตรา และทองลา, 2557)

Prince of Songkla University Pattani Campus

2. การวิเคราะห์จากการส่งผานอิเล็คตรอนเดี่ยว (Electron transfer, ET หรือ SET) เชน

- วิธี 2,2-diphenyl–1–picrylhydrazyl assay (DPPH)

วิธีนี้จะวัดความสามารถในการยับยั้ง DPPH ซึ่ง DPPH จะเป็นสารอนุมูลอิสระประเภทไนโตรเจนที่คอนข้างคงตัว ช่วงเริ่มต้นของการทดลองจะใหสารสีม่วง เมื่อเกิดปฏิกิริยากับสารต้านออกซิเดชันสารจะมีสีจางลง (เหลือง) ดังสมการที่ 3 วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย มีความแม่นยำ ใช้เวลาน้อยและใช้เครื่องมือแคเครื่องวัดการดูดกลืนแสงเทานั้น เหมาะสำหรับวัดสมบัติการต้านออกซิเดชันในสารสกัดผักและผลไม้ แต่ไม่เหมาะกับพลาสมา เนื่องจากสาร DPPH ตองละลายในเมทานอล จึงสงผลใหเกิดการตกตะกอนของโปรตีน (Sanchez-Moreno, 2002) ส่วนข้อเสียของวิธีนี้ คือ อนุมูลอิสระ $DPPH^{\bullet}$ มีความคงตัวไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเหมือนอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในเซลล์ วิธีนี้จึงไม่สามารถแยกแยะหรือจัดอันดับอนุมูลอิสระที่มีความไวสูงได้

$$DPPH^{\bullet} + RH \longrightarrow DPPH\text{-}H + R^{\bullet} \qquad (3)$$

สีม่วง ตัวอย่าง สีเหลือง

- วิธี The ferric reducing ability of plasma assay (FRAP)

เป็นวิธีการที่สารต้านอนุมูลอิสระถ่ายเทอิเล็คตอนให้กับสารประกอบเชิงซ้อน $[Fe(III)(TPTZ)_2]^{3+}$ แล้วเปลี่ยนรูปเป็น $[Fe(II)(TPTZ)_2]^{2+}$ ดังสมการที่ 4 ปริมาณ $[Fe(II)(TPTZ)_2]^{2+}$ ที่เกิดขึ้นสามารถประมาณความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระได้ในรูป FRAP value เทียบกับสารมาตรฐานเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ข้อดีของวิธีนี้ คือ เป็นวิธีที่ง่าย ไม่แพง ข้อเสีย คือ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นไม่เกี่ยวข้องกับสภาวะร่างกาย (ปรียนันท์, 2549)

$$[Fe\ (III)(TPTZ)_2]^{3+} + \text{antioxidant} \longrightarrow [Fe\ (II)(TPTZ)_2]^{2+} \qquad (4)$$

- วิธี 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS)

วิธีนี้เป็นวิธีวัดทางอ้อมโดยใช้สาร 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) หรือ ABTS มาทำให้เป็นอนุมูลอิสระด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ถ้าในระบบการทดลองมีการต้านออกซิเดชันจะทำให้ $ABTS^{+\bullet}$ ลดลง โดยแสดงสีที่จางลง ดังสมการที่ 5 ข้อดีของวิธีนี้ คือ ทำง่าย อนุมูลอิสระ $ABTS^{+\bullet}$ จะทำปฏิกิริยาเร็วกับสารต้านอนุมูลอิสระ อีกทั้งยังสามารถละลายได้ทั้งในน้ำและในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ABTS ไม่เป็นสารตามธรรมชาติที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระในเซลล์หรือในร่างกาย (Re *et al.*, 1999)

Prince of Songkla University Pattani Campus

$$ABTS^{+\bullet} + \text{antioxidant} \longrightarrow ABTS \quad (5)$$

สีเหลืองเข้ม ไม่มีสี

2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการงอกของเมล็ด

เมล็ดข้าวที่งอกจะต้องมีปัจจัยการงอกที่เหมาะสมทั้งตัวของเมล็ดและสภาพแวดล้อมภายนอก เมื่อเมล็ดข้าวได้ปัจจัยที่เหมาะสมเพียงพอต่อความต้องการ เมล็ดข้าวสามารถงอกได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการงอกของเมล็ดมีดังนี้ (วันชัย, 2553)

1. **น้ำ** เป็นตัวกระตุ้นกระบวนการงอกของเมล็ด กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาเคมีและกระบวนการเมแทบอลิซึม โดยเมล็ดจะดูดน้ำเข้าไปทำให้เปลือกเมล็ดอ่อนนุ่ม ทำให้เมล็ดพองโต เมื่อเปลือกเมล็ดอ่อนนุ่มทำให้รากแทงออกมาได้ง่าย สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการดูดน้ำ ได้แก่ ความหนาของเปลือก สารที่เคลือบอยู่ที่ผิวเปลือก ความเข้มข้นของน้ำและการสุกแก่ของเมล็ด เป็นต้น
2. **ออกซิเจน** ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการหายใจของเมล็ดข้าวที่กำลังงอกโดยเมล็ดข้าวที่กำลังจะงอกจะมีอัตราการหายใจสูงเมื่อเทียบกับการหายใจในช่วงอื่น ๆ และจะมีกิจกรรมการสลายและเผาผลาญอาหารที่เก็บสะสมไว้ นอกจากอัตราการใช้ออกซิเจนจะเป็นตัวชี้การเกิดกระบวนการงอกแล้วก็ยังเป็นตัววัดความแข็งแรงของเมล็ดด้วย
3. **อุณหภูมิ** อุณหภูมิที่เหมาะสมช่วยให้เมล็ดดูดน้ำและกระบวนการงอกของเมล็ดเกิดเร็ว พืชมีความต้องการอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการงอกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและถิ่นกำเนิดของพืช อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่เหมาะสมของพืชเมืองร้อนย่อมสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของพืชเมืองหนาว อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด คือ อุณหภูมิที่สามารถงอกได้เร็วและมีเปอร์เซ็นต์การงอกสูง
4. **แสง** เมล็ดพันธุ์บางชนิดอาจจะต้องการแสงเพียงเพื่อกระตุ้นการงอก สำหรับเมล็ดพันธุ์บางชนิดแสงเป็นตัวยับยั้งการงอก นอกจากนี้ การตอบสนองของแสงต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และระยะเวลาการดูดน้ำของเมล็ดด้วย

2.1.8 การนึ่งข้าวเปลือก (Rice parboiling)

การนึ่งข้าวมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพข้าวเปลือกที่มีคุณภาพการขัดสีต่ำและมีความชื้นสูงให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยลดปริมาณข้าวหักระหว่างการขัดสี เพิ่มปริมาณต้นข้าว และ

เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ (เครือวัลย์, 2536) การนึ่งข้าวจะได้เปอร์เซ็นต์ข้าวหักและปริมาณอะไมโลสน้อยกว่าข้าวทั่วไป แต่มีปริมาณวิตามินบี 1 (Thiamine) สูงกว่าข้าวดิบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการนึ่ง (Otegbayo *et al*., 2001) นอกจากนี้การนึ่งข้าวยังมีผลต่อการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารภายในเมล็ดข้าว โดยเฉพาะธาตุเหล็กและสังกะสีที่มีการศึกษากันเป็นจำนวนมากและพบว่าธาตุเหล็ก (Fe) ในข้าวขาวมีปริมาณเพิ่มสูงกว่าข้าวดิบแต่มีปริมาณธาตุสังกะสี (Zn) น้อยกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพการนึ่งและพันธุ์ข้าว (ขวัญชนก, 2553) จะเห็นได้ว่ากระบวนการนึ่งข้าวสามารถเพิ่มคุณภาพข้าวได้ทั้งคุณภาพการขัดสีและคุณภาพทางโภชนาการ การนึ่งต้องทำให้ข้าวเปลือกทั้งเมล็ดได้รับอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งเท่าๆ กันปกติจะใช้เวลา 15-30 นาที ที่อุณหภูมิ 100-105 ^{o}C โดยเวลาที่พอเหมาะในการนึ่งสามารถลดปริมาณการเกิดท้องไข่ เนื่องจากความร้อนและความชื้นสามารถเข้าสู่แกนกลางของเมล็ด ทำให้เกิดแป้งสุกหรือเจลลาติไนซ์ได้เต็มที่ ข้าวที่ผ่านกระบวนการนึ่งจะมีลักษณะโปร่งใสทั้งเมล็ด แต่ถ้าใช้เวลาในการนึ่งนานทำให้ข้าวนึ่งมีลักษณะสีคล้ำ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการนึ่งจะมีความชื้นที่สูง ซึ่งจะทำให้ข้าวเสื่อมสภาพได้ง่าย ดังนั้นเพื่อต้องการรักษาคุณภาพของข้าวให้เก็บได้นานจึงต้องทำการอบแห้ง เพื่อลดความชื้นของข้าวกล้องงอก

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.1.9 การอบแห้งข้าวเปลือก

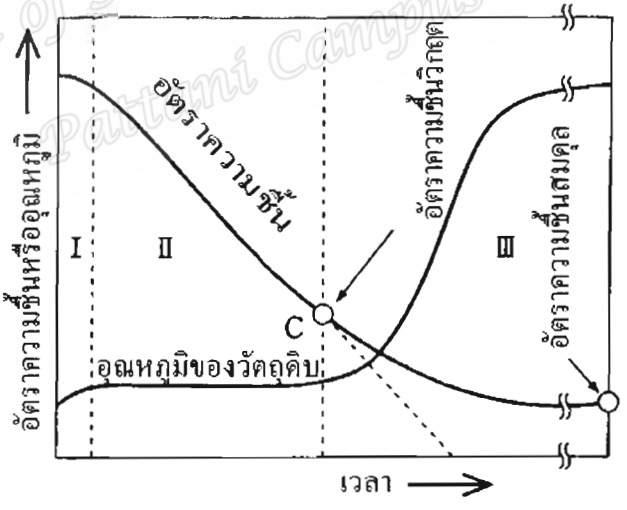
ข้าวกล้องงอกจากข้าวที่ทำการงอกจากข้าวเปลือกหลังจากนึ่งจะมีความชื้นสูงถึง 50-60% มาตรฐานแห้ง ซึ่งความชื้นที่สูงจะส่งผลต่อคุณภาพของข้าว ดังนั้นจำเป็นต้องลดความชื้นของข้าวให้เหลือประมาณ 14-16% มาตรฐานแห้ง (สมชาติ, 2540) โดยไม่ทำให้เมล็ดข้าวเกิดรอยร้าว การลดความชื้นจะทำเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกเป็นการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งให้มีความชื้น 20-25 % มาตรฐานแห้ง (ยุทธนา และสุภวรรณ, 2553) ระยะที่สองเป็นการหยุดพักการให้ความร้อนโดยการผึ่งลมในที่ร่ม เพื่อป้องกันการแตกร้าวของเมล็ดข้าว ระยะที่เหมาะสมในการหยุดพักข้าวประมาณ 48 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นข้าวกล้องงอกให้มีความชื้นสุดท้ายเป็น 14-16 % มาตรฐานแห้ง (สุชาติ, 2540)

กระบวนการอบแห้ง คือกระบวนการลดความชื้นผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดความชื้นโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง เช่น การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน หรือทั้งสามวิธีผสมผสานกัน เพื่อให้น้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมาอยู่ในรูปของไอ โดยความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ได้รับคือ ความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรส่วนใหญ่โครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน ในขณะที่ทำการอบแห้งอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในการนำและพาความร้อนจะถูกใช้ไปในการระเหยน้ำที่บริเวณผิววัตถุ ในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ซึ่ง

ในขณะนั้นอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะมีค่าคงที่ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย (อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศ มีค่าคงที่) เรียกการอบแบบช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และเมื่อผ่านกระแสอากาศร้อนต่อไปจะทำให้ที่ผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุสูงขึ้น และความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุลดลงมีผลให้อัตราการอบแห้งลดลง เรียกการอบแห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การอบแห้งช่วงนี้ความชื้นในวัสดุจะค่อยๆ ลดต่ำลงกว่าความชื้นวิกฤติ (Critical moisture content) น้ำจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือ ไอน้ำ แล้วจึงระเหยไปกับกระแสอากาศร้อน

2.1.9.1 อัตราเร็วในการอบแห้งกับเส้นกราฟแสดงสมบัติการอบแห้ง

เมื่อนำวัตถุดิบที่จะอบซึ่งเปียกชื้นอย่างเพียงพอถึงผิวหน้ามาแขวนไว้ในกระแสลมร้อนแล้วติดตามตรวจวัดอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบนั้น โดยทั่วไปจะได้ผลลัพธ์ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบ

ซึ่งกลไกการอบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะที่มีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ (I) ช่วงอุ่นวัตถุดิบ (II) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ (III) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง (อิศเรศ, 2554)

(I) ช่วงอุ่นวัตถุดิบ

ช่วง I อุณหภูมิของวัตถุดิบจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้น (อุณหภูมิห้อง) จนถึงอุณหภูมิสมดุล ในกรณีที่วัตถุดิบได้รับความร้อนด้วยการพาความร้อนโดยลมร้อน อุณหภูมิสมดุลนี้จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนนั้น

(II) ช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วคงที่

ในช่วง II วัตถุดิบจะมีอุณหภูมิคงที่ ปริมาณความร้อนที่ได้รับจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นเท่านั้น การระเหยจะเกิดที่ผิวหน้าของวัตถุดิบโดยอัตราเร็วในการอบแห้งจะมีค่าคงที่ โดยอัตราความชื้นของวัตถุดิบจะลดลงด้วยอัตราเร็วคงที่

(III) ช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วลดลง

เมื่ออบไปเรื่อย ๆ จนปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าวัตถุดิบลดลง และความชื้นภายในเนื้อวัตถุดิบเริ่มลดลง ความชื้นอิสระภายในตัววัตถุดิบจะซึมขึ้นมาทดแทน ให้ทันกับอัตราเร็วในการระเหยที่ผิวหน้า จึงเริ่มเข้าสู่ช่วงนี้ ชั้นของการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบ อุณหภูมิของวัตถุดิบจะเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของลมร้อนจากบริเวณพื้นผิว ในการอบแห้งความร้อนจะต้องเข้าไปถึงภายในเนื้อวัตถุดิบ นอกจากนี้ความร้อนส่วนหนึ่งยังต้องใช้ไปในการให้ความร้อนตัววัตถุดิบเองอีกด้วย อัตราเร็วในการอบจึงค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการการอบแห้งเพิ่มขึ้น จึงได้มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการผลิต โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (สมชาติ, 2540) แหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งมีหลายชนิด เช่น การอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน (Tirawanichakul *et al*., 2004) การอบแห้งด้วยลมร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Bala and Janjai, 2009) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Tirawanichakul *et al*., 2008) เป็นต้น การอบแห้งด้วยการใช้พลังงานจากแหล่งต่าง ๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ

2.1.6.2 การอบแห้งด้วยลมร้อน

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการอบแห้งที่ได้รับความนิยม เพราะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ การอบแห้งแบบนี้จะอาศัยลมร้อนจากแหล่งความร้อนเป่าขนานไปกับผิวหน้าวัตถุดิบ หรือเป่าตั้ง

ฉากกับก้นถาดที่ยอมให้ลมผ่านได้ ลมร้อนจะผ่านเข้าไปในชั้นวัตถุดิบ เนื่องจากจะใช้ลมร้อนที่มีความเร็วไม่สูงนัก วัตถุดิบจึงยังอยู่นิ่ง ไม่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือการกระแทกใด ๆ ไม่เกิดความเสียหายจากการแตกหัก ตู้อบแบบนี้จะทำงานแบบกะ (batch) จึงเหมาะกับวัตถุดิบที่ต้องการอบด้วยการควบคุมภายใต้เงื่อนไขการอบเข้มงวด หรืออบวัตถุดิบหลายๆ ชนิดแต่จำนวนน้อย ๆ

หลักการทำงานของการอบแห้งด้วยลมร้อน

ความร้อนจะถูกถ่ายโอนไปยังผิวของวัตถุดิบแล้วระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดเป็นไอ ไอน้ำจะถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของวัตถุดิบต่ำกว่าความดันไอด้านในของวัตถุดิบเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ ด้านในของวัตถุดิบจะมีความดันไอสูงและค่อยๆ ลดลง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันไล่น้ำออกจากวัตถุดิบ

2.1.6.3 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นการอบแห้งที่ได้รับความนิยมเช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาในการอบแห้งที่เร็ว และไม่ทำลายผิวของวัตถุดิบ เพราะการอบแห้งนี้จะเป็นการแผ่รังสีอินฟราเรดและเป็นการปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีอินฟราเรดจะใช้ช่วงความยาวคลื่น 0.76-1,000 μm (โดยทั่วไปจะแสดงความถี่ด้วยความยาวคลื่น ซึ่งเทียบเท่ากับความถี่ 300 MHz-300 GHz) ในการแผ่รังสี Near Infrared ซึ่งใช้หลอดไฟอินฟราเรด รังสีจะทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบได้น้อยมาก ในอดีตที่ผ่านมาจะใช้ในการอบน้ำยาเคลือบ หมึกพิมพ์ หรือกาว ส่วน Far Infrared หรือคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัตถุได้มาก หากใช้ในการอบช่วงอัตราเร็วลดลงจะมีประสิทธิผลสูง และสามารถป้องกันการให้ความร้อนมากเกินไปในช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลงได้ จึงใช้ในการอบเวชภัณฑ์และอาหารต่าง ๆ ในปัจจุบันมีการอบอาหารด้วย Far Infrared กันมาก โดยคุณลักษณะเด่นของความร้อนจากรังสีอินฟราเรด ได้แก่ ถ่ายความร้อนสู่อาหารอย่างมีประสิทธิภาพจึงสามารถช่วยลดเวลาของกระบวนการและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน อากาศภายในอุปกรณ์ไม่ได้ถูกทำให้ร้อนและด้วยเหตุนี้อุณหภูมิอากาศโดยรอบจึงสามารถคงที่อยู่ในระดับปกติ สามารถควบคุมได้ง่ายและปลอดภัย ควบคุมความร้อนได้โดยตรงตามที่ต้องการ เป็นต้น (Sakai และ Mao, 2006) แต่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้ค่าใช้จ่ายที่สูงในส่วนของอุปกรณ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ Prince of Songkla University Pattani Campus

2.1.10 สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying kinetics equation)

สมการอบแห้ง คือ สมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นหรือสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นโดยใช้ทฤษฎีหรือผลการทดลองหรือทั้งสองแนวทางประกอบกันเพื่อวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้ทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งหรือกล่าวคือใช้ทำนายอัตราการอบแห้งตลอดจนถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยสมการที่พัฒนาขึ้นนี้จะขึ้นกับพารามิเตอร์หลายตัว อาทิเช่น ค่าความชื้น อุณหภูมิ ระยะเวลาในการอบแห้ง และความชื้นสมดุล เป็นต้น สมการอบแห้งนั้นจะพัฒนาจากแนวคิดเดียวกันคือกระบวนการอบแห้งนั้นเป็นแบบการอบแห้งชั้นบาง ๆ เรียงซ้อนๆ กัน ซึ่งโดยปกติกระบวนการอบแห้งที่เกิดขึ้นจริงนั้นก็เป็นไปตามลักษณะดังกล่าวดังที่รายงานการวิจัยมากมายกล่าวไว้ (Agrawal and Singh, 1977; สมชาติ, 2540 และ Luangmalawat *et al.*, 2008;) สามารถแบ่งได้เป็น สมการอบแห้งทางทฤษฎี สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการอบแห้งเอมพิริเคิล

2.110.1.สมการการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical drying equation)

ได้มีผู้ศึกษานำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงการอบแห้งลดลง Luikov (1966) ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุซึ่งอาจเกิดแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- การเคลื่อนที่ในรูปของเหลวเนื่องจาก Capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force)
- การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นความชื้น (Liquid Diffusion)
- การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ (Surface Diffusion)
- การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอน้ำเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)
- การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Diffusion)
- การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic Flow)

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังที่กล่าวมา Luikov (1966) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม แต่เนื่องจากแบบจำลองมีความยุ่งยากมากเพราะมีตัวแปร และพารามิเตอร์หลายตัวดังนั้นจึงไม่มีการนำไปใช้ เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น อัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนท์ความเข้มข้นของความชื้น สามารถเขียนในรูปสมการ (6)

$$m_w^{\circ} = -\mathrm{AD}\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial \mathrm{x}} \qquad (6)$$

เมื่อ m_w° คือ อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h

A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล, m^2

C คือ ความเข้มข้นของความชื้น, kg/m^3

x คือ ระยะ, m

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/h

Prince of Songkla University Pattani Campus

โดยที่ภาวะเริ่มต้น และภาวะขอบเขตสามารถเขียนได้ว่า

$$M(r,0) = M_{In}$$

$$M(r_0,t) = M_{eq}$$

เมื่อ r คือ ระยะทางวัดจากจุดกึ่งกลางของวัสดุ, m

r_0 คือ ความกว้างหรือรัศมี, m

M_t คือ ความชื้นที่เวลา t ใด ๆ

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

และกำหนดให้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} \qquad (7)$$

คำตอบของสมการที่ (7) ที่สอดคล้องกับภาวะเริ่มต้น และสภาวะขอบเขตสำหรับวัสดุทรงกลม สามารถเขียนได้ว่า

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{1}{n^2}\right)\exp\left(-\frac{n^2\pi^2 X^2}{9}\right) \quad (8)$$

เมื่อ $X = \left(\frac{A_p}{V_p}\right)(Dt)^{0.5}Dt$

A_p คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ, m^2

V_p คือ ปริมาตรของวัสดุ, m^3

จากสมการ (3) ประกอบด้วยเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด และเทอมท้ายๆ จะมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ ดังนั้นสามารถตัดเทอมท้ายๆออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรกหรือสองสามเทอมแรกเท่านั้น ซึ่งคำตอบสุดท้ายที่ได้จะผิดพลาดไปไม่มากนักโดยเฉพาะเมื่อระยะเวลาอบแห้งมีค่ามาก

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.1.10.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying equation)

สามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งแบบง่ายๆ โดยการสมมติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของเมล็ดพืช และความชื้นสมดุล ข้อสมมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) สมการดังกล่าวสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq}) \quad (9)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}

ด้วยภาวะเริ่มต้น M (0) = M_{in} จะได้คำตอบของสมการ (4) คือ

$$MR = \exp^{-kt} \quad (10)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงตัวของการอบแห้ง

MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M คือ ความชื้น, % มาตรฐานแห้ง

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น, % มาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, % มาตรฐานแห้ง

t คือ เวลา, s

ซึ่งสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D) และอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นค่าคงตัวของแต่ละสมการ ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ และภายในช่วงสภาวะอากาศอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้นความสัมพันธ์ของค่าคงตัวของการอบแห้งนี้นิยมใช้รูปแบบสมการอาเรเนียส (Arrehenius equation) ดังนี้

$$D = D_0 \exp[-\frac{E}{RT}] \quad (11)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/s

D_0 คือ ค่าคงตัว

E คือ พลังงานกระตุ้น, KJ/mol

R คือ ค่าคงตัวของก๊าซ, 8.314 KJ/mol-K

T คือ อุณหภูมิลมร้อน, K

2.1.10.3 สมการการอบแห้งเอมพิริเคิล (Empirical drying equation)

สมการอบแห้งเอมพิริคัล คือ สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองจริงสำหรับวัสดุในช่วงอุณหภูมิ ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่งๆที่ทำการทดลอง ดังนั้นสมการอบแห้งเอมพิริเคิลจะสามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งของวัสดุนั้น ๆ ได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการจะต้องตรงกับสภาวะการทดลองตัวอย่างเท่านั้น

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 2.8 แสดงตัวอย่างสมการอบแห้งเอมพิริเคิลที่ใช้ในการทำนายการอบแห้ง

ลำดับ	แบบจำลอง	รูปแบบสมการ
1	Newton model	MR=exp(-kt)
2	Hendeson and Pabis model	MR = a exp(-kt)
3	Logarithimic model	MR = a exp(-kt) + b
4	Approximation of diffusion model	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-kbt)
5	Midilli model	MR = a exp (-Kt)n [-K(t^n)] + bt
6	Logistic model	MR = a / (1+exp(kt))

เมื่อ a, b, c, n และ K คือค่าคงตัว

ตัวอย่างสมการอบแห้งเอมพิริเคิลสำหรับข้าวเปลือกมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

Wang และ Singh (1978) ได้เสนอสมการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดข้าวเปลือกขนาดกลาง CSM 5 ดังนี้ สำหรับ $30^{\circ}C < T < 55^{\circ}C$

$$MR = a\, e^{-bt} \qquad (12)$$

เมื่อ a = 0.96-0.00008826T+0.02324

b = 0.16884+0.00756T+0.2172

T = อุณหภูมิลมร้อน, K

สมชาติ และวิไลพร (2530) เสนอสมการอบแห้งข้าวเปลือกชั้นบางสำหรับเมล็ดข้าวพันธุ์ กข ซึ่งเป็นข้าวเปลือกเมล็ดยาว โดยใช้รูปแบบสมการเดียวกันกับ Wang และ Singh (1978) ได้ค่าคงที่ a และ b ดังนี้

สำหรับ $26^{\circ}C<T<56^{\circ}C$, $0.14<RH<0.77$ และ $0.22<M_{in}<0.35$

a = $1.136-6.78\times10^{-3}T-0.083$

b = $-1.249\times10^{-3}+4.67\times10^{-3}T-0.1$

T = อุณหภูมิลมร้อน, K

Prince of Songkla University Pattani Campus

Agrawal และ Singh (1977) ได้ใช้สมการการอบแห้งข้าวเปลือกชั้นบางของ Page เพื่อฟิตกราฟเข้ากับผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกขนาดสั้นพันธุ์ Caloro ได้สมการและตัวแปรดังนี้

สำหรับ $32^{o}C<T<51^{o}C$ และ $0.19<RH<0.85$

$$MR = e^{-xty} \quad (13)$$

เมื่อ x = 0.02958-0.44565+0.01215T

y = 0.13365 + 1.93653 - 0.177435 + 0.009468T

T = อุณหภูมิลมร้อน, K

จุฑารัตน์ และคณะ (2550) ได้เสนอสมการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งสุพรรณบุรี1 พบว่ารูปแบบสมการของ Page สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดี ได้สมการและตัวแปร ดังนี้

สำหรับ $90\ ^{\circ}C < T < 120\ ^{\circ}C$ และ $0.64 < M_{in} < 0.65$

$$MR = \exp(-xt^{n}) \quad (14)$$

เมื่อ $K= 6.8419-0.0395T+0.00006T^{2}$

$n= -10.271-0.0677T-0.001T^{2}$

T= อุณหภูมิลมร้อน, K

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทิวานัถ และคณะ (2557) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกในการอบแห้งแบบสองขั้นตอน โดยเริ่มจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดซึ่งใช้แก๊สเป็นแหล่งพลังงาน จากนั้นจึงเอาลมร้อนปล่อยทิ้งจากขั้นตอนแรกมาอบแห้งข้าวเปลือกในขั้นตอนถัดไป การทดสอบจะใช้ข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 20.32, 25.89 และ 31.60% มาตรฐานเปียก. ความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด 3.14 , 2.83 และ 2.58 μm (อุณหภูมิ 650 750 และ 850 °C ตามลำดับ) ผลการศึกษาพบว่าความยาวคลื่นอินฟราเรดมีอิทธิพลต่อการลดความชื้นข้าวเปลือกในทุกระดับความชื้นเริ่มต้น โดยความชื้นข้าวเปลือกสามารถลดลงได้ทั้งในช่วงของการอบแห้งด้วยอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อน ส่วนอุณหภูมิของข้าวเปลือกและอุณหภูมิของอากาศร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นอินฟราเรดที่ลดลง ผลการทดลองพบว่าที่ความยาวคลื่นอินฟราเรด 2.58 μm สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจนเหลือความชื้นสุดท้าย 15.39, 19.23 และ 24.15% มาตรฐานเปียก ตามลำดับ

เทวิกา และวรนุช (2556) ได้ศึกษาผลของการทำแห้งข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C เป็นเวลา 10, 12 และ 14 ชั่วโมงต่อปริมาณความชื้นและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลามีผลต่อปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่อิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลา และปัจจัยเวลาไม่มีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเป็นที่น่าสังเกตว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณ GABA และ γ-tocopherol การอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 40 °C เวลา 14 ชั่วโมง จะทำให้ข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณ GABA และ γ-tocopherol สูงสุดคือ 15.83 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 123.27 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ส่วนสภาวะที่มีกิจกรรมต้านออกซิเดชันที่ วัดด้วยวิธี DPPH สูงที่สุด คือ อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

นฤบดี และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศร้อน และพิจารณาคุณภาพของข้าวกล้องงอกหลังการอบแห้ง ในเรื่องของปริมาณสาร GABA ปริมาณจุลินทรีย์ สมบัติของข้าวหุงสุก และร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ทำการอบแห้งข้าวกล้องงอกและอบแห้งให้มีความชื้นประมาณ 18-20% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิการอบแห้งอยู่ในช่วง 90-150 °C นำมาเก็บในที่อับอากาศ และเป่าลมด้วยอากาศแวดล้อมให้เหลือความชื้น 13-15% มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการอบแห้งทำให้ความชื้นลดลงแบบ exponential ปริมาณสาร GABA ในข้าวกล้องงอกไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิการอบแห้ง และปริมาณการปนเปื้อนของจุลินทรีย์บนผิวของข้าวกล้องหลังการอบแห้งมีปริมาณต่ำกว่า 10^4 CFC/g ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานด้านความปลอดภัยในอาหาร และที่

Prince of Songkla University Pattani Campus

อุณหภูมิการอบแห้ง 150 ℃ พบว่าเมล็ดข้าวจะมีการแตกร้าวอย่างรุนแรง ซึ่งส่งผลต่อความแข็ง และการคงรูปของเมล็ดข้าวภายหลังการหุงต้ม

ยุทธนา และสุภวรรณ (2553) ได้ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งข้าวกล้องนึ่งโดยการพาความร้อนด้วยลมร้อน การแผ่รังสีอินฟราเรด และพลังงานความร้อนร่วม (รังสีอินฟราเรดและพลังงานไฟฟ้า) และทำการศึกษาคุณภาพของข้าวในด้านปริมาณต้นข้าว ความเหลืองของข้าวกล้อง และข้าวท้องไข่ โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาทที่มีความชื้นเริ่มต้น 50-55% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 70-90 ℃ ความเร็วลมร้อน 1.0±0.5 m/s กระแสป้อนกลับของอากาศอบแห้ง 95% ทำการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 20-25 % มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่าข้าวนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งและนำไปอบแห้งด้วยพลังงานงานร่วม (รังสีอินฟราเรดและพลังงานไฟฟ้า) มีร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดสูงกว่าข้าวนึ่งที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนตามลำดับ ส่วนความขาวของข้าวสารจะลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นคุณภาพของข้าวจะลดลง

วรัมพร และคณะ (2555) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสำคัญในข้าวกล้องงอก โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของข้าวกล้องงอก 3 พันธุ์ได้แก่ ข้าวหอมนิล ข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียวดำ โดยทำการงอกที่อุณหภูมิ 30 ℃ ระยะเวลาการงอก 48 ชั่วโมง พบว่าข้าวทั้ง 3 พันธุ์ที่ผ่านกระบวนการงอกมีปริมาณวิตามินบี1 สารโพลีฟีนอล และสารกาบาเพิ่มขึ้น 1-4 เท่าเมื่อเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการงอกโดยข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 มีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด ชี้ให้เห็นว่าธัญพืชที่ผ่านกระบวนการงอกมีประสิทธิภาพในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น

อภิวัฒน์ และพักตร์เพ็ญ (2559) ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวจากแปลงเกษตรกรจำนวน 2 แปลง ที่มีการใช้ปุ๋ยแตกต่างกัน ได้แก่ นาข้าวใช้ปุ๋ยอินทรีย์ภายใต้มาตรฐานสินค้าเกษตรอินทรีย์ (มกษ. 9000-2552) และนาข้าวใช้ปุ๋ยเคมีภายใต้ระบบมาตรฐานสินค้าเกษตร (มกษ. 4400-2552) ตามลำดับ บรรจุข้าวกล้องในถุงสุญญากาศและเก็บรักษาในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 เดือน พบว่าระยะเวลาการเก็บรักษามีผลทำให้คุณภาพกายภาพ และมีผลทำให้คุณภาพทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป โดยปริมาณคาร์โบไฮเดรตและอะไมโลสเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณไขมันและสารความหอม (2-AP) ลดลง ซึ่งข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์ยังคงมีปริมาณ 2-AP มากกว่าข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยเคมี จึงเป็นผลทำให้ข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์มีกลิ่นหอมมากกว่า เช่นเดียวกับคุณภาพทางโภชนาการที่มีการลดลงตามการเก็บรักษา แต่ข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์ยังคงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในเมล็ดมากกว่าข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยเคมี และถึงแม้ว่าระยะเวลาการเก็บรักษามีผลทำให้ข้าวหุงสุกมีระยะเวลาการหุงต้มนานขึ้นและมีความนุ่มเหนียวลดลง แต่ข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค

Rights of Rangsit University
Rattanā Rangsit University

ทั้งทางด้านรสชาติ กลิ่นหอม ความนุ่มเหนียวมากกว่าข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยเคมี ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของปริมาณธาตุอาหารที่ได้รับจากปุ๋ย

อุไรวรรณ และคณะ (2554) ศึกษาเกี่ยวกับผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกต่อคุณค่าทางโภชนาการบางประการของข้าวกล้องงอกสังข์หยดอินทรีย์ พบว่าระยะเวลาเก็บเกี่ยวมีผลต่อปริมาณโปรตีน สารประกอบฟินอลิก (Phenolic compound) และฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) รวมทั้งวิตามินบี1 ในเมล็ดข้าวกล้องโดยให้ค่าสูงสุดที่ระยะ 44 วัน การเก็บรักษาข้าวเปลือก 4 เดือนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโปรตีน วิตามินบี1 และความชื้นในข้าวกล้อง แต่มีผลให้ปริมาณสารกาบา สารฟินอลิกและฟลาโวนอยด์มีค่าสูงที่สุดในเดือนที่ 4 ผลที่ได้พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมต่ออายุการเก็บเกี่ยวคือ 44 วันหลังออกดอก และระยะเวลาในการเก็บรักษา 4 เดือนไม่ส่งผลให้ปริมาณโปรตีน สารกาบา และวิตามินบี1 ในข้าวกล้องลดต่ำลง

Kim *et al.* (2012) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของส่วนต่าง ๆ ในเมล็ดข้าวเปลือก (*Oryza sativa* L.) ก่อนและหลังการงอก โดยแบ่งข้าวเปลือกออกเป็นข้าวกล้อง (Brown rice) และข้าวเปลือกงอก (Sprout) จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาโปรตีนสกัดหยาบ ไขมันสกัดหยาบ น้ำตาลอิสระ กรดไขมัน กรดไฟติก วิตามินอี γ-oryzanol และสาร γ-aminobutyric acid (GABA) จากผลการทดลองพบว่าก่อนการงอกเมล็ดข้าวเปลือกมีปริมาณของโปรตีน 97.28 มิลลิกรัมต่อกรัม ไม่พบปริมาณของกลูโคส ปริมาณของสาร GABA มีค่าเท่ากับ 15.34 มิลลิกรัมต่อ100 กรัม ปริมาณวิตามินอี มีค่าเท่ากับ 3.21 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม แต่หลังการงอกปริมาณของโปรตีนเพิ่มขึ้นเป็น 105.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่กรดไฟติกหลังการงอกมีปริมาณลดลง ซึ่งถือได้ว่าเป็นผลดีต่อผู้บริโภคเนื่องจากการมีปริมาณกรดไฟติกสูงจะทำให้การใช้แร่ธาตุต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อร่างกายลดลง กลูโคสมีปริมาณเพิ่มขึ้นโดยมีปริมาณเท่ากับ 11.45 มิลลิกรัมต่อกรัมในข้าวกล้อง และ8.82 มิลลิกรัมต่อกรัมในข้าวเปลือก นอกจากนี้พบว่า กรดลิโนเลอิกเพิ่มขึ้นในขณะที่กรดโอเลอิกและปาลม์มิติก (Palmitic) มีปริมาณลดลง และมีปริมาณสารGABA เท่ากับ 31.74 มิลลิกรัมต่อ100 กรัมในข้าวเปลือกงอก ปริมาณของวิตามินอีพบ 3.93 มิลลิกรัมต่อ100 กรัมในข้าวเปลือก ในขณะที่ในข้าวกล้องงอก (Sprout) มีปริมาณของวิตามินอี (5.45 มิลลิกรัมต่อกรัม) และ γ-oryzanol (9.91 มิลลิกรัมต่อกรัม) อยู่ในปริมาณสูง จากงานวิจัยสรุปได้ว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการงอกจะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญนอกจากนี้กระบวนการงอกยังทำให้ชั้นนอกของข้าวมีความนุ่มขึ้นทำให้ง่ายต่อการหุงและการรับประทานเหมือนข้าวสารขาว

