



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ผลของวิธีการทำแห้งและภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณสารต้านออกซิเดชัน
และคุณภาพการบริโภคของข้าวหอมมะลิแดงอินทรีย์

โดย ดร. ขนิษฐา ชนานวงศ์

พฤษภาคม 2552

สัญญาเลขที่ MRG5180051

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ผลของวิธีการทำแห้งและภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณสารต้านออกซิเดชัน
และคุณภาพการบริโภคของข้าวหอมมะลิแดงอินทรีย์

ดร. ขนิษฐา ชนานวงศ์

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินไปได้อย่างสำเร็จลุล่วงด้วยดี จากการสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัยจากทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ตามโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย จึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วรรณ ตูลย์ธัญ นักวิจัยที่ปรึกษา (mentor) ที่กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ โสภณรัตนฤทธิ์ สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สิทธิวัฒน์ เลิศศิริ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าใช้เครื่อง Gas chromatography - Mass Spectrometry และขอขอบคุณบุคลากรและนิสิตประจำภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกด้านต่างๆ ตลอดงานวิจัย

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ MRG5180051

ชื่อโครงการ ผลของวิธีการทำแห้งและภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณสารต้านออกซิเดชัน และคุณภาพการบริโภคของข้าวหอมมะลิแดงอินทรีย์

ชื่อนักวิจัยและสถาบัน อาจารย์ ดร. ขนิษฐา ธนานุวงศ์ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address Kanitha.T@chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ 18 เดือน (15 พฤษภาคม 2551 - 14 พฤศจิกายน 2552)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้งและภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพด้าน เกสซ์โภชนาการ สมบัติทางเคมีกายภาพที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพด้านการบริโภค และคุณภาพทาง ประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหอมมะลิแดงอินทรีย์ จากผลการทดลองพบว่าข้าวกล้องสุกที่เตรียม จากตัวอย่างที่ทำแห้งต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การทำแห้งในที่ร่ม การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และ การทำแห้งด้วยวิธีฟลูอิดไดเซชัน มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด และค่าสีในระบบ Hunter L a b ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยวิธีฟลูอิดไดเซชันมีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงที่สุดอย่างมี นัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) มีเอนทาลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชันและค่า breakdown ต่ำที่สุดอย่างมี นัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) และมีระดับสารระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในตัวอย่าง ได้แก่ Hexanal 2,4-Nonadienal และ 2-Pentylfuran สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม วิธีการทำแห้งไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภคต่อตัวอย่างข้าว สุก ($p>0.05$) เมื่อนำตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์มาเก็บรักษาที่ภาวะต่างกันพบว่า ชนิด ของบรรจุภัณฑ์ (OPP/Al/LLDPE หรือ Nylon/LLDPE) อุณหภูมิ (15°C หรืออุณหภูมิห้อง) และ เวลาในการเก็บรักษาตัวอย่าง (0 – 12 เดือน) ไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด และค่าสีในระบบ Hunter L a b ของตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีใน เซชัน ค่า setback ค่าความแข็งของข้าวสุก และปริมาณสารระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยา ออกซิเดชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สมบัติต่างๆ ได้มากกว่า ส่วน OPP/Al/LLDPE ช่วยรักษาคุณภาพด้านกลิ่นไว้ได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ผู้บริโภคยังคงให้การยอมรับด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และคุณภาพโดยรวมของตัวอย่างที่บรรจุ ในถุง Nylon/LLDPE ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 เดือน

คำหลัก: ข้าวกล้องหอมมะลิแดง การทำแห้งข้าวเปลือก การเก็บรักษาข้าว สารต้านออกซิเดชัน สมบัติทางความร้อน สมบัติทางความหนืด การวิเคราะห์สารระเหย สมบัติทางประสาทสัมผัส

Abstract

Project Code: MRG5180051

Project Title: Effects of drying methods and storage conditions on antioxidant content and eating qualities of organic hulled red jasmine rice *Oryza sativa* L.

Investigator : Dr. Kanitha Tananuwong, Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

E-mail Address : Kanitha.T@chula.ac.th

Project Period : 18 months (15 May 2008 – 14 November 2009)

Effects of paddy drying methods and storage conditions on antioxidant content, physicochemical properties related to eating qualities, and sensory characteristics of organic hulled red fragrant rice cv. Hom Mali Daeng were investigated. Cooked hulled rice samples prepared from shade-dried, sun-dried and fluidized bed-dried paddy had similar total phenolic content, antioxidant activities, total anthocyanin content and color in Hunter L a b system. Fluidized bed drying resulted in significantly highest gelatinization temperature, lowest enthalpy of gelatinization, and highest level of volatile lipid oxidation products, hexanal, 2,4-nonadienal and 2-pentylfuran, in the hulled rice samples ($p \leq 0.05$). However, drying methods did not significantly affected consumer acceptability of the cooked rice ($p > 0.05$). Packaging materials (OPP/Al/LLDPE or Nylon/LLDPE), storage temperatures (15°C or ambient temperature) and duration (up to 12 months) did not apparently affect total phenolic content, antioxidant activities, total anthocyanin content and Hunter L a b color of the cooked rice prepared from aged sun-dried hulled rice. However, longer storage duration led to an increase in gelatinization temperature, setback, hardness of cooked rice, as well as the level of volatile lipid oxidation products in the hulled rice samples. Greater extent of these changes was found in the samples stored at ambient temperature. OPP/Al/LLDPE better retarded the formation of volatile lipid oxidation products and greater retained desirable odorants. Nevertheless, consumer still accepted color, aroma and texture of cook hulled rice prepared from the samples stored in Nylon/LLDPE pouches at ambient temperature up to 12 months.

Keywords: hulled red jasmine rice, paddy drying, rice storage, antioxidant, thermal properties, pasting properties, volatile analysis, sensory properties

หน้าสรุปโครงการ (Executive summary)

ข้าวกล้องหอมมะลิแดง (*Oryza sativa* L.) เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองอีกพันธุ์หนึ่งของไทย ซึ่งกลายพันธุ์มาจากข้าวหอมพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตามธรรมชาติ ข้าวพันธุ์นี้มีลักษณะเด่นคือ มีกลิ่นที่หอมดังเช่นข้าวหอมมะลิและมีสีแดงที่เยื่อหุ้มเมล็ด ซึ่งเกิดจากรงควัตถุกลุ่มแอนโทไซยานิน ดังนั้นข้าวพันธุ์นี้จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มของอาหารเพื่อสุขภาพได้เนื่องจากมีสารฟีนอลิกในปริมาณสูงกว่าข้าวกล้องหอมมะลิทั่วไป ปัจจุบันมีการปลูกข้าวพันธุ์นี้กันมากในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย และส่วนหนึ่งเป็นการปลูกแบบเกษตรอินทรีย์ ซึ่งมีการส่งออกข้าวกล้องหอมมะลิแดงอินทรีย์นี้ไปยังประเทศในแถบทวีปยุโรปเป็นประจำทุกปี จึงจัดเป็นข้าวอินทรีย์อีกพันธุ์หนึ่งของไทยที่มีศักยภาพในการสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศ มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพของข้าวชนิดต่างๆ ทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งจะมุ่งศึกษาถึงคุณภาพด้านการบริโภค ได้แก่ เนื้อสัมผัสและกลิ่นรสของข้าวหุงสุก อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบข้อมูลเกี่ยวกับผลของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต้านออกซิเดชัน รวมถึงฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของข้าวกล้องที่มีสี นอกจากนี้ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพของข้าวอินทรีย์อย่างจริงจังในประเทศไทย ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านต่างๆ ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่อบแห้งและเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ จะเป็นประโยชน์ในการเลือกวิธีปฏิบัติที่เหมาะสมหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อช่วยรักษาคุณภาพข้าว ทั้งในด้านโภชนาการ (nutraceuticals) และด้านการบริโภค ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังอาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวอินทรีย์ ข้าวหอม และ/หรือข้าวที่มีสีพันธุ์อื่นๆ ได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง และภาวะการเก็บรักษา ซึ่งได้แก่ชนิดของบรรจุภัณฑ์ อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษา ต่อคุณภาพของข้าวกล้องหอมมะลิแดงอินทรีย์ในด้านคุณภาพด้านโภชนาการ ได้แก่ ปริมาณสารต้านออกซิเดชันในกลุ่มฟีนอลิก และฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน และคุณภาพด้านการบริโภคและคุณภาพทางประสาทสัมผัส อันได้แก่ สีเมล็ด สมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการหุงและเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ปริมาณสารระเหยที่ให้กลิ่นหอมหรือกลิ่นหืนในข้าว