Luangmalawat *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และคุณภาพของข้าวหุงสุกโดยคุณภาพที่ศึกษาคือ การหดตัว สี และสัณฐานวิทยาของข้าวหุงสุกแห้งทำการอบแห้งข้าวมะลิเก่าแบบลมร้อน อุณหภูมิการอบแห้ง 50, 60, 80, 100 และ

120 °C ความเร็วของอากาศ 0.4 m/s จากนั้นศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยวิธีหาความชื้น โดยใช้สมการอย่างง่ายมาพัฒนาเพื่ออธิบายสัมประสิทธิ์การแพร่ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และความชื้น พบว่าอุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อสีของข้าวหุงสุกแต่ไม่มีผลกระทบต่อการหดตัว และการคืนตัวของข้าวหุงสุกแห้ง และเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างด้วย SEM พบว่าโครงสร้างของข้าวหุงสุกหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะเหมือนกันแต่จะแตกต่างจากข้าวที่หุงสุกใหม่ๆ เนื่องจากมีชนาดรูพรุนเล็ก ๆ เกิดขึ้นมาก ดังนั้นอุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้ง

Moongngarm and Saetung (2010) ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณโปรตีน ปริมาณกรดอะมิโนอิสระรวม วิตามินอี สารแกมม่าโอไรซานอล ไทอามีน ไนเอซิน และปริมาณของไพริออกซิน ใน 1) ข้าวมอลต์ 2) ข้าวกล้องงอก 3) สารสกัดจากข้าวกล้องงอก และ 4) ในข้าวกล้องที่ยังไม่ผ่านการงอก จากรายงานพบว่าในข้าวมอลต์และสารสกัดจากข้าวกล้องมีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมี และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากกว่าในข้าวกล้องงอกและในข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก กระบวนการงอกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวมอลต์และสารสกัดจากข้าวกล้องอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดต่าง ๆ เช่น สารประกอฟีนอลิก วิตามินอี สารโอไรซานอลที่ผสมกันอยู่ทำให้ข้าวมอลต์และสารสกัดจากข้าวกล้องงอกที่อาจจะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารหรืออุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้อีก เพราะสารอาหารเหล่านี้เป็นสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อผู้บริโภค และเมื่อเปรียบเทียบข้าวมอลต์และข้าวกล้องงอกพบว่าการทำข้าวมอลต์จะใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าอัตราการงอกสูงกว่าและการทำข้าวมอลต์ยังสามารถพัฒนาไปในระดับกึ่งอุตสาหกรรมและระดับอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

Parnsakhorn and Noomhorm (2008) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องนึ่ง 3 สายพันธุ์ (ชัยนาท1, สุพรรณบุรี1 และข้าวขาวดอกมะลิ105) ที่ความชื้นเริ่มต้น 13±1% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิในการแช่ข้าว 70-80 °C เวลาในการแช่ 1-4 ชั่วโมง และทำการนึ่งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10,15 และ 20 นาที ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ความเหลือง ความขาว ความแข็ง การดูดซับน้ำ วิตามิน E และวิตามิน B2) และวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส (รสชาติ สี กลิ่นเนื้อสัมผัส และความยอมรับโดยรวม) จากผลการทดลองพบว่า ข้าวกล้องนึ่งให้คุณภาพข้าวที่ดีกว่าข้าวทางการค้าในทุกเงื่อนไขการทดลอง และในการทดสอบทางประสาทสัมผัสอยู่ในเกณฑ์การยอมรับสูง อย่างไรก็ตามสภาวะที่เหมาะสมของข้าวนึ่งทั้ง 3 สายพันธุ์พบว่า ข้าวชัยนาท 1 อุณหภูมิในการแช่ 80 °C เวลาในการแช่ 2-4 ชั่วโมง เวลาในการนึ่ง 15-20 นาที ข้าวสุพรรณบุรี 1 อุณหภูมิในการแช่ 70 °C เวลาในการแช่ 4 ชั่วโมง เวลาในการนึ่ง 15-20 นาที และข้าวขาวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิในการแช่ 70 °C เวลาในการแช่ 2 ชั่วโมง เวลาในการนึ่ง 10-15 นาที ซึ่งสภาวะการทดลองนี้มีคุณภาพของข้าวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ

Parnsakhorn and Langkapin. (2013) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้อง (BR) ในระหว่างการเก็บรักษา (แบบสุญญากาศ) เป็นเวลา 8 เดือน ที่อุณหภูมิ 4 °C และ 37 °C พบว่า อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่สูงขึ้น ทำให้ค่า b-value ค่าความแข็งและกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น แต่ดัชนีความขาวของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกลดลง ในส่วนของปริมาณกาบาพบว่าการเก็บที่อุณหภูมิทั้งสองทำให้ปริมาณกาบาลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น อีกทั้งที่อุณหภูมิต่ำช่วยรักษาความสามารถในการดูดซึมน้ำและความแข็งของข้าวกล้อง และข้าวกล้องงอก ขณะที่อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่สูงขึ้นทำให้ค่าทั้งสองของตัวอย่างเพิ่มขึ้น

Soponronnarit (2006) ได้ศึกษาการนึ่งข้าวกล้องโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวกล้อง อุณหภูมิของการนึ่ง และความลึกของเบดที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ข้าวท้องไข่ ความขาว และความหนืดของข้าวชัยนาท 1 ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 12.8% มาตรฐานแห้ง ทำการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 70-90 °C เวลาในการแช่ 0.5-2.0 ชั่วโมง อุณหภูมิอบแห้ง 120-160 °C ความเร็วลม 3.9 เมตร/วินาที ความลึกของเบด 8 -12 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งแต่ความลึกของเบดและระยะเวลาในการแช่ข้าวไม่มี ผลต่อ การอบแห้งที่ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกประมาณ 28% มาตรฐานแห้ง การทดสอบร้อยละเต็มเมล็ดของข้าวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ถ้าความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 28% มาตรฐานแห้ง และ 18% มาตรฐานแห้ง ส่งผลให้ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดและความขาวลดลงตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเป็นท้องไข่พบว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งสูงขึ้นความเป็นท้องไข่ของข้าวลดลงเนื่องจากเจลาติไนเซชันในข้าวเพิ่มขึ้น

Sripum *et al.* (2016) ศึกษาสภาวะการเก็บรักษาต่อสารต้านอนุมูลอิสระ (FRAP ORAC และ DPPH) และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวกล้องงอก (ข้าวขาวดอกมะลิ 105) โดยเก็บรักษาข้าวกล้องงอกในถุงสุญญากาศเป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 30-40 °C ซึ่งพบว่า อุณหภูมิการเก็บรักษาไม่มีผลต่อสารต้านอนุมูลอิสระ (FRAP ORAC และ DPPH) และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวกล้องงอก (ข้าวขาวดอกมะลิ 105) อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวกล้องงอก พบว่าระยะเวลาการเก็บที่นานขึ้นส่งผลให้สารต่าง ๆ มีปริมาณลดลง

Srisang *et al.* (2010) ศึกษาผลของการให้ความร้อนกับคุณภาพของข้าวกล้องงอก เช่น ผลต่อปริมาณของสาร GABA และผลต่อค่า GI พบว่าการให้ความร้อนต่อข้าวกล้องงอกแบบใช้ hot air (HA) จะทำให้ข้าวกล้องงอกมีค่า GI ต่ำกว่าการให้ความร้อนแบบ super heat stream (SHS) เนื่องจากการให้ความร้อนแบบ HA จะทำให้เกิดสารเชิงซ้อนของ amylose-lipid เกิดขึ้นทำให้การย่อยข้าวกล้องงอกที่ผ่านการให้ความร้อนแบบ HA เป็นไปได้ช้ากว่าข้าวกล้องที่ผ่านการให้ ความ

ร้อนแบบ SHS ที่ไม่มีสารเชิงซ้อน amylase-lipid เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนทั้งสองแบบในการวิจัยครั้งนี้ไม่มีผลต่อปริมาณ GABA ในข้าวกล้องงอก และยังพบว่าการให้ความร้อนยังช่วยลดปริมาณของจุลินทรีย์ในข้าวกล้องงอกได้อีกด้วย

จากการการทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยเกี่ยวกับข้าวกล้องงอกส่วนใหญ่เน้นหนักไปที่การวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญโดยเฉพาะสาร GABA และคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชัน ตลอดจนการปรับปรุงกระบวนการผลิต เช่น ระยะเวลาในการแช่ข้าวเป็นต้น เพื่อให้ได้คุณภาพและปริมาณสาระสำคัญหลังจากผ่านกระบวนการผลิตเป็นข้าวกล้องงอกมากที่สุด อย่างไรก็ดีหากต้องการสนับสนุนให้ผลิตในเชิงอุตสาหกรรมและ/หรือเชิงพานิชย์ นอกจากขบวนการผลิตและการอบแห้งแล้วพบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษาเพื่อคงคุณภาพทางโภชนาการของข้าวกล้องงอกนั้นมีความสำคัญมากไม่แพ้กัน และยังพบงานวิจัยด้านนี้ค่อนข้างน้อย จึงเป็นที่มาของหัวข้อวิจัยในครั้งนี้

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

ข้าวเจ้าพันธุ์หอมกระดังงา และพันธุ์ชีบูกันตัง จากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ อ.โคกโพธิ์ จ.ปัตตานี นำข้าวเปลือกทั้งสองสายพันธุ์มาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 $^{\circ}$C เพื่อรักษาคุณภาพก่อนการทดลอง เมื่อต้องการทดลองจะนำข้าวเปลือกออกจากตู้เย็นมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องก่อนนำมาทดลอง ในส่วนของขั้นตอนในการผลิตข้าวกล้องงอกอยู่ในหัวข้อ 3.3.1

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.2 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.2.1 สารเคมี

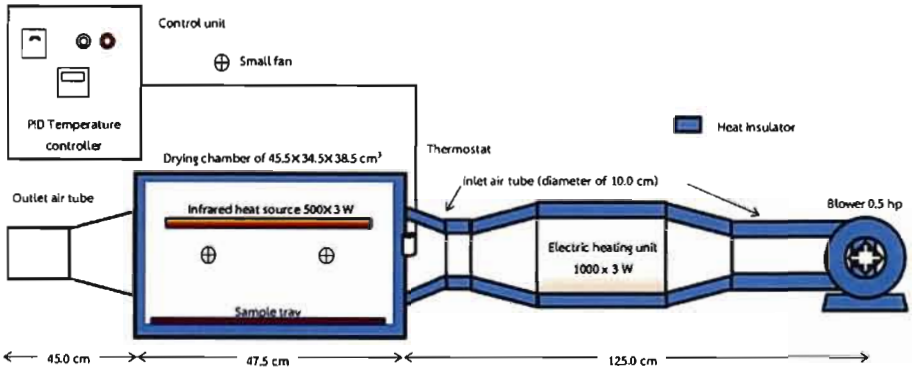
1. Ethanol
2. Methanol
3. Hydrochloric acid (HCl)
4. Potassium chloride buffer pH 1.0 (KCl buffer pH 1.0)
5. Sodium acetate buffer pH 4.5 ($CH_3CO_2Na.3H_2O$ pH 4.5)
6. Sulfuric acid (H_2SO_4)
7. Sodium carbonate (Na_2CO_3)
8. Sodium nitrite ($NaNO_2$)
9. Aluminum chloride hexahydrate ($AlCl_3{\cdot}6H_2O$)
10. Sodium hydroxide (NaOH)
11. Borate buffer pH 9.0
12. Vanillin
13. Standard catechin
14. Standard gallic acid
15. Folin–Ciocalteu reagent
16. 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl ($DPPH^+$)

17. 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox)
18. 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid ($ABTS^{\cdot+}$)
19. Sodium hypochlorite (NaOCl)
20. Potassium peoxydisulfate ($K_2S_2O_8$)
21. Acetate buffer pH 3.6
22. 2,4,6-Tripyridyltriazine (TPTZ)
23. Ferric chloride ($FeCl_3.6H_2O$)
24. Ferrous sulphate ($FeSO_4 \cdot 6H_2O$)
25. Standard γ-aminobutyric acid
26. Phenol

3.2.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1. ไมโครปิเปิต (ขนาด 10-100 ไมโครลิตร และ 100-1,000 ไมโครลิตร)
2. เครื่องแก้วสามัญ
3. หลอดทดลอง (Test Tube)
4. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
5. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
6. โถดูดความชื้น (Desiccator)
7. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
8. เครื่องชั่งน้ำหนักรุ่น 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)
9. เครื่องปั่นผสม (Vortex)
10. เครื่องเขย่าสาร (Shaker)
11. เครื่องอบแห้ง (Dryer)
12. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
13. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
14. เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (Evaporator)
15. เครื่องกะเทาะข้าว (Paddy Husker)
16. เครื่องบรรจุแบบสุญญากาศ (Vacuum Sealing Machine)
17. เครื่องวัดสี (Color measuring)
18. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างแบบ Scanning Electron Microscope (SEM)

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด (สุภวรรณ และคณะ, 2555)

Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 3.2 เครื่องวัดสี รุ่น Hunter lab system CIELAB; color flex 4510

รูปที่ 3.3 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น LIBRA S22

รูปที่ 3.4 เครื่องกะเทาะข้าว (รุ่น P-1 จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วนจำกัดเจ็กเซ่งฮวด).

รูปที่ 3.5 เครื่องเขย่าสาร (Lab Companion รุ่น Sl-600R)

Prince of Songkla University Pattani Campus

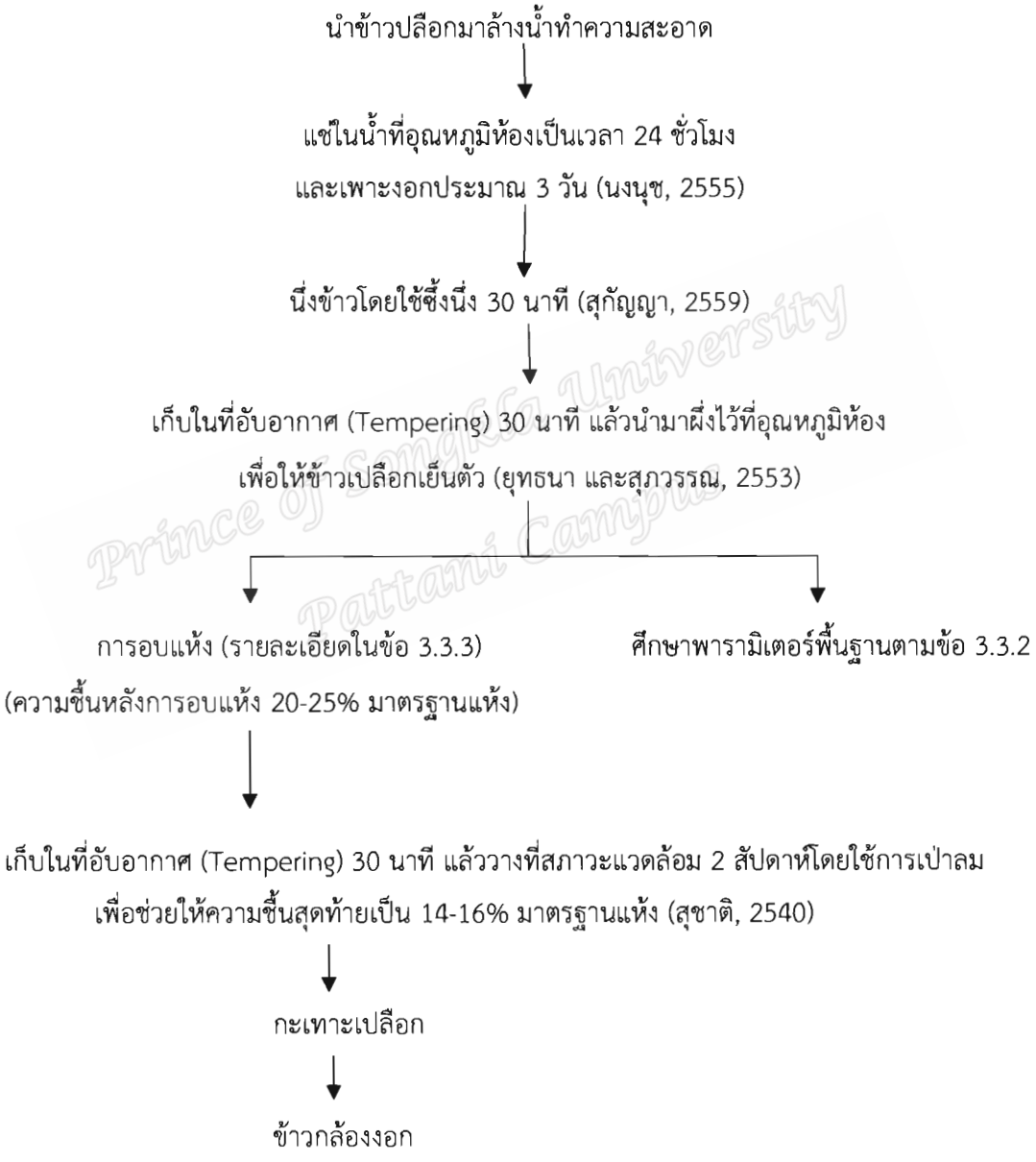
รูปที่ 3.6 เครื่องระเหยสารแบบสุญญากาศ Heidolph รุ่น Hei-VAP Advantage

Prince of Songkla University
Pattani Campus

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกได้ดัดแปลงจากกรรมวิธีการผลิตข้าวกล้องงอกทั่วไปในปัจจุบัน ในงานวิจัยนี้จะผลิตข้าวกล้องงอกจากข้าวเปลือก โดยมีขั้นตอนการผลิตดังนี้



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างของข้าวกล้องงอก

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานของการอบแห้ง

3.3.2.1 การหาความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density, ρ)

การหาความหนาแน่นปรากฏตามวิธีของ พัชราภรณ์ (2558) ชั่งน้ำหนักบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร นำตัวอย่างที่ทราบความชื้นเริ่มต้นใส่ในบีกเกอร์ทีละเมล็ดจนเต็ม แล้วทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ ทำการทดลองเช่นเดิมโดยเปลี่ยนตัวอย่างข้าวที่มีความชื้นแตกต่างกัน ทำการทดลองแต่ละความชื้น 3 ซ้ำ แล้วคำนวณหาความหนาแน่นปรากฏของตัวอย่างจากสมการที่ 15 ดังนี้

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{15}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

m คือ มวลของวัสดุ (kg)

V คือ ปริมาตรรวมของวัสดุกับปริมาตรของช่องว่างของอากาศ (m^3)

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.3.2.2. การหาสัดส่วนช่องว่างของอากาศ (Void fraction, % ε)

การหาร้อยละช่องว่างอากาศตามวิธีของ พัชราภรณ์ (2558) นำตัวอย่างที่ทราบความชื้นเริ่มต้นใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยค่อยๆใส่จนเต็มบีกเกอร์ แล้วทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ รินน้ำมันพืชลงในบีกเกอร์ที่บรรจุตัวอย่างให้มีระดับเท่ากับระดับตัวอย่าง ทำการทดลองเช่นเดิมโดยเปลี่ยนตัวอย่างข้าวที่มีความชื้นแตกต่างกัน ทำการทดลองแต่ละความชื้น 3 ซ้ำ แล้วคำนวณหาค่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศจากสมการที่ 16 ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{V_{oil}}{V_{sample}} \tag{16}$$

เมื่อ ε คือ ค่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศ (%)

V_{oil} คือ ปริมาตรน้ำมันพืช (ml)

V_{sample} คือ ปริมาตรของตัวอย่าง (ml)

3.3.3 การอบแห้ง

นำข้าวเปลือกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านกระบวนการงอกและมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 50-60% มาตรฐานแห้ง มาอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 60 75 และ 95 ^{o}C โดยแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งมีดังนี้

-อบแห้งด้วยลมร้อน ที่ความเร็วลม 0.5±0.1 เมตร/วินาที

-อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 1,000W

-อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 1,500W

ทำการเก็บข้อมูลการอบแห้งโดยการบันทึกผลการทดลอง ดังนี้ น้ำหนักของข้าวกล้องงอก เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งตามจุดต่าง ๆ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วย watt-hour-meter ทำการอบแห้งข้าวกล้องงอกจนกระทั่งมีความชื้นประมาณ 20-25% มาตรฐานแห้ง (ยุทธนา และสุภวรรณ, 2553) หลังการอบแห้งจะนำข้าวกล้องงอกเก็บในที่อับอากาศ (Tempering) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ความชื้นจากภายในเมล็ดแพร่ออกมาที่ผิวของเมล็ดข้าว เมื่อนำมาลดความชื้นในขั้นตอนต่อไปจะสามารถพาความชื้นออกไปได้ง่ายและเร็ว (ณัฐพล, 2540) อีกทั้งยังช่วยลดการแตกร้าวของเมล็ด (Cnossen *et al*., 2000) จากนั้นนำข้าวกล้องงอกมาวางแผ่บาง ๆ ที่สภาวะแวดล้อมประมาณ 2 สัปดาห์โดยใช้การเป่าลมช่วยให้ความชื้นลดลงจนความชื้นสุดท้ายเป็น 14-16% มาตรฐานแห้ง (สุชาติ, 2540) แล้วจึงนำมากะเทาะเปลือกซึ่งจะได้ลักษณะของข้าวกล้องงอกดังรูปที่ 3.8 จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมี เปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการผึ่งบาง ๆ ไว้ในสภาวะแวดล้อมและใช้การเป่าลมช่วยในการพาความชื้นออกจากเมล็ดข้าว (ข้าวควบคุม) และข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการงอกและการอบแห้ง (ข้าวอ้างอิง)

Prince of Songkla University Pattani Campus

(ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา

(ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง

รูปที่ 3.8 ลักษณะของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้ง (ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และ (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.3.4 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของข้าวกล้องงอกภายหลังการอบแห้ง ดังนี้

3.3.4.1 ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด (Head rice yield)

วิเคราะห์ร้อยละเต็มเมล็ดตามวิธีของ ยุทธนา และสุภวรรณ (2553) โดยนำข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้ง 125 กรัม มาแยกส่วนที่เป็นข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหัก โดยทำการคัดแยกด้วยมือ ข้าวที่เต็มเมล็ดนั้นต้องมีความยาวของเมล็ดข้าวกล้องตั้งแต่ 7 มิลลิเมตรเป็นต้นไป บันทึกค่าน้ำหนักของข้าวกล้องที่ผ่านการคัดแยกและคำนวณร้อยละข้าวเต็มเมล็ดดังสมการที่ 17 ดังนี้

$$\text{ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด} = \left(\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังการคัดแยก}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนการคัดแยก}}\right) \times 100 \qquad (17)$$

3.3.4.2 ร้อยละท้องไข่ (White belly)

วิเคราะห์ร้อยละท้องไข่ ตามวิธีของ เครือวัลย์ (2536) สุ่มเมล็ดข้าวกล้องงอก 100 กรัม วางบนช่องที่แสงจากหลอดไฟส่องผ่าน คัดแยกเมล็ดข้าวกล้องงอกที่มีท้องไข่ บันทึกค่าน้ำหนักของข้าวกล้องที่ผ่านการคัดแยกและคำนวณร้อยละท้องไข่ดังสมการที่ 18 ดังนี้

$$\text{ร้อยละท้องไข่} = \left(\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังการคัดแยก}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนการคัดแยก}}\right) \times 100 \qquad (18)$$

3.3.4.3 สีของข้าวกล้องงอก

นำตัวอย่างข้าวกล้องงอก มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีหลังจากอบแห้งด้วยเครื่อง Hunter Lab System CIELAB; Color flex 4510) โดยใช้ระบบ L*, a*, b* โดย ค่า L* แสดงค่าความสว่าง (0-100) a* แสดงค่าสีแดง (ค่า a* เป็นค่าบวก) และสีเขียว (ค่า a* เป็นค่าลบ) และค่า b* แสดงค่าสีเหลือง (ค่า b* เป็นค่าบวก) สีน้ำเงิน (ค่า b* เป็นค่าลบ) ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ รายงานผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และคำนวณค่า Chorma (C°)

Prince of Songkla University Pattani Campus

ซึ่งแสดงถึงความเข้ม โดยคำนวณได้จากสมการที่ 19 และคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของสีรวม (ΔE^*)ดังสมการที่ 20.

$$C^o = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (19)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (20)$$

เมื่อ ΔL^*=L*(อ้างอิง) - L*(ข้าวกล้องงอก)

Δa^*=a*(อ้างอิง) - a*(ข้าวกล้องงอก)

Δb^*=b*(อ้างอิง) - b*(ข้าวกล้องงอก)

3.3.4.4 ศึกษาสัญฐานวิทยาของข้าวกล้องงอก

ศึกษาสัญฐานวิทยาของข้าวกล้องงอกด้วยเครื่อง SEM นำตัวอย่างมาตัดครึ่งติดบน stub โดยใช้เทปกาวสองหน้าหรือกาว ฉาบด้วยทองหนา 20-30 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง ion sputter บันทึกรูปโครงสร้างของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ควบคุมที่ 20 kV ใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า วิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง การกระจายตัว และพื้นผิวของเม็ดแป้งจากรูปที่บันทึกได้ด้วยเครื่อง

3.3.4.5 การทดสอบสมบัติการหุงต้มของข้าว (กฤตนัย และชัยยงค์, 2556)

การหาระยะเวลาในการหุงต้ม (Cooking time)

นำข้าวกล้องงอกที่ผ่านกระบวนการคัดแยกข้าวเมล็ดเต็มมาแล้วมา 2 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นใส่หลอดทดลอง 20 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำเดือดประมาณ 10 นาที จากนั้นนำเมล็ดข้าวมากดโดยใช้กระจกใส 2 แผ่นกดลงบนเมล็ดข้าวที่ต้มแล้วทำการกดทุก ๆ 1 นาที จนสังเกตได้ว่าเมล็ดข้าวที่กดนั้นไม่มีแกนสีขาวเหลืออยู่และตรงนั้นคือ ระยะเวลาในการหุงต้ม (Cooking time)

การหาปริมาณการดูดซับน้ำ (Water uptake)

ชั่งเมล็ดข้าวกล้องงอกจำนวน 2 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดจนถึงเวลา cooking time ยกหลอดขึ้นจากน้ำเดือด

Prince of Songkla University Pattani Campus

เทน้ำทิ้ง รอให้เย็นและนำข้าวที่หุงสุกไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำมาคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำ (Water uptake) ดังสมการที่ 21 ดังนี้

$$\text{Water uptake (\%)} = \frac{W_c - W_{uc}}{W_{uc}} \times 100 \quad (21)$$

เมื่อ W_c = น้ำหนักเมล็ดข้าวที่ผ่านการหุง (g)

W_{uc} = น้ำหนักเมล็ดข้าวที่ยังไม่ผ่านการหุง (g)

ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก (Solid loss)

ชั่งเมล็ดข้าวกล้องจำนวน 2 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดจนถึงเวลา cooking time จากนั้นเทน้ำที่ใช้ในการหุงข้าว ใส่ภาชนะที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน รอให้เย็นแล้วนำน้ำนั้นไปอบที่ 100±5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาใส่ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 45 นาที ชั่งน้ำหนักของภาชนะหลังอบแล้วนำมาคำนวณหา Solid loss ดังสมการที่ 22 ดังนี้

$$\text{Solid loss} = \frac{B - A}{C} \times 100 \quad (22)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักภาชนะเริ่มต้น (กรัม)

B คือ น้ำหนักภาชนะหลังอบ (กรัม)

C คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.3.5 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

นำข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด ข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม) และข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) มาการกะเทาะเปลือกแล้วบดให้เป็นผงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ดังนี้

3.3.5.1 ปริมาณแอนโทไซยานิน (Anthocyanin)

การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด ด้วยวิธี pH differential ดัดแปลงตามวิธีของ Lee *et al.* (2005) ชั่งตัวอย่างข้าวที่ผ่านการบด 1 กรัม เติมสารที่ใช้ในการสกัด (40% เมทานอล:กรดไฮโดคลอริก ในอัตราส่วน 98:2 มิลลิลิตร) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองแล้วนำไปวิเคราะห์ดังนี้

หลอดที่ 1 ปิเปตสารสกัดแล้วเจือจางด้วย KCl buffer pH 1.0 ในอัตราส่วน 1:10 ส่วนในหลอดที่ 2 ปิเปตสารสกัดแล้วเจือจางด้วย $CH_3CO_2Na.3H_2O$ pH 4.5 ในอัตราส่วน 1:10 จากนั้นนำหลอดทั้ง 2 ไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้ง 520 และ 700 นาโนเมตร คำนวณปริมาณแอนโทไซยานินจากสมการที่ 23 ดังนี้

$$\text{ปริมาณแอนโทไซยานิน(mg/l)} = (A \times MW \times DF \times 10^3)/ (e \times L) \qquad (23)$$

โดยที่ A = (A513 nm - A700nm) pH 1.0 - (A510 nm – A700nm) pH 4.5

MW = 449.2 g/mol (น้ำหนักโมเลกุลของ Cyanidin-3-glucoside)

e = 26,900 L/mol/cm (โมลาร์แอฟซอฟติวิตี้)

L = 1 cm (ความกว้างของ cuvette)

DF = Dilution factor ของสารละลายตัวอย่าง

10^3= factor for conversion from g to mg

รายงานผลในรูปของมิลลิกรัมไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ในตัวอย่าง 100 กรัมน้ำหนักแห้ง (mg cyanidin-3-glucoside/100 g dry weight)

3.3.5.2 ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดิน (Proanthocyanidin)

วิเคราะห์ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดิน ดัดแปลงวิธีตามวิธีของ Hu *et al* (2017) ชั่งตัวอย่างข้าวที่ผ่านการบด 0.5 กรัม สกัดด้วยเมทานอล:กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ (85:15 v/v) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร โดยนำไปเขย่าในที่มืดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงที่ 4,100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิห้อง ปิเปตสารสกัด 0.6 มิลลิลิตร เติม 1.5 มิลลิลิตร ของสารละลาย A (1% vanillin ในเมทานอล) เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปทำปฏิกิริยาในอ่างน้ำร้อน

Prince of Songkla University Pattani Campus

30 °C เป็นเวลา 20 นาที เติม 1.5 มิลลิลิตรของสารละลาย B (ซักรดลฟูริก:เมทานอล (1:4 v/v)) เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 500 นาโนเมตร ใช้ Catechin เป็นสารมาตรฐาน

3.3.5.3 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลลิกทั้งหมดโดยใช้วิธี Spectrophotometry ที่มี Folin-Ciocalteu เป็นสารรีเอเจนต์ในการทำให้เกิดสารสี ดัดแปลงตามวิธีของ Thammapat *et al*. (2015). ชั่งตัวอย่างข้าวที่ผ่านการบด 1 กรัม สกัดด้วย 70% เอทานอล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิ 25 °C 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ทำการสกัดอีกสองครั้ง นำส่วนใสที่ได้มารวมกัน แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ปิเปตสารสกัดปริมาตร 200 ไมโครลิตร เติม 10% Folin–Ciocalteu reagent ปริมาตร 800 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน 1 นาที เติม 7.5% Na_2CO_3 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน 1 นาที ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 5 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ตั้งให้เกิดปฏิกิริยายาในที่มืด 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตร โดยใช้ gallic acid เป็นสารมาตรฐาน

3.3.5.4 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total flavonoid content)

ใช้สารสกัดที่ได้จากข้อ 3.3.5.3 วิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด โดยดัดแปลงวิธีของ Basker และคณะ (2011) ปิเปตสารสกัดปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติม 5% $NaNO_2$ ปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร ตั้งให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที หลังจากนั้นเติม 10% $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร ตั้งให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที แล้วเติม NaOH เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1.0 มิลลิตร และน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร เขย่าให้ผสมกันแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร โดยใช้ Catechin เป็นสารมาตรฐาน

3.3.5.5 วิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH

ใช้สารสกัดที่ได้จากข้อ 3.3.5.3 วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ตามวิธีของ Iqbal *et al*. (2005) ทำการดูดสารสกัดปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมสาร DPPH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันวางทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้องและวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร และคำนวณ % DPPH scavenging effect จากสมการที่ 24 ดังนี้

Prince of Songkla University Pattani Campus

$$\text{DPPH scavenging effect (\%)} = 1 - (\frac{A_{test}}{A_{control}}) \times 100 \quad (24)$$

เมื่อ A_{test} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (สารสกัดตัวอย่าง+DPPH)

$A_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH

3.3.5.6 วิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี $ABTS^{\cdot+}$

ใช้สารสกัดที่ได้จากข้อ 3.3.5.3 วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ตามวิธีของ Shen *et al.*, (2009) เตรียมสารละลาย $ABTS^{\cdot+}$ โดยเตรียมจาก 7mM ABTS stock solution กับ 2.45 mM Potassium peroxydisulfate (2:1 v/v) ตั้งให้ทำปฏิกิริยาในที่มืด 12-16 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้ นำ $ABTS^{\cdot+}$ มาเจือจางด้วย 70% เอทานอล ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 0.700±0.020 โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตร ปิเปตสารสกัดปริมาตร 100 ไมโครลิตร เติม $ABTS^{\cdot+}$ ที่เจือจางปริมาตร 3 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งให้ทำปฏิกิริยาในที่มืด 6 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร คำนวณ % $ABTS^{\cdot+}$ scavenging effect จากค่าการดูดกลืนแสง ดังสมการที่ 25 ดังนี้

$$ABTS^{+} \text{ scavenging effect } \% = \frac{A_{test}}{A_{control}} \times 100 \quad (25)$$

เมื่อ A_{test} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (สารสกัดตัวอย่าง+$ABTS^{\cdot+}$)

$A_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย $ABTS^{\cdot+}$

3.3.5.7 สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

ใช้สารสกัดที่ได้จากข้อ 3.3.5.3 วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP วิเคราะห์ดัดแปลงวิธีของ Benzie and Strain (1996) ทำการดูดสารสกัด 100 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติม FRAP reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบ่มที่ $37^{o}C$ เป็นเวลา 4 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถการต้านออกซิเดชันจากกราฟมาตรฐานของ $FeSO_4 \cdot 6H_2O$

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.3.5.8 ปริมาณสาร γ-aminobutyric acid (GABA)

วิเคราะห์ปริมาณสาร γ-aminobutyric acid (GABA) ดัดแปลงจาก kitaoka และ Nakano (1969) ; Karladee และ Suriyong (2012) ชั่งตัวอย่างข้าวที่ผ่านการบด 3 กรัม สกัดด้วย 80% เอทานอล ปริมาตร 30 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ระเหยเอทานอลจนหมด จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร นำสารสกัดเก็บไว้ในขวดสีชา เพื่อนำไปวิเคราะห์ ปิเปตสารสกัดปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติม Borate buffer ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร และ 6% Phenol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและทำให้เย็นในอ่างน้ำแข็ง 5 นาที จากนั้นเติม 7.5% NaOCl ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มในน้ำเดือด 10 นาที ทำให้เย็นทันทีในอ่างน้ำแข็ง 5 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 630 นาโนเมตร

3.4.4 การเก็บรักษา

เมื่อได้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์แล้ว จะทำการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยสภาวะการอบแห้งที่เหมาะ แล้วทำการบรรจุในถุงสุญญากาศชนิด Nylon/LLDPE ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอกเพื่อศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก ดังรูปที่ 3.9

ชั่งข้าวเปลือกตามต้องการแล้วนำมาทำความสะอาด

↓

นำข้าวเปลือกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
และเพาะงอกประมาณ 3 วัน (นงนุช, 2555)

↓

นึ่งข้าวโดยใช้ซึ้งนึ่ง ประมาณ 30 นาที (สุกัญญา, 2559)

↓

เก็บในที่อับอากาศ 30 นาที แล้วนำมาผึ่งไว้ในสภาวะแวดล้อม
เพื่อให้ข้าวเปลือกเย็นตัว (ยุทธนา และสุภวรรณ, 2553)

↓

อบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด (ใช้สภาวะที่ได้จากการศึกษาการอบแห้ง)
เก็บในที่อับอากาศ (Tempering) 30 นาที

↓

แล้ววางที่สภาวะแวดล้อม 2 สัปดาห์โดยใช้การเป่าลมเพื่อช่วยความชื้นสุดท้ายเป็น
14-16% มาตรฐานแห้ง (สุชาติ, 2540)

↓

กะเทาะเปลือก

↓

บรรจุถุงสุญญากาศชนิด Nylon/LLDPE (รูปที่ 3.10) และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 เดือน

↓

วิเคราะห์คุณภาพทางกายและคุณภาพทางเคมี (ทุก ๆ เดือน)

รูปที่ 3.9 การเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอกในการศึกษาผลการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

Prince of Songkla University Pattani Campus

(ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

รูปที่ 3.10 ลักษณะการบรรจุข้าวกล้องงอกแบบสุญญากาศเพื่อการเก็บรักษา
(ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และ (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของการอบแห้ง

4.1.1 การหาความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density, ρ)

ความหนาแน่นปรากฏเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การอบแห้ง เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความชื้นของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ จากการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตัง ซึ่งมีความชื้นอยู่ในช่วง 20-60 % มาตรฐานแห้ง พบว่าข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงามีความหนาแน่นปรากฏอยู่ในช่วง 521.47-601.87 kg/m^3 ส่วนข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง มีความหนาแน่นปรากฏอยู่ในช่วง 463.86-573.60 kg/m^3 และจากการทดลอง พบว่าข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงามีความหนาแน่นปรากฏมากกว่าข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง เนื่องจากข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงามีขนาดของเมล็ด (ความยาว ความกว้าง และความหนา) มากกว่าข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง และเมื่อนำผลการทดลองของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของข้าวพบว่า เมื่อข้าวมีความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.1 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของข้าวกล้องงอกจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น การวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา	ρ=2.2347M+476.62	R^2=0.9972	RMSE=2.361
ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง	ρ=2.891M+405.21	R^2=0.9906	RMSE=3.894

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นปรากฏ, kg/m^3

M คือ ความชื้นของข้าวเปลือกงอก, % มาตรฐานแห้ง

4.1.2 การหาสัดส่วนช่องว่างของอากาศ (Void fraction, % ε)

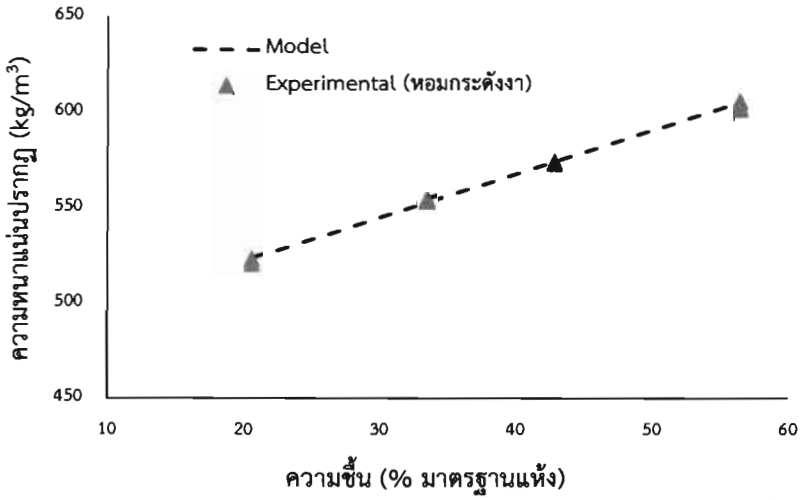
การศึกษาสัดส่วนช่องว่างของอากาศจะทำให้สามารถกำหนดขนาดของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างของอากาศกับความชื้นของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ จากการทดลองหาสัดส่วนช่องว่างของอากาศของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และพันธุ์ชีบูกันตัง ซึ่งมีความชื้นอยู่ในช่วง 20-60% มาตรฐานแห้ง พบว่าข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงามีสัดส่วนช่องว่างของอากาศอยู่ในช่วง 48.13-54.40% ส่วนข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังมีสัดส่วนช่องว่างของอากาศอยู่ในช่วง 48.72-56.29 % และเมื่อนำผลการทดลองของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างของอากาศกับความชื้นของข้าวกล้องงอก พบว่าเมื่อข้าวมีความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้สัดส่วนช่องว่างของอากาศลดลงดังรูปที่ 4.2 โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างของอากาศกับความชื้นของข้าวกล้องงอกจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น การวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างของอากาศกับความชื้นของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา	ε=58.051-0.1728M	R^2=0.9827	RMSE=0.302
ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง	ε=60.553-0.2034M	R^2=0.9853	RMSE=1.189

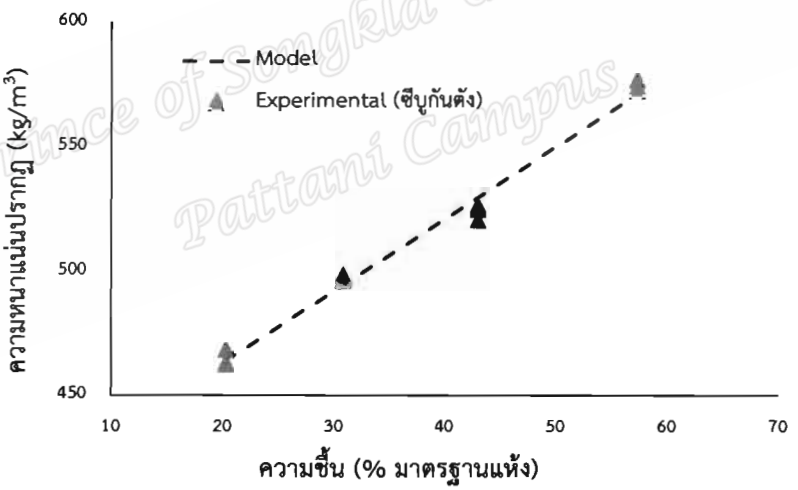
เมื่อ ε คือ สัดส่วนช่องว่างของอากาศ, %

M คือ ความชื้นของข้าวเปลือกงอก, % มาตรฐานแห้ง

Prince of Songkla University Pattani Campus



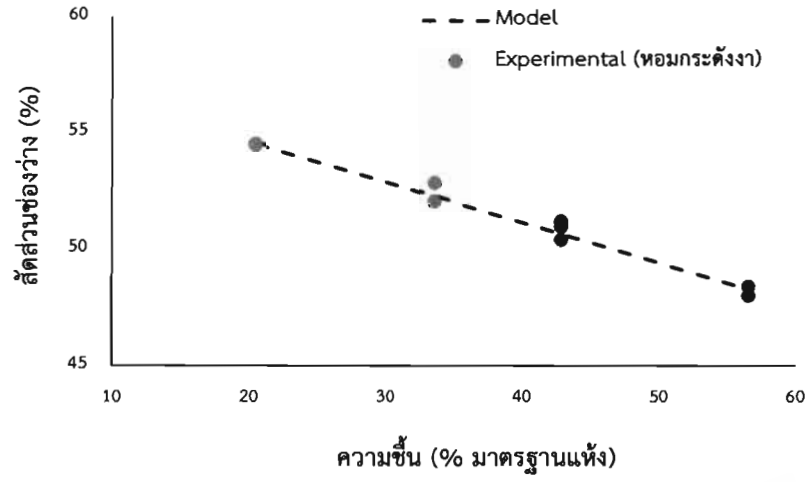
(ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา



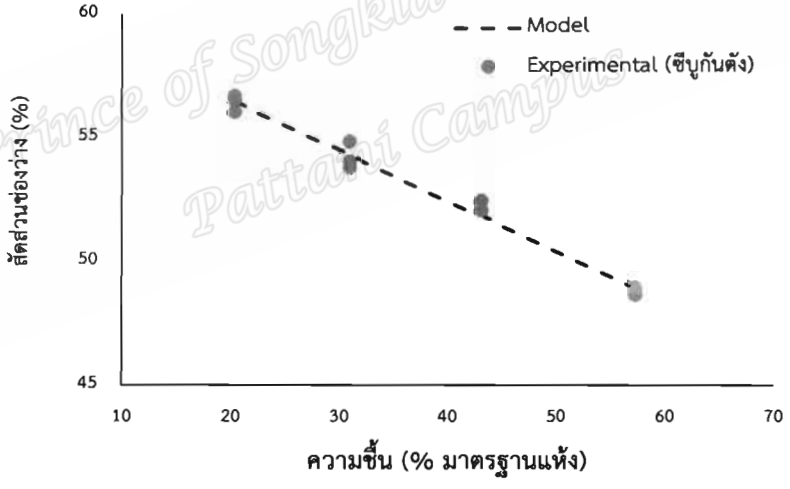
(ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของข้าวกล้องงอก (ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และ (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา



(ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างของอากาศกับความชื้นของของข้าวกล้องงอก (ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และ (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

Prince of Songkla University Pattani Campus

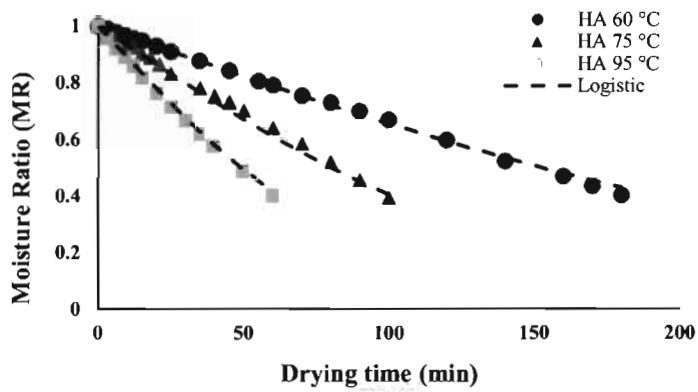
4.2 ผลการทดลองหาจลนพลศาสตร์และสมการการอบแห้งทางคณิตศาสตร์

4.2.1 ผลการอบแห้ง

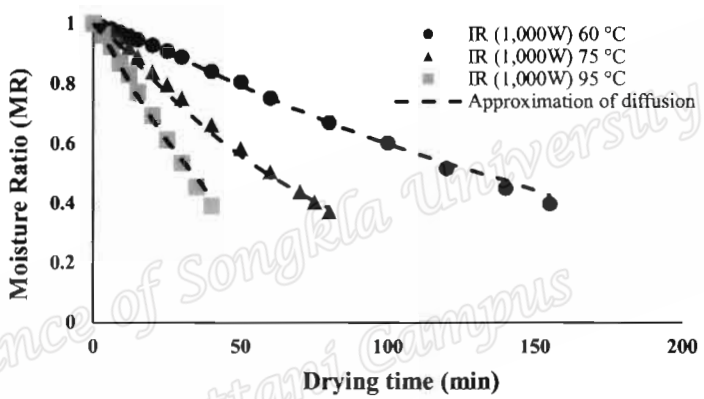
จากการทดลองการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตัง โดยใช้แหล่งพลังงานในการอบแห้ง 2 แหล่ง คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ให้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1.1 ปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์ของข้าวกล้องงอก

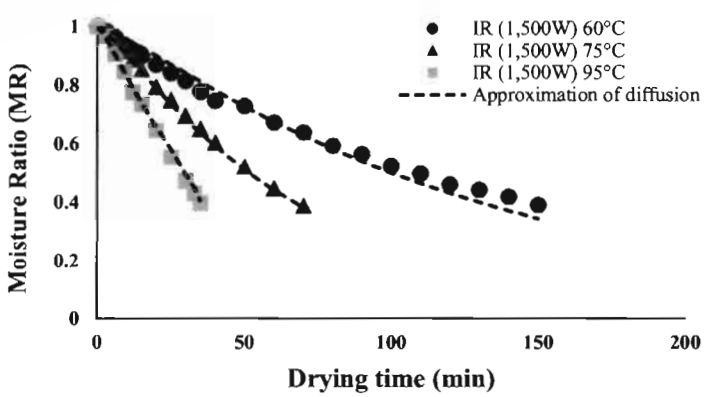
จากการทดลองการอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 50-60% มาตรฐานแห้ง โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 60 75 และ 95 °C โดยทำการอบแห้งให้มีความชื้นสุดท้ายประมาณ 20-25% มาตรฐานแห้ง นำค่าความชื้นต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงจลนพลศาสตร์การอบแห้งในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งจากรูปจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W เมื่อพิจารณาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลังวัตต์เดียวกันพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะให้ระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิต่ำเช่นกัน เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเมล็ดกับอุณหภูมิอบแห้งทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเร็วขึ้น การลดลงของความชื้นในลักษณะนี้จะเป็นการลดลงแบบเอกซ์โปแนนเชียล (Exponential) :ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุภาณี (2555) ซึ่งได้ทำการทดลองการอบแห้งข้าวกาบาพันธุ์สังข์หยดและพันธุ์เฉี้ยงพัทลุงด้วยลมร้อนแบบพุ่งชนของอากาศ อบแห้งด้วยลมร้อนแบบอากาศไหลขนานและอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 60-100 °C พบว่าที่แหล่งพลังงานเดียวกันการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ



(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



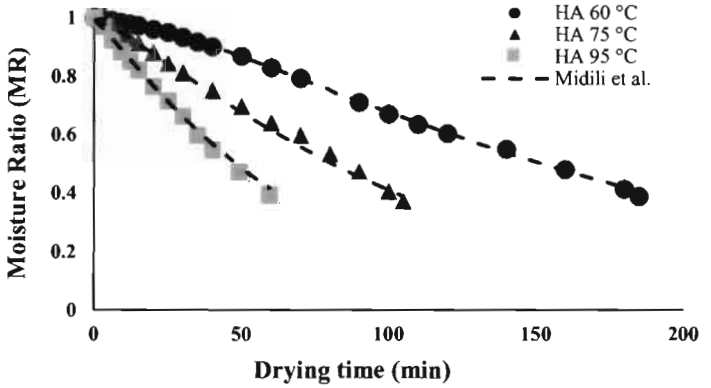
(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W



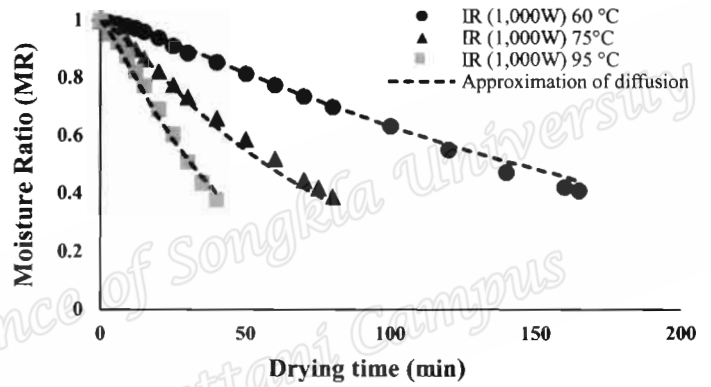
(ค) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W

รูปที่ 4.3 ปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ (ค) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W

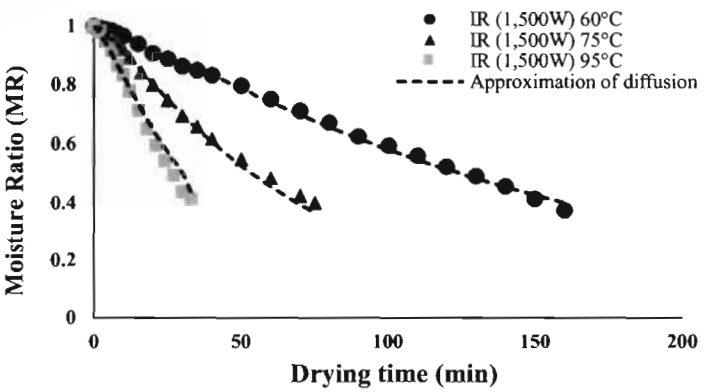
Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W



(ค) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W

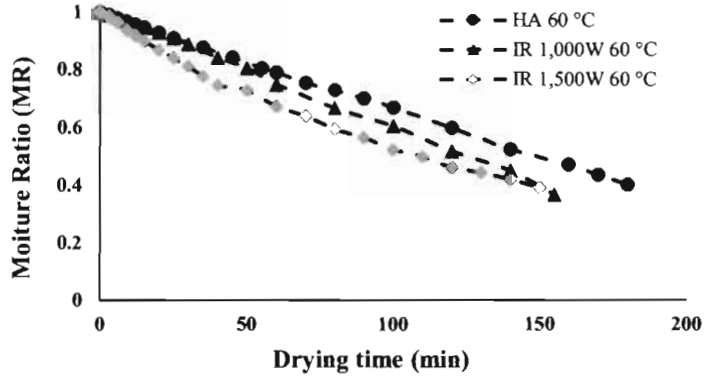
รูปที่ 4.4 ปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ (ค) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W

Prince of Songkla University Pattani Campus

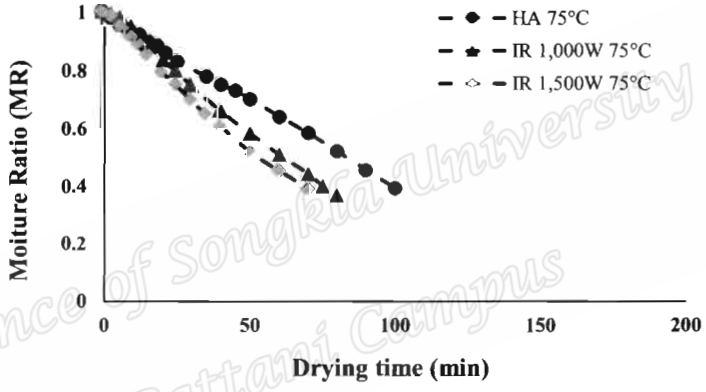
4.2.1.2. ปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์ของข้าวกล้องงอก

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งจากแหล่งพลังงานที่ต่างกัน คือ อบแห้งด้วยลมร้อนและอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 75 และ 95 °C พิจารณาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W จะใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งที่กำลัง 1,000W และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดกับการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีระยะเวลาการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้จากหลอดรังสีอินฟราเรดเป็นพลังงานความร้อนที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รังสีอินฟราเรดจากแหล่งพลังงานความร้อนมาตกกระทบลงบนผิวของเมล็ดข้าวแล้วทะลุผ่านเข้าในเนื้อของเมล็ดข้าว ทำให้พลังงานส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีถูกเมล็ดข้าวดูดกลืนเอาไว้ ทำให้โมเลกุลของเมล็ดข้าวเกิดการสั่นสะเทือนแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนขึ้นในเมล็ดข้าว ดังนั้นน้ำที่อยู่เมล็ดข้าวก็จะได้รับความร้อนและเกิดการแพร่ไปยังบริเวณผิวของเมล็ดข้าว ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งเมล็ดข้าวและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี (Soponronnarit *et al*., 2006; Nathakaranakule *et al*., 2010)

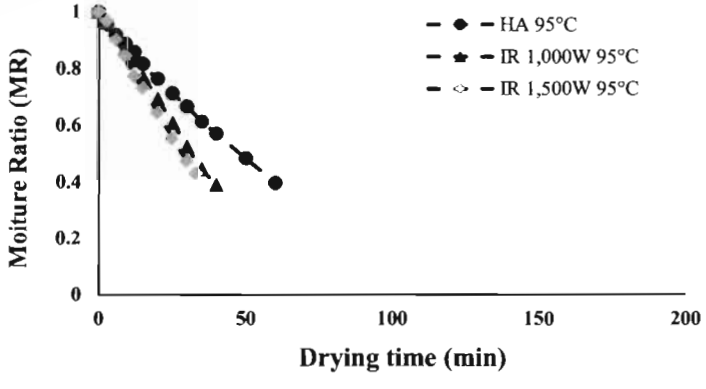
Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C



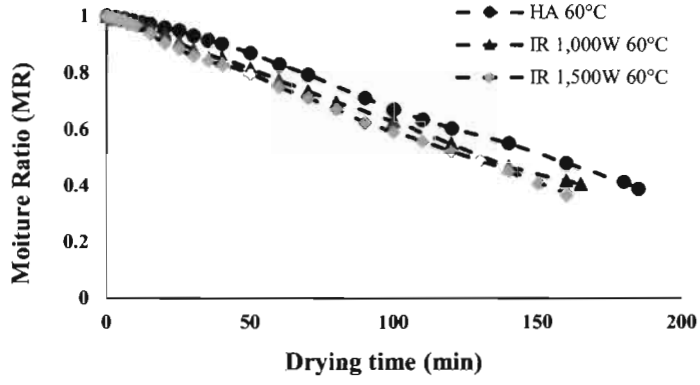
(ข) อุณหภูมิอบแห้ง 75 °C



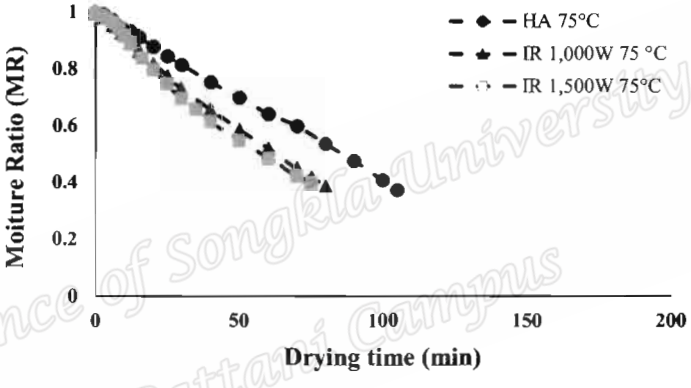
(ค) อุณหภูมิอบแห้ง 95 °C

รูปที่ 4.5 ปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา (ก) อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (ข) อุณหภูมิอบแห้ง 75 °Cและ (ค) อุณหภูมิอบแห้ง 95 °C

Prince of Songkla University Pattani Campus

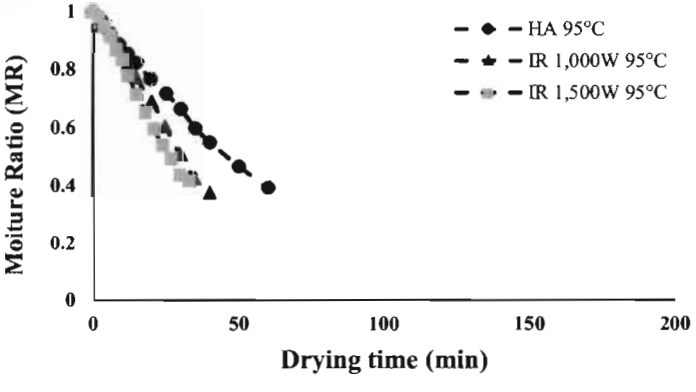


(ก) อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C



Prince of Songkla University Pattani Campus

(ข) อุณหภูมิอบแห้ง 75 °C



(ค) อุณหภูมิอบแห้ง 95 °C

รูปที่ 4.6 ปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง (ก) อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C (ข)อุณหภูมิอบแห้ง 75 °C และ (ค) อุณหภูมิอบแห้ง 95 °C

4.2.2 สมการการอบแห้งทางคณิตศาสตร์

จากข้อมูลการทดลองการอบแห้งข้าวกล้องงอกสามารถหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตัง โดยทำการวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริเคิล 6 สมการ โดยมีรูปแบบสมการ ดังนี้ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รูปแบบสมการเอมพิริเคิล (ปฏิวัติ และคณะ, 2554)

Name of model	Model equation
Newton	MR=exp(-kt)
Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt)
Logarithmic	MR = a exp(-kt) + b
Approximation of diffusion	MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-kbt)
Midilli *et al.*	MR = a exp(-k(t^n)) + bt
Logistic	MR = a / (1+exp(kt))

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น t คือ เวลา a, b, c, n และ k คือค่าคงตัว

ค่าสัมประสิทธิ์ R-Square (R^2) และ Root Mean Square Error (RMSE) จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม โดยพิจารณาที่ค่า R^2 ซึ่งจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ถ้ามีค่ามาก แสดงว่าตัวแปรต้นสามารถอธิบายค่าตัวแปรตามได้ดี ในขณะค่า RMSE เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่บ่งบอกความแตกต่างระหว่างข้อมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ถ้ามีค่าน้อยจะบ่งบอกถึงความผิดพลาดในการทำนายที่น้อย ดังนั้นนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่ดีควรมีค่า R^2 มาก แต่ค่า RMSE น้อย แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรูปแบบนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้แม่นยำและมีความผิดพลาดน้อย (วิกานดา และคณะ 2556)

Prince of Songkla University Pattani Campus

และจากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลพลศาสตร์ของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการ Approximation of diffusion สมการนี้สามารถอธิบายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่า R^2 และ ค่า RMSE ในตารางที่ 4.2 ซึ่งการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9922 และค่า RMSE เท่ากับ 0.0189 และในส่วนของการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาด้วยลมร้อนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลพลศาสตร์ของการอบแห้งนี้ คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการ Logistic สมการนี้สามารถอธิบายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่า R^2 และค่า RMSE ในตารางที่. 4.3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9946 และ 0.0134 ตามลำดับ

และในส่วนของผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลพลศาสตร์ของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการ Approximation of diffusion สมการนี้สามารถอธิบายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่า R^2 และ ค่า RMSE จากตารางที่ 4.3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9896 และ 0.0191 ตามลำดับ และในส่วนของการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังด้วยลมร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลพลศาสตร์ของการอบแห้งนี้ คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการ Midilli *et al*. สมการนี้สามารถอธิบายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่า R^2 และ ค่า RMSE จากตารางที่ 4.3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9963 และ 0.0199 ตามลำดับ

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ที่มีความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง 60-95 °C

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา		
	สมการ	R^2	RMSE
อบแห้งด้วยลมร้อน			
Newton	k=-0.0113+0.0003T	0.9858	0.0219
Henderson and Pabis	k=1.0148+0.0003T, a=1.0158	0.9881	0.0201
Logarithmic	k=0.5456-0.0331T, a=-0.0007, c=0.9880	0.9931	0.0152
Approximation of diffusion	k=-33.63+0.5603T, a=-0.0447, b=0.0007	0.9881	0.0201
Midilli *et al.*	k=0.8324+0.0003T, a=0.9904, b=0.8577, n=1.0019	0.9945	0.0136
Logistic	k=-0.0187+0.0004T, a=2.0002	0.9946	0.0134
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (1,000W และ 1,500W)			
Newton	$k=-0.0231+(3.40\times10^{-6})P+0.00041T$	0.9859	0.0255
Henderson and Pabis	$k=0.0243+(3.45\times10^{-6})P+0.00043T$, a=1.0194	0.9898	0.0231
Logarithmic	$k=1.4710+(-2.74\times10^{-4})P-0.0388T$, a=-0.0012, c=0.9881	0.9787	0.0296
Approximation of diffusion	$k=0.2591+(3.53\times10^{-5})P+0.0046T$, a=-0.0603, b=0.1004	0.9922	0.0189
Midilli *et al.*	$k=1.9672+(3.749\times10^{-6})P+0.00045T$, a=1.0134, b=-1.939, n=0.9997	0.9905	0.0220
Logistic	$k=0.0383+(4.85\times10^{-6})P+0.00069$, a=2.0081	0.9907	0.0216

Prince of Songkla University Pattani Campus

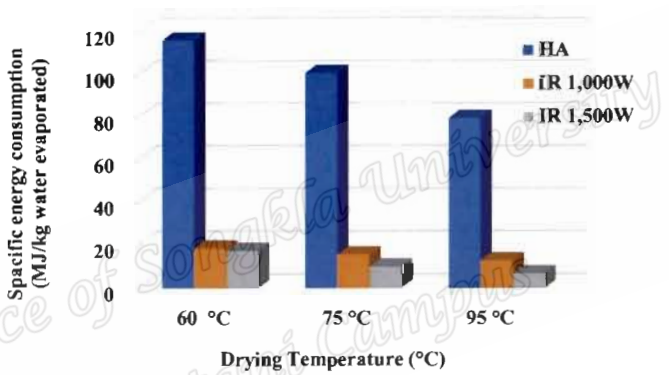
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ที่มีความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง 60-95 °C

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา		
	สมการ	R^2	RMSE
อบแห้งด้วยลมร้อน			
Newton	k=-0.0127+0.0002T	0.9749	0.0317
Henderson and Pabis	k=-0.0136+0.0003T, a=1.0337	0.9838	0.0254
Logarithmic	k=-0.0342-0.0348T, a=-0.0004, c=1.0060	0.9900	0.0199
Approximation of diffusion	k=-0.0136+0.0003T, a=0.0168, b=0.9992	0.9838	0.0254
Midilli *et al.*	k=0.0651+0.0003T, a=0.9905, b=0.0872, n=1.0180	0.9963	0.0199
Logistic	K=-0.0210+0.0004T, a=2.0341	0.9907	0.0254
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (1,000W และ 1,500W)			
Newton	k=-0.02528+(1.58×10^{-6})P+0.00047T	0.9799	0.0276
Henderson and Pabis	k=-0.0266+(1.58×10^{-6})P+0.00050T, a=1.0277	0.9859	0.0230
Logarithmic	k=-0.0088+(-1.73×10^{-4})P-0.0433)T, a=-0.0002, c=0.9982	0.9855	0.0261
Approximation of diffusion	k=0.2616+(-1.47×10^{-5})P-0.0049)T, a=-0.078, b=0.1108	0.9896	0.0191
Midilli *et al.*	k=0.0247+(-1.27×10^{-6})P-0.00045)T, a=1.0183, b=-0.00055, n=1.0254	0.9873	0.0217
Logistic	k=0.0417+(2.33×10^{-6})P-0.00078)T, a=2.0201	0.9882	0.0208

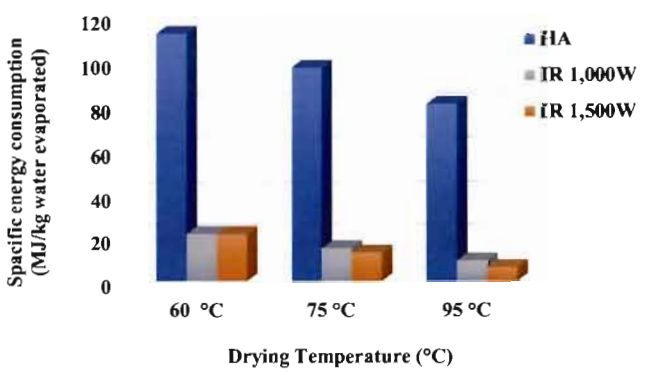
Prince of Songkla University Pattani Campus

4.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

จากการพิจารณารูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลื้องพลังงานจำเพาะลดลง โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุด รองลงมาเป็นการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W ตามลำดับ เนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานให้กับวัสดุ และยังให้ความร้อนในรูปของคลื่นความถี่ จึงส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ต้องใช้ตัวกลาง (อากาศ) ในการพาความร้อนไปยังวัสดุ



(ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา



(ข) ข้าวพันธุ์ซีบูกันตัง

รูปที่ 4.7 อุณหภูมิการอบแห้งต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่มีความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวพันธุ์ซีบูกันตัง

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.4 ผลการทดสอบทางกายภาพ

4.4.1 ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด (Head rice yield)

จากการศึกษาร้อยละข้าวเต็มเมล็ดของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านกระบวนการงอกและการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 95 °C ให้ผลดังตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่าข้าวล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดรวมทั้งข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากในสภาวะแวดล้อม) มีร้อยละข้าวเต็มเมล็ดสูงกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากผลจากการแช่น้ำในขั้นตอนการผลิตข้าวกล้องงอกทำให้เม็ดแป้งที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวมีการดูดซึมน้ำทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนในขั้นตอนของการนึ่งและการอบแห้ง เม็ดแป้งจะเกิดการหลอมขึ้น ซึ่งเป็นการเกิดปรากฏการณ์เจลาติไนเซชัน เมื่ออุณหภูมิเย็นลงหลังการอบแห้ ทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวจับตัวกันแน่นขึ้น ซึ่งจะช่วยลดรอยแตกของเมล็ดข้าวลง จึงทำให้ลดการหักของเมล็ดข้าวระหว่างการกะเทาะเปลือก ข้าวกล้องงอกที่ได้จึงมีร้อยละข้าวเต็มเมล็ดเพิ่มขึ้น (อรอนงค์, 2547)) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกหักของเมล็ดข้าว เช่น การเก็บก่อนอายุหรือช้าเกินไป การเกิดท้องไข่ ขั้นตอนการนวดข้าวหรืออีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือขั้นตอนของการอบแห้งเมล็ดข้าว ข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งที่แหล่งพลังงานเดียวกันแต่อุณหภูมิต่างกัน พบว่า อุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดมีแนวโน้มลดลงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นบริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงแค้นขึ้นภายในเมล็ด ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดมากขึ้น เมื่อนำไปกะเทาะจะทำให้ได้ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดลดลง

4.4.2 ร้อยละท้องไข่ (White belly)

ท้องไข่ คือ จุดทึบแสงภายในเมล็ดข้าว ซึ่งแสดงถึงคุณภาพที่ไม่ดีของข้าวหลังการอบแห้ง ท้องไข่เกิดจากกระบวนการเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งภายในเมล็ดข้าวที่ไม่สมบูรณ์ โดยส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณแกนกลางของเมล็ดข้าว จากการทดลองพบว่า ข้าวกล้องงอกที่ผ่านกระบวนการงอก กระบวนการนึ่งและกระบวนการอบแห้ง มีปริมาณท้องไข่น้อยมากหรือแทบจะไม่มีท้องไข่เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) เนื่องจากข้าวที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ ทำให้เกิดเจลาติไนเซชันภายในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้ง

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด	
	หอมกระดังงา	ชีบูกันตัง
ข้าวอ้างอิง	69.55±2.64^{d}	70.67±0.75^{d}
ข้าวควบคุม	73.87±0.18^{abc}	74.12±0.14^{b}
อบแห้งด้วยลมร้อน		
60	75.53±0.23^{ab}	78.84±0.12^{a}
75	75.76±0.11^{a}	78.85±0.07^{a}
95	75.52±0.01^{ab}	78.71±0.14^{a}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W		
60	73.14±1.72^{bc}	72.67±0.26^{c}
75	72.61±0.38^{c}	73.94±0.12^{c}
95	72.21±0.99^{c}	73.94±0.44^{c}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W		
60	73.62±0.89^{abc}	72.68±0.64^{c}
75	72.72±0.14^{c}	72.32±0.16^{b}
95	72.77±0.24^{c}	72.31±0.32^{b}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.4.3 สี (Color)

สีของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W ที่อุณหภูมิ 60 75 และ 95 °C โดยวัดค่าสีตามมาตรฐานระบบ CIE (L*, a*, b*) ค่า L* หมายถึงค่าความสว่างอยู่ในช่วง 0-100 ค่า +a* คือค่าสีแดง -a* คือค่าสีเขียว และค่า +b* คือค่าสีเหลือง -b* คือค่าสีน้ำเงิน จากตารางที่ 4.5 พบว่าข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด (ทุกสภาวะการทดลอง) และข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการตากในสภาวะแวดล้อม) มีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเหลือง (b*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัย

พันธุ์ข้าวปัตตานี) ในส่วนข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง (ตารางที่ 4.6) ซึ่งเป็นข้าวที่ไม่มีสี เมื่อผ่านกระบวนการงอกแล้วนำมาอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด (ทุกสภาวะการทดลอง) มีค่าความสว่าง (L*) ลดลง ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยพันธุ์ข้าวปัตตานี) ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการรวมกันระหว่างกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีในข้าวทำให้เกิดสารประกอบสีน้ำตาลประเภทเมลานอยดิน (Melanoidin) เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์โดยมีความร้อนทั้งจากการนึ่งและการอบแห้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (สุวรรณา และคณะ, 2554) จึงส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องงอกจะมีสีเข้มกว่าข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก นึ่ง และอบแห้ง (รูปที่ 4.8) ในสภาวะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าการอบแห้งจากแหล่งพลังงานเดียวกันที่อุณหภูมิต่างกัน (60 75 และ 95 ℃) มีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเหลือง (b*) ใกล้เคียงกัน .ในส่วนของแหล่งพลังงานต่างกัน พบว่าข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนจะมีความเข้ม (C^{o}) มากกว่าข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนจะเกิดความร้อนสะสมที่ผิวของเมล็ดข้าวมากกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและการวัดค่าสีจะทำการวัดที่บริเวณผิวของเมล็ดข้าว (กรรณิการ์ และคณะ, 2557)

Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงสีของข้าว (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง

ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	สี				
	L*	a*	b*	C°	ΔE*
ข้าวอ้างอิง	36.64±0.60^{a}	16.88±0.60^{a}	20.78±0.07^{a}	26.77±0.08^{a}	-
ข้าวควบคุม	25.60±0.47^{cd}	9.36±0.17^{c}	8.56±0.08^{c}	12.69±0.15^{de}	18.11±0.32^{bc}
อบแห้งด้วยลมร้อน					
60	27.41±0.51^{b}	10.46±0.09^{b}	9.27±0.05^{b}	14.01±0.03^{c}	16.08±0.54^{d}
75	27.46±0.39^{b}	10.79±0.17^{b}	9.38±0.16^{b}	14.30±0.20^{bc}	15.870.27^{d}
95	27.81±0.66^{b}	10.80±0.10^{b}	9.57±0.10^{b}	14.43±0.03^{b}	15.54±0.55^{d}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W					
60	24.87±0.43^{cd}	9.37±0.03^{c}	8.24±0.40^{cd}	12.48±0.24^{ef}	18.78±0.35^{ab}
75	25.05±0.27^{cd}	9.23±0.20^{c}	8.15±0.27^{cd}	12.31±0.15^{f}	18.78±0.09^{ab}
95	24.27±0.52^{cd}	9.47±0.32^{c}	7.95±0.24^{d}	12.36±0.35^{ef}	19.32±0.31^{a}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W					
60	25.06±0.48^{cd}	9.20±0.16^{c}	8.21±0.24^{cd}	12.34±0.04^{ef}	18.74±0.30^{ab}
75	25.80±0.41^{c}	9.50±0.12^{c}	8.66±0.12^{c}	12.85±0.14^{d}	17.87±0.38^{c}
95	25.85±0.45^{c}	9.50±0.34^{c}	8.65±0.10^{c}	12.85±0.16^{d}	17.84±0.26^{c}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	สี				
	L*	a*	b*	C°	ΔE*
ข้าวอ้างอิง	63.38±0.23^{a}	4.33±0.03^{e}	22.40±0.23^{g}	22.82±0.21^{g}	-
ข้าวควบคุม	51.09±0.25^{g}	6.28±0.17^{bcd}	25.00±0.10^{f}	25.78±0.06^{f}	12.72±0.38^{a}
อบแห้งด้วยลมร้อน					
60	54.13±0.35^{b}	6.17±0.10^{bcd}	27.66±0.12^{a}	28.34±0.14^{a}	10.80±0.30^{d}
75	53.89±0.09^{b}	6.29±0.10^{bcd}	27.22±0.28^{b}	27.93±0.30^{b}	10.83±0.09^{d}
95	54.38±0.11^{b}	6.05±0.10^{d}	26.99±0.28^{bc}	27.66±0.24^{bc}	10.26±0.09^{d}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W					
60	51.87±0.24^{de}	6.30±0.02^{bcd}	26.28±0.24^{de}	27.03±0.22^{de}	12.31±0.19^{bc}
75	52.46±0.34^{c}	6.34±0.20^{bc}	26.34±0.09^{de}	27.10±0.12^{de}	11.78±0.22^{c}
95	52.21±0.37^{cd}	6.20±0.11^{bcd}	26.00±0.36^{e}	26.73±0.33^{e}	11.89±0.08^{c}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W					
60	51.24±0.34^{fg}	6.49±0.16^{a}	26.24±0.30^{de}	27.03±0.29^{de}	12.92±0.51^{a}
75	51.64±0.14^{ef}	6.47±0.10^{ab}	26.49±0.6^{d}	27.26±0.07^{cd}	12.61±0.04^{ab}
95	51.18±0.44^{fg}	6.51±0.20^{a}	26.63±0.05^{cd}	27.41±0.08^{cd}	13.10±0.52^{a}

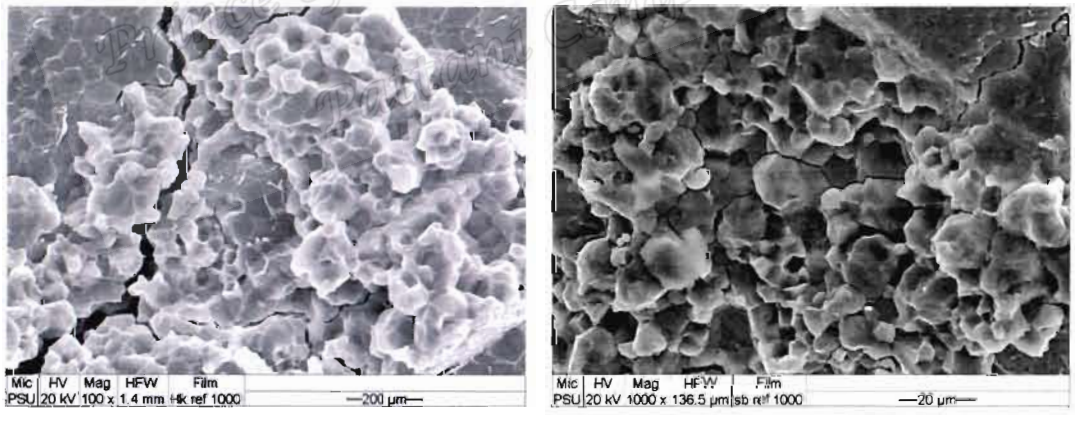
หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.4.4 ศึกษาสัณฐานวิทยาของข้าวกล้องงอก

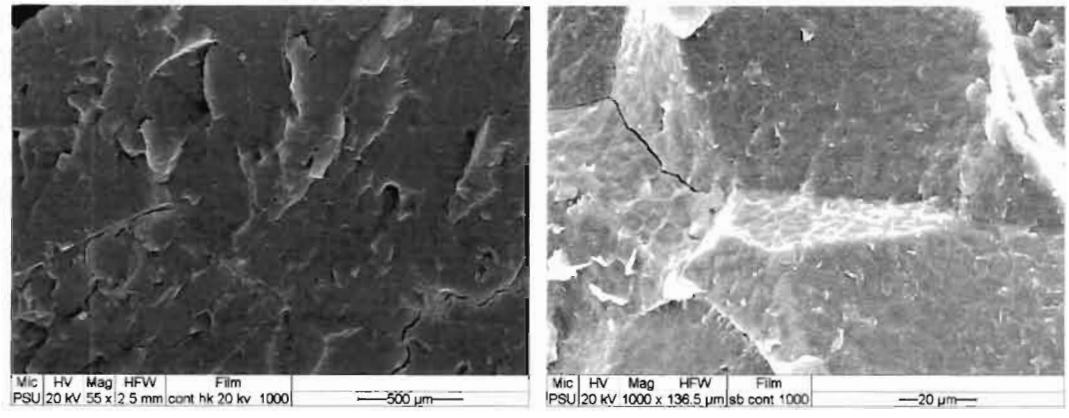
การศึกษาลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ด้วยวิธีการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) พบว่าลักษณะโครงสร้างของข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก นึ่ง และอบแห้ง มีความแตกต่างกับข้าวที่ผ่านกระบวนการงอก นึ่ง และอบแห้ง จากการทดลองข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) ซึ่งเป็นข้าวที่ไม่ผ่านการงอก นึ่ง และอบแห้ง พบว่าโครงสร้างของข้าวอ้างอิงยังมีเม็ดแป้งเกาะกันอยู่เป็นจำนวนมากดังรูปที่ 4.9 ส่วนของข้าวควบคุม เป็นข้าวที่ผ่านการงอก นึ่ง และลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม ดังรูป 4.10 จะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างจากข้าวอ้างอิง เนื่องจากความร้อนจากการนึ่งจะส่งผลให้เม็ดแป้งบางส่วนเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันภายในเมล็ด ความร้อนจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวและเชื่อมประสานกัน และในส่วนของข้าวที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ (งอก นึ่ง และอบแห้ง) จะมีลักษณะโครงสร้างที่เรียบ เนื่องจากเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันภายในเมล็ดที่สมบูรณ์ขึ้น เม็ดแป้งเริ่มหลอมตัวและประสานกันกลายเป็นพื้นเรียบมากขึ้น ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12

Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง

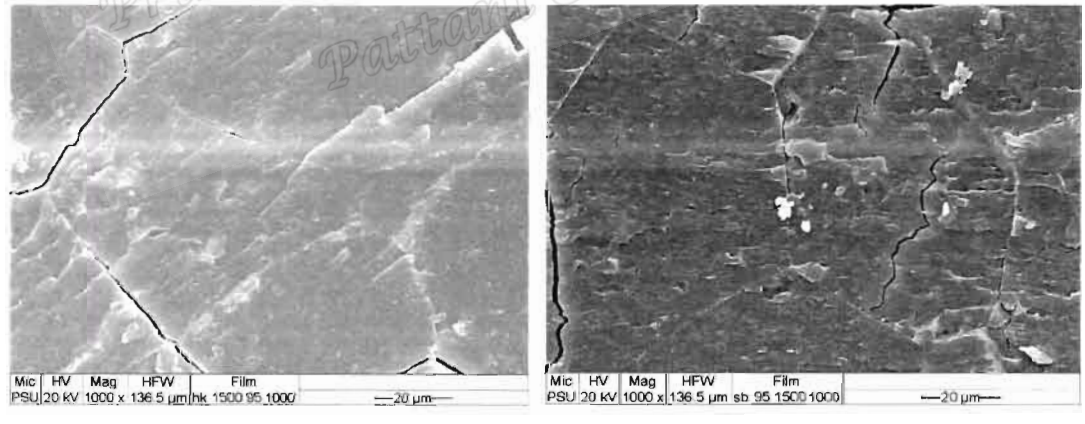
รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างของข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่กำลังขยาย x1,000 และ (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตังที่กำลังขยาย x1,000



(ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

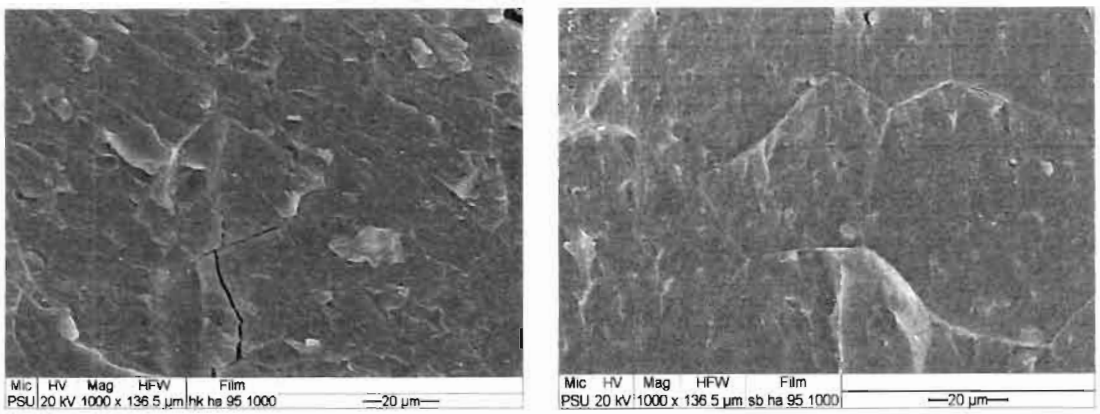
รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างของข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่กำลังขยาย x1,000 และ (ข) ข้าวพันธุ์ซีบูกันตังที่กำลังขยาย x1,000

Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W อุณหภูมิ 95 °C ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่กำลังขยาย x1,000 และ (ข) ข้าวพันธุ์ซีบูกันตังที่กำลังขยาย x1,000



(ก) ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา (ข) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง

รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 95 °Cด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่กำลังขยาย x1,000 และ (ข) ข้าวพันธุ์ชีบูกันตังที่กำลังขยาย x1,000

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.4.5 การทดสอบคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวกล้องงอก

จากการทดสอบคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด ในช่วงอุณหภูมิ 60 75 และ 95 °C ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ รวมถึงข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม) จะใช้เวลาในการหุงต้มนานกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) เนื่องจากการนึ่งและการอบแห้งทำให้เม็ดสตาร์ชภายในเมล็ดข้าวเกิดเจลาทิไนเซชัน และการประสานกันของเม็ดสตาร์ชทำให้น้ำซึมเข้าไปได้ยากจึงใช้เวลาในการหุงต้มนานกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการนึ่ง การอบแห้งข้าวกล้องงอกที่แหล่งพลังงานเดียวกันแต่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าเวลาที่ใช้ในการหุงต้มไม่แตกต่างกัน และจากการศึกษาข้าวทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าข้าวพันธุ์หอมกระดังงาจะใช้เวลาในการหุงต้มเร็วกว่าข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง เนื่องจากข้าวพันธุ์หอมกระดังงามีปริมาณอะไมโลสต่ำ ปริมาณอะไมโลแพคตินสูง เมื่อให้ความร้อนแก่ข้าว ความร้อนจะเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจน โมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกระหว่างสายของโมเลกุลอะไมโลแพคตินได้ง่ายกว่าอะไมโลส ดังนั้นข้าวที่มีประมาณอะไมโลสต่ำ ปริมาณอะไมโลแพคตินสูงจึงหุงต้มได้เร็วกว่าข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ปริมาณอะไมโลแพคตินต่ำ

สำหรับปริมาณการดูดซับน้ำ (Water uptake) ของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W อุณหภูมิการอบแห้งที่ 60 75 และ 95 °C ให้ผลการทดลองดังนี้ ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 °C ให้ค่าการดูดซับน้ำน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 75 °C และการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลังเดียวแต่อุณหภูมิต่างกัน พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกันมีค่าการดูดซับน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ1,500W อุณหภูมิการอบแห้งที่ 95 °C มีค่าการดูดซับน้ำน้อยกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวที่ผ่านการงอกและอบแห้งจะมีค่าการดูดซับน้ำน้อยกว่าข้าวอ้างอิง ซึ่งเป็นข้าวที่ไม่ผ่านการงอก (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) จากการทดลองพบว่าข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้มีการดูดซับน้ำน้อยลง เนื่องจากข้าวที่ผ่านการแช่น้ำ นึ่งและอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีการเกิดเจลาติไนเซชันภายในเมล็ดแป้ง ส่งผลให้โครงสร้างภายในเกิดการจับตัวกันแน่นขึ้น ทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปภายในได้น้อย

ปริมาณของแข็งละลายในน้ำข้าวสุก (Solid loss) ของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W รวมถึงข้าวควบคุม (ข้าวที่ข้าวกล้องงอกที่ตากในสภาวะแวดล้อม) มีค่าน้อยกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) จากการอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่างกันพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของแข็งละลายในน้ำข้าวสุกน้อยลง และข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดในทุกสภาวะการทดลงมีปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุกไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการเจลลาติไนเซชันได้สมบูรณ์กว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้โครงสร้างภายในเกิดการจับตัวกันแน่นขึ้น การเกิดโครงสร้างที่จับตัวกันแน่นขึ้นนี้ก็เป็นการปกป้องการสูญเสียของแข็งในระหว่างกระบวนการหุงต้ม ซึ่งสอดคล้องกับผลของเวลาที่ใช้ในการหุงต้ม และผลการทดลองในส่วนของโครงสร้าง จาการทดสอบคุณภาพด้านการหุงต้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ กฤตนัย และชัยยงค์ (2556) โดยได้ทำการศึกษาการอบแห้งของข้าวเปลือกเริ่มงอกโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันและทดสอบคุณภาพด้านการหุงต้ม พบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งจะใช้เวลาในการหุงต้มนานขึ้น ปริมาณการดูดซับน้ำและปริมาณของแข็งละลายในน้ำข้าวสุกมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง

ตารางที่ 4.7 คุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่อบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	คุณภาพการหุงต้มข้าวสุก		
	เวลาในการหุงต้ม (นาที)	การดูดซับน้ำ (%)	ของแข็งละลายในน้ำข้าวสุก (%)
ข้าวอ้างอิง	35	286.63±6.33^{a}	2.44±0.09^{a}
ข้าวควบคุม	46	277.59±5.63^{b}	2.35±0.05^{ab}
อบแห้งด้วยลมร้อน			
60	48	272.05±4.27^{bcd}	2.20±0.12^{abc}
75	48	268.49±6.30^{cd}	1.51±0.09^{ef}
95	47	255.21±2.21^{f}	1.21±0.05^{f}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W			
60	44	273.84±2.97^{bc}	2.01±0.32^{abcd}
75	45	272.48±0.48^{bcd}	1.96±0.08^{bcde}
95	48	270.66±0.47^{bcd}	1.86±0.03^{cde}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W			
60	47	265.36±3.91^{de}	1.73±0.62^{de}
75	50	259.86±4.20^{ef}	1.69±0.26^{de}
95	51	257.97±2.88^{ef}	1.58±0.24^{def}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยพันธุ์ข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.8 คุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังที่อบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	คุณภาพการหุงต้มข้าวสุก		
	เวลาในการหุงต้ม (นาที)	การดูดซับน้ำ (%)	ของแข็งละลายในน้ำข้าวสุก (%)
ข้าวอ้างอิง	32	356.52±0.53^{a}	2.00±0.61^{a}
ข้าวควบคุม	44	325.21±3.61^{b}	1.86±0.54^{ab}
อบแห้งด้วยลมร้อน			
60	50	314.85±3.85^{c}	1.63±0.18^{abcd}
75	50	299.53±5.48^{d}	1.33±0.23^{cd}
95	52	287.79±2.50^{e}	1.15±0.04^{d}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W			
60	48	222.98±0.81^{f}	1.68±0.06^{abc}
75	50	221.43±0.67^{fg}	1.450±05^{bcd}
95	53	216.42±5.29^{g}	1.32±0.08^{cd}
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W			
60	45	210.30±2.59^{h}	1.20±0.05^{cd}
75	47	19 4.20±0.95^{i}	1.12±0.06^{d}
95	52	189.76±4.15^{i}	1.11±0.03^{d}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยพันธุ์ข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.5 ผลการทดสอบทางเคมี

4.5.1 ปริมาณแอนโทไซยานิน และโปรแอนโทไซยานิดิน

ข้าวกล้องที่มีสีเกิดจากการสะสมของรงควัตถุ 3 ชนิดคือ แอนโทไซยานิน ฟลาโวนอยด์ และโปรแอนโทไซยานิน (Wiriyasuk, 2005) ลักษณะของเฉดสีที่แสดงออกขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารที่สะสมโดยพบว่าเมล็ดที่มีเยื่อหุ้มสีม่วงนั้น จะมีการสะสมของสารแอนโทไซยานินปริมาณมาก ในขณะที่เยื่อหุ้มเมล็ดสีแดงและสีน้ำตาลจะมีการสะสมของสารโปรแอนโทไซยานิดินปริมาณมาก เป็นต้น (Furukawa *et al*., 2006; Reddy *et al*., 1995) สารแอนโทไซยานินเป็นสารประกอบฟีนอล เป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ (รัตนา และคณะ, 2557) และมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) จากการวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินและโปรแอนโทรไซยานิดินในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา พบว่าไม่พบสารแอนโทไซยานิน แต่พบสารโปรแอนโทไซยานิดินในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา เนื่องจาก ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาเป็นข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีแดงน้ำตาล ซึ่งในข้าวที่มีเยื่อมหุ้มสีนี้จะมีการสะสมของโปรแอนโทไซยานิดิน และจากการทดลองอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดให้ผลดังตารางที่ 4.9 ซึ่งการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดรวมทั้งข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่ตากในสภาวะแวดล้อม) จะมีปริมาณของโปรแอนโทไซยานิดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) เมื่อพิจารณาการอบแห้งจากแหล่งพลังงานและกำลังวัตต์เดียวกันที่อุณหภูมิต่างกัน (60 75 และ 95 °C) พบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำจะมีปริมาณโปรแอนโทไซยานินดินต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง เนื่องจากการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลานานทำให้ตัวอย่างสัมผัสกับออกซิเจนนานกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการที่ตัวอย่างสัมผัสกับออกซิเจนจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาออกซเดชันในส่วนของข้าวพันธุ์ชีบูกันตังนั้นจะไม่พบ สารแอนโทไซยานินและโปรแอนโทไซยานิดิน เนื่องจากเยื่อหุ้มเมล็ดของข้าวพันธุ์ชีบูกันตังไม่มีสีจึงไม่พบสารเหล่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu-Ping และHsi-Mei (2016) ที่ได้ศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (แอนโทไซยานินและโปรแอนโทไซยานิดิน) ในรำข้าวที่มีสีและพบว่าโปรแอนโทไซนิดินสามารถตรวจพบได้เฉพาะในรำข้าวที่มีแดงเท่านั้น ในขณะที่แอนโทไซยานินจะพบในรำข้าวที่มีสีดำ

ตารางที่ 4.9 ปริมาณสารโปรแอนโทไซยานิดินในข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Proanthocyanidin (mg CE /g sample)	
	หอมกระดังงา	**ซีบูกันตัง**
ข้าวอ้างอิง	98.13±1.13^{a}	ND
ข้าวควบคุม	67.13±0.52^{b}	ND
อบแห้งด้วยลมร้อน		
60	50.80±0.77^{i}	ND
75	53.13±0.26^{h}	ND
95	55.30±1.18^{g}	ND
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W		
60	59.80±0.89^{f}	ND
75	61.13±0.52^{ef}	ND
95	62.63±0.68^{de}	ND
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W		
60	62.47±0.68^{de}	ND
75	63.63±0.26^{d}	ND
95	65.13±0.68^{c}	ND

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยพันข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

Prince of Songkla University Pattani Campus

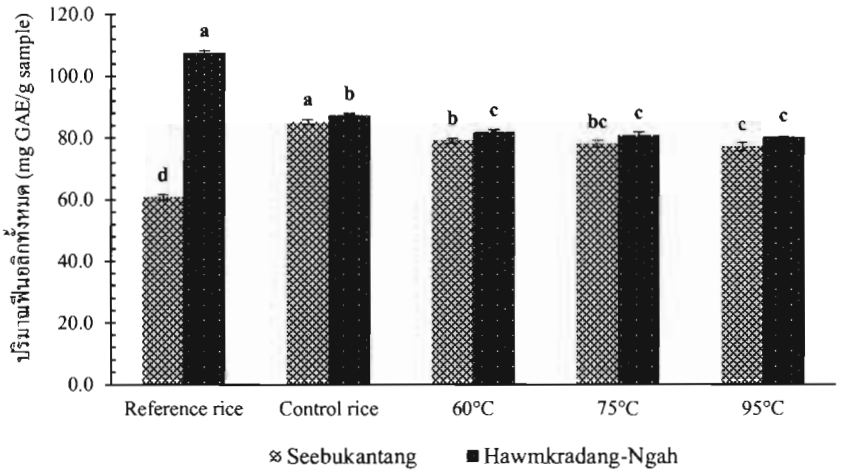
4.5.2 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ซีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W ในช่วงอุณหภูมิ 60 75 และ 95 °C ให้ผลดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 จากการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน (80.12±0.31-81.88±0.70 mg GAE/ g sample

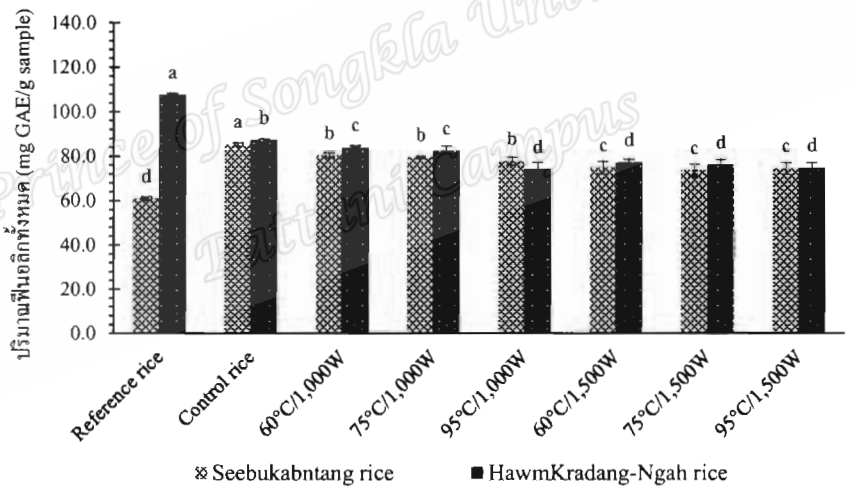
และ 28.96±0.44-29.98±1.32 mg CE/g sample ตามลำดับ) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W (73.94±3.36-83.79±1.00 mg GAE/g sample และ 31.19±0.71-32.39±0.70 mg CE/g sample ตามลำดับ) และที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W (74.68±2.37-77.03±1.55 mg GAE/g sample และ 29.61±0.35-30.54±1.54 mg CE/g sample .ตามลำดับ) รวมถึงข้าวควบคุมซึ่งเป็นข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม (87.18±0.74 mg GAE/g sample และ 33.04±0.88 mg CE/g sample ตามลำดับ) จะมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี ที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก การนึ่ง และการอบแห้ง) (107.47±0.88 mg GAE/g sample และ 46.83±0.97 mg CE/g sample) โดยทั่วไปกระบวนการงอกจะทำให้สารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์เพิ่มขึ้น โดยเอนไซม์กลูโคซิเดสที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการทางชีวเคมีภายในเมล็ดข้าวซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการสร้างสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ (Abdel *et al.*, 2006; Coda *et al.*, 2010) เมื่อผ่านกระบวนการนึ่งและการอบแห้งจะทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ลดลง แต่เนื่องจากสารในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิกมีหลายชนิด และที่พบมากในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาซึ่งเป็นข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีน้ำตาลแดง คือโปรแอนโทไซยานิดิน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ออกซิเจน และแสง (รัตนา, 2557) ดังนั้นเมื่อนำข้าวมาผ่านกระบวกการงอก นึ่ง และอบแห้งจะทำให้ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดินลดลง จึงส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับข้าวที่อ้างอิงซึ่งเป็นข้าวไม่ผ่านการงอก การนึ่ง และการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phattayakorn และคณะ (2016) พบว่าปริมาณฟีนอลิก และปริมาณฟลาโวนอยด์ในข้าวฮางงอก (ข้าวสีแดงและข้าวขาวดอกมะลิ) จะมีปริมาณต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการงอกและนึ่ง อีกทั้ง Pascual et al. (2013) ได้รายงานถึงการลดลงของ γ-oryzanol และα-tocopherol หลังจากได้รับความร้อนจากการนึ่ง และในส่วนของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน (77.18±1.30-79.09±0.69 mg GAE/ g sample และ 24.43±0.33-24.89±0.20 mg CE/g sample ตามลำดับ) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W (77.76±1.83-80.41±1.07 mg GAE/g sample และ 24.52±0.48-25.91±0.63 mg CE/g sample ตามลำดับ) และที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W (73.5±2.74-74.82±2.74 mg GAE/g sample และ 24.24±1.85-24.89±0.88 mg CE/g sample.ตามลำดับ) รวมถึงข้าวควบคุมซึ่งเป็นข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม (85.26±0.74 mg GAE/g sample และ 27.48±0.71 mg CE/g sample ตามลำดับ) จะมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดมากกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี ที่ไม่ผ่านกระบวน

การงอก การนึ่ง และการอบแห้ง) (60.85±0.88 mg GAE/g sample และ 23.69±0.70 mg CE/g sample ตามลำดับ) เนื่องจากข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังเป็นข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดที่ไม่มีสี จึงไม่พบสารในกลุ่มของสารสีที่มีความไวต่อความร้อน ออกซิเจน และแสง เมื่อผ่านกระบวนการนึ่งจะทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดลดลง แต่ยังคงมีค่าที่สูงกว่าข้าวอ้างอิง จากการทดลองในส่วนของการอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าจะมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม) เนื่องจากความร้อนส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ และที่แหล่งพลังงานเดียวกันแต่อุณหภูมิต่างกัน ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และจากการวิเคราะห์ข้าวทั้งสองสายพันธุ์จะพบว่าข้าวพันธุ์หอมกระดังงามีปริมาณฟลาโวนอยด์มากกว่าข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง เนื่องจากสารฟลาโวนอยด์เป็นกลุ่มสารสีที่ทำให้พืชมีสีที่หลากหลายขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสาร เช่น อาจจะมีสีเหลือง สีส้ม สีแดง สีม่วง หรือให้ สีอ่อนมาก เป็นต้น ข้าวพันธุ์หอมกระดังงาเป็นข้าวกล้องที่มีสีแดงจึงทำให้มีปริมาณฟลาโวนอยด์มากกว่าข้าวพันธุ์ชีบูกันตังซึ่งเป็นข้าวกล้องที่ไม่มีสี

Prince of Songkla University Pattani Campus



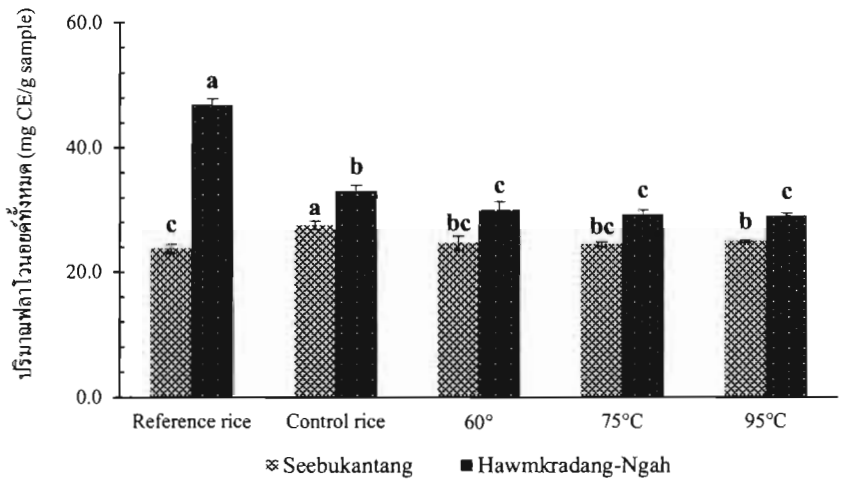
(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



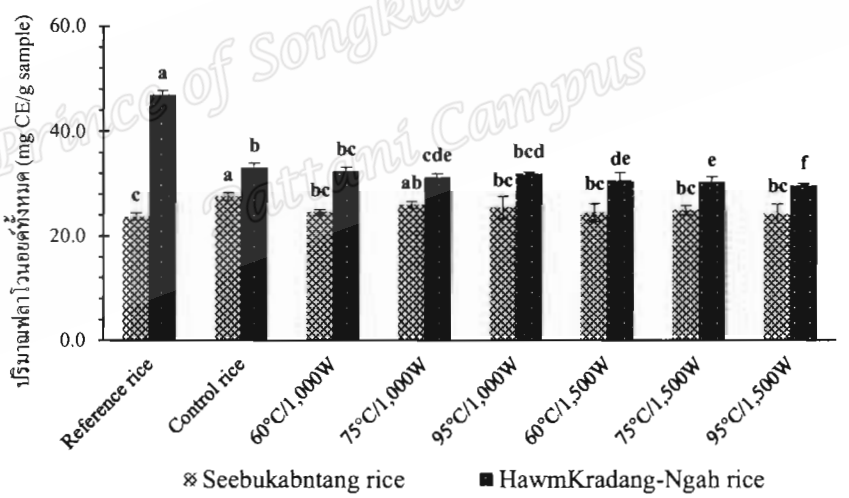
ข. อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.13 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



(ข). อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

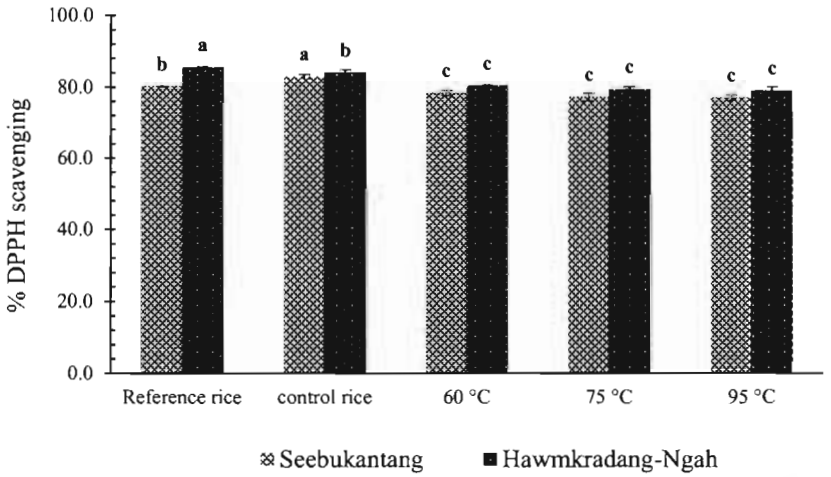
รูปที่ 4.14 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ซีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus

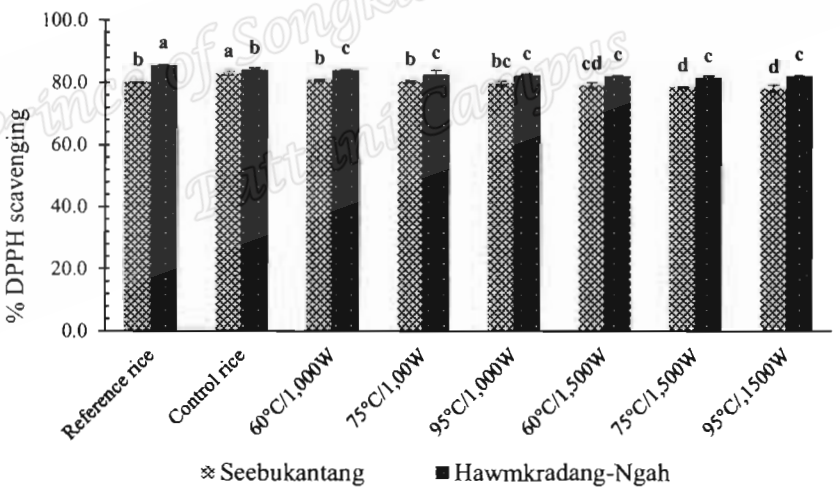
4.5.3 ความสามารถรวมในการรีดิวซ์ Total Antioxidant Capacity (TAC)

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตัง โดยการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ABTS และFRAP แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 4.16 และ 4.17 จากการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลทั้ง 3 วิธีในข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่เป็นข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม) และข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดจะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระต่ำกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ข้าวพันธุ์ชีบูกันตังที่เป็นข้าวควบคุม (ข้าวกล้องงอกที่นำมาลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม) และข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดจะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างกัน (60 75 และ 95 °C) พบว่าค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจากการวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธี มีแนวโน้มลดลงแต่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เทวิกา และวรนุช (2011) โดยได้ศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 40-60 °C ที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีแนวโน้มลดลง จากการทดลองเมื่อเทียบระหว่างแหล่งพลังงานในการอบแห้ง พบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W จะยังคงมีสารที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W จะใช้เวลาในการอบแห้งที่เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน จึงทำให้ช่วยรักษาความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าการอบแห้งที่จะระยะเวลานาน ส่วนข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W จะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ใกล้เคียงกัน จากการทดลองโดยใช้ข้าวสองสายพันธุ์ พบว่าข้าวพันธุ์หอมกระดังงามีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระดีกว่าข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง เนื่องจากข้าวพันธุ์หอมกระดังงาเป็นข้าวกล้องที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดที่มีสีซึ่งจะมีรงควัตถุประเภทฟลาโวนอยด์และโปรแอนโทรไซยานิดินมากว่าข้าวกล้องที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดที่ไม่มีสี ซึ่งสารเหล่านั้นมีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ดี การเพิ่มขึ้นและลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และโปรแอนโทไซยานิดิน ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

Prince of Songkla University Pattani Campus



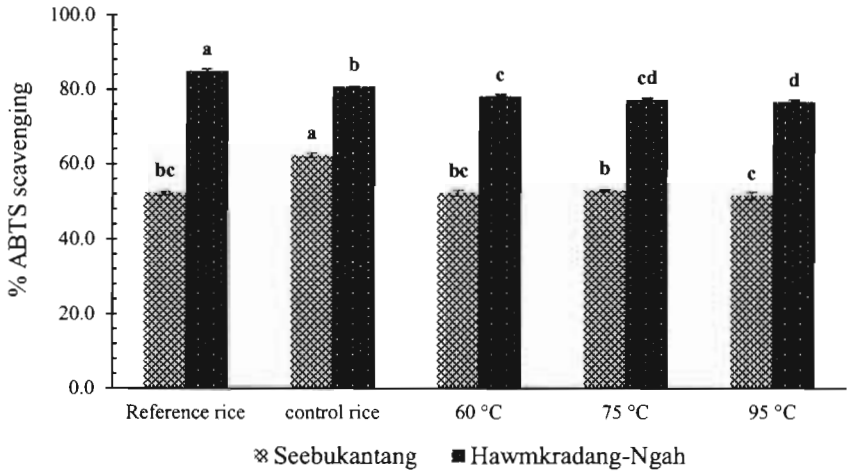
(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