ในการศึกษาผลของวิธีการทำแห้งข้าวเปลือก 3 วิธี ได้แก่ การทำแห้งในที่ร่ม (shade drying) ซึ่งเป็นวิธีควบคุม การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (sun drying) ซึ่งเป็นวิธีที่เกษตรกรในประเทศไทยนิยมปฏิบัติ และการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์ (fluidized bed drying) ที่ 115 °C ซึ่งเป็นวิธีที่ลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วและได้ข้าวที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ พบว่าวิธีการทำแห้งไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของข้าวกล้องสุก ซึ่งตรวจวัดด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) และ DPPH-radical scavenging assays (DPPH) นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณแอนโท

ไซยานินทั้งหมดและค่าสีในระบบ Hunter L a b ของตัวอย่างข้าวกล้องดิบและสุกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่างกันยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) สมบัติทางความหนืดซึ่งตรวจวัดด้วยเครื่อง Rapid Visco-Analyzer (RVA) และปริมาณสารระเหยของตัวอย่างข้าวกล้องซึ่งวิเคราะห์โดย Solid phase microextraction/ Gas Chromatography-Mass Spectrometry (SPME/GC-MS) กล่าวคือ ตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยวิธีฟลูอิดเซชันมีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชันและค่า breakdown ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเกิดจากเปลี่ยนแปลงของสตาร์ช (เกิดเจลลิตีในเซชันหรือหลอมผลึกบางส่วน) และโปรตีน (เสียสภาพธรรมชาติ) ภายหลังจากการอบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง ส่วนปริมาณสารระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันซึ่งเกี่ยวข้องกับกลิ่นหืน อันได้แก่ Hexanal 2,4-Nonadienal และ 2-Pentylfuran มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยวิธีฟลูอิดเซชัน แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการยอมรับด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมของตัวอย่างข้าวกล้องสุกกลับพบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ โดยเฉพาะด้านกลิ่นภายหลังจากการอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดเซชันที่อุณหภูมิ 115 °C ยังไม่มากพอที่จะส่งผลให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปในระดับที่ผู้บริโภคโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ ดังนั้นวิธีฟลูอิดเซชันที่ใช้อุณหภูมิใกล้เคียงกับที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จึงอาจนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวกล้องอินทรีย์ได้

สำหรับการศึกษาผลการเก็บรักษาข้าวกล้องที่ภาวะต่างๆ โดยนำตัวอย่างข้าวกล้องที่ผ่านทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ มาบรรจุแบบสุญญากาศในบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด ได้แก่ Nylon/LLDPE และ OPP/Al/LLDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างกัน 2 ระดับ คือ 15 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง (28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 0-12 เดือน พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP และ DPPH ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด และค่าสีในระบบ Hunter L a b ของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงมากนักระหว่างการเก็บรักษาในทุกภาวะที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม สมบัติทางความร้อน สมบัติทางความหนืด ลักษณะเนื้อสัมผัส และปริมาณสารระเหยของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดระหว่างการเก็บรักษา กล่าวคือ อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน ค่า pasting temperature ค่า setback และค่าความแข็งของข้าวสุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ค่า peak viscosity และค่า breakdown กลับมีแนวโน้มลดลงระหว่างการเก็บรักษา โดยจะเห็นแนวโน้มดังกล่าวอย่างชัดเจนภายหลังเดือนที่ 6 ของการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางความหนืดระหว่างการเก็บรักษาตัวอย่างข้าวกล้องนั้น อาจเกิดจากการเพิ่มขนาดโมเลกุลของโปรตีน oryzenin ซึ่งส่งผลให้อันตรกิริยาของสตาร์ชและ

โปรตีนในตัวอย่างระหว่างการทำให้สุก (ให้ความร้อนในภาวะที่มีน้ำเกินพอ) เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เอื้อต่อการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ช สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยในตัวอย่างนั้น พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของสารระเหยเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการลดลงของสารระเหยที่ให้กลิ่นหอม เช่น 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาพบว่า การเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำ (15 °C) สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วได้ ในขณะที่ชนิดบรรจุภัณฑ์มีผลต่อคุณภาพด้านกลิ่นของตัวอย่างเท่านั้น กล่าวคือ OPP/Al/LLDPE ซึ่งสามารถกันแสงและกันการซึมผ่านของก๊าซ (และไอน้ำ) ได้ดีกว่า Nylon/LLDPE นั้น สามารถชะลอการสร้างสารระเหยจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และลดการสูญเสียสารระเหยที่ให้กลิ่นหอมอื่นๆ โดยเฉพาะ 2-AP ได้ ดังนั้นจึงช่วยรักษาคุณภาพด้านกลิ่นโดยรวมไว้ได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้บริโภคยังคงให้การยอมรับด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และคุณภาพโดยรวมของข้าวกล้องหุงสุกซึ่งเตรียมจากตัวอย่างที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 เดือน จึงอาจกล่าวได้ว่า การบรรจุข้าวแบบสุญญากาศในถุง Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้โดยทั่วไปสำหรับข้าวอินทรีย์ ข้าวกล้อง และข้าวหอมนี้ เหมาะสมดีแล้วสำหรับข้าวที่จำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคโดยทั่วไป ส่วนภาวะการเก็บรักษาอื่นๆ ที่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า เช่น ใช้บรรจุภัณฑ์ OPP/Al/LLDPE อาจนำไปประยุกต์ใช้กับข้าวกล้องหรือข้าวสารเกรดดีพิเศษที่มุ่งจำหน่ายแก่ผู้บริโภคเฉพาะกลุ่มและ/หรือข้าวส่งออก รวมทั้งข้าวสารเคลือบกลิ่นรสหรือสารอาหารได้

สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ	1
บทคัดย่อ	2
Abstract	3
หน้าสรุปโครงการ (Executive summary).....	4
สารบัญเรื่อง.....	7
สารบัญตาราง	8
สารบัญภาพ.....	10
บทนำ.....	11
วิธีการทดลอง	13
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	23
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	54
ภาคผนวก: บทความสำหรับการเผยแพร่.....	55