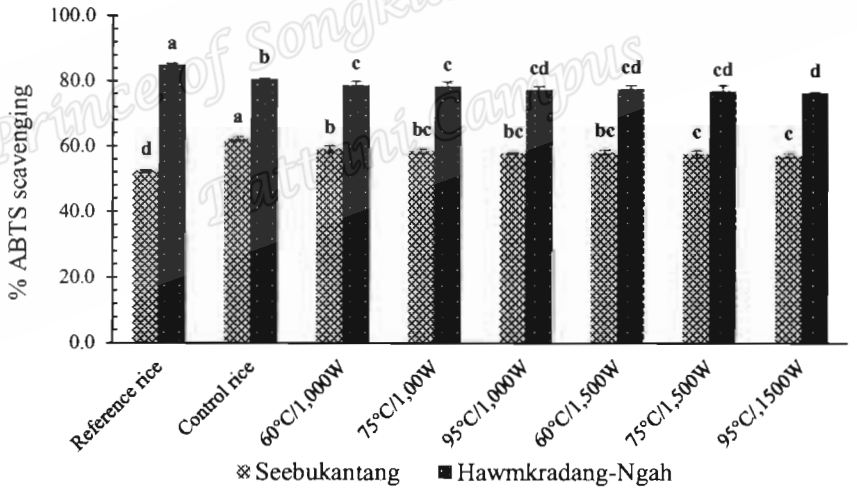
(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.15 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และพันธุ์ซีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus



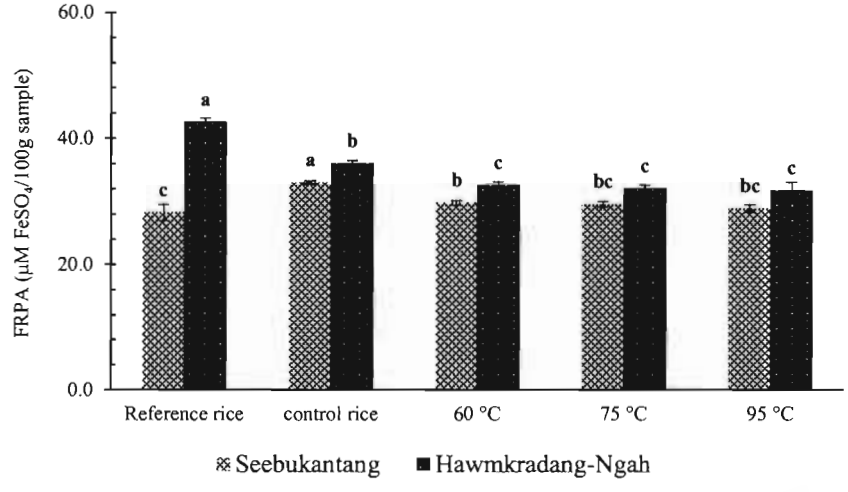
(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



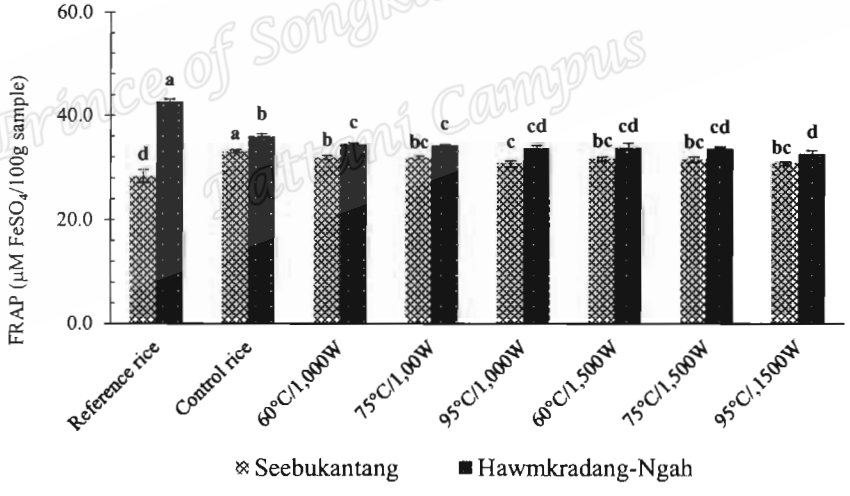
(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.16 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

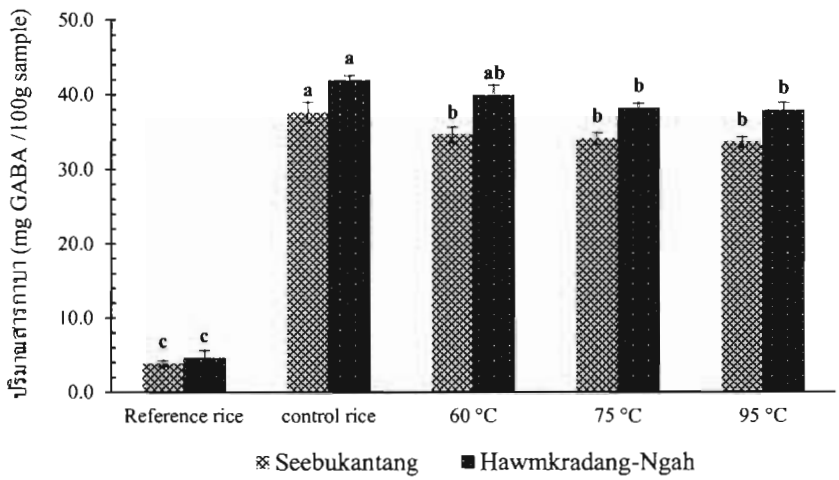
รูปที่ 4.17 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus

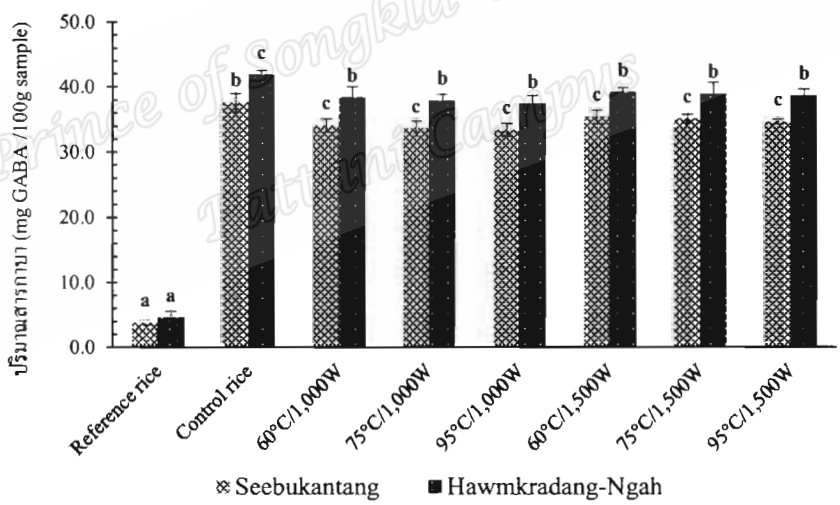
4.5.4 ปริมาณสารกาบา (γ-aminobutyric acid, GABA)

ข้าวกล้องงอกมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญหลายชนิดหนึ่งในนั้นคือ สารกาบา (γ-aminobutyric acid, GABA) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มโปรตีนที่ช่วยบำรุงเซลล์ประสาททำให้สมองเกิดการผ่อนคลายและช่วยป้องกันการทำลายสมองซึ่งเป็นสาเหตุของโรคสูญเสียความทรงจำหรือโรคอัลไซเมอร์ อีกทั้งยังมีความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ จากการผลิตข้าวกล้องงอกพบว่ามีความชื้นสูง ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก จึงต้องศึกษากระบวนการทำแห้ง ซึ่งในการทดลองนี้ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 60 75 และ 95 °C ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 จากผลการทดลอง พบว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการงอกและอบแห้งในทุกสภาวะการทดลองจะมีปริมาณสารกาบาสูงกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวที่ได้จากศูนย์วิจัยข้าวปัตตานี) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเมล็ดข้าวได้รับน้ำเข้าไปจากขั้นตอนของการแช่ ส่งผลให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์สารที่จำเป็นภายในเซลล์ของเมล็ดข้าวและเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอาหารภายในเมล็ดข้าว เช่น การย่อยโปรตีนด้วยเอนไซม์โปรตีเอสเป็นกรดอะมิโน โดยกรดอะมิโนที่สำคัญ คือ กลูตาเมท สารนี้จะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ Decarboxylation โดยเอนไซม์ Glutamate decarboxylase ได้ผลิตภัณฑ์เป็น γ-aminobutyric acid (GABA) (วรัมพร และคณะ, 2555) จึงทำให้ข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอกมีปริมาณของสารกาบาเพิ่มขึ้น และในส่วนของการอบแห้งทั้งการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ พบว่า ปริมาณสารกาบาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับข้าวควบคุมที่ไม่ผ่านการอบแห้ง (ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม) และจากการอบแห้งที่แหล่งพลังงานและกำลังวัตต์เดียวกันแต่อุณหภูมิการอบแห้งต่างกัน (60 75 และ 95 °C) พบว่าปริมาณสารกาบาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เนื่องจากสารกาบาเป็นสารที่ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ โดยสารกาบาสลายตัวที่อุณหภูมิ 203 °C (สุกัญญา, 2559) ดังนั้นการทำแห้งที่อุณหภูมิดังกล่าวจึงไม่มีผลต่อปริมาณสารกาบาอย่างมีนัยสำคัญ

Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.18 ปริมาณของสารกาบาจากข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ซีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้ง (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากการศึกษาการอบแห้ง คุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทาเคมีของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500W โดยใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่ 60 75 และ 95 ℃ พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 95 ℃ และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W อุณหภูมิการอบแห้งที่ 95 ℃ จะใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 75 ℃ ทำให้ประหยัดเวลาในการอบแห้ง โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 95 ℃ จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 60 นาที และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W อุณหภูมิการอบแห้งที่ 95 ℃ จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 33 นาที อีกทั้งมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อพิจารณาในด้านคุณภาพทางกายภาพพบว่า ให้ผลการทดลองที่ต่างกันเล็กน้อยแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ส่วนในด้านคุณภาพทางเคมีพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะทำให้ปริมาณสารต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลง แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ดังนั้นสภาวะการอบแห้งที่เลือกใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 95 ℃ และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W อุณหภูมิการอบแห้งที่ 95 ℃

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.6 การเก็บรักษาข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา และชีบูกันตัง

หลังจากที่ได้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังแล้ว จะทำการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ ที่อุณหภูมิห้อง (30-40 ℃) เป็นเวลา 3 เดือน โดยบรรจุในถุง Nylon/LLDPE ทำการบรรจุแบบสุญญากาศ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ โดยทำการวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ในทุก ๆ เดือน

4.6.1 การเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างการเก็บรักษา

จากการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพในด้านของสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด และเก็บรักษาในถุง Nylon/LLDPE แบบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (30-40 ℃) เป็นเวลา 3 เดือน จากตารางที่ 4.10 พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด ในเดือนที่ 1 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับค่าความสว่าง

ในเดือนเดือนที่ 2 และ 3 ส่วนเดือนที่ 2 และ 3 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในด้านของความเป็นสีแดง (a*) และความเหลือง (b*) ในแต่ละเดือนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และในส่วนของข้าวพันธุ์ชีบูกันตัง (ตารางที่ 4.11) ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดมี ค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีแดง (a*) ในแต่ละเดือนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แต่จะมีความเปลี่ยนแปลงในด้านความเหลือง โดยพบว่าข้าวพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดจะมีค่าความเหลืองเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 2 และ เดือนที่ 3 โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับเดือนที่ 1 ทั้งนี้การเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานจะสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลรประเภท Maillard reaction ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดแอมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่น ๆ ในเมล็ดข้าวโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจะทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องได้สาร melanoidins ที่ให้สีน้ำตาลเกิดขึ้นและส่งผลทำให้ข้าวมีความสว่างลดลงและมีสีที่คล้ำมากขึ้น (เวียงโขง และคณะ, 2559)

ตารางที่ 4.10 ค่าสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน

อบแห้งด้วยลมร้อน					
เดือน	L*	a*	b*	C°	ΔE*
0	28.05±0.66^{a}	10.59±0.17^{a}	9.36±0.11^{a}	14.430±30^{a}	15.54±0.55^{c}
1	27.90±0.15^{b}	10.68±0.28^{a}	9.25±0.19^{a}	13.90±0.13^{a}	16.08±0.34^{bc}
2	26.61±0.50^{c}	11.01±0.51^{a}	9.76±0.20^{a}	14.59±0.66^{a}	16.52±0.35^{ab}
3	26.59±0.28^{c}	11.28±0.33^{a}	9.20±0.12^{a}	13.88±0.50^{a}	17.09±0.19^{a}

อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด					
เดือน	L*	a*	b*	C°	ΔE*
0	27.81±0.66^{a}	10.80±0.10^{a}	9.57±0.10^{a}	14.13±0.14^{a}	15.63±0.32^{a}
1	27.61±0.15^{a}	10.48±0.16^{a}	9.14±0.01^{a}	14.13±0.33^{a}	15.74±0.17^{a}
2	26.29±0.28^{b}	10.76±0.30^{a}	9.49±0.66^{a}	14.71±0.75^{a}	16.02±0.54^{a}
3	25.97±0.50^{b}	10.47±0.26^{a}	9.11±0.49^{a}	14.56±0.33^{a}	16.35±0.68^{a}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยพันข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.11 ค่าสีของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน

อบแห้งด้วยลมร้อน					
เดือน	L*	a*	b*	C°	ΔE*
0	54.24±0.55^{a}	6.70±0.06^{a}	27.27±0.38^{b}	27.01±0.36c	9.98±0.28b
1	53.55±0.49^{a}	6.76±0.20^{a}	27.08±0.58^{b}	27.24±0.35bc	10.52±0.39ab
2	53.11±0.70^{a}	6.93±0.09^{a}	28.79±0.56^{a}	28.23±0.63ab	11.02±0.21a
3	53.79±0.70^{a}	6.97±0.09^{a}	28.46±0.56^{a}	28.33±0.52a	11.12±0.62a

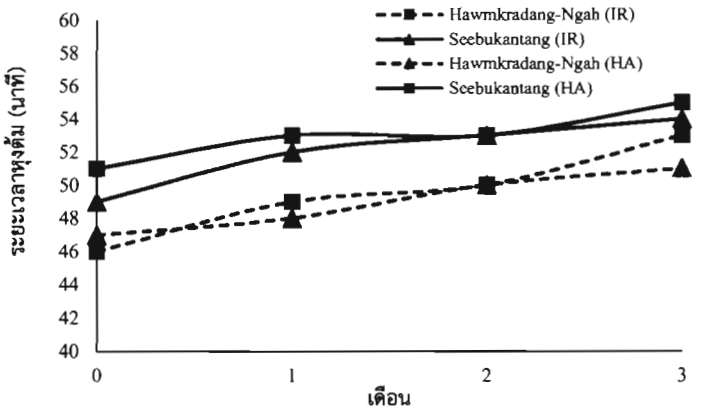
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด					
เดือน	L*	a*	b*	C°	ΔE*
0	54.38±0.11^{a}	6.05±0.18^{a}	26.32±0.40^{c}	28.08±0.37^{b}	10.62±0.72^{c}
1	53.91±0.53^{a}	6.27±0.02^{a}	26.51±0.37^{bc}	27.91±0.61^{b}	11.19±0.25^{bc}
2	53.87±0.47^{a}	6.48±0.09^{a}	27.48±0.64^{ab}	29.61±0.56a	12.40±0.38^{a}
3	53.77±0.56^{a}	6.03±0.41^{a}	27.68±0.56^{a}	29.30±0.45^{a}	11.68±0.31^{ab}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยพันข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

Prince of Songkla University Pattani Campus

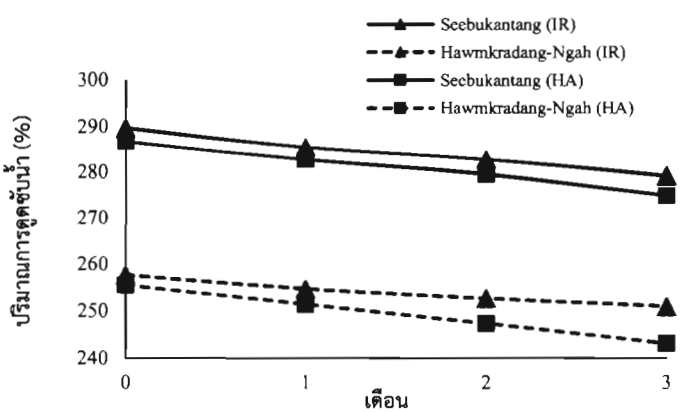
4.6.2 คุณภาพด้านการหุงต้มในระหว่างการเก็บรักษา

จากการวิเคราะห์คุณภาพด้านการหุงต้ม เช่น ระยะเวลาในการหุงต้ม ปริมาณการดูดซับน้ำ และปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุกของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30-40 °C) เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดเป็นเวลา 3 เดือน จะมีระยะเวลาในการหุงต้มที่นานขึ้น โดยข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ในเดือนที่ 3 เดือนจะใช้เวลาในการหุงต้มนานที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการเก็บรักษาจะทำให้การเกิดเจลาติไนเซชันภายในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.19



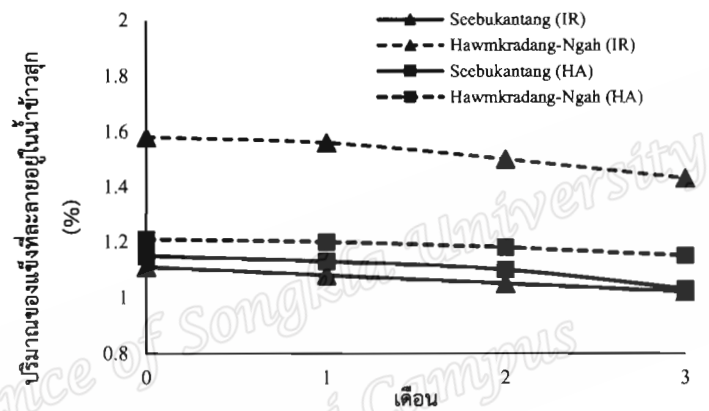
รูปที่ 4.19 ระยะเวลาการหุงต้มของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ ที่เก็บรักษา 3 เดือน

ปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด โดยเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน ให้ผลดังรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่าปริมาณการดูดซับน้ำในแต่ละเดือนมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) จากการที่ปริมาณการดูดซับน้ำลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บที่นานขึ้น เนื่องจากข้าวที่ผ่านการเก็บเป็นเวลานานเมล็ดข้าวจะมีความแข็งจากการเกิดเจลาติไนเซชันจึงใช้เวลานานในการทำให้ข้าวสุก ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้จึงน้อยกว่าข้าวใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Soponronnarit *et al.* (2008) ที่พบว่าอัตราการดูดซับน้ำของข้าวมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา



รูปที่ 4.20 ปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน

ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุกของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน ให้ผลดังรูปที่ 4.21 พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุกของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมและรังสีอินฟราเรด มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) การลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุกที่ระยะเวลาในการเก็บนานขึ้น เนื่องจากการเก็บที่อุณหภูมิสูง (30-40 °C) จะทำให้ข้าวเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างภายในจับตัวกันแน่นขึ้น เป็นการป้องกันการสูญเสียของแข็งในระหว่างการหุงต้ม



รูปที่ 4.21 ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุกของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน

4.6.3 ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดินในข้าวกล้องงอกในระหว่างการเก็บรักษา

จากการวิเคราะห์ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดินในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าจะพบสารโปรแอนโทไซยานิดินได้เฉพาะในข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีแดง นั้นคือข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ในส่วนของข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตังจะไม่พบสารโปรแอนโทรไซยานิดิน เนื่องจากข้าวสายพันธุ์นี้เป็นข้าวกล้องที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดที่ไม่มีสี จึงทำให้ไม่พบสารโปรแอนโทไซยานิดิน ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดินในแต่ละเดือนแสดงดังตารางที่ 4.12 ปริมาณโปรแอนโทโซยานิดินในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือนอยู่ในช่วง 43.63±1.13-53.63±0.93 mg CE/g sample และข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน อยู่ในช่วง

Prince of Songkla University Pattani Campus

50.63±0.68-63.47±0.68 mg CE/g sample จากการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดเป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง (30-40 °C) พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลทำให้ปริมาณโปรแอนโทรไซยานิดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งจะพบปริมาณสารโปรแอนโทไซยานิดินมากที่สุดในเดือนที่ 1 และต่ำสุดในเดือนที่ 3 เนื่องจากสารโปรแอนโทไซยานิดินสลายตัวได้ง่ายเมื่อโดยความร้อน ออกซิเจน และแสง ดังนั้นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานส่งผลให้ตัวอย่างสัมผัสกับแสงเป็นเวลานาน ซึ่งจะทำให้ปริมาณสารโปรแอนไทไซยานิดินลดลงได้ง่าย

ตารางที่ 4.12 ปริมาณสารโปรแอนโทไซยานิดินในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน

ปริมาณโปรแอนโทไซยานิดิน (mg CE/g sample)		
เดือน	อบแห้งด้วยลมร้อน	อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด
0	53.63 ± 0.93^{a}	63.47 ± 0.68^{a}
1	50.63 ± 0.68^{b}	60.13 ± 1.37^{b}
2	46.30 ± 0.45^{c}	55.63 ± 1.13^{c}
3	43.63 ± 1.13^{d}	50.63 ± 0.68^{d}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)
ข้าวอ้างอิง คือ ข้าวจากศูนย์วิจัยพันข้าวปัตตานี
ข้าวควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกที่ลดความชื้นโดยการตากไว้ในสภาวะแวดล้อม

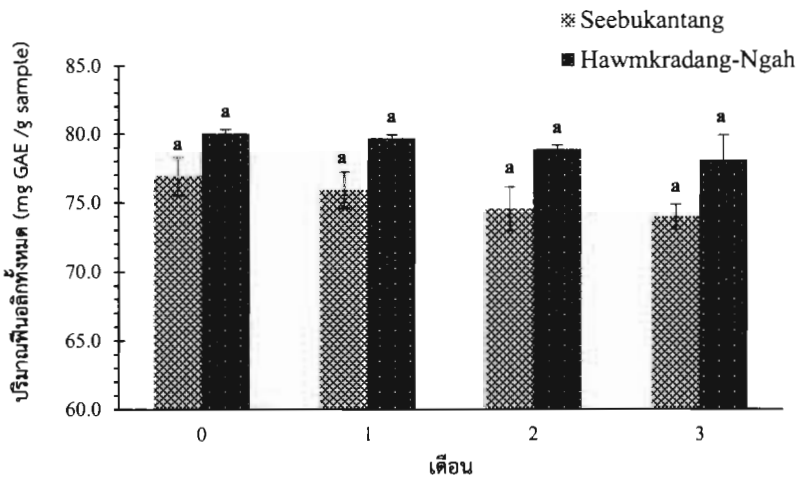
Prince of Songkla University Pattani Campus

4.6.4 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในระหว่างการเก็บรักษา

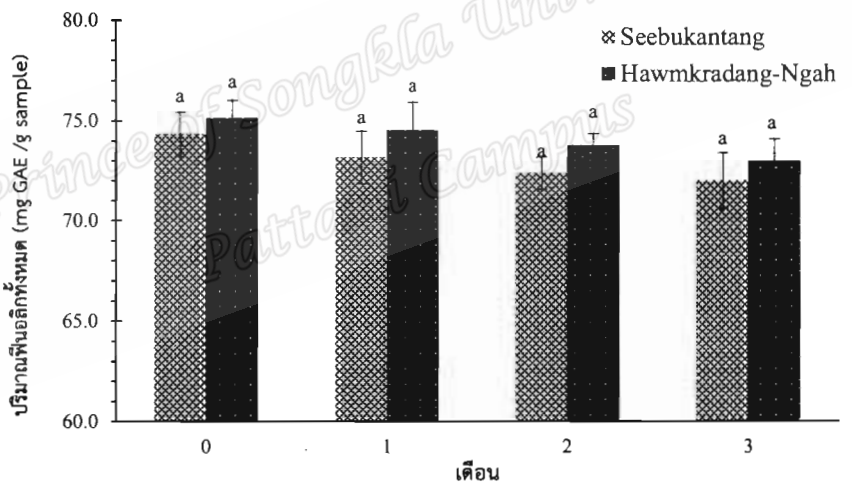
การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดและนำมาเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดแล้วนำมาเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 78.06±1.82-80.02±0.30 mg/g sample และ72.96±1.10-75.12±2.41 mg/g sample ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ชีบูกันตังมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 72.96±1.32-76.88±1.39 mg/g sample และ 71.98±1.52-74.33±1.10 mg/g sample ตามลำดับ (รูปที่ 4.22)

ส่วนปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในข้าวพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดแล้วนำมาเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน มีปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 26.31±1.38-28.90±0.51 mg/g sample และ 27.42±1.70-29.77±0.21 mg/g sample ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ชีบูกันตังมีปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในช่วง 23.10±1.88-24.95±0.19 mg/g sample และ 21.74±1.19-24.21±0.77 mg/g sample ตามลำดับ (รูปที่ 4.23) จากการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงในเดือนที่ 1 2 และ 3 ของการเก็บรักษาแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ อุไรวรรณ และคณะ (2554) พบว่าปริมาณฟีนอกลิกและฟลาโวนอยด์ในข้าวกล้องงอกพันธุ์สังข์หยดที่เก็บรักษาเป็นเวลา 4 เดือน (ไม่ได้ระบุอุณหภูมิในการเก็บรักษา) มีค่าลดลงโดยในเดือนที่ 1 2 และ 3 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) แต่จะมีความแตกต่างในเดือนที่ 4

Prince of Songkla University
Pattani Campus



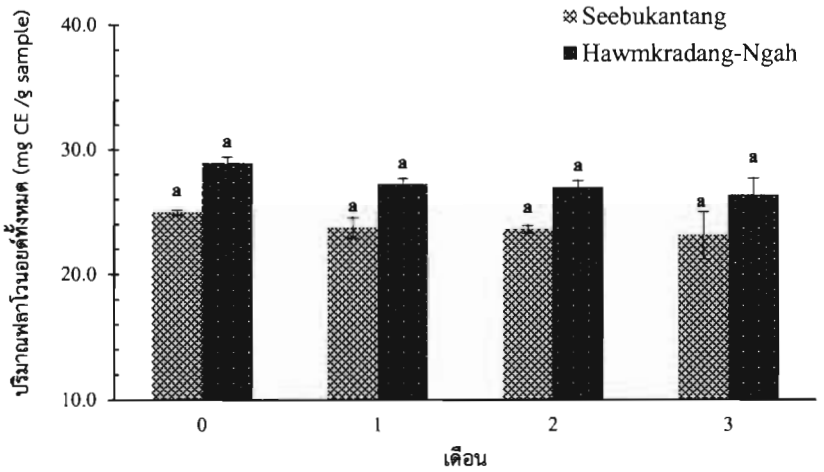
(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



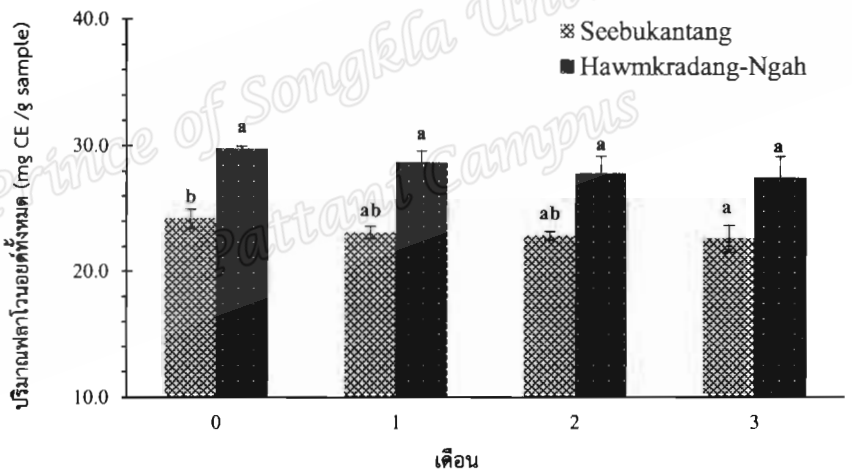
(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.22 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้ง และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

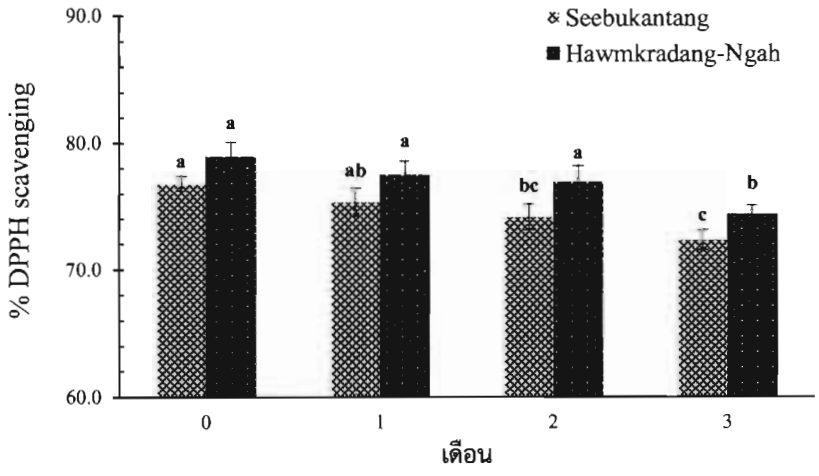
รูปที่ 4.23 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้ง และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus

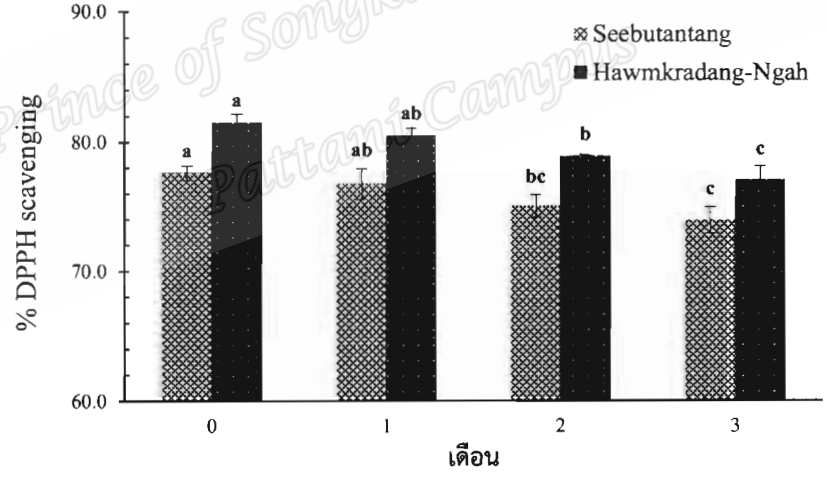
4.6.5 ความสามารถรวมในการรีดิวซ์ของข้าวกล้องงอกในระหว่างการเก็บรักษา

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน โดยการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP ให้ผลดังรูปที่ 4.24 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ การวิเคราะห์ความสามรถในการต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 วิธี ของข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าในเดือนที่ 1 และ 2 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แต่ในเดือน 3 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากการลดลงของปริมาณโปรแอนโทไซยานิดินที่มีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งจะพบในข้าวกล้องงอกที่มีสี และจากการวิเคราะห์ความสามรถในการต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 วิธีของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในเดือนที่ 1 2 และ 3 มีแนวโน้มลดลงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตังเป็นข้าวกล้องที่ไม่มีสี ไม่พบปริมาณโปรแอนโทไซยานิดิน จึงทำให้ในความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในแต่ละเดือนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sripum *et al*. (2016) ที่ศึกษาการเก็บรักษาข้าวกล้องงอก (ข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวกล้องงอกที่ไม่มีสี) ที่อุณหภูมิห้อง (30-40 °C) เป็นเวลา 6 เดือน พบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

Prince of Songkla University Pattani Campus



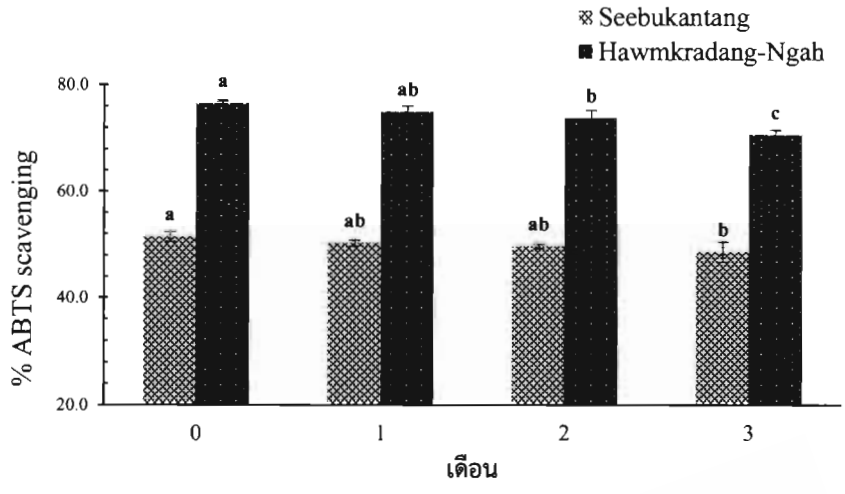
(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



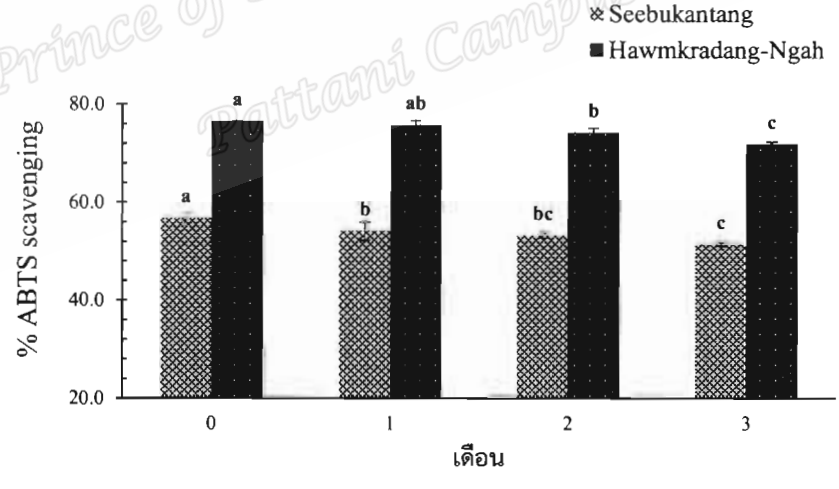
(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.24 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus



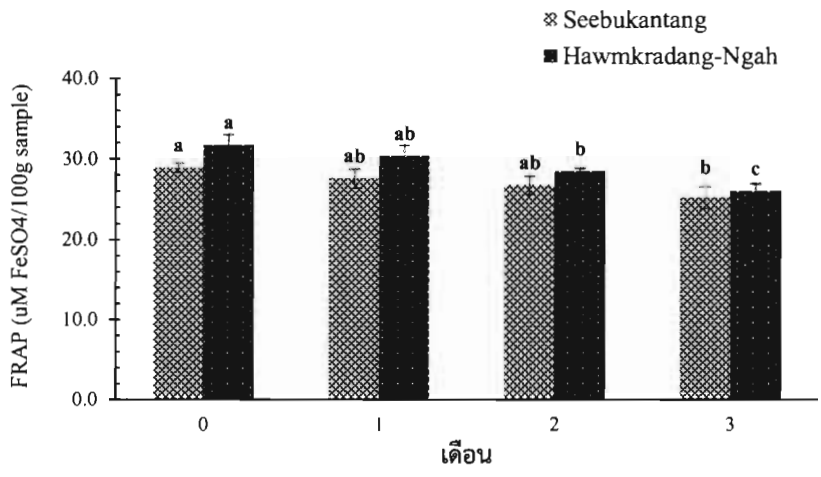
(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



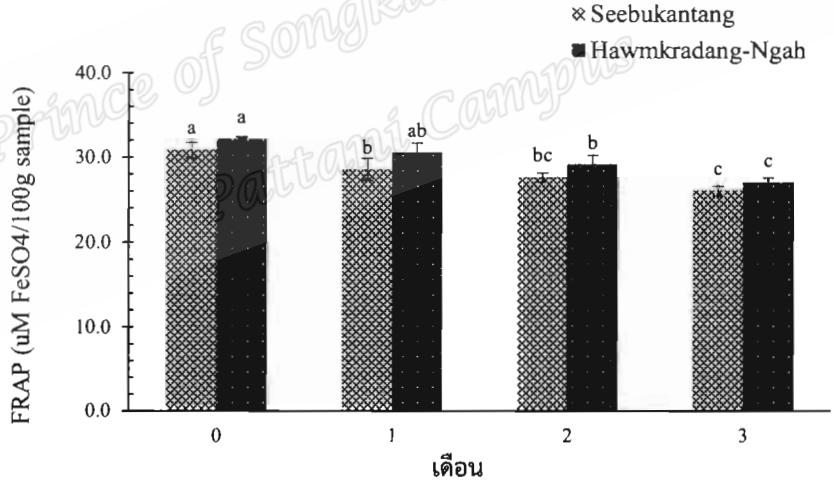
(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.25 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus



(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



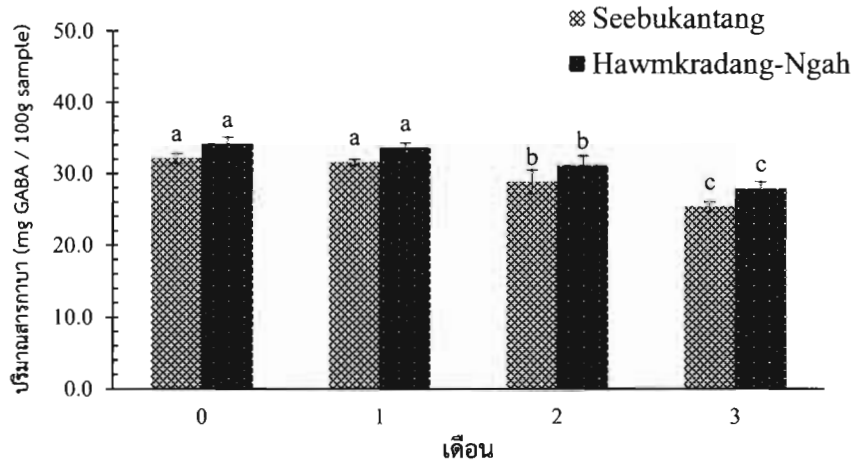
(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.26 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

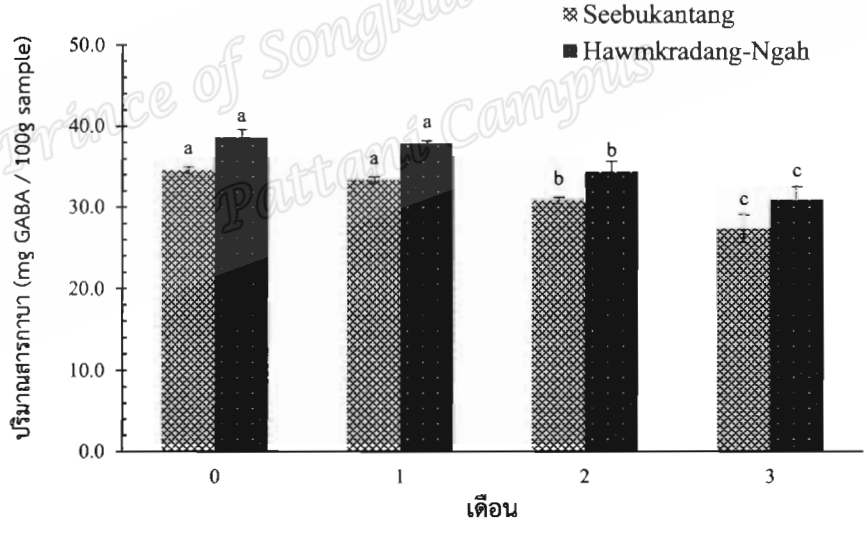
Prince of Songkla University Pattani Campus

4.6.6 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกในระหว่างการเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน ให้ผลดังรูปที่ 4.27 ข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน มีปริมาณสารกาบาอยู่ในช่วง 27.85±1.02-34.15±1.00 mg/100g sample และ 25.35±0.67-32.10±0.67 mg/100g sample ตามลำดับ และข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงาและพันธุ์ชีบูกันตังที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน มีปริมาณสารกาบาอยู่ในช่วง 30.85±1.69-38.60±1.02 mg/100g sample และ 27.35±1.69-34.60±0.39 mg/100g sample ตามลำดับ จากการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่าปริมาณสารกาบาในเดือนที่ 1 2 และ 3 มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณสารกาบามีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา เนื่องจากทำการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกในถุงแบบใส ทำให้ข้าวกล้องงอกสัมผัสกับแสงจึงทำให้ปริมาณสารกาบามีแนวโน้มลดลง ข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์จะมีปริมาณสารกาบาสูงสุดที่การเก็บรักษาในเดือนที่ 1 และมีค่าต่ำสุดที่การเก็บรักษาในเดือนที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เวียงโขง และคณะ (2559) พบว่าปริมาณสารกาบาของข้าวฮางงอกมีการลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดอายุการเก็บรักษา ($p \leq 0.05$) การลดลงของปริมาณสารกาบาของข้าวฮางงอกที่ผลิตจากข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในอุณหภูมิสูงจะสามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราที่เร็วกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ($p \leq 0.05$) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ อุไรวรรณ และคณะ (2554) ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกสังข์หยดที่เก็บรักษาเป็นเวลา 4 เดือน มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ปริมาณสารกาบาในเดือนที่ 3 และ 4 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)



(ก) อบแห้งด้วยลมร้อน



(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รูปที่ 4.27 ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน (ก) อบแห้งด้วยลมร้อน และ (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากการศึกษาสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของข้าวกล้องงอก พบว่าการเก็บรักษาข้าวกล้องงอกในถุง Nylon/LLDPE แบบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (30-40 °C) ที่ระยะเวลา 3 เดือน โดยส่วนใหญ่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ แต่มีผลต่อคุณภาพทางเคมี

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1.จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ ในส่วนของความหนาแน่นปรากฏและสัดส่วนช่องว่างของอากาศ พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่ม ค่าความหนาแน่นปรากฏจะเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนช่องว่างของอากาศมีค่าลดลง

2.จากการอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวกล้องงอก นั้นคือเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลง ส่งผลให้ความชื้นมีค่าลดลง และในส่วนของแหล่งพลังงานเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งคงที่ พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W จะใช้เวลาในการอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และการอบแห้งด้วยลมร้อน

3. ในด้านของความสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุด รองลงมาเป็นการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000W และ 1,500 W ตามลำดับ เนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลาง (อากาศ) ในการส่งถ่ายพลังงานให้กับวัสดุ จึงส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

4. ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการงอก นึ่ง และอบแห้ง จะมีร้อยละข้าวเต็มเล็ดที่สูงกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยพันธุ์ข้าว ปัตตานี) และจากการอบแห้งที่แหล่งพลังงานต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 60 75 และ 95 °C พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดลดลง แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) อีกทั้งยังทำให้ข้าวมีปริมาณท้องไข่น้อย ในด้านของสีของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่ผ่านการงอก นึ่ง และอบแห้ง พบว่าข้าวกล้องงอกมีสีเข้มขึ้นจากข้าวอ้างอิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไม่มีผลต่อสีของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์

5. สมบัติด้านการหุงต้มของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์พบว่า ข้าวที่ผ่านการงอก นึ่ง และอบแห้งจะใช้เวลาในการหุงต้มนานกว่าข้าวอ้างอิง (ข้าวจากศูนย์วิจัยพันธุ์ข้าวปัตตานี) ปริมาณการดูดซับน้ำ และปริมารของของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก มีค่าลดลง เนื่องจากข้าวกล้องงอกที่ผ่านการแช่น้ำและให้ความร้อนจะทำให้มีโครงสร้างที่แน่นขึ้น

5.ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของข้าวกล้องงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสารต่าง ๆ ลดลง แต่ไม่แตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในด้านของแหล่งพลังงาน พบว่าข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะมีปริมาณสารที่มากกว่าข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้น และทำให้ยังคงรักษาสารต่าง ๆ ไว้ได้

6. สรุปสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C และอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,500W อุณหภูมิ 95 °C เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นทำให้ประหยัดเวลาในการอบแห้ง อีกทั้งปริมาณสารต่าง ๆ ไม่แตกต่างกับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

7. คุณภาพทางกายภาพของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงในด้านของสีที่เดือนที่ 2 ส่วนคุณภาพด้านการหุงต้ม พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา

8. คุณภาพทางเคมีของข้าวกล้องงอกทั้งสองสายพันธุ์ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน จากการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อการลดลงของปริมาณโปรแอนโทรไซยานิดิน และปริมาณสารกาบา แต่ไม่มีผลต่อต่อปริมาณสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ส่วนในด้านของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH ABTS และ FRAP) พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH ABTS และ FRAP) ในข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา แต่ไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH ABTS และ FRAP) ในข้าวกล้องงอกพันธุ์ซีบูกันตัง

Prince of Songkla University Pattani Campus

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาในเรื่องของระยะเวลาในการแช่ อุณหภูมิในการแช่ และระยะเวลาในการนึ่ง และระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการ

2. ควรมีการศึกษาอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่นอกเหนือจากอุณหภูมิห้องเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ส่งออกข้าว

3. ศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอก

บรรณานุกรรม

กฤตนัย แก้วยศ, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์. 2556. อิทธิพลของการอบแห้งของข้าวเปลือกเริ่มงอกต่อสารต้านอนุมูลอิสระ โดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 32(4), 449-455.

กัญญา มานอก และกันยรัตน์ แฉกกระโทก. 2557. การวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดข้าวพื้นเมืองบริเวณตอนเหนือของจังหวัดนครราชสีมา. ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.

กรมการข้าว. 2555. รายงานสถานการณ์ข้าวรายสัปดาห์. สถานการณ์ข้าว รายสัปดาห์. 2555 (32), 2.

ขวัญชนก ปฏิสนธิ์. 2553. การเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กและสังกะสีภายในเมล็ดข้าว จากกระบวนการผลิตข้าวนึ่งที่ต่างกัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาวิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข. 2536. คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพ และการแปรสภาพเมล็ด. ใน เอกสารประกอบการบรรยาย ฝึกอบรมหลักสูตรวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ณ ศูนย์วิจัย ข้าวพัทลุง ฝ่ายฝึกอบรมสถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการ เกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพ.

เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข. 2540. คุณภาพเมล็ดทางกายภาพและการแปรสภาพเมล็ด. สถาบันวิจัยข้าว กรมเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพ.

งามชื่น คงเสรี. 2542. เทคนิคการทดสอบข้าว. น.ส.พ.กสิกร. 72(5). 467-473.

จันทรพร ทองเอกแก้ว. 2558. คุณประโยชนของสารกาบาที่มีตอสุขภาพ. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 43(2), 205-211.

เจนจิรา จิรัมย์ และประสงค์ สีหานาม. 2554. อนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ: แหล่งที่มาและกลไกการเกิดปฏิกิริยา. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์. 1(1), 59-70.

เชาวนีพร ชีพประสพ ฤทัยทิพย์ อโนมุณี และหาสันต์ สาเหล็ม. 2559. องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณอะไมโลสในข้าวพันธุ์พื้นเมือง จังหวัดพัทลุง. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.

ณัฏฐิกา ศิลาลาย. 2548. ฟลาโวนอยด์ในใบชา: หน้าที่ การใช้ประโยชน์ และการวิเคราะห์. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 2(1), มิถุนายน 2548-พฤษภาคม 2549.

ณัฏฐา สุวัฒนชาติ และศรวณีย์ อ่อนฉลวย. 2557. การวิเคราะห์สารอาหารหลักของข้าวพื้นเมืองบริเวณตอนใต้ของจังหวัดนครราชสีมา. ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.

Prince of Songkla University Pattani Campus

ณัฐพล ภูมิสะอาด. 2540. การจัดการข้าวปลอกชื้นโดยการอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน การเก็บในที่อับอากาศ และการบำบัดด้วยอากาศแวดล้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ทิวานัถ แก้วสอนดี สุพรรณ ยั่งยืน และจักรมาส เลาหวณิช. 2557. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยรังสีอินฟราเรด และแก๊สร้อนปล่อยทิ้งจากหัวเผาอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 45, 393-396.

เทวิกา กีรติบูรณะ และวรนุช ศรีเจษฎารักษ์. 2556. ผลของการอบแห้งแบบถาดของข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 งอกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ. Graduate research conference 12th. Khon kaen Univesity.

ธนาภร รติธรรมธร. 2559. ผลของการให้ความร้อนและการทำให้เย็นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลโครงสร้างและการย่อยของแป้ง. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 21(2), พฤษภาคม–สิงหาคม พ.ศ. 2559.

นงนุช วงศ์สินชวน. 2555. การเพาะข้าวกล้องงอก. ธรรมชาติบำบัดและสมุนไพร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 33(2), 57-62.

นฤบดี ศรีสังข์ สมเกียรติ ปรัชญาวรากร วารุณี วรัญญานนท์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2552. การอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยฟลูอิไดซ์เบดแบบอากาศร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 40(1 พิเศษ), 449-452.

นิธิศ แสงอรุณ ราตรี รัตนสำเนียง บุญนะ หนูคง จรัญ ทับทิมทอง และ กัณธิกานต์ ปลอดปล้อง. (2553). พันธุ์ข้าวยอดนิยมชายแดนใต้ ชีบูกันตัง (PTNC09001) หอมกระดังงา (PTNC09002) ช่อลุง (PTNC99024-97). การประชุมสัมมนาวิชาการข้าว กลุ่มศูนย์วิจัยข้าวภาคใต้ ประจำปี 2553, 25-26 พ.ค. 2553, สงขลา, ม.ป.ท: กรมการข้าว สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว ศูนย์วิจัยข้าวกระบี่. 132 หน้า.

เนตรนภา เมยกลาง และเฉลิม เรืองวิริยะชัย. 2557. การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในเครื่องดื่มน้ำผลไม้. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 14(4), ตุลาคม- ธันวาคม 2557.

ปฏิวัติ วรามิตร นันทวัฒน วีระยุทธ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา. 2554. การทำนายอัตราสวนความชื้นการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้แบบจำลองเอมพีริคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม. วารสารวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 6(1), 39-47.

ลิขสิทธิ์ของ Songkla University
Prince of Songkla University
Pattani Campus

ปรียนันท์ บัวสด. 2549. การตรวจสอบความสามารถในการเป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ของเครื่องดื่มชาโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ปริยานุช อินทร์รอด. 2551. ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน และปริมาณสารประกอบฟนอลรวมของสวนสกัดจากตนเร่วหอมและว่านสาวหลง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตรมหาวิทยาลัยบูรพา.

พัชราภรณ์ ยาบา. 2558. การศึกษาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งกรือโป๊ะ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

มหาวิทยาลัยรังสิตและสำนักงานวิจัยและพัฒนาการเกษตร. 2553. กระบวนการผลิตข้าวมอลต์พร้อมบริโภค. สิทธิบัตรการประดิษฐ์เลขที่ 28281

ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล และสุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล. 2553. แนวทางการอบแห้งข้าวกล้องนึ่งโดยใช้พลังงานความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและไฟฟ้า. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้ง ที่ 6, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

วรัมพร วงศ์สุดิน พัชราภรณ์ รัตนธรรม ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์ และอรพิน เกิดชูชื่น. 2555. การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสำคัญในข้าวกล้องงอก. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 43(2), 553-556.

รัตนา ม่วงรัตน์, กรวิกา สกุลไกรพีระ, ธัญญารัตน์ บุระคา และลีลาวดี ชมนาน. 2557. ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดสารแอนโทไซยานินจากข้าวโพดสีม่วง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 22(3), 367-380.

ลือชัย บุตคุป. 2555. สารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพ. วารสารเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 31(4), 443-455.

วันชัย จันทร์ประเสริฐ. 2553. สรีรวิทยาเมล็ดพันธุ์. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษต มหาวิทยาลัย-เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เวียงโขง วันสะหว่าง วีรเวทย์ อุทโธ เอกสิทธิ์ อ่อนสอาด วชิราพรรณ บุญญาพุทธิพงศ์ และเมทินี มาเวียง. 2559. ผลของการเก็บรักษาข้าวเปลือกในบรรจุภัณฑ์ อุณหภูมิ และระยะเวลาต่อคุณภาพของข้าวฮางงอก. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 34 (3), 73-85.

วิกานดา แก้วยอด รัชฎา แย้มศรวล และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2556. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอัตราการถ่ายเทมวลในระหว่างการอบแห้งเปลือกทับทิมแบบชั้นบางด้วยลมร้อน. การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล ณ โรงแรมวินเซอร์สวีทส์ สุขุมวิท กรุงเทพฯ. 2, 23-30.

วิจิตรา แดงปรก และทองลา ภูคำวงศ. 2557. ผลของวิธีการทำแห้งต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*). โครงการย่อยภายใต้ชุดโครงการ : ระบบการผลิตสัตว์น้ำที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่ออาหารปลอดภัยและเพิ่มมูลค่าทรัพยากรสัตว์น้ำ, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ศิริรัตนาพร หล้าบัววงศ์ และอุมา แสงคร้าม. 2552. การศึกษาคุณสมบัติของข้าวกล้องงอกนึ่ง. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร.

ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี. 2553. รายงานผลการวิเคราะห์คุณภาพเมล็ดและการหุงต้มรับประทานข้าวพันธุ์พื้นเมืองของศูนย์วิจัยข้าวปตตานี. 3 หน้า.

ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (ออนไลน์). 2554. สืบค้นจาก: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2254 [20 กรกฎาคม 2561]

สุกัญญา แช่เตียว. 2559. อิทธิพลของการทำแห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณภาพของข้าวหอมนิลฮางงอก. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สุนทร ตรีนันทวัน. 2553. คุณค่าทางโภชนาการ (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.scimath.org/article-biology/item/517-nutritional. [30 กรกฎาคม 2560].

สุวรรณา พิชัยยงค์วงศ์ดี นันทพร รุจขจร และศวรรญา ปั่นดลสุข.2554. เอกสารประกอบการสอนวิทยาศาสตร์ การประกอบอาหาร. โรงพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็ม แอนด์เอ็ม เลเซอร์พริ้นต์, กรุงเทพฯ.

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล สากีนา ลาแมปะ และยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล. 2555. การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน: จลนพลศาสตร์ คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17 (1), 117-129.

สุภาณี วรรณทอง. 2555. การอบแห้งข้าวกาบาด้วยลมร้อนแบบพุ่งชน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. มาตรฐานสินค้าเกษตรมกษ. 4003-2555. ข้าวกล้องงอก GERMINATED BROWN RICE. ประกาศในราชกิจจานุเบกษาฉบับประกาศและงานทั่วไปเล่ม 129 ตอนพิเศษ 144, 19 กันยายน พุทธศักราช 2555.

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. องค์ความรู้เรื่องข้าว สืบค้นจาก : http://www.ricethailand.go.th/rkb/product/index.phpfile=content.php&id=3.htm (25/06/2561)

Prince of Songkla University Pattani Campus

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2560. ข้าวไทย. เล่ม 134 ตอนพิเศษ 221.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ วิไลพร นพรัตน์ไกรลาส. 2530. อุปกรณ์การศึกษาอัตราการอบแห้งเมล็ดพืชและผลการทดสอบข้าวเปลือก. การประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 28-30 ตุลาคม 2530.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพ, 300 หน้า.

อรอนงค์ วินัยกุล. 2547. ข้าว: วิทยาศาสตร์แลพเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพ, 336 หน้า

อภิวัฒน์ อินทร์นก และพักตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์. 2559. ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมี. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 5(3), 233-245.

อิศเรศ วรรณพร. 2554. การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพรุนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล. ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

อุมา แสงคร้าม และลำพึง พุ่มจันทร์. 2550. ผลของระยะเวลาในการแช่และการเก็บรักษาต่อปริมาณสารโอไรซานอลในข้าวกล้องงอก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. ฉบับบพิเศษ, 392-401.

อุไรวรรณ วัฒนกุล วัฒนา วัฒนกุล นพรัตน์ มะเห และพิทูรย์ จรูญรัตน์. 2554. ผลของอายุการเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางโภชนาการของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกสังข์หยดพัทลุง. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 14(3), 50-58.

Abdel-Aal, S.M., Young, J.C. and Rabalski, I. 2006, Anthocyanin Composition in Black, Blue, Pink, Purple, and Red Cereal Grains, Journal of Agricultural and Food Chemistry. 54, 4696-4704.

Agrawal, Y.C. and Singh, R.P. 1977. Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. ASAE paper No. 77-3531, ASAE, St. Joseph, MI.

AOAC. 1995. Official Method of Analysis. 16th Ed. Association of Official Analysis Chemists, Inc.

Bala, B.K. and Janjai, S. 2009. Solar drying of fruits,vegetables, spices, medicinal plants and fish: Developments and Potentials, International Solar Food Processing Conference 2009. 1-24.

Baskar, R., Shrisakthi, S., Sathyapriya, B., Sathyapriya, R.,Nithya, R. and Poongodi, P. 2011. Antioxidants potential of peel extracts of banana varieties (Musa sapientum). Food and Nutrition Sciences. 2, 1128 -1133.

Benzie, I.F.F. and Strain, J.J. 1996. The ferric reducing ability of plasma as a measure of antioxidant power the FRAP assay. Analytical Biochemistry. 239,70–76.

Burton, G.W. and Traber, M.G. 1990. Vitamin E antioxidant activity biokinetics and bioavailability. Annual Review of Nutrition. 10, 357-382.

Cagampang, G.B., Cruz, L.J., Espiritu, S.G., Santiago, R.G. and Juliano, B.0. 1966. Studies on the extraction and composition of rice proteins. Cereal Chem. 43, 145-155.

Carlos, A.G., Grace, G., Mercedes, B.M., Patricio, H. and Victor, C.G. 2007. Correlation of tocopherol, tocotrienol, γ-oryzanol and total polyphenol content in rice bran with different antioxidant capacity assays. Food Chemistry. 102, 1228-1232.

Chalermchaiwat, P., Jangchud, K., Jangchud, A., Charunuch, C. and Prinyawiwatkul, W. 2015. Antioxidant activity free gamma-aminobutyric acid content, selected physical properties and consumer acceptance of germinated brown rice extrudates as affected by extrusion process. LWT-Food Science and Technology. 64(1), 490-496.

Cho, J.Y., Lee, H.J., Kim, G.A., Kim, G.D., Lee, Y.S., Shin, S.C., Park, K.H. and Moon, J.H. 2012. Quantitative analyses of individual γ-Oryzanol (Steryl Ferulates) in conventional and organic brown rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Cereal Science. 55(3), 337-343.

Choi, S., Jun, H., Bang, J., Chung, S.H., Kim, Y., Kim, B.-S., Kim, H., Beuchat, L.R. and Ryu, J.H. 2015. Behavior of Aspergillus flavus and Fusarium graminearum on rice as affected by degree of milling, temperature, and relative humidity during storage. Food Microbiology. 46, 307-313.

Chungcharoen, T., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2015. Effects of germination time and drying temperature on drying characteristics and quality of germinated paddy. Food and Bioproducts Processing. 94, 707-716.

Prince of Songkla University Pattani Campus

Cnossen, A.G., Jimenez, M.J. and Siebenmorgen, T.J. 2000. Rice fissuring response to high drying and tempering temperature. Journal of Food Engineering. 59, 61-69.

Coda, R., Rizzello, C.G. and Gobbetti, M. 2010. Use of Sourdough Fermentation and Psedo and Cereals Leguminous Flours for the Making of a Functional Bread Enriched of gamma-Aminobutyric Acid (GABA). Food Microbiology. 137, 236-245.

Dejian H. and Boxin O. The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. 2005. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 53, 1841-1856.

Finocchiaro, F., Ferrari, B. and Gianinetti, A. 2010. A study of biodiversity of flavonoid content in the rice caryopsis evidencing simultaneous accumulation of anthocyanins and proanthocyanidins in a black-grained genotype. Journal of Cereal Science. 51, 28–34.

Frankel, E. N. et al. 1998. Commercial grape juices inhibit the in vitro oxidation of human low- density lipoproteins. Journal of the American Oil Chemists Society. 46, 834-838.

Furukawa, T., Maekawa, M., Oki, T., Suda, I., Lida, S., Shimada, H., Takamure, I., and Kadowaki, K. 2006. The Rc and Rd genes are involved in proanthocyanidin synthesis in rice pericarp. The Plant Journal. 49, 91-102.

Hu, Z., Tang, X., Liu, J., Zhu, Z. and Shao, Y. 2017. Effect of parboiling on phyto-chemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice. Food Chemistry. 285–292.

Iqbal, S., Bhanger, M.I. and Anwar, F. 2005. Antioxidant Properties and Components of some Commercially Available Varieties of rice bran in Pakistan. Food Chemistry. 93(2), 265 -272.

Juliano, B.O. 1985. Rice: Chemical and Technology, 2^{ed}. Minnesota, American Association of Cereal Chemists. 774 p.

Karlardee, D. and Suriyong, S. 2012. γ-Aminobutyric acid (GABA) content in different varieties of brown rice during germination. Science Asia. 38,13-17.

Prince of Songkla University Pattani Campus

Kanyahara, H. and Tukahara, K. 2000. Flavor Health and Nutritional Quality of Pre-germimated Brown Rice. International Chemical Congress of Pacific Basin Societies in Hawaii.

Kim, H. Y., Hwang, I. G., Kim, T. M., Woo, K. S., Park, D. S., Kim, J. H., Kim, D. J., Lee, J., Lee, Y. R. and Jeong, H. S. 2012. Chemical and functional components in different parts of rough rice (*Oryza sativa* L.) before and after germination. Food Chemistry. 134(1), 288- 293.

Kitaoka, S., Nakano, Y. 1969 Colorimetric determination of **ω**-amino acids. J Biochem 66, 87–94.

Lazze, M.C., Savio, M., Pizzala, R., Cazzalini, O., Perucca, P., Scovassi, A.I., Stivala, L.A. and Bianchi, L. 2004. Anthocyanins induce cell cycle perturbations and apoptosis in different human celllines. Carcinogenesis. 2, 1427-1433.

Lee, J., Durst, R.W. and Wrolstad, R.E. 2005. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. Journal of AOAC International. 88(5), 1269-1278.

Luangmalawat, P., Prachayawarakorn, S., Nathakaranakuleand, A. and Soponronnarit, S. 2008. Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice. LWT-Food Science and Technology. 41(4), 716–723.

Luikov, A.V. 1966. Heat and mass transfer in capillary porous bodies. Pergamon Press, London.

Moongngarm, A. and Saetung, N. 2010. Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germination rough rice and brown rice. Food Chemistry. 122, 782-788.

Nathakaranakul, A., Jaiboon, P. and Soponronnarit, S. 2010. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. Journal of Food Engineering. 100(4), 662-668.

Natural Product (ออนไลน์). 2559. สืบค้นจาก: http://fangfangjirapa.blogspot.com/2016/05/sesamin-h1n1-2012-2012-3-1.html [20 กรกฎาคม 2561].

Prince of Songkla University Pattani Campus

Osawa, M.Z., K. Goto and K. Tsukahara. 2004. Clinical study of germinated brown rice on Sawapikari. World rice Research Conference 2004, Tsukuba International Congress Center (Epochal Tsukuba) Tsukuba, Ibaraki, Japan, 5-7 November 2004.

Otegbayo, B.O., F. Osamuel, and J.B. Fashakin. 2001. Effect of parboiling on physico-chemical qualities of two local rice varieties in Nigeria. Journal of Food Technology in Africa. 6(4), 130-132.

Pascual, C. S. C. I., Massaretto, I. L., Kawassaki, F., Barros, R. M. C., Noldin, J. A. and marquez, U. M. L. 2013. Effects of parboiling, storage and cooking on the levels of tocopherols, tocotrienols and γ-oryzanolin brown rice (*Oryza sativa* L.). Food Research International. 50, 676-681.

Parnsakhorn, S. and Noomhorm, A. 2008. Changes in physicochemical properties of parboiled brown rice during. Food Engineering. 1-19.

Parnsakhorn, S. and Langkapin, J. 2013. Changes in physicochemical characteristics of germinated brown rice and brown rice during storage at various temperatures. Agric Eng Int: CIGR Journal. 15(2), 293-303.

Phattayakorn, K., Pajanyor, P., Wongtecha, S., Prommakool, A. and Saveboworn, W. 2016. Effect of germination on total phenolic content and antioxidant properties of 'Hang' rice. International Food Research Journal. 23(1), 406-409.

Powers, M.E., Yarrow, J.F., McCoy, S.C. and Borst, S.E. 2008. Growth hormone isoform responses to GABA ingestion at rest and after exercise. Medicine and Science in Sports and Exercise40(1): 104–110.

Puangwerakul, Y. 2008. Vitamin B2 content of parboiled Pathum Thani 1 malts in pilot scale production. Proceedings of 46 th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry. 29 January - 1 February 2008. 10-16.

Puerta, T. 1999. Inhibition of leukocytes lipoxygenase by phenolics from virgin olive oil. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 57, 445-449.

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. and Rice-Evans, C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biological and Medicine. 26, 1231-1237.

Prince of Songkla University Pattani Campus

Reddy, V.S., Dash, S., and Reddy, A.R. Anthocyanin pathway in rice (*Oryza sativa* L.): identification of a mutant showing dominant inhibition of anthocyanins in leaf and accumulation of proanthocyanin in pericarp. Theor. Appl. Genet. 1995. 91, 301-312.

Sakai, N. and Mao, W. 2006. Infrared Heating. In Da-Wen and Sun (Eds.), Thermal food processing, USA: Taylor and Francis Group. 493-525.

Sanchez-Moreno, C., Jimenez-Escria, A. and Saura-Calixto. J. 2000. Study of low-density lipoprotein oxidizability indexes to measure the antioxidant activity of dietary polyphenols. Nutrition Research. 20, 941-953.

Shen, Y., Jin, L., Xiao, P., Lu, Y., & Bao, J. S. 2009. Total phenolics, flavonoids, anti-oxidant capacity in rice grain and their relations to grain color, size and weight. Journal of Cereal Science. 49(1), 106–111.

Sies, H., Stahl, W. and Sundquist, A. 1992. "Antioxidant functions of vitamins, vitamin E and C, beta-carotene and other carotenoids". Annals of the New York Academy of sciences. 368, 7-19.

Sirisoontaralak, P., Nakornpanom, N.N., Koakietdumrongkul, K. and Panumaswiwath, C. 2015. Development of quick cooking germinated brown rice with convenient preparation and containing health benefits. LWT-Food Science and Technology. 61(1), 138-144.

Smanalieva, J., Salieva, K., Borkoev, B., Windhab, E.J. and Fischer, P. 2015. Investigation of changes in chemical composition and rheological properties of Kyrgyz rice cultivars (Ozgon rice) depending on long-term stack-storage after harvesting. LWT-Food Science and Technology. 63, 626-632.

Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A. and Taechapairoj, C. 2006. Parboiling brown rice using superheated steam fluidization technique. Journal of Food Engineering. 75, 423-432.

Soponronnarit, S., Chiawwet,M., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P. and Taechapairoj, C. 2008. Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice. J. Food Eng. 85, 268-276.

Sripum, C., Kukreja, R.K., Charoenkiatkul, S., Kriengsinyos, W. and Suttisansanee, U. 2016. The effect of storage conditions on antioxidant activities and total

Prince of Songkla University Pattani Campus

phenolic contents of ฦ parboiled germinated brown rice (Khao Dok Mali 105). International Food Research Journal. 23(4), 1827-1831

Srisang, N., Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S. and Varanyanond, W. 2010. The Effects of drying media and temperatures on the quality attributes of germinated brown rice. Agricultural Science. 41(3), 397-400.

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

Thammapat, P., Meeso, N. and Siriamornpun, S. 2017. Effects of NaCl and soaking temperature on the phenolic content, α-tocopherol, γ-oryzanol and fatty acids of glutinous rice. Food Chemistry. 218–224.

Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Waranyanond, W., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2004. Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. Drying Technology. 22(7), 1731–1754.

Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W. and Tirawanichakul, Y. 2008. Drying strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation and hot air convection. Walailak Journal of Science and Technology, 55, 77-100.

Valacchi, G. et al. 2004. " In vivo ozone exposure induces antioxidant stress-related responses in murine lung and skin". Free Radical Biology and Medicine. 36, 673-681.

Varanyanond, W., Tungtrakul, P., Surojanametakul, V., Watansiritham, L. and Luxiang, W. 2005. Effects of water soaking on gamma-aminobutyric acid (GABA) in germ of different Thai rice varieties. Kasetsart Journal (Natural Science). 39, 411-415.

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. 43(9), 1325-1330.

Wang, C.Y. and Singh, R.P. 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE paper No. 78-3001, ASAE, St. Joseph, MI.

Wiriyasuk, K. Extraction and Regulation of genes controlling grain anthocyanin and

Prince of Songkla University Pattani Campus

proanthocyanin (condensed tannins) accumulation in rice. 2005. Thesis for Master of Science, Kasetsart Universit, 64 p.

Xiao, J., Kai, G., Yamamoto, K. and Chen, X. 2013. Advance in dietary polyphenols as α-glucosidases inhibitors: a review on structure-activity relationship aspect. Critical reviews in food science and nutrition. 53(8), 818-836.

Xie, D.-Y. and. Dixon, R.A. 2005. Proanthocyanidin biosynthesis–still more questions than answers. Phytochemistry. 66, 2127–2144.

Yu-Ping, H. and Hsi-Mei L. 2016. Bioactive compounds and antioxidative activity of colored rice bran. Food and drug analysis. 24, 564 -574.

Zhou, Z., Chen, X., Zhang, M. and Blanchard, C. 2014. Phenolics, flavonoids, proanthocyanidin and antioxidant activity of brown rice with different pericarp colors following storage. Journal of Stored Products Research. 59, 120-125.