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	13
ตารางที่ 2 รายละเอียดเครื่องมืออุปกรณ์และภาวะการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยจากข้าว	21
ตารางที่ 3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ.....	23
ตารางที่ 4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากการย่อยด้วยเอนไซม์จากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ	24
ตารางที่ 5 สมบัติทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_o และ T_p) ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔT_g) และเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH_g) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ	25
ตารางที่ 6 สมบัติทางความหนืด ได้แก่ pasting temperature (PT) peak viscosity (PV) breakdown (BD) และ setback (SB) ของเพสต์ข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ.....	26
ตารางที่ 7 ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดในข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ.....	26
ตารางที่ 8 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ.....	27
ตารางที่ 9 คำอธิบายลักษณะกลิ่น (odor description) และค่า odor threshold ของสารระเหยชนิดหลักที่พบในข้าวกล้องหอมมะลิแดง	28
ตารางที่ 10 ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (area ratio) ของสารระเหยชนิดหลักจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ	29
ตารางที่ 11 ความแข็งของข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ จากการทดสอบด้วยวิธี descriptive analysis.....	30
ตารางที่ 12 การยอมรับทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ 30	
ตารางที่ 13 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน.....	33
ตารางที่ 14 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากการย่อยด้วยเอนไซม์จากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน.....	34

ตารางที่ 15 ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน	40
ตารางที่ 16 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 และ 6 เดือน.....	41
ตารางที่ 17 ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (area ratio) ของสารระเหยชนิดหลักจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0 - 12 เดือน.....	44
ตารางที่ 18 ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (area ratio) ของสารระเหยชนิดหลักจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/Al/LLDPE ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0 - 12 เดือน.....	45
ตารางที่ 19 ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (area ratio) ของสารระเหยชนิดหลักจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE ที่อุณหภูมิ 15 °C เป็นเวลา 0 - 6 เดือน.....	46
ตารางที่ 20 ลักษณะทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องในบรรจุภัณฑ์ต่างชนิด เป็นเวลา 0 และ 6 เดือน จากการทดสอบด้วยวิธี descriptive analysis	48
ตารางที่ 21 ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน.....	48

สารบัญภาพ

รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (Tirawanichakul และคณะ, 2004)	15
รูปที่ 2 ตัวอย่างข้าวที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE (ซ้าย) และ OPP/AL/LLDPE (ขวา).....	16
รูปที่ 3 สีของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบ (ซ้าย) และสุก (ขวา) ที่เตรียมจากข้าวเปลือกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์.....	27
รูปที่ 4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 - 12 เดือน โดย error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ	32
รูปที่ 5 สมบัติทางความร้อนของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 - 12 เดือน โดย error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ (Key: AI – OPP/Al/LLDPE, Nylon – Nylon/LLDPE, ambient – ambient temperature, 15 - 15°C).....	36
รูปที่ 6 สมบัติทางความหนืดของเพสต์ข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 - 12 เดือน โดย error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ (Key: AI – OPP/Al/LLDPE, Nylon – Nylon/LLDPE, ambient – ambient temperature, 15 - 15°C)	37
รูปที่ 7 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) และความแตกต่างของค่าสี (ΔE) ข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 - 6 เดือน โดย error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ.....	39

บทนำ

ข้าวหอมมะลิแดง (*Oryza sativa* L.) เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองของไทยที่กลายพันธุ์มาจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยธรรมชาติ จัดเป็นข้าวเจ้าที่ไวต่อช่วงแสง มีความต้านทานโรคและแมลงสูง เมื่อนำมาหุงจะได้ข้าวสุกที่นุ่ม เหนียว และมีกลิ่นหอมคล้ายข้าวขาวดอกมะลิ 105 แต่มีลักษณะเด่นที่แตกต่างออกไป คือ เยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องมีสีแดง (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2549) นิยมปลูกในแถบภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นการปลูกแบบเกษตรอินทรีย์ และมีการส่งออกข้าวกล้องหอมมะลิแดงอินทรีย์นี้ไปยังประเทศในแถบทวีปยุโรปเป็นประจำทุกปี จึงจัดเป็นข้าวอินทรีย์อีกพันธุ์หนึ่งของไทยที่มีศักยภาพในการสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ข้าวพันธุ์ที่มีสีจะมีสารต้านออกซิเดชัน โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณสูง (Toyokuni และคณะ, 2002; Hu และคณะ, 2003; Nam และคณะ, 2006) ดังนั้นข้าวพันธุ์นี้จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มของอาหารเพื่อสุขภาพซึ่งช่วยในการป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคมะเร็ง โรคเบาหวาน และโรคหลอดเลือดอุดตันได้ดีกว่าข้าวที่ไม่มีสีพันธุ์อื่นๆ

ในการผลิตข้าวแต่ละสายพันธุ์ให้มีคุณภาพดีนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับกระบวนการควบคุมปัจจัยต่างๆ ระหว่างการเพาะปลูกให้มีความเหมาะสมแล้ว ยังต้องมีการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่ดีด้วย ขั้นตอนที่สำคัญหลังเก็บเกี่ยวข้าว ประกอบด้วย การนวดข้าวเพื่อให้ข้าวเปลือกหลุดออกจากรวง ซึ่งในปัจจุบันนิยมนวดโดยใช้เครื่องจักร จากนั้นจึงทำแห้งข้าวเปลือกที่ได้หลังจากการนวด เพื่อลดอัตราการหายใจของเมล็ด ลดการเจริญเติบโตของแมลงและรา ซึ่งเป็นสาเหตุให้เมล็ดเสื่อมคุณภาพ (Brooker และคณะ, 1975; Howell, 2003) แล้วจึงเก็บข้าวในรูปของข้าวเปลือกที่มีความชื้นประมาณ 13% โดยน้ำหนักเปียก หรือแปรรูปเป็นข้าวกล้องหรือข้าวสารแบ่งบรรจุเพื่อจำหน่ายให้ผู้บริโภคต่อไป อนึ่ง เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตข้าวอินทรีย์ซึ่งไม่มีการใช้สารเคมี เช่น ปุ๋ยเคมีหรือสารเคมีกำจัดศัตรูพืชนั้น ควรมีการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่รวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และถือปฏิบัติอย่างเคร่งครัดมากกว่ากรณีของข้าวปกติ เพื่อป้องกันความเสียหายจากราและแมลงศัตรูพืช เช่น ทำแห้งข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วภายหลังการนวดข้าว และบรรจุข้าวกล้องหรือข้าวสารอินทรีย์แบบสุญญากาศหรืออัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในบรรจุภัณฑ์แทนที่ออกซิเจน เพื่อลดการเสื่อมเสียของข้าวจากมอดหรือแมลงอื่นๆ ระหว่างการเก็บรักษา

มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพของข้าวชนิดต่างๆ ทั้งในและต่างประเทศ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวระหว่างขั้นตอนการทำแห้งข้าวเปลือก รวมถึงการเก็บรักษาข้าวเปลือก ข้าวกล้องหรือข้าวสารในภาวะต่างๆ นั้น มักเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพขององค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดข้าว เช่น การเกิดเจลลิตินในเซชันหรือการหลอมผลึกบางส่วนในเม็ดแป้งภายหลังการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิสูง และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีนในเมล็ดข้าวระหว่างการเก็บ

รักษา ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางความร้อน สมบัติทางความหนืด และเนื้อสัมผัสของข้าวสุกเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ข้าวที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงหรือเก็บรักษาในภาวะที่มีออกซิเจนเกินพอเป็นเวลานานยังอาจมีกลิ่นหืนเนื่องจากสารระเหยซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ในขณะที่สารระเหยที่ให้กลิ่นเฉพาะตัวเช่น 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) มีปริมาณลดลง (Juliano, 1985; Inprasit และ Noomhorm, 2001; Wongpornchai และคณะ, 2004; Tulyathan และ Leecharatanaluk, 2006) อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต้านออกซิเดชันและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของข้าวกล้องที่มีสีภายหลังการเก็บเกี่ยว และยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพของข้าวอินทรีย์อย่างจริงจัง ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านต่างๆ ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงอินทรีย์ที่ได้รับการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่างๆ กัน จะเป็นประโยชน์ในการเลือกวิธีปฏิบัติที่เหมาะสม เพื่อช่วยรักษาคุณภาพของข้าวให้คงอยู่นานขึ้นได้ คุณภาพดังกล่าวหมายถึงคุณภาพด้านเภสัชโภชนาการ (nutraceuticals) ได้แก่ ปริมาณสารต้านออกซิเดชันและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน รวมถึงคุณภาพด้านการบริโภค ซึ่งได้แก่เนื้อสัมผัสและกลิ่นรสของข้าวหุงสุก นอกจากนี้ ผลการศึกษาในเชิงวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวพันธุ์ดังกล่าว ยังอาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวที่มีสี ข้าวหอม และ/หรือข้าวอินทรีย์พันธุ์อื่นๆ ได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง ได้แก่การทำแห้งในที่ร่ม (วิธีควบคุม) การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (วิธีดั้งเดิมที่นิยมปฏิบัติโดยเกษตรกร) และการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (วิธีที่ทันสมัย ทำได้เร็วและได้ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ) รวมถึงผลของภาวะการเก็บรักษา ซึ่งได้แก่ชนิดของบรรจุภัณฑ์ อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษา ต่อคุณภาพของข้าวกล้องหอมมะลิแดงอินทรีย์ในด้านต่างๆ คือ

1. คุณภาพด้านเภสัชโภชนาการ ได้แก่ ปริมาณสารต้านออกซิเดชันในกลุ่มฟีนอลิก และฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน
2. คุณภาพด้านการบริโภคและคุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ สีเมล็ด สมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการหุงและเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ปริมาณสารระเหยที่ให้กลิ่นหอมของข้าวหอม และสารระเหยที่ให้กลิ่นหืน

วิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

ข้าวหอมมะลิแดงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นข้าวอินทรีย์ที่มีแหล่งปลูก ณ อ. ตระการพืชผล จ. อุบลราชธานี ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีค่าประมาณ 14-15% โดยน้ำหนักเปียก (wet basis, wb) นำข้าวเปลือกทั้งหมดไปผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดที่ใช้ลมเป่า (air-screen cleaner) คัดเอาสิ่งปนเปื้อน เช่น เศษฟางหญ้า ฝุ่น รวมทั้งเมล็ดลีบออกไป เก็บข้าวเปลือกที่ได้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 °C ระหว่างรอการนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ oriented polypropylene/aluminium/ linear low density polyethylene (OPP/AL/LLDPE) ขนาด 230 x 300 mm² หนา 100 µm และ nylon/linear low density polyethylene (Nylon/LLDPE) ขนาด 200 x 300 mm² หนา 70 µm ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนของบรรจุภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ชนิดบรรจุภัณฑ์	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (g/m ² day)	ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (cc/m ² day)
OPP/AL/LLDPE	~0	~0
Nylon/LLDPE	57.25 ± 2.63	25.34 ± 1.27

ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนที่อุณหภูมิ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75% อ้างอิงจากอุปกรณ์สิทธิ์ทราเวอร์น และคณะ (2550) รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก

ปรับความชื้น (rewetting) ข้าวเปลือกหอมมะลิแดงให้อยู่ในช่วง 26-30% wb โดยเติมน้ำตามปริมาณที่คำนวณได้ลงในข้าวเปลือก คลุกเคล้าข้าวเพื่อให้น้ำกระจายอย่างทั่วถึง แล้วนำข้าวเปลือกไปเก็บไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 °C ในระหว่างนี้จะมีการคลุกข้าวทุกวัน เพื่อให้เมล็ดข้าวมีความชื้นสม่ำเสมอ จนกระทั่งความชื้นอยู่ในช่วงที่ต้องการ (26-30% wb) โดยใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 7 วัน

3. การทำแห้งข้าวเปลือก

นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่ปรับความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการแล้วออกมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 8 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำไปทำแห้ง โดยกำหนดให้ค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ได้จากการทำแห้งในแต่ละวิธีมีค่าอยู่ในช่วง 13 – 14% wb วิธีการทำแห้งที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 วิธี คือ

3.1. การทำแห้งในที่ร่ม (shade drying)

นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่ปรับความชื้นแล้วมาทำแห้งในที่ร่ม (27 – 33 °C) โดยบรรจุข้าว- เปลือกในตระกร้าพลาสติกขนาด 28 x 40 x 12 cm³ ให้มีความสูงของชั้นข้าวประมาณ 2.5 cm นำตะกร้าบรรจุข้าวเปลือกมาวางบนชั้นเหล็กที่ล้อมรอบด้วยมุ้งลวด ป้องกันนก หนู หรือสัตว์ต่างๆ มาทำลายข้าวเปลือกในระหว่างการทำแห้ง ใช้เวลาประมาณ 7 วัน ในการลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือ 13-14% wb ในระหว่างนี้จะมีการคลุกข้าวทุกวัน เพื่อให้ตัวอย่างมีความชื้นสม่ำเสมอ ข้าวที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีนี้จะจัดเป็นตัวอย่างชุดควบคุม (control samples)

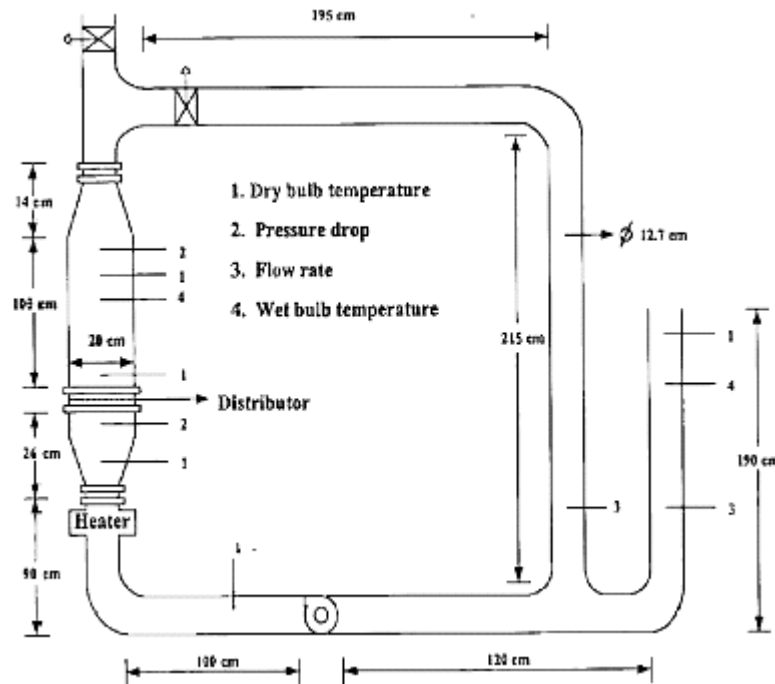
3.2. ทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (sun drying)

นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่ปรับความชื้นแล้วมาทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ โดยบรรจุข้าวเปลือกในตระกร้าพลาสติกเช่นเดียวกับที่ระบุในข้อ 3.3.1. นำตะกร้าบรรจุข้าวเปลือกมาวางบนแผ่นผ้าใบในบริเวณที่มีแสงแดดส่องถึงตลอดเวลา ใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง ในการลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือ 13-14% wb ในระหว่างนี้จะมีการคลุกข้าวทุกๆ 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างมีความชื้นสม่ำเสมอ

3.3. ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized bed drying)

นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่ปรับความชื้นแล้วมาทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (รูปที่ 1) ซึ่งแบ่งเป็นสองขั้นตอนย่อย ขั้นตอนแรกคือการอบข้าวเปลือกครั้งละ 1.8 kg ในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบกะ ที่ 115 °C ความเร็วลม 2 m/s เป็นเวลา 215 s เพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือ 18 - 20% wb ข้าวเปลือกที่ได้จะมีอุณหภูมิประมาณ 72.3 ± 1.6 °C ขั้นตอนที่สองคือนำข้าวเปลือกที่ได้ไปทำแห้งในที่ร่มตามวิธีที่ระบุในข้อ 3.1. อีกประมาณ 2 วัน

อนึ่ง การทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดจะขึ้นอาศัยกระบวนการที่ของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับอากาศร้อนที่พัดขึ้นจากด้านล่างของเครื่องและทำให้อนุภาคของแข็งนั้นเกิดการผสมและกวนอย่างรุนแรง (fluidized) อากาศจึงเป็นทั้งตัวกลางในการทำแห้งและการทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์ด้วย (วิลโลว์ รังสาทอง, 2547) โดยความเร็วของอากาศจะต้องมากพอที่จะต้านแรงโน้มถ่วงของอนุภาคของแข็ง ทำให้อนุภาคของแข็งลอยอยู่ในอากาศจนมีคุณสมบัติคล้ายของไหล การใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดมีข้อดีหลายประการ เช่น มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น เนื่องจากอนุภาคของแข็งเกิดการลอยตัวและสัมผัสกับอากาศร้อนได้มาก จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี อีกทั้งอนุภาคของแข็งยังเกิดการคลุกเคล้าในระหว่างการทำแห้ง ทำให้มีคุณภาพหลังการทำแห้งใกล้เคียงกัน (Soponronnarit, 1996)



รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (Tirawanichakul และคณะ, 2004)

จากการวัดความชื้นและ a_w ของตัวอย่างข้าวกล้องที่อบแห้งได้จากแต่ละวิธี พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีความชื้นและ a_w อยู่ระหว่าง 13 – 15% wb และ 0.7 – 0.8 ตามลำดับ กะเพาะเปลือกของข้าวเปลือกที่ทำแห้งแล้วในแต่ละวิธี เพื่อให้ได้ข้าวกล้อง แบ่งตัวอย่างข้าวกล้องส่วนหนึ่งมาบรรจุในถุง OPP/AL/LLDPE และบรรจุแบบสุญญากาศ เก็บรักษาที่ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ รอการนำไปวิเคราะห์คุณภาพต่างๆ เพื่อพิจารณาผลของการอบแห้งต่อไป

4. การเก็บรักษาข้าวกล้อง

คัดเลือกเฉพาะตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์มาศึกษาผลของภาวะการเก็บรักษา โดยแบ่งบรรจุข้าวกล้องในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE หรือ OPP/AL/LLDPE บรรจุตัวอย่างถุงละประมาณ 300 g ปิดผนึกแบบสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2 เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างกัน 2 ระดับ คือ $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิห้อง ($27 - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 12 เดือน อนึ่ง ความชื้นและ a_w ของตัวอย่างข้าวกล้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10% ของค่าเริ่มต้นระหว่างการเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ



รูปที่ 2 ตัวอย่างข้าวที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE (ซ้าย) และ OPP/AL/LLDPE (ขวา)

5. การเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องหุงสุก

หุงตัวอย่างข้าวกล้องโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:2 ในหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ประมาณ 30 นาที อุณหภูมิหลังหุงอีกประมาณ 10 นาที จะได้ตัวอย่างสำหรับการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี และวิเคราะห์สมบัติทางประสาทสัมผัส สำหรับตัวอย่างข้าวกล้องสุกที่จะนำไปสกัดสารกลุ่มฟีนอลิก ต้องนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer) (Labconco, Model 7753501, USA) ประมาณ 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ -40°C ภายใต้ความดัน 1.33×10^{-5} mbar จากนั้นจึงเตรียมแบ่งข้าวกล้องหุงสุกที่ทำแห้งแล้ว ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

6. การตรวจวัดคุณภาพด้านต่าง ๆ ของข้าวกล้อง

6.1. คุณภาพด้านเภสัชโภชนศาสตร์ของข้าวกล้อง ทั้งที่ไม่ได้ผ่านการหุงสุก และหุงสุกแล้ว (ทดลอง 3 ซ้ำ)

6.1.1. การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการบดข้าวกล้อง (เมล็ดข้าวดิบหรือเมล็ดข้าวสุกที่ทำแห้งแล้ว) แล้วร่อนผ่านตะแกรง 70 mesh นำแป้งที่ได้มาสกัดสารกลุ่มฟีนอลิกหรือย่อยด้วยเอนไซม์เพื่อเลียนแบบการย่อยตัวอย่างในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ ดังนี้

6.1.1.1. การสกัดสารกลุ่มฟีนอลิกด้วยเมทานอล (ดัดแปลงจาก Tananuwong และ Tewaruth, 2009)

ผสมตัวอย่างแป้งข้าวกล้อง 5.0 ± 0.1 g เข้ากับเมทานอล 50 mL สกัดในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิพร้อมระบบเขย่า ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำของผสมไปปั่น

เหวี่ยงที่ 21790×g เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำกากมาสกัดซ้ำเช่นเดิมอีก 4 ชั่วโมง รวมเวลาสกัดทั้งสิ้น 8 ชั่วโมง นำส่วนใสที่แยกได้จากการสกัดทั้งสองรอบมารวมกันและระเหยตัวทำละลายออกให้เหลือประมาณ 1 ใน 4 ส่วนด้วยเครื่องระเหยภายใต้สุญญากาศ (rotary evaporator) ที่ 65 °C โดยใช้เวลาในการระเหยไม่เกิน 5 นาทีต่อตัวอย่าง กรองสารสกัดที่ได้ด้วยกระดาษกรอง Whatman #1 ปรับปริมาตรของสารสกัดสุดท้ายให้เป็น 25 mL ด้วยเมทานอล เก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิ -18 °C เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

6.1.1. 2. การย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์ (ดัดแปลงจาก Pérez-Jiménez และ Saura-Calixto, 2005)

ผสมตัวอย่างแป้งข้าวกล้อง 900 ± 10 mg เข้ากับ HCl-KCl buffer 0.2 M pH 1.5 ประมาณ 60 ml เติมสารละลายเอนไซม์ pepsin (P-7000, Sigma, USA, activity 800-2500 units/mg protein) ละลายใน HCl-KCl buffer 0.2 M pH 1.5 ให้ได้ความเข้มข้น 300 mg/mL ปริมาตร 0.2 ml บ่มที่อุณหภูมิ 40 °C 1 ชั่วโมง จากนั้นปรับ pH ของตัวอย่างให้มีค่าเป็น 7.5 แล้วจึงเติมสารละลายเอนไซม์ pancreatin (P-1750, Sigma, USA, activity equivalent 4x U.S.P) ละลายใน phosphate buffer 0.1 M pH 7.5 ให้ได้ความเข้มข้น 5 mg/mL ปริมาตร 1 ml บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 37 °C 6 ชั่วโมง ปรับ pH ของตัวอย่างให้มีค่าเป็น 6.9 แล้วจึงเติมสารละลายเอนไซม์ α -amylase (A-3176, Sigma, USA, activity 26 units/mg solid) ละลายใน phosphate buffer 0.1 M pH 6.9 ให้ได้ความเข้มข้น 120 mg/mL ปริมาตร 1 mL บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 37 °C 16 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 21790×g เป็นเวลา 20 นาที นำส่วนใสมาปรับ pH ให้มีค่าเป็น 4.8 แล้วจึงเติมสารละลายเอนไซม์ amyloglucosidase (A-74205, Sigma, USA, activity 67.4 units/mg) ละลายใน sodium acetate buffer 0.2 M pH 4.8 ให้ได้ความเข้มข้น 5 mg/mL ปริมาตร 5 mL บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 45 นาที นำสารสกัดที่ได้มากรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no.1 ปรับปริมาตรสารสกัดสุดท้ายเป็น 100 mL ด้วยน้ำกลั่น เก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิ -18 °C เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

6.1.2. การวิเคราะห์คุณภาพทางเภสัชโภชนศาสตร์ของตัวอย่าง

6.1.2.1. การวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด ด้วยวิธี microscale Folin-Ciocalteu (Waterhouse, 2005)

ปิเปตตัวอย่างสารสกัดปริมาตร 20 μ L ลงใน cuvette แล้วจึงปิเปตน้ำกลั่น ปริมาตร 1.58 ml และสารเคมี Folin-Ciocalteu ปริมาตร 100 μ L ลงใน cuvette ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ประมาณ 1-8 นาที จากนั้นจึงปิเปตสารละลาย sodium carbonate (200 g/L) ปริมาตร 300 μ L ลงใน cuvette ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นแสง 765 nm นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานของ gallic acid รายงานค่าเป็น μ g gallic acid/g flour dry basis (db)

6.1.2.2. การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน โดยวิธี DPPH-radical scavenging assays ดัดแปลงจาก Brand-Williams และคณะ (1995) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระของตัวอย่าง

ปิเปตตัวอย่างสารสกัด มา 50 μ l ผสมกับสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 1.2×10^{-4} M ปริมาตร 950 μ l ใน cuvette ทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง 15 นาที นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 515 nm โดยใช้ methanol เป็น blank โดยสีของตัวอย่างจะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลืองอ่อน ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH (A_{initial} ควรมีค่าประมาณ 1.1) จะนำมาหักลบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final} ควรมีค่าประมาณ 0.6-0.7) ได้เป็นผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) ดังสมการ 1

$$A_{\text{difference}} = A_{\text{initial}} - A_{\text{final}} \quad (1)$$

นำ $A_{\text{difference}}$ ที่ได้ไปคำนวณหาค่าฤทธิ์ต้านออกซิเดชันโดยเทียบกับ $A_{\text{difference}}$ ของกราฟมาตรฐานของ Trolox รายงานค่าเป็น $\mu\text{mole Trolox /g flour db}$

6.1.2.3. การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน โดยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) ดัดแปลงจาก Benzie และ Strain (1996) ซึ่งแสดงถึงกำลังการรีดิวซ์ของตัวอย่าง

ปิเปตตัวอย่างมา 50 μ l ผสมกับสารละลาย FRAP (ประกอบด้วย acetate buffer : ferric chloride solution : Tripyridyltriazine solution ในสัดส่วน 10:1:1 โดยปริมาตร) ปริมาตร 950 μ l ใน cuvette ทิ้งไว้ในที่อุณหภูมิห้อง 4 นาที นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 593 nm ใช้น้ำกลั่นเป็น blank โดยสีของตัวอย่างจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอมแดงเป็นสีม่วง นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) มาหักลบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย FRAP (A_{initial}) ได้เป็นผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) ดังสมการ 2

$$A_{\text{difference}} = A_{\text{final}} - A_{\text{initial}} \quad (2)$$

นำ $A_{\text{difference}}$ ที่ได้ไปคำนวณหาค่าฤทธิ์ต้านออกซิเดชันโดยเทียบกับ $A_{\text{difference}}$ ของกราฟมาตรฐานของ Trolox รายงานค่าเป็น $\mu\text{mole Trolox /g flour db}$

6.2. คุณภาพทางโภชนาการและคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ทดลอง 3 ซ้ำ ยกเว้นการทดสอบทางประสาทสัมผัส)

วัตถุดิบที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการหุงและเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุก อันได้แก่

6.2.1. สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างแป้งข้าวกัลลิ่ง (เฉพาะข้าวดิบ) โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (Perkin-Elmer, model Diamond DSC, USA) ที่ต่อเชื่อมกับ Intracooler unit (Perkin-Elmer, model 2P, USA) และใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็น purge gas บรรจุตัวอย่างประมาณ 15 mg ที่ประกอบด้วยตัวอย่างแป้งข้าวกัลลิ่งต่อน้ำในอัตราส่วน 1:3 ลงใน Aluminum volatile sample pan ให้ความร้อนแก่ pan ตัวอย่างและ pan อ่างอิง (pan เปล่า) ในเครื่อง DSC จาก 30 °C ถึง 85 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C /min รายงานค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (°C) และเอนทาลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (J/g flour db) โดยการประมวลผลจาก Pyris™ Software version 7.0

6.2.2. สมบัติทางความหนืดของเพสต์ (pasting properties)

วิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของเพสต์แป้งข้าวกัลลิ่ง (เฉพาะข้าวดิบ) โดยใช้เครื่อง Rapid Visco-Analyzer (RVA) (Newport Scientific, model Super 3, Australia) ผสมตัวอย่างแป้งข้าวกัลลิ่ง 3.0 g โดยน้ำหนักแห้ง (dry basis, db) เข้ากับน้ำ 25 mL นำของผสมที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง RVA จาก 50 ถึง 95 °C ด้วยอัตรา 12 °C/min คงไว้ที่ 95 °C 2.5 min แล้วจึงทำให้เย็นลงถึง 50 °C ด้วยอัตรา 12 °C/min รายงานค่า pasting temperature, peak viscosity, breakdown และ setback โดยการประมวลผลจาก software

6.2.3. การวัดค่าสีของเมล็ดข้าวกัลลิ่งด้วยเครื่องวัดสี

นำเมล็ดข้าวกัลลิ่งดิบหรือสุกบรรจุในจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm ใส่เมล็ดข้าวให้มีความสูง 1 cm ให้เต็มจาน กดให้แน่น จากนั้นจึงวัดค่าสีของข้าวด้วยเครื่องวัดสี Chroma meter (Minolta, Model CR-300 series, Japan) ในระบบ Hunter (L, a, b) โดยค่า L แสดงระดับความสว่างของสี ค่า a แสดงระดับสีแดง-เขียว และค่า b แสดงระดับสีเหลือง-น้ำเงิน วัดค่าสีตัวอย่างละ 5 บริเวณ แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย จึงได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ 1 ซ้ำ (1 ตัวอย่าง) สำหรับการศึกษาผลของภาวะการเก็บรักษา จะพิจารณาความแตกต่างของค่าสี (ΔE) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 3

$$\Delta E = [(L-L_0)^2 + (a-a_0)^2 + (b-b_0)^2]^{1/2} \quad (3)$$

เมื่อ L a และ b คือ ค่าสีที่เวลาใดๆ ส่วน L_0 a_0 และ b_0 คือค่าสีที่เวลาเริ่มต้น (เดือนที่ 0)

6.2.4. การวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มแอนโทไซยานินโดยวัดค่าการดูดกลืนแสง

โดยดัดแปลงจากวิธีของ Awika และคณะ (2004) และวิธีของ Giusti และ Wrolstad (2005)

ในที่นี้มุ่งพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่วัดได้ และปริมาณรงควัตถุกลุ่มหลักในตัวอย่าง คือ แอนโทไซยานิน จึงระบุการทดลองส่วนนี้ไว้ในการศึกษาคุณภาพการบริโภคและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยสกัดสารกลุ่มแอนโทไซยานินจากแป้งข้าวกล้องดิบด้วย 1% HCl ในเมทานอล โดยผสมตัวอย่างแป้งข้าวกล้อง 5.0 ± 0.1 g เข้ากับตัวทำละลาย 50 mL สกัดในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิพร้อมระบบเขย่า ที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำของผสมไปปั่นเหวี่ยงที่ 21790×g เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำกากมาสกัดซ้ำเช่นเดิมอีก 4 ชั่วโมง รวมเวลาสกัดทั้งสิ้น 8 ชั่วโมง นำส่วนใสที่แยกได้จากการสกัดทั้งสองรอบมารวมกันและระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยภายใต้สุญญากาศ (rotary evaporator) ที่ 65 °C ใช้เวลาประมาณ 7 นาทีต่อตัวอย่าง (เพื่อให้เหลือสารสกัดประมาณ 2 mL) เติม HCl-KCl buffer pH 1.0 ประมาณ 8 mL ลงในสารสกัด แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman #1 และ 0.45 polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane filter ตามลำดับ ปรับปริมาตรสุดท้ายด้วย HCl-KCl buffer pH 1.0 ให้ได้สารสกัด 10 mL วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัด (โดยไม่ต้องเจือจางอีก) ที่ 516 nm (maximum absorption) และ 700 nm (แสดงถึงความขุ่นของตัวอย่าง) คำนวณค่า differential absorbance (A_{diff}) ดังสมการ 4

$$A_{diff, pH 1.0} = (A_{513} - A_{700})_{pH 1.0} \quad (4)$$

นำค่า A_{diff} มาคำนวณปริมาณสารกลุ่มแอนโทไซยานินทั้งหมด โดยรายงานเป็น cyanidin equivalent ดังสมการ 5

$$\text{Total anthocyanin pigments } (\mu\text{g cyanidin equivalent/g flour}) = [A_{diff} \times MW \times F \times 1000] / \epsilon \quad (5)$$

เมื่อ MW คือน้ำหนักโมเลกุลของ cyanidin (287) F คือ factor ที่ใช้คำนวณเทียบค่ากลับเป็นปริมาณแอนโทไซยานินต่อกรัมตัวอย่าง (50) ϵ คือ molar absorptivity of cyanidin ($24800 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

6.2.5. การวัดปริมาณสารระเหยที่หักกลิ่นเฉพาะตัวของข้าวโดย Solid Phase

Microextraction/ Gas Chromatography – Mass Spectrometry (SPME/GC-MS)

ดัดแปลงจาก Tulyathan และคณะ (2008)

บดเมล็ดข้าวกล้องดิบและร่อนผ่านตะแกรง 35-mesh ซังข้าวกล้องบดหยาบ 7.000 g บรรจุลงใน vial ขนาด 27-mL เติมสารละลาย 2,4,6-trimethylpyridine (TMP) ใน isopropanol ความเข้มข้น 1000 mg/kg (internal standard) ปริมาตร 1 μL ลงใน vial ที่บรรจุตัวอย่าง ปิดผนึกด้วยฝาอะลูมิเนียมที่ประกอบด้วย PTFE/silicone septum บ่มตัวอย่างใน silicone oil bath ที่ 120 °C เป็นเวลา 15 min ดูดซับสารระเหยที่บริเวณ headspace ด้วย 50/30 μm DVB/CarboxenTM/PDMS Stable FlexTM SPME fiber ความยาว 1 cm (Supelco, Bellefonte, PA) จากนั้นจึงปลดปล่อยสารระเหยจาก SPME fiber ที่ injection port ของเครื่อง GC-MS ที่

อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้ splitless mode ภาวะการทดลองวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารระเหยจากตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดเครื่องมืออุปกรณ์และภาวะการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยจากข้าว

เครื่องมือ/อุปกรณ์/ภาวะการทดลอง	รายละเอียด
GC-MS	Agilent 6890 และ HP 5973 mass-selective detector
GC column	HP-FFAP column 25.0 m x 320 μ m i.d. x 0.5 μ m film thickness
Mobile phase	Ultra high purity helium gas, 1.5 mL / min
การตั้งค่าอุณหภูมิ	อุณหภูมิเริ่มต้น 45 °C อุณหภูมิที่สอง 80 °C (อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2 °C/min) อุณหภูมิที่สาม 120 °C (อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 °C/min) อุณหภูมิสุดท้าย 230 °C (อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min)
การตั้งค่า MS	อุณหภูมิที่ MSD capillary direct-interface 250 °C Ionization energy 70 eV Mass range (m/z) 20–350 a.m.u Scan mass rate 4.33 scan/s Electron multiplier voltage ได้จาก autotune

คำนวณค่า Kovats retention indices (RI) จากค่า retention time ของสารแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับ RI ของ standard alkanes (C_{11} – C_{25}) ที่แยกได้จาก HP-FFAP column ภายใต้ภาวะการทดลองเดียวกัน ระบุนิคมของสารที่แยกได้โดยพิจารณาจาก mass spectra และเปรียบเทียบกับ Wiley 275.L mass spectral database (Hewlett-Packard Co.) และเปรียบเทียบค่า RI ที่คำนวณได้กับค่า RI อ้างอิงของสารมาตรฐานแต่ละชนิด หาพื้นที่ใต้กราฟของสารแต่ละชนิดโดยอาศัยการประมวลผลจาก HP chemstation software (Hewlett-Packard Co.) คำนวณสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของสารแต่ละชนิดต่อพื้นที่ใต้กราฟของ TMP standard และรายงานเป็นข้อมูลกึ่งปริมาณ (semi-quantitative data)

6.2.6. การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุก

ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสแบบ descriptive analysis ด้านความแข็ง (hardness) ของข้าวกล้องหุงสุก โดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 8 คน (ทดลอง 2 ซ้ำ) ใช้การทดสอบระดับความแข็งตามคะแนน 0 – 10 (10 point intensity scale) ระหว่างการฝึกฝนได้ใช้ตัวอย่างอ้างอิง 2 ตัวอย่าง คือตัวอย่างข้าวสุกที่เตรียมจากข้าวกล้องหอมมะลิที่มีอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 1 เดือน ซึ่งกำหนดให้มีค่าความแข็งเท่ากับ 0 (น้อยที่สุด) และตัวอย่างข้าวสุก

ที่เตรียมจากข้าวกล้องหอมมะลิที่มีอายุการเก็บรักษาประมาณ 13 เดือน กำหนดให้มีค่าความแข็งเท่ากับ 10 โดยตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิดิบที่ใช้ในการฝึกฝนนั้นได้ซื้อมาจากท้องตลาด และทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมของข้าวกล้องหุงสุก โดยใช้คะแนนความชอบชนิด 5-point hedonic scale ทดสอบโดยผู้บริโภคจำนวน 34 คน อุณหภูมิข้าวสุกที่ใช้ในการทดสอบทั้งสองแบบอยู่ระหว่าง 40 – 50 °C

7. การวางแผนการทดลองทางสถิติ

สำหรับการทดลองในส่วนที่ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งและภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพด้านต่างๆ ข้าวกล้องหอมมะลิแดง วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูล (analysis of variance) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. ผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพด้านต่าง ๆ ของข้าวกล้องหอมมะลิแดง

1.1. คุณภาพด้านเภสัชโภชนาการของข้าวกล้องดิบและข้าวกล้องหุงสุก

เมื่อพิจารณาค่าต่าง ๆ ที่ตรวจวัดได้จากสารสกัดเมทานอลและสารสกัดจากการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธี (ตารางที่ 3 และ 4) พบว่า ตัวอย่างข้าวดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันเบดมีปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่วัดได้จากทั้ง 2 วิธี (วิธี FRAP และ DPPH) ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันเบดมีค่าสูงกว่าวิธีอื่น ๆ (115°C) แม้ว่าจะใช้เวลาสั้น แต่อาจทำให้สารกลุ่มฟีนอลิกสลายตัวได้มากกว่าการอบแห้งอีก 2 วิธี อย่างไรก็ตาม ข้าวกล้องหุงสุกที่ทำแห้งด้วยวิธีที่ต่างกันกลับมีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัด (ที่ได้จากทั้งสองวิธี) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) การสลายตัวของสารกลุ่มฟีนอลิกเนื่องจากความร้อนระหว่างการหุงข้าว ซึ่งส่งผลให้ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันมีค่าลดลงด้วยนั้น อาจเกิดขึ้นในระดับที่รุนแรงกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวภายหลังการอบแห้งข้าวเปลือก อิทธิพลของความร้อนจากการหุงข้าวอาจบดบังอิทธิพลของความร้อนจากการทำแห้ง คุณภาพทางเภสัชโภชนาการของตัวอย่างข้าวสุกที่อบแห้งด้วยวิธีจึงมีค่าใกล้เคียงกันด้วย ซึ่งข้อสันนิษฐานดังกล่าวสอดคล้องกับกรณีของสารสกัดเมทานอล (ตารางที่ 3) ที่พบว่าปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดมีค่าลดลงกว่า 80% ภายหลังการหุง

ตารางที่ 3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด		ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ		กำลังการรีดิวซ์	
	(µg gallic acid/ g flour)		(µmole trolox/g flour)		(µmole trolox/g flour)	
	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก ^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก ^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก ^{ns}
ในที่ร่ม	2134 ^a ± 74	379 ± 25	11.95 ^a ± 0.69	1.46 ± 0.00	12.70 ^a ± 0.22	1.96 ± 0.04
ใช้แสงอาทิตย์	2017 ^b ± 60	412 ± 8	12.03 ^a ± 0.30	1.51 ± 0.04	12.23 ^a ± 0.34	2.03 ± 0.05
ฟลูอิดไรเซชัน	1751 ^c ± 24	378 ± 30	9.66 ^b ± 0.11	1.39 ± 0.08	10.72 ^b ± 0.38	1.92 ± 0.12

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ การรีดิวซ์ของสารสกัดจากการย่อยด้วยเอนไซม์จากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิก ทั้งหมด		ความสามารถในการกำจัด อนุมูลอิสระ		กำลังการรีดิวซ์	
	(µg gallic acid/ g flour)		(µmole trolox/g flour)		(µmole trolox/g flour)	
	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก ^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก ^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก ^{ns}
ในที่รม	6088 ^a ± 84	6219 ± 240	11.85 ^a ± 0.93	8.19 ± 0.33	15.24 ^b ± 0.11	12.52 ± 0.76
ใช้แสงอาทิตย์	6109 ^a ± 74	6299 ± 87	12.51 ^a ± 0.41	8.27 ± 0.10	15.95 ^a ± 0.45	12.93 ± 0.65
ฟลูอิดเซชัน	5705 ^b ± 188	6135 ± 373	9.90 ^b ± 0.87	7.85 ± 0.52	14.07 ^c ± 0.21	11.88 ± 0.48

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัด ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างต่างกันพบว่า การย่อยด้วยเอนไซม์ทำให้ได้สารสกัดที่มีค่าดังกล่าว สูงกว่าค่าที่ได้จากสารสกัดเมทานอล (ตารางที่ 3 และ 4) โดยปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และ FRAP) มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 16 เท่า และ 6 เท่า ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pérez-Jiménez และ Saura-Calixto (2005) ที่พบว่าปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยวิธี FRAP) ของ สารสกัดจากจากธัญพืชและผลิตภัณฑ์จากธัญพืชโดยการย่อยสกัดด้วยเอนไซม์ (ที่พบในระบบ ทางเดินอาหาร) มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสารสกัดจากตัวทำละลายอินทรีย์ประมาณ 2-15 เท่า และ 2-5 เท่า ตามลำดับ วิธีการย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์มีการเลียนแบบภาวะการย่อยตัวอย่าง ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งทำให้เกิดการย่อยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน และอาจช่วย ปลดปล่อยสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึงที่มักจับอยู่กับคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนด้วย จึงทำ ให้ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดในรูปอิสระเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการสกัดด้วยตัวทำละลาย อินทรีย์จะไม่สามารถสกัดสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึง หรือสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ๆ เช่น condensed tannins จึงอาจมีสารเหล่านี้หลงเหลืออยู่ในกากได้ ซึ่งปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกที่ เพิ่มขึ้นนี้และอาจช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดด้วย อย่างไรก็ดี วิธี Folin-Ciocalteu ที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด สามารถวิเคราะห์สารที่มีหมู่ฟีนอลิก ในตัวอย่าง เช่น กรดอะมิโนได้ จึงอาจให้ค่าที่วิเคราะห์ได้สูงกว่าความเป็นจริง (Shahidi และ Naczk, 2004) ทั้งนี้จะเห็นได้จากกรณีของข้าวกล้องหุงสุก ซึ่งมีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องดิบ (ตารางที่ 4) โดยข้อมูลดังกล่าวขัดแย้งกับข้อมูลที่ได้จากสารสกัดเมทานอล (ตารางที่ 3) อาจ

เนื่องมาจากการที่เอนไซม์สามารถย่อยข้าวหุงสุกได้ดีขึ้น จึงอาจปลดปล่อยสารกลุ่มฟีนอลิกและสารอื่นๆ ที่สามารถตรวจวัดได้โดยวิธี Folin-Ciocalteu ออกมาในสารสกัดมากขึ้น แต่ผลของการสลายตัวของสารต้านออกซิเดชันโดยรวม (ที่มีใช้เฉพาะสารกลุ่มฟีนอลิก) เนื่องจากการหุงข้าวจะเห็นได้จากการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันโดยตรง

1.2. คุณภาพทางการบริโภคและคุณภาพทางประสาทสัมผัส

เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง DSC (ตารางที่ 5) พบว่า ตัวอย่างที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน (onset temperature, T_o และ peak temperature, T_p) สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่มีค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลลาติไนเซชัน (ΔH_g) ต่ำกว่าตัวอย่างที่ทำแห้งในที่ร่มอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) การเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปีเนื่องจากการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่อุณหภูมิสูง ให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tirawanichagul และคณะ (2004) สำหรับสมบัติด้านความหนืดจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง RVA (ตารางที่ 6) พบว่าตัวอย่างที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดมีค่า breakdown ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า breakdown เนื่องจากการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่อุณหภูมิสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wiset และคณะ (2003) และ Borompichaichartkul และคณะ (2007) นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดที่ 115°C ตามภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิประมาณ 72°C ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าวอาจเกิดจากการที่สตาร์ชเกิดเจลลาติไนเซชันหรือเกิดการหลอมผลึกบางส่วน และโปรตีนเกิดการเสียสภาพธรรมชาติระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด จึงทำให้กระบวนการเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชในตัวอย่างเกิดขึ้นได้ในระดับที่ต่ำลง

ตารางที่ 5 สมบัติทางความร้อนของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	T_o ($^\circ\text{C}$)	T_p ($^\circ\text{C}$)	ΔT_g ($^\circ\text{C}$)	ΔH_g (J/g)
ในที่ร่ม	$67.17^c \pm 0.06$	$72.88^b \pm 0.17$	$11.35^a \pm 0.23$	$7.92^a \pm 0.53$
ใช้แสงอาทิตย์	$67.70^b \pm 0.08$	$73.10^b \pm 0.20$	$10.87^b \pm 0.07$	$7.57^{ab} \pm 0.36$
ฟลูอิดไรซ์เบด	$68.66^a \pm 0.19$	$73.82^a \pm 0.20$	$10.93^b \pm 0.08$	$6.80^b \pm 0.18$

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

Key: T_o – onset temperature, T_p – peak