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ก

การหาความชื้นของข้าวกล้องงอก (Moisture content)

หาความชื้นตามวิธีมาตรฐาน AOAC (1995) มีขั้นตอนดังนี้

1.อบกระป๋องอลูมิเนียม (Moisture can) ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในโถดูดความชื้นเพื่อให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก ทำค่าบันทึกค่า

2. ชั่งตัวอย่างข้าวกล้องงอกประมาณ 1-2 กรัม ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมที่เตรียมไว้ บันทึกน้ำหนักของตัวอย่าง แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

3. เมื่อครบ 72 ชั่วโมงนำกระป๋องอลูมิเนียม (Moisture can) ออกมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ประมาณ 45 นาทีเพื่อให้ตัวอย่างเย็นลง

4. นำกระป๋องอลูมิเนียม (Moisture can) มาชั่งน้ำหนักอีกครั้งแล้วบันทึกค่าทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่างและคำนวณหาค่าความชื้นโดยน้ำหนักแห้ง (dry-basic) ดังนี้

$$\text{Moisture content (\%)} = \frac{W1 - W2}{W2} \times 100$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบแห้ง

W2 คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง

Prince of Songkla University Pattani Campus

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการอบแห้ง

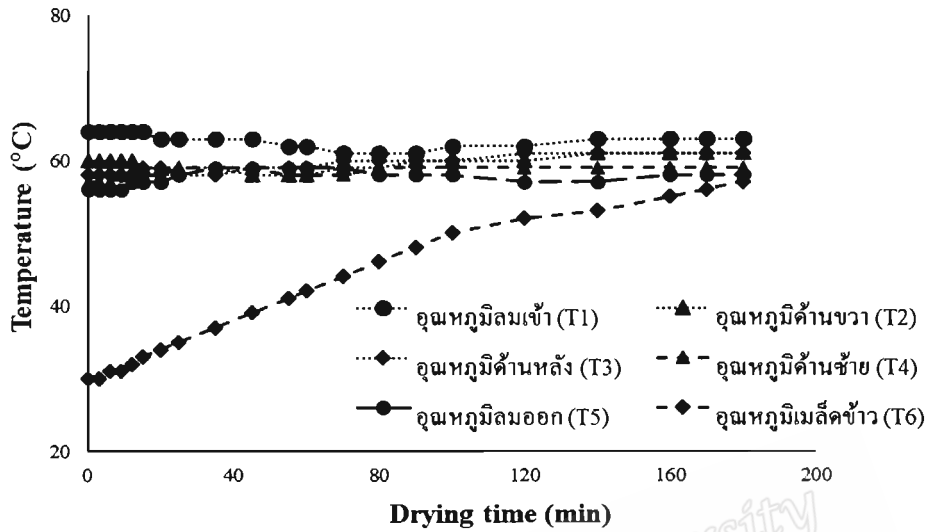
1. ผลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา

ตาราง ข.1 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 °C ด้วยลมร้อน

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (% d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)							
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{db}	T_{wb}
0	502.12	56.57	64	60	58	57	56	30	29	27
3	500.34	56.01	64	60	58	57	56	30	29	27
6	498.02	55.29	64	60	58	57	56	31	29	27
9	496.06	54.68	64	60	58	58	56	31	29	27
12	494.21	54.10	64	60	58	58	57	32	29	27
15	492.52	53.58	64	59	59	58	57	33	29	27
20	489.09	52.51	63	59	59	58	57	34	29	27
25	485.59	51.42	63	59	58	59	58	35	29	27
35	479.90	49.64	63	59	58	59	59	37	29	27
45	473.59	47.67	63	58	59	59	59	39	29	27
55	466.88	45.58	62	58	59	58	59	41	29	26
60	464.13	44.72	62	58	59	58	59	42	29	26
70	457.58	42.68	61	59	60	58	59	44	29	26
80	453.08	41.28	61	59	60	59	58	46	28	26
90	447.81	39.64	61	60	60	59	58	48	28	26
100	442.01	37.83	62	60	60	59	58	50	28	26
120	429.10	33.80	62	60	61	59	57	52	28	26
140	415.80	29.65	63	61	61	59	57	53	28	26
160	405.93	26.58	63	61	61	59	58	55	28	26
170	399.74	24.65	63	61	61	59	58	56	28	26
180	393.62	22.74	63	61	61	59	58	57	28	26

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile



Prince of Songkla University Pattani Campus

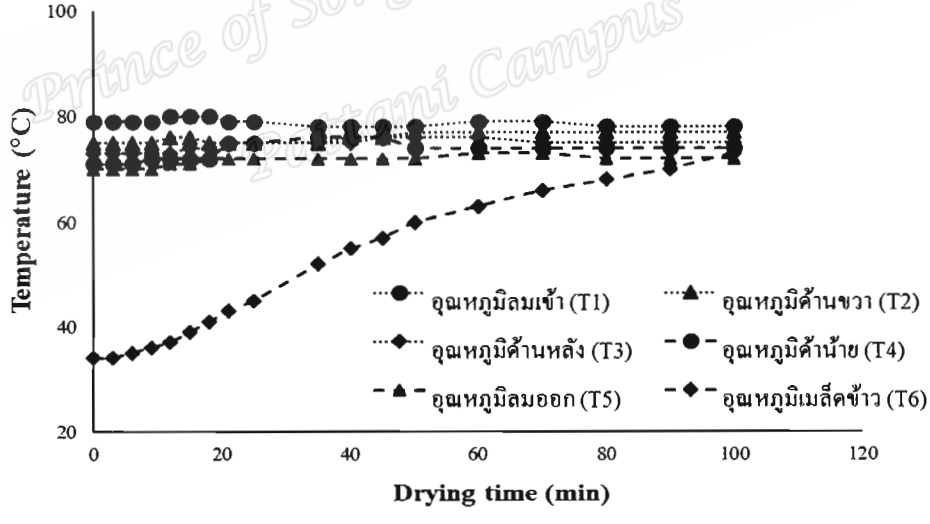
ตาราง ข.2 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °Cด้วยลมร้อน

เวลา	น้ำหนักข้าว	ความชื้น	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)							
(min)	(กรัม)	(%d.b)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{db}	T_{wb}
0	500.75	56.25	79	75	73	71	70	34	29	27
3	496.45	54.91	79	75	73	71	70	34	29	27
6	492.02	53.53	79	75	73	71	70	35	29	27
9	489.00	52.59	79	75	73	72	70	36	29	27
12	487.31	52.06	80	76	73	72	71	37	29	27
15	482.91	50.69	80	76	74	72	71	39	29	27
18	480.56	49.95	80	75	74	72	72	41	29	27
21	475.87	48.49	79	75	75	75	72	43	29	27
25	470.35	46.77	79	75	75	75	72	45	29	27
35	461.23	43.92	78	75	75	76	72	52	30	26
40	456.01	42.29	78	76	75	76	72	55	30	26

ตาราง ข.2 (ต่อ) ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยลมร้อน

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)							
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{db}	T_{wb}
45	452.34	41.15	78	76	76	76	72	57	30	26
50	447.05	39.50	78	77	76	74	72	60	30	26
60	436.22	36.12	79	77	76	74	73	63	28	27
70	426.01	32.93	79	77	75	74	73	66	28	27
80	414.54	29.35	78	77	75	74	72	68	28	27
90	402.8	25.69	78	77	75	74	72	70	28	27
100	391.55	22.18	78	77	75	74	72	73	28	27

Temperature profile



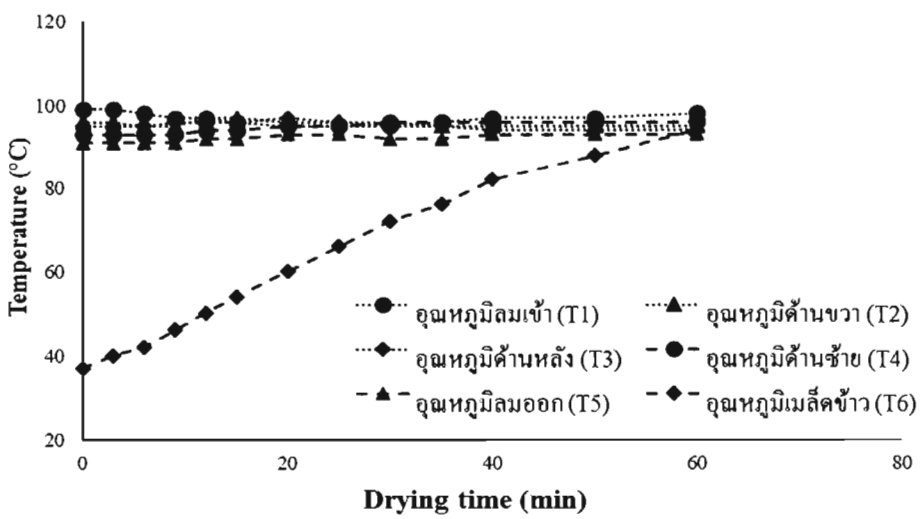
Prince of Songkla University Pattani Campus

ตาราง ข.3 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 95 °C ด้วยลมร้อน

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)							
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{db}	T_{wb}
0	500.12	56.05	99	96	95	93	91	37	29	26
3	492.3	53.61	99	96	95	93	91	40	29	26
6	485.74	51.56	98	95	95	93	91	42	29	26
9	480.06	49.79	97	95	96	93	91	46	29	26
12	474.68	48.11	97	97	96	94	92	50	29	27
15	466.97	45.71	96	97	96	94	92	54	29	27
20	457.30	42.69	95	96	97	95	93	60	29	27
25	448.54	39.95	95	96	96	95	93	66	29	26
30	440.22	37.36	95	96	95	96	92	72	28	26
35	430.46	34.31	96	95	95	96	92	76	28	26
40	422.89	31.95	97	95	94	96	93	82	28	26
50	407.33	27.10	97	95	94	96	93	88	28	26
60	391.97	22.30	98	95	94	96	93	94	28	26

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile

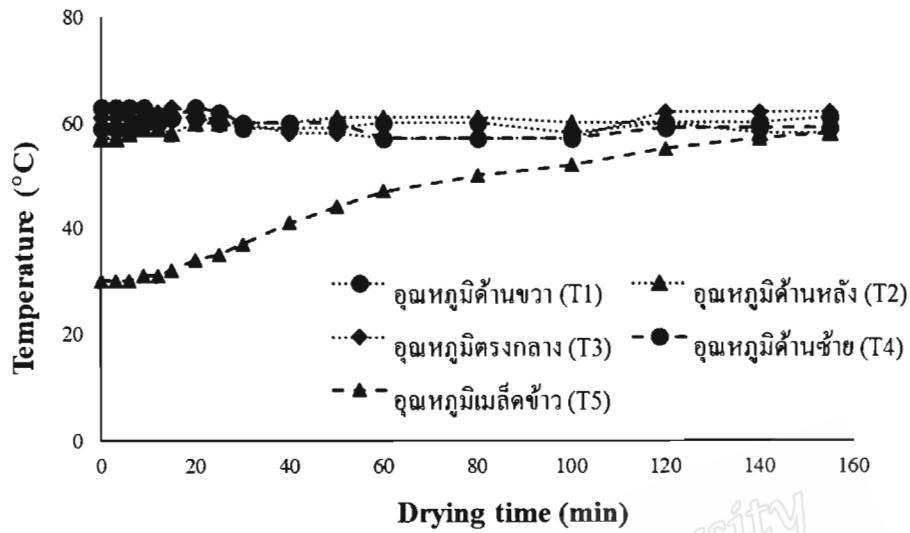


ตาราง ข.4 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	500.88	58.14	59	57	61	63	30	28	26
3	498.85	57.50	59	57	61	63	30	29	26
6	497.46	57.06	59	58	61	63	30	29	26
9	495.36	56.40	60	59	61	63	31	29	26
12	493.11	55.69	60	59	62	61	31	29	26
15	490.92	55.00	61	58	63	61	32	29	26
20	487.46	53.90	61	60	62	63	34	29	26
25	483.96	52.80	60	60	60	62	35	29	26
30	480.38	51.67	59	60	60	60	37	28	26
40	471.65	48.91	59	60	58	60	41	29	26
50	465.26	46.89	59	61	58	60	44	30	26
60	454.69	43.56	60	61	57	57	47	29	27
80	439.53	38.77	60	61	57	57	50	29	27
100	428.05	35.15	58	60	57	57	52	29	27
120	412.09	30.11	60	60	62	59	55	29	27
140	399.72	26.20	60	58	62	59	57	29	27
155	384.38	21.36	61	58	62	59	58	29	27

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile



ตาราง ข.5 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000W

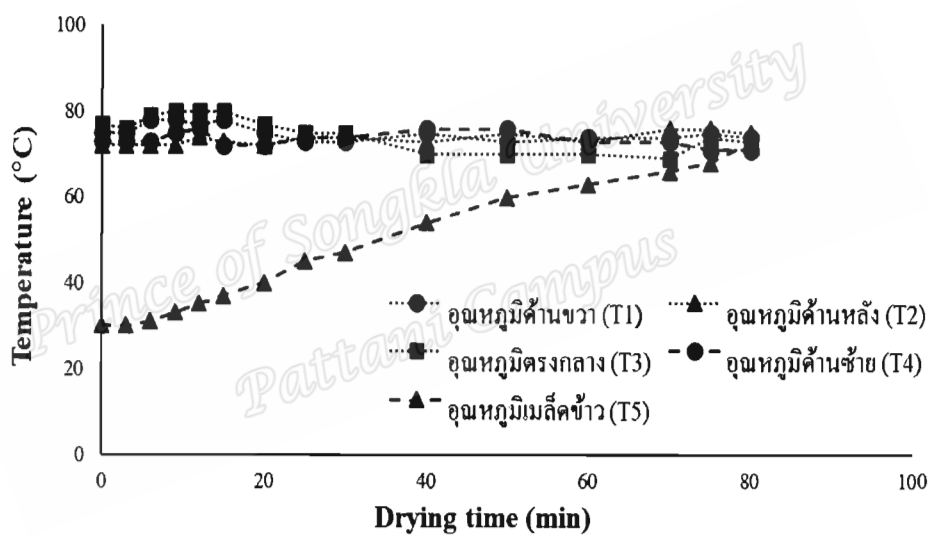
เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	500.54	57.28	75	72	77	73	30	29	27
3	498.79	56.73	75	72	76	73	30	29	27
6	496.49	56.01	78	72	79	73	31	29	27
9	492.13	54.64	78	72	80	75	33	28	27
12	486.1	52.74	77	74	80	76	35	28	27
15	480.26	50.91	78	73	80	72	37	28	27
20	470.99	47.99	75	72	77	72	40	29	27
25	463.69	45.70	73	74	75	74	45	28	27
30	454.69	42.87	73	74	75	74	47	28	27
40	438.54	37.80	75	73	70	76	54	28	27
50	424.79	33.48	73	75	70	76	60	28	26
60	411.1	29.18	74	73	70	73	63	28	26

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตาราง ข.5 (ต่อ) ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
70	398.97	25.36	74	76	69	73	66	28	27
75	391.47	23.01	75	76	74	71	68	29	27
80	385.57	21.15	74	75	73	71	73	29	27

Temperature profile



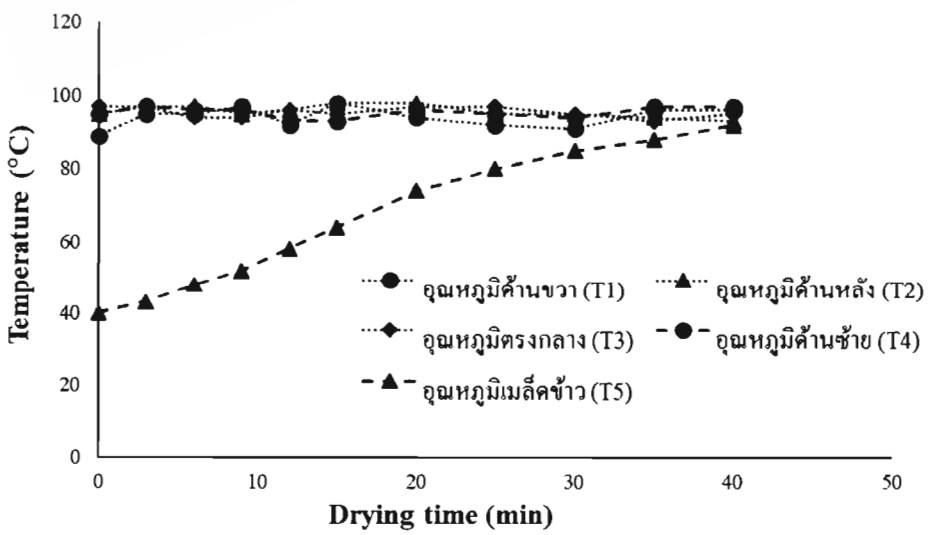
Prince of Songkla University Pattani Campus

ตาราง ข.6 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 95 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	500.15	57.42	89	95	97	95	40	29	27
3	493.24	55.24	95	97	97	97	43	29	33
6	486.07	52.99	95	97	94	96	48	29	27
9	475.97	49.81	97	95	94	96	52	29	26
12	468.88	47.58	92	96	96	93	58	29	27
15	458.49	44.31	98	98	95	93	64	29	27
20	444.09	39.77	94	98	97	96	74	28	27
25	428.86	34.98	92	95	97	95	80	29	27
30	413.51	30.15	91	95	95	94	85	29	27
35	399.20	25.65	96	94	93	97	88	28	27
40	389.04	22.45	96	93	95	97	92	28	27

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile

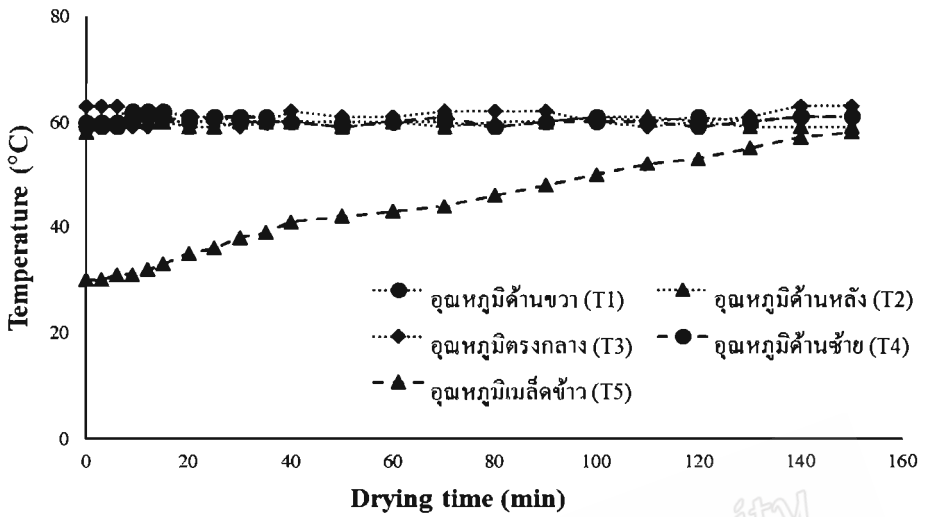


ตาราง ข.7 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,500W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	501.15	52.58	60	58	63	59	30	26	26
3	498.42	51.75	60	60	63	59	30	26	26
6	494.68	50.61	60	60	63	59	31	27	26
9	490.25	49.26	62	61	59	60	31	26	26
12	487.04	48.28	62	60	59	61	32	27	25
15	483.71	47.27	62	60	60	61	33	26	25
20	478.49	45.68	61	59	60	60	35	27	25
25	473.59	44.19	61	59	60	61	36	27	25
30	468.87	42.75	60	60	59	61	38	27	25
35	462.68	40.87	60	60	60	61	39	27	25
40	457.46	39.28	60	60	62	60	41	27	25
50	454.36	38.34	60	59	61	59	42	27	25
60	444.65	35.38	60	60	61	60	43	27	25
70	438.81	33.60	60	59	62	61	44	27	25
80	430.92	31.20	59	60	62	59	46	27	25
90	426.05	29.72	60	60	62	60	48	27	25
100	418.94	27.55	61	61	60	60	50	27	25
110	414.62	26.24	60	61	59	60	52	27	25
120	408.06	24.24	61	60	60	59	53	27	25
130	405.17	23.36	60	59	61	60	55	27	25
140	401.04	22.10	61	59	63	61	57	27	25
150	396.00	20.57	61	59	63	61	58	27	25

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile



ตาราง ข.8 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,500W

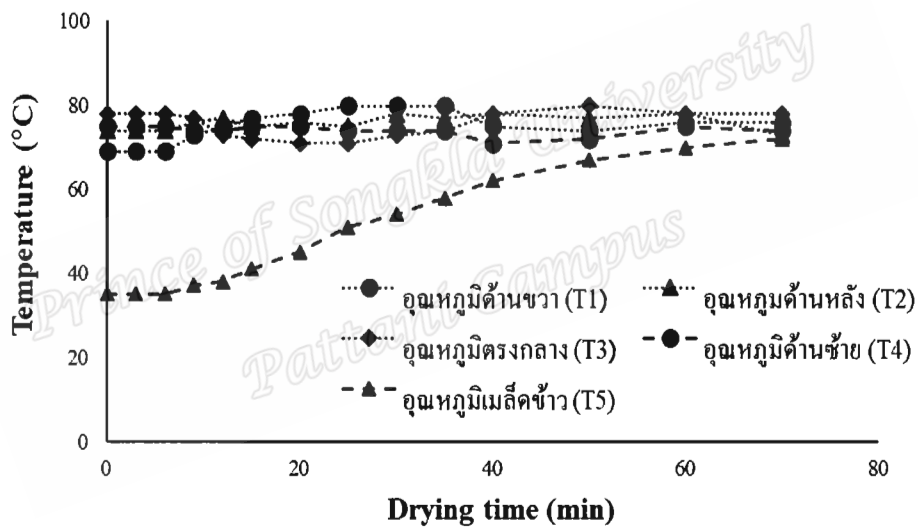
เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	501.94	54.10	69	74	78	75	35	28	26
3	499.2	53.26	69	74	78	75	35	28	26
6	493.14	51.40	69	74	78	75	35	28	26
9	487.48	49.66	73	76	77	74	37	28	26
12	482.37	48.09	75	77	73	74	38	27	26
15	475.99	46.13	77	75	72	75	41	27	26
20	465.62	42.95	78	76	71	75	45	27	25
25	457.97	40.60	80	75	71	74	51	27	26
30	448.85	37.80	80	78	73	74	54	27	25
35	440.3	35.18	80	77	74	74	58	27	25
40	432.79	32.87	75	78	78	71	62	27	25

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตาราง ข.8 (ต่อ) ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,500W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
50	417.22	28.09	74	77	80	72	67	27	25
60	405.81	24.59	76	78	78	75	70	27	25
70	394.81	21.21	76	73	78	74	72	27	25

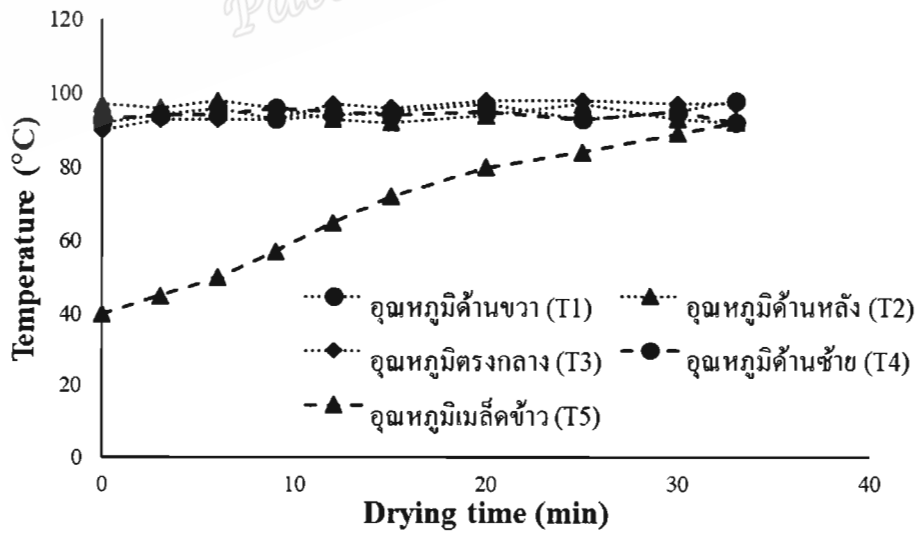
Temperature profile



ตาราง ข.9 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์หอมกระดังงา ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 95 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,500W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	501.13	55.87	92	97	90	93	40	30	28
3	495.71	54.18	94	96	93	94	45	30	28
6	483.6	50.42	96	98	93	94	50	30	28
9	473.2	47.18	93	96	93	96	57	29	28
12	460.68	43.29	94	93	97	95	65	30	28
15	453.01	40.90	95	92	96	94	72	29	27
20	437.29	36.01	97	94	98	95	80	30	28
25	420.91	30.92	93	97	98	93	84	30	28
30	406.65	26.48	95	93	97	95	89	30	27
33	398.92	24.08	98	92	97	92	92	29	27

Temperature profile



Prince of Songkla University Pattani Campus

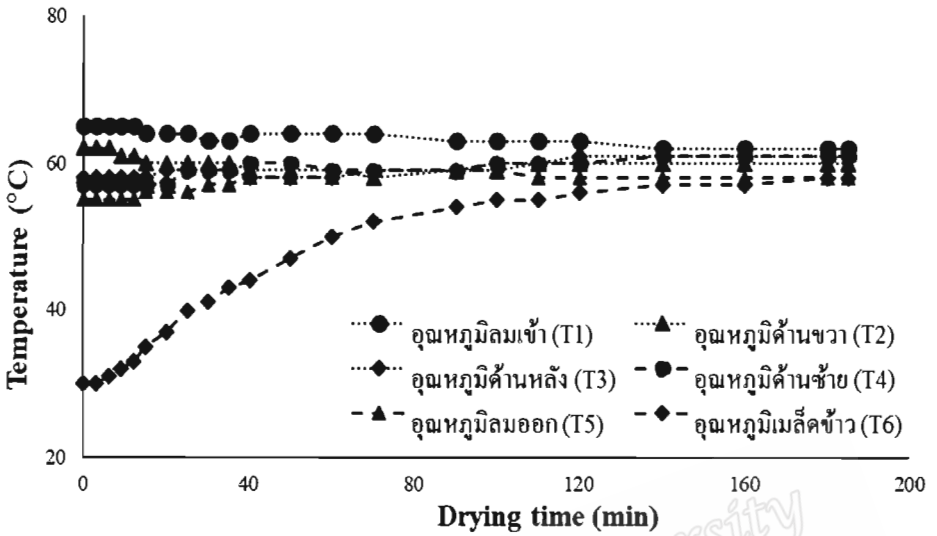
2. ผลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง

ตาราง ข.10 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 °C ด้วยลมร้อน

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)							
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{db}	T_{wb}
0	502.11	57.32	65	62	58	57	55	30	30	26
3	501.3	57.07	65	62	58	57	55	30	30	26
6	500.54	56.83	65	62	58	57	55	31	30	26
9	499.15	56.39	65	61	58	57	55	32	30	26
12	498.12	56.07	65	61	58	57	55	33	30	26
15	497.14	55.77	64	60	58	57	56	35	31	26
20	494.96	55.08	64	60	59	57	56	37	31	26
25	493.04	54.48	64	60	59	59	56	40	31	27
30	489.86	53.48	63	60	59	59	57	41	31	27
35	486.99	52.58	63	60	59	59	57	43	29	27
40	484.18	51.70	64	59	58	60	58	44	29	27
50	478.09	49.80	64	59	58	60	58	47	29	27
60	470.91	47.55	64	59	58	59	58	50	29	27
70	464.4	45.51	64	58	59	59	59	52	29	27
90	449.31	40.78	63	59	59	59	59	54	29	27
100	442.06	38.51	63	59	60	60	59	55	30	26
110	435.44	36.43	63	60	60	60	58	55	30	26
120	429.76	34.65	63	60	61	60	58	56	30	26
140	419.96	31.58	62	60	61	61	58	57	30	27
160	407.32	27.62	62	60	61	61	58	57	30	27
180	394.97	23.75	62	60	61	61	58	58	30	27
185	390.45	22.34	62	60	61	61	58	58	30	27

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile



Prince of Songkla University Pattani Campus

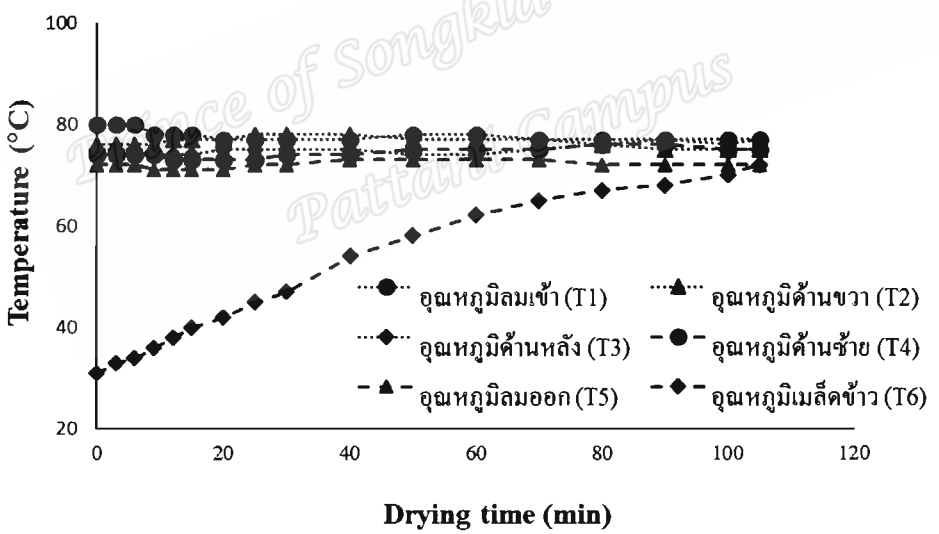
ตาราง ข.11 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยลมร้อน

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)							
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{db}	T_{wb}
0	501.87	57.41	80	76	75	74	72	31	29	26
3	500.30	56.92	80	76	75	74	72	33	30	26
6	496.73	55.80	80	76	75	74	72	34	30	26
9	491.84	54.26	78	76	74	74	71	36	31	26
12	489.26	53.45	78	77	74	73	71	38	30	26
15	486.11	52.47	78	77	74	73	71	40	29	26
20	480.14	50.59	77	77	75	73	71	42	29	25
25	473.26	48.44	77	78	75	73	72	45	29	25
30	467.67	46.68	77	78	75	74	72	47	30	25
40	456.56	43.20	77	78	75	74	73	54	30	27
50	446.57	40.07	78	77	74	75	73	58	30	27

ตาราง ข.11 (ต่อ) ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยลมร้อน

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)							
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{db}	T_{wb}
60	436.16	36.80	78	77	74	75	73	62	30	27
70	428.44	34.38	77	77	75	75	73	65	30	27
80	416.82	30.73	77	76	76	76	72	67	30	27
90	405.80	27.28	77	75	77	76	72	68	30	27
100	393.24	23.34	77	75	76	75	72	70	30	27
105	386.97	21.37	77	75	77	75	72	72	30	27

Temperature profile



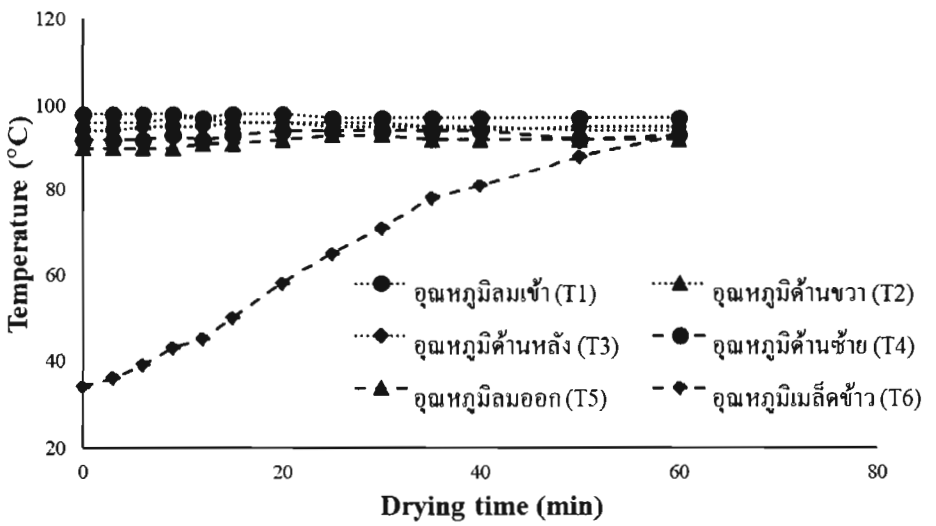
Prince of Songkla University Pattani Campus

ตาราง ข.12 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60 % มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 95 °C ด้วยลมร้อน

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)							
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_{db}	T_{wb}
0	501.86	57.18	98	96	94	92	90	34	30	26
3	496.11	55.38	98	96	94	92	90	36	30	26
6	488.03	52.85	98	96	95	92	90	39	30	27
9	481.01	50.65	98	97	95	93	90	43	30	27
12	475.03	48.78	97	97	95	92	91	45	30	27
15	469.45	47.03	98	96	96	93	91	50	28	27
20	459.31	43.85	98	96	96	94	92	58	28	27
25	450.21	41.00	97	95	96	94	93	65	29	27
30	440.45	37.95	97	95	96	94	93	71	28	27
35	428.45	34.19	97	95	95	94	92	78	29	27
40	419.46	31.37	97	95	94	94	92	81	28	26
50	404.44	26.67	97	94	95	92	92	88	28	26
60	390.81	22.40	97	94	95	93	92	93	28	26

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile

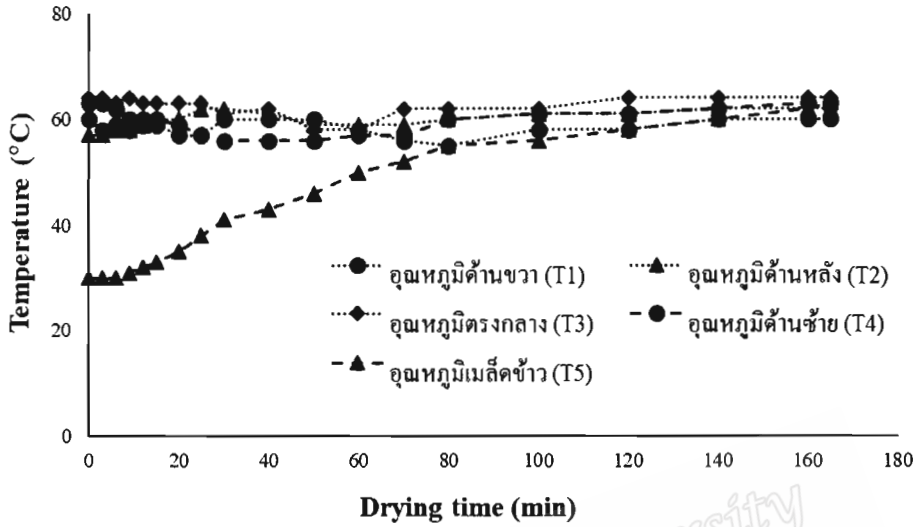


ตาราง ข.13 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	500.08	60.05	63	57	64	60	30	30	26
3	498.68	59.60	63	57	64	58	30	30	27
6	497.50	59.23	62	58	63	59	30	30	27
9	496.09	58.77	60	58	64	58	31	30	27
12	494.69	58.33	59	59	63	60	32	30	27
15	492.53	57.63	59	60	63	60	33	30	27
20	488.60	56.38	57	60	63	59	35	30	27
25	483.43	54.72	57	62	63	57	38	29	26
30	478.58	53.17	60	62	61	56	41	29	26
40	472.47	51.21	60	61	62	56	43	29	26
50	465.12	48.86	60	59	58	56	46	29	27
60	457.88	46.55	58	59	58	57	50	29	28
70	450.52	44.19	56	59	62	57	52	30	28
80	443.17	41.84	55	60	62	60	55	30	28
100	430.86	37.90	58	61	62	61	56	31	28
120	415.42	32.96	58	61	64	61	58	30	26
140	400.77	28.27	60	62	64	62	60	30	26
160	391.14	25.18	60	62	64	63	62	30	26
165	388.82	24.44	60	62	64	63	63	30	26

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile



ตาราง ข.14 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000W

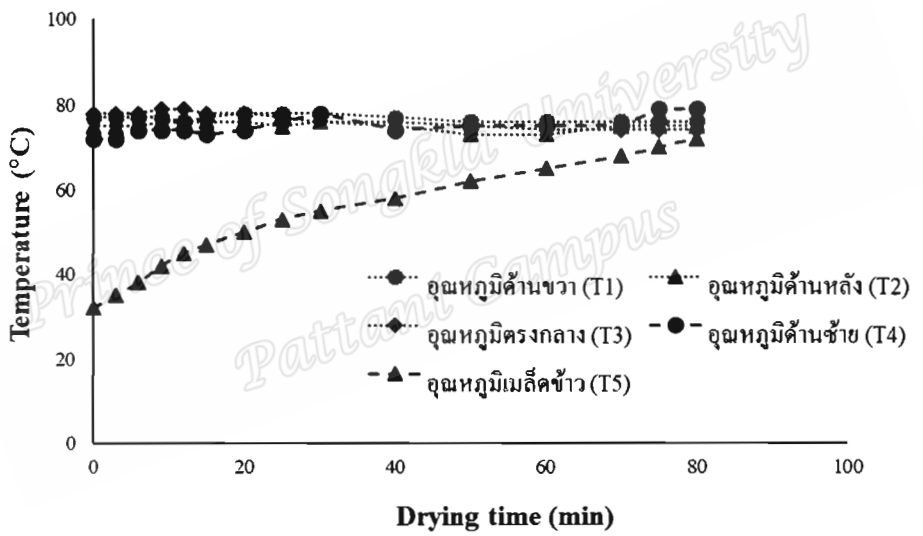
เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	500.16	59.78	77	75	78	72	32	28	25
3	496.87	58.73	77	75	78	72	35	28	25
6	491.82	57.12	77	75	78	74	38	28	25
9	486.88	55.54	77	76	79	74	42	28	24
12	481.17	53.71	76	76	79	74	45	28	24
15	475.32	51.84	77	76	78	73	47	28	24
20	466.73	49.10	78	76	78	74	50	28	25
25	457.97	46.30	78	75	77	76	53	28	25
30	449.9	43.72	78	76	76	78	55	28	25
40	436.21	39.35	77	75	76	74	58	29	25
50	422.53	34.98	76	73	75	75	62	29	25

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตาราง ข.14 (ต่อ) ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
60	410.17	31.03	76	73	74	75	65	29	25
70	397.21	26.89	76	75	74	75	68	29	26
75	391.17	24.96	76	75	74	79	70	29	26
80	385.47	23.14	76	75	74	79	72	29	26

Temperature profile

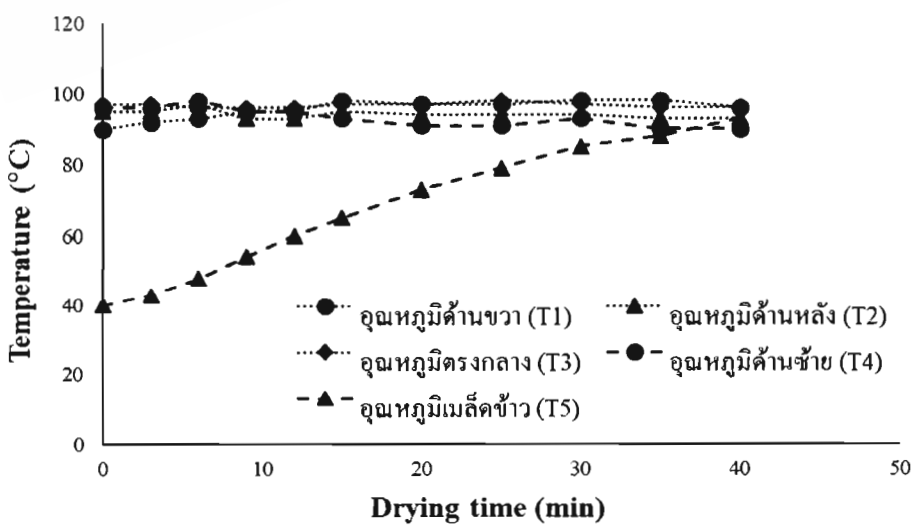


ตาราง ข.15 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 95 °Cด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	500.03	59.81	90	95	97	96	40	29	26
3	491.1	56.96	92	95	97	96	43	29	26
6	485.91	55.30	93	97	96	98	48	30	26
9	476.99	52.45	95	93	96	95	54	30	26
12	466.83	49.20	95	93	96	95	60	30	27
15	457.34	46.17	98	95	97	93	65	30	26
20	441.88	41.23	97	94	97	91	73	30	26
25	425.8	36.09	97	94	98	91	79	30	26
30	408.01	30.40	98	94	97	93	85	30	26
35	392.67	25.50	98	93	96	90	88	30	26
40	383.6	22.60	96	93	96	90	93	30	26

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile

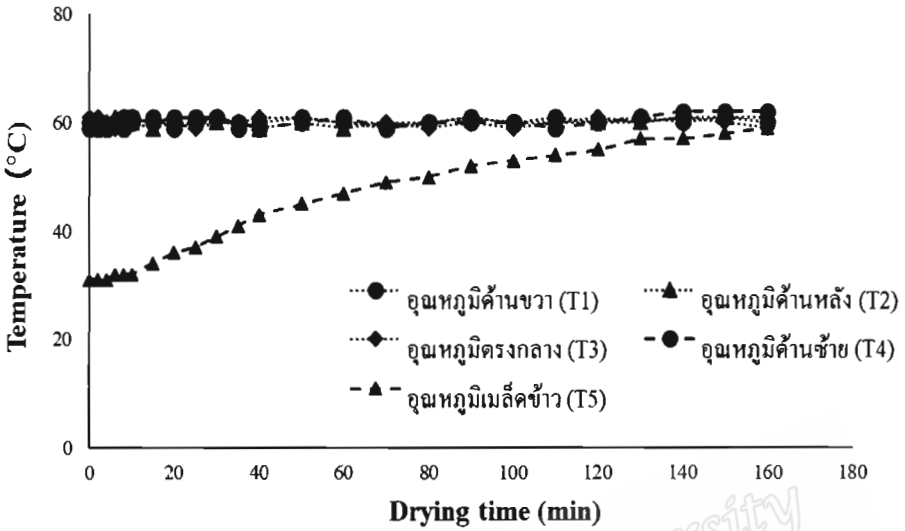


ตาราง ข.16 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 °Cด้วยรังสีอินฟราเรด 1,500W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	506.76	58.18	60	60	61	59	31	27	26
2	505.52	57.79	60	60	61	59	31	27	26
4	504.6	57.51	59	60	60	59	31	27	26
6	503.69	57.22	60	61	59	60	32	27	26
8	501.91	56.67	61	61	60	59	32	27	25
10	500.35	56.18	60	60	61	61	32	27	25
15	495.33	54.61	61	59	60	60	34	27	25
20	489.37	52.75	59	60	60	61	36	27	25
25	485.84	51.65	60	60	59	61	37	27	25
30	481.17	50.19	61	60	60	61	39	27	25
35	478.58	49.38	59	60	60	60	41	27	25
40	475.52	48.43	60	59	61	59	43	27	25
50	468.81	46.33	61	60	61	60	45	27	25
60	460.47	43.73	60	59	60	61	47	27	25
70	453	41.40	59	60	60	59	49	27	25
80	445.58	39.08	60	60	59	60	50	27	25
90	436.87	36.36	61	61	60	60	52	27	25
100	430.81	34.47	60	60	59	60	53	27	25
110	424.71	32.57	61	60	60	59	54	27	25
120	417.92	30.45	60	60	61	60	55	27	25
130	411.81	28.54	61	60	60	61	57	27	25
140	405.35	26.53	60	61	61	62	57	27	25
150	397.4	24.04	61	61	60	62	58	27	25
160	390.07	21.76	60	61	59	62	59	27	25

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile



ตาราง ข.17 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,500W

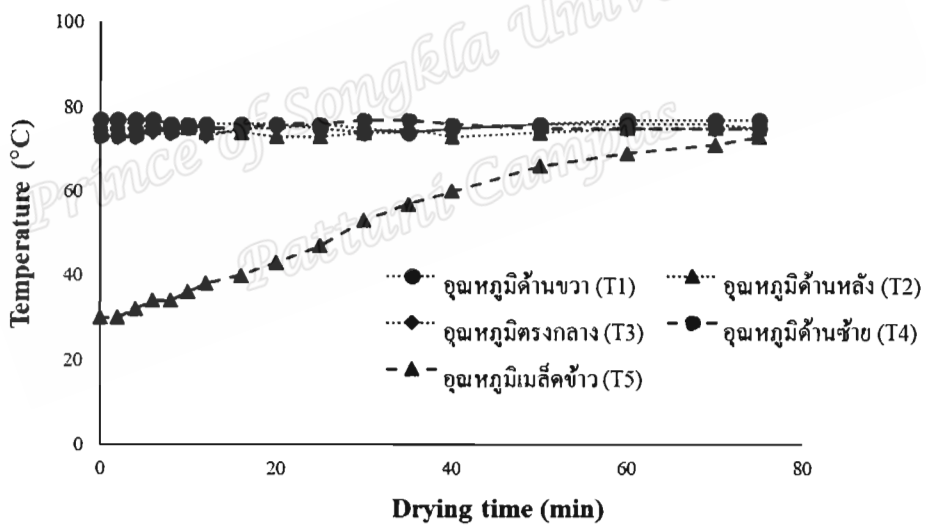
เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	505.5	56.28	77	76	75	73	30	28	26
2	503.5	55.66	77	76	75	73	30	28	26
4	501.43	55.02	77	76	75	73	32	28	26
6	499.1	54.30	77	75	74	75	34	28	26
8	495.65	53.23	76	75	75	74	34	27	26
10	490.85	51.75	75	75	75	76	36	27	26
12	485.9	50.22	76	74	73	75	38	27	25
16	476.88	47.43	76	74	75	75	40	27	26
20	469.26	45.08	76	73	75	76	43	27	25
25	459.58	42.08	75	73	76	76	47	27	25
30	450.19	39.18	74	74	75	77	53	27	25
35	443.51	37.11	74	75	74	77	57	27	25

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตาราง ข.17 (ต่อ) ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 75 °C ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,500W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
40	435.59	34.67	75	73	75	76	60	27	25
50	423.27	30.86	76	74	76	75	66	27	25
60	411.68	27.27	77	75	76	75	69	27	25
70	400.68	23.87	77	75	76	75	71	27	25
75	396.29	22.52	77	75	75	75	73	27	25

Temperature profile



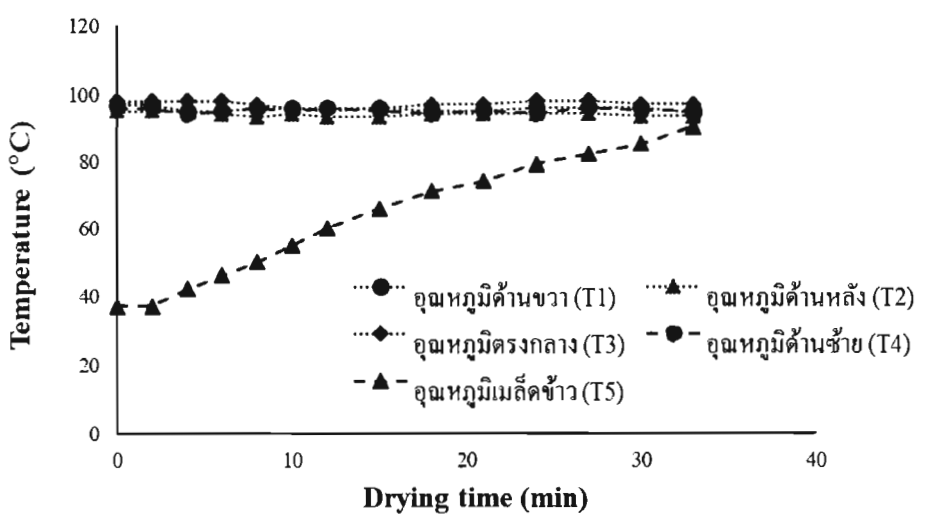
Prince of Songkla University Pattani Campus

ตาราง ข.18 ข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ชีบูกันตัง ความชื้นเริ่มต้น 50-60 %มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้งที่ 95 องศาเซลเซียส ด้วยรังสีอินฟราเรด 1,500W

เวลา (min)	น้ำหนักข้าว (กรัม)	ความชื้น (%d.b)	อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)						
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{db}	T_{wb}
0	508.69	58.25	97	95	98	96	37	26	24
2	505.29	57.19	97	95	98	96	37	26	24
4	498.96	55.22	95	95	98	94	42	26	24
6	492.71	53.28	95	94	98	95	46	26	24
8	483.93	50.55	96	93	97	96	50	26	24
10	477.22	48.46	96	94	96	95	55	26	24
12	467.27	45.36	96	93	95	96	60	26	24
15	455.07	41.57	96	93	96	95	66	26	24
18	443.3	37.91	95	94	97	94	71	26	24
21	432.9	34.67	95	94	97	95	74	26	24
24	422.65	31.48	96	94	98	94	79	26	24
27	413.99	28.79	96	94	98	96	82	27	24
30	403.49	25.52	96	93	97	95	85	27	25
33	399.21	24.19	94	93	97	95	90	27	25

Prince of Songkla University Pattani Campus

Temperature profile



ภาคผนวก ค

การเตรียมสารเคมี

1. หาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

1.1 10% Folin-Ciocalteu

ใส่ Folin-Ciocalteu ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

1.2 7.5% Na_2CO_3

ชั่ง Na_2CO_3 7.5 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

1.3 5% $NaNO_2$

ชั่ง $NaNO_2$ 5 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

1.4 10% $AlCl_3$

ชั่ง $AlCl_3.6H_2O$ 10 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

1.5 1M NaOH

ชั่ง NaOH 20 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 500 มิลลิลิตร

2. หาปริมาณโปรแอนโทไซยานิดิน

2.1 1M HCl (37% v/v)

ปิเปต Cont.HCl 49.33 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 500 มิลลิลิตร

2.2 1% Vanillin ในเมทานอล

ชั่ง Vanillin 1 กรัม ละลายด้วยเมทานอลใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอลเป็น 100 มิลลิลิตร

3. ปริมาณแอนโทไซยานิน

3.1 KCl buffer pH 1.0 (0.25M)

ชั่ง KCl 0.466 กรัม ละลายด้วยน้ำ กลั่น 240 มิลลิลิตร.ปรับค่า pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจนได้ pH 1.0 แล้วปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น.

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.2 $CH_3CO_2Na.3H_2O$ pH 4.5 (0.4M)

ชั่ง $CH_3CO_2Na.3H_2O$ 13.608 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 240 มิลลิลิตร. ปรับค่าพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจนได้ pH 4.5 แล้วปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น.

4. ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

4.1 0.1mM DPPH

ชั่ง DPPH 0.0197 กรัม ละลายด้วย 70% เอทานอล จะได้ DPPH ที่มีความเข้มข้น 5 mM จากนั้นทำการเจือจางให้มีความเข้มข้น 0.1 mM โดยการปิเปตสารละลาย 5 mM DPPH 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วย 70% เอทานอล เป็น 100 มิลลิลิตร

4.2 ABTS solution

เตรียม ABTS เข้มข้น 7 mM โดยการชั่ง ABTS 0.0950 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร เตรียม 2.45 mM $K_2S_2O_8$ โดยชั่ง $K_2S_2O_8$ 0.0066 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร นำสารทั้งสองมาผสมกัน แล้วเก็บไว้ที่ 4 °C เป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้ต้องเจือจางด้วย 70% เอทานอล วัดค่าการดูดกลืนแสงให้อยู่ในช่วง 0.700±0.020 นาโนเมตร

4.3 FRAP reagent

4.3.1 300 mM Acetate buffer pH 3.6

ชั่ง $C_2H_3NaO_2.3H_2O$ 3.1 กรัม ละลายด้วย Glacial acetic acid 16 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร

4.3.2 20 mM Ferric chloride solution

ชั่ง $FeCl_3.6H_2O$ 0.54 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เก็บในที่ปราศจากแสง และทำการเตรียมใหม่ทุกครั้ง

4.3.3 10 mM TPTZ solution

ชั่ง 2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine 0.31 กรัม ละลายด้วย 40 mM HCl (Conc.HCl 0.146 มิลลิลิตร ปรับด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร) 10 มิลลิลิตร ทำการเตรียมใหม่ทุกครั้ง

นำสารละลายจากข้อ 4.31 4.32 และ 4.33 มาผสมกันในอัตราส่วน 50:5:5 มิลลิลิตร

5. ปริมาณกาบา

5.1 6% Phenol

ชั่ง Phenol 6 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

Faculty of Songkla University Pattani Campus

5.2 7.5% NaOCl

ปิเปต 10% NaOCl 75 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

5.3 Borate buffer pH 9.0

ผสม 0.2M H_3BO_3 50 มิลลิลิตร กับ 0.2M $Na_2B_4O_7.10H_2O$ 59 มิลลิลิตร

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวฮารีซะ กอฮิง

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5920320304

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ. เคมี-ชีววิทยา)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2557

ทุนการศึกษา

- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2560

Prince of Songkla University Pattani Campus

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Kohing, H., Tasara, T. and Khummueng, W. 2018. Effect of infrared drying on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated brown rice. The Pure and Applied Chemistry International Conference 2018, The 60th Anniversary of His Majesty the King's Accession to the Throne International Convention Center, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 7-9 February 2018, p FA5-FA10.

PACCON
PURE AND APPLIED CHEMISTRY INTERNATIONAL CONFERENCE 2018

Effect of infrared drying on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated brown rice

Hareesah Kohing, Jutarut Tasara, Weeraya Khummueng*
Department of Science, Faculty of Science and Technology,
Prince of Songkla University, Pattani Campus 94000, Thailand
**E-mail: weeraya.k@psu.ac.th*

Abstract:

Infrared drying (IR) is well known as an effective drying method due to high heat and mass transfer rates and economical cost for structure equipment. This drying method is attractively considered because it can reduce the drying time and keep the rice quality. In this study, the effect of infrared drying at different power (1000 and 1500 W) and temperature (60, 75 and 95 °C) on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of HawmKradang-Ngah (HK) and Seebukabntang (SB) germinated brown rice was investigated. HK and SB are famous local rice varieties which widely cultivar in the south of Thailand, especially, in Narathiwat province. HK is a medium grain, red-brown color with moderate amylose content while SB is a short grain, non-color and high amylose content. The results showed that drying temperatures did not significantly affect the total phenolic content (TPC), total flavonoid content (TFC) and antioxidant activity when compared with control rice. Additionally, the results of quality analysis showed that cooking time and water absorption of IR drying rice were significantly different as compared with the control rice. These studied results provided the new choice for germinated brown rice production and applications.

1. Introduction

Germinated brown rice (GBR) is a functional rice product which has high content of phytochemicals compared to brown rice. During germination, significant changes in biochemical, nutritional and sensory were observed.

The major drawback in germinated brown rice (GBR) is high moisture content, which leads to infection by microorganisms, yellowing by non-enzymatic reaction and undesirable odors. To maintain quality of germinated brown rice extensively, the moisture content must be reduced.[1,2] Therefore, drying is an important process of the germinated brown rice production. Several, drying methods for moisture content reduction in GBR,[3] such as sun drying, hot air drying and microwave drying etc., However, one of the high efficient drying methods that provide high heat and mass transfer is electromagnetic irradiation method, especially, infrared radiation (IR) drying method IR drying is significantly different from convective drying because the material is dried directly by absorption of IR energy rather than transfer of heat from the air.[4] Infrared irradiation technique is easy installation and low cost for construction.[5,6] Employing the IR drying method have been known to reduce the drying time and energy.[6,7] Therefore, the objectives of this research was aimed to investigate the effect of IR drying on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of local rice in southern Thailand, especially, Hawm-Kradang-Ngah (HK) and Seebukabntang (SB) rice.

2. Materials and Methods

2.1 Materials and reagents

HK and SB paddy varieties were provided by the Rice Research Center in Pattani province, Thailand. All chemicals used in the experiment are listed below: ethanol, folin–ciocalteu reagent, sodium carbonate (Na_2CO_3), gallic acid, sodium nitrite ($NaNO_2$), aluminium chloride ($AlCl_3$),

sodium hydroxide (NaOH), catechin, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), 2,2'-azino-bis-3-ethylbenz-thiazoline-6-sulphonic acid (ABTS), potassium peroxydisulfate ($K_2S_2O_8$).

2.2 Rice samples preparation

Paddy was cleaned and soaked in water at room temperature for 24 h and incubated for 24 h. The paddy was steamed at temperature of 100±2 °C for 30 min Then, it was stored in a confined space for 30 min before drying with infrared (IR) at different powers (1,000 and 1,500 W) and temperatures (60, 75 and 95 °C). The average initial moisture content of the samples was in the range of 54±2% dry basis. Paddy sample was dried until it reached the final moisture content at 22±1% dry basis. The samples were taken out the dryer and were then ventilated by aeration until the moisture content of the paddy about 16±1% dry basis for prolonged shelf life.[10] The paddy was husked by hulling machine into the GBR.

2.3 Rice samples extraction

1.00 g of rice samples were extracted with 10 mL of 70% aqueous ethanol at 25 °C in a shaking incubator at 150 rpm for 16 h The mixtures were centrifuged at 2,500 rpm for 20 min and the supernatants were collected.The residues were re-extracted under the same conditions, and supernatants from both extractions were combined [9]

2.4 Determination of total phenolic content (TPC)

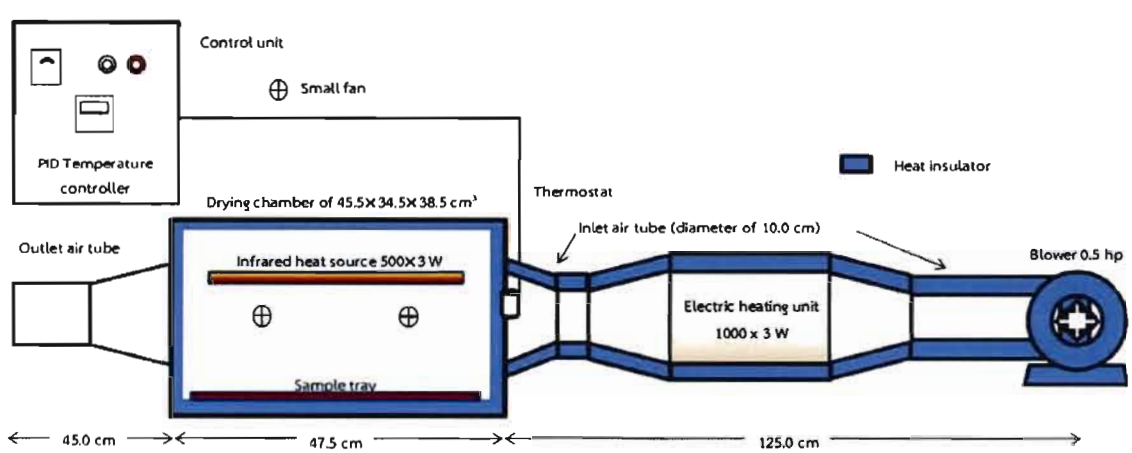
Total phenolic content were determined using the Folin-Ciocalteu colorimetric method.[9] Briefly, 200 µL of extract solution was mixed with 800 µL of 10 % Folin–Ciocalteu reagent. The mixture was shaken for 1min, then 2 mL of 7.5% (w/v) Na_2CO_3 solution was added, and the mixture was shaken once again for 30 s The final mixture was made up to 5 mL with deionized water and then allowed to stand for 2 h at ambient temperature. The absorbance of the mixture was measured at 760 nm Gallic acid solution was used as standard.

2.5 Determination of total flavonoid content (TFC)

Total flavonoid content were analyzed by the method modified by Basker.[10] Briefly, 0.5 mL of extract solution was mixed with 3 mL of deionized water and 0.3 mL of 5% $NaNO_2$ then incubated for 5 min. After adding 0.6 mL of 10 % $AlCl_3$ and allowing 5 min of reaction, 2 mL of 1 M NaOH was added The absorbance was measured at 510 nm. Catechin solution was used as standard.

2.6 DPPH radical scavenging analysis

The DPPH radical scavenging activity was determined according to the method by Iqbal.[11] Briefly, 1 mL of extract solution was mixed with 3 mL of 0.1 mM DPPH. After incubating for 30 min in dark,



*The hot air blower was turn off when the IR drying mode was operated

Figure 1. Infrared dryer[8]

the absorbance was measured at the wavelength of 517 nm. DPPH radical scavenging activity (%) was calculated using the following equation:

$$\text{Scavenging activity}(\%) = [1 - (A_{sample}/A_{blank})] \times 100$$

2.7 ABTS cation radical scavenging assay

The ABTS cation radical scavenging activity was determined according to the method by Shen.[12] The $ABTS^{\cdot+}$ solution was produced by mixing 7 mM ABTS stock solution and 2.45 mM $K_2S_2O_8$ (v/v = 2:1) in dark at room temperature 12-16 h. The working $ABTS^{\cdot+}$ solution was diluted by ethanol to adjust the absorbance to 0.700 ± 0.020 at the wavelength of 734 nm. The extracts or standards (100 µL) were mixed with 3.9 mL working $ABTS^{\cdot+}$ solution thoroughly on a vortex. After reacting for about 6 min, the absorbance was tested at 734 nm. ABTS cation radical scavenging activity (%) was calculated using the same formula in section 2.6.

2.8 Cooking properties

2.8.1 Cooking time

Rice sample (2 g) was boiled in 20 mL of distilled water. After cooking for 10 min, the 2-3 grains were removed from the water and placed over a Petri dish. Then, the grains were suddenly compressed with a spatula in order to visualize and count the grains which do not have the opaque area inside core. The same procedure was repeated every minute until all the grain reached to complete gelatinization.[13]

2.8.2 Water absorption

2 g of rice samples were added to 20 mL of distilled water previously heated at 95 °C in a test tube covered with cotton plug and placed in a water bath. The rice samples were cooked according the cooking time in a water bath as previously determined. Then, samples were cooled in water and placed at room temperature for 1 h. The samples were weighed. The increased weight was calculated using the following equation:[13]

$$\text{Water absorption} = \frac{\text{Weight of cooked rice}}{\text{Weight of raw rice}}$$

3. Results and Discussion

3.1 Drying kinetics of germinated paddy

Moisture ratio (MR) results of germinated paddy drying using IR at difference temperatures (60, 75 and 95 °C) and powers (1,000-1,500 W) were shown in Figure 2. Using a higher drying temperature can decrease the MR, which results the shorter drying time. Hence, the condition of IR drying for two rice varieties should be performed at 95 °C and 1,500 W to obtain the shorter drying time. The obtained MR from the drying of germinated paddy at different temperatures and powers were fitted with drying equation as shown in Table 1. Accuracy of models was evaluated based on R^2 and RMSE values and the most accurate model was selected with regard to the highest of R^2 and the lowest of RMSE. HK and SB germinated paddy drying showed that the model proposed by Approximation of diffusion, predicts the drying process of HK and SB germinated paddy more accurately than other models.

3.2 Phytochemical content (TPC and TFC)

The TPC contents in HK and SB of all rice products were shown in Figure 3. TPC of HK untreated rice (without germination and drying) was higher compared to the other rice products. HK is red-brown colored rice which frequently found flavonoid compounds especially proanthocyanidin higher than non-color rice. It is water soluble and not resistant to heat and light. Therefore, during the streaming of germinated paddy, heat and the steep water partially remove the soluble phenolic compounds including flavonoids from the grain.[14]

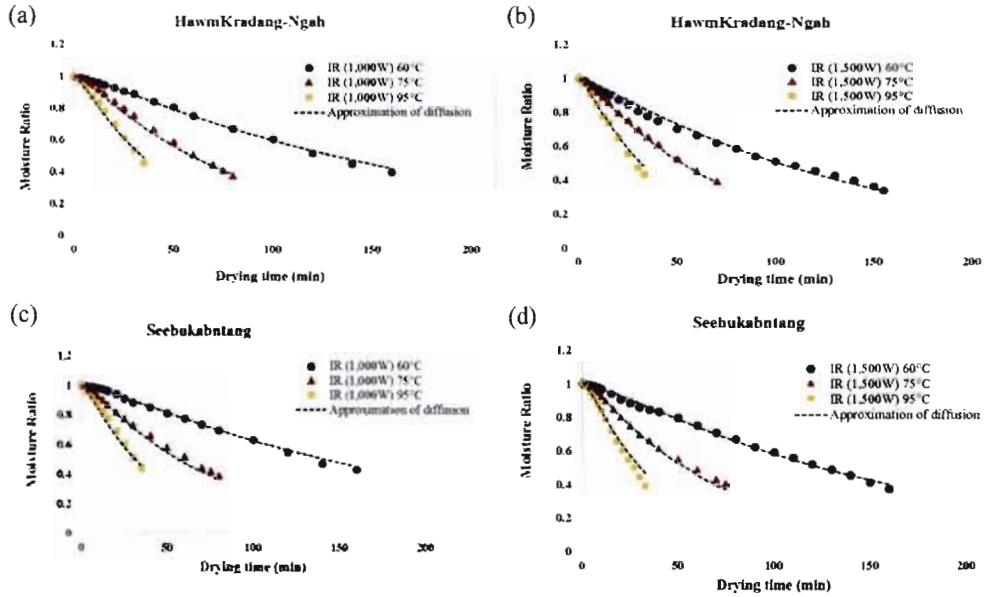


Figure 2. The change of MR and drying time during (a) HK germinated paddy drying with 1,000 W, (b) HK germinated paddy drying with 1,500 W, (c) SB germinated paddy drying with 1,000 W and (d) SB germinated paddy drying with 1,500 W

Table 1. Constant values and drying equation of germinated paddy drying

Model	Hawm-Kradang-Ngah			Seebukabntang		
	Constant value	R^2	RMSE	Constant value	R^2	RMSE
Newton MR=exp(-kt)	k=-0.0241+(3.67*10^{6})P +0.0004T	0.9767	0.0312	k=-0.0251+(1.49*10^{-6})P +0.0005T	0.9780	0.0296
Henderson and Pabis MR=aexp(-kt)	K=0.0251+(3.73*10^{-6}) P +(4.44*10^{-4})T, a=1.0194	0.9793	0.0293	k=-0.0265+(1.49*10^{-6})P +0.0005T, a=1.0281	0.9841	0.0251
Logarithmic MR=aexp(-kt) + b	K=0.2353+(-2.88*10^{-4}) P +(-0.0396)T, a=(-0.0003), c=0.9820	0.9594	0.0411	k=-1.458+(-1.63*10^{-4})P +(-0.0433)T, a=(-0.0010), c=0.9988	0.9855	0.0239
Approximation of diffusion MR=aexp(-kt) + (1-a)exp(-kbt) Midilli et	K=0.6901+(1.01*10^{-4}) P +0.0122T, a=(-0.0318), b=0.0373	0.9910	0.0193	k=0.2542+(-1.35*10^{-5})P +(-0.0048)T, a=(-0.0812), b=0.1138	0.9879	0.0219
al. MR=aexp(-k(t^{n})) + bt	K=0.5554+(3.72*10^{6}) P +0.0004T, a=1.022, b=0.5797, n=0.9997	0.9794	0.0293	k=0.0261+(-1.25*10^{-6})P +(-0.0005)T, a=1.0197, b=(-0.0007), n=1.0068	0.9856	0.0239

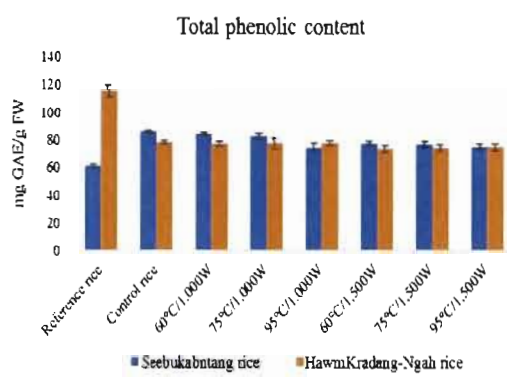


Figure 3. Total phenolic content in HK-GBR and SB-GBR

On the other hand, TPC value of SB after germinated and IR drying was increased when compared with untreated rice. Due to the activation of hydrolytic enzyme by water to degrade starch, non- starch polysaccharide and protein to small bio-molecules such as monosaccharide, peptide and amino acid during germination process.[15] For TFC of HK and SB, the results were the same trend of TPC (not showed in Figure). Additionally, the difference of temperature and power of IR drying did not significantly affect TPC and TFC contents of HK-GBR and SB-GBR. However, there are many factors that affect TPC and TFC

contents of HK-GBR and SB-GBR such as varieties, cultivation area, growing conditions and germination conditions including extraction methods.

3.3 Antioxidant activity

Antioxidant activity was determined using DPPH and ABTS assay, and their results were reported as a percentage of scavenging using the formula as shown in section 2.6. The antioxidant activity (DPPH assay) on both rice varieties were shown in Figure 4a. There were no significantly different ($p>0.05$) of %DPPH scavenging of both rice varieties when IR power at 1,000 and 1,500 W with different temperatures (60, 75 and 95 °C) were used. The ABTS assay of antioxidant activity in two rice varieties is shown in Figure 4b. %ABTS scavenging on HK-GBR of all rice product decrease significantly ($p<0.05$) when compare to untreated rice. Due to the major compounds that play an important role for antioxidant in HK-GBR such as anthocyanin, proanthocyanidin, etc. was removed during the streaming and steep water. While, %ABTS scavenging of SB-GBR was increase significantly ($p<0.05$) when compared to untreated rice. The trends of antioxidant activity (DPPH and ABTS assay) were generally like that of TPC and TFC results, due to the high correlation between antioxidant activity and TPC and TFC.

3.4. Cooking properties

Cooking is associated with changes in the chemical and physical properties of the grain. Moreover, there are many factors that affect the quality of cooking such as the chemical composition of the grain, drying temperature and storage time, etc. The result for cooking properties in HK-GBR and SB-GBR are present in Table 2. It was found that cooking time of all rice drying products was increasing when the drying temperature is increase while water absorption is decreasing when compared to untreated rice.

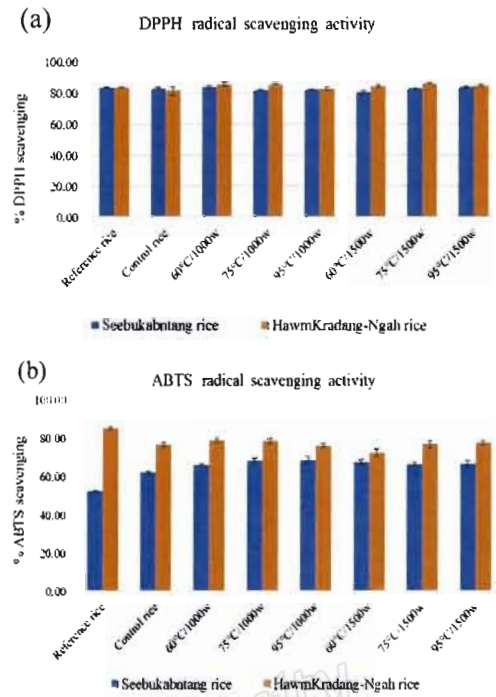


Figure 4. Antioxidant activity in HK-GBR and SB-GBR (a) DPPH radical scavenging of rice samples and (b) ABTS radical scavenging of rice samples

Due to rice, physiopropeties were changed during streaming and steep water process causing to starch granules modification to stronger structure which is difficult for water to penetrate into the kernel [16]

4. Conclusion

The above finding on total phenolic content (TPC) total flavonoids content (TFC) antioxidant activity and cooking properties of HK-GBR and SB-GBR drying with infrared (IR) at different power (1,000 and 1,500 W) and temperature (60, 75 and 95 °C) show that IR drying have no significantly effect on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated paddy rice. However, in order to shorten the drying time the drying of HK-GBR and SB -GBR germinated paddy rice should be done at 95 °C and 1,500 W

Table 2. The effect of infrared drying on cooking properties in HK-GBR and SB-GBR

Hawm-Kradang-Ngah			Seebukabntang		
Drying temperature (°C)	Cooking time (min)	Water Absorption	Drying temperature (°C)	Cooking time (min)	Water Absorption
Reference rice	35	2.87±0.01[d]	Reference rice	30	3.58±0.00[f]
Control rice	42	2.58±0.01[a]	Control rice	44	2.70±0.02[a]
Infrared (IR) drying of 1,000 W			Infrared (IR) drying of 1,000 W		
60	44	2.74±0.03[c]	60	48	3.23±0.01[e]
75	45	2.72±0.00[c]	75	50	3.21±0.01[e]
95	48	2.71±0.00[c]	95	53	3.21±0.01[e]
Infrared (IR) drying of 1,500 W			Infrared (IR) drying of 1,500 W		
60	47	2.65±0.04[b]	60	45	3.10±0.03[d]
75	50	2.58±0.02[a]	75	47	2.94±0.01[c]
95	51	2.56±0.01[a]	95	52	2.88±0.02[b]

The results are presented as mean ±SD (n=3). Values in each column with different letters are significantly different ($p<0.05$).

of power energy. However, the other parameters such as rice product quality and specific energy consumption (SEC) will be further investigated.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Faculty of Science and Technology, Faculty of Science and Graduate School Prince of Songkhla University for all facilities and financial support. The authors also would like to thank Rice Research Center in Pattani province, Thailand and the Regular budget funds that help support 2017 budget in research.

References

1. Soponronnarit, S ; Nathakaranakule, A ; . Jirajindalert, A ; Taechapairoj, C. *J Food Eng* **2005**, *75* (3) , 423 432.
2. Tirawanichakul, Y. ; Prachayawarakorn, S.; Varanyanond, W. ; Soponronnarit, S *J Food Eng.* **2004**, *64* (4), 405–415 .
3. Das, I ; Das, S .K ; Bal, S *J .Food Eng* . 2003, *62* (1), 9–14 .
4. Bal, S.; Wratten, F. T.; Chesness, J. L ; Faulkner, M. D. *Trans ASAE* **1970** , *13* (5), 644-652.
5. Afzal, T. M.; Abe, T. *J. Comput. Electron. Agr.* **2000**, *26* (2), 137–145.
6. Kian, J C ; Siaw, K. C. *Int .J. Food Sci. Tech.* **2005**, *40* (1), 23–39 .
7. Hebbar, U. H.; Rastogi, N. K. *J. Food Eng.* **2001**, *47* (1), 1–5 .
8. Tirawanichakul, S ; Lamaepae, S ; Tirawanichakul, Y *J Burapha Sci* **2012**, *17* (1), 117–129 .
9. Thammapat, P.; Meeso, N.; Siriamornpun, S. *J. Food Chem* . **2015**, *175*, 218–224.
10. Baskar, R. ; Shrisakthi, S. ; Sathyapriya, B.; Sathyapriya, R ; Nithya, R ; Poongodi, P. *J. Food Sci. Nutr.* **2011**, *2*, 1128–1133.
11. Iqbal, S.; Bhanger, M. I ; Anwar, F. *J Food Chem.* **2005**, *93* (2), 265–272.
12. Shen, Y.; Jin, L ; Xiao, P ; Lu, Y ; Bao, J . S. *J. Cereal Sci.* **2009**, *49* (1), 106–111 .
13. Kaewyot, K ; Taechapairoj, C. *J. Sci Tech. MSU.* **2013**, *32* (4), 449–455 .
14. Scaglioni, P . T ; Souza, T .D ; Schmidt, C G.; Furlong, E B .*J Cereal Sci.* **2014**, *60* (3), 526–532 .
15. He, D. ; Han, C. ; Yao, J. ; Shen, S ; Yang, P. *Proteomics* **2011**, *11* (13), 2693–2713 .
16. Parnsakhorn, S.; Noomhorm, A. J. Agr. Eng Int : the CIGR E-journal .Manuscript FP 08 009. August, **2008**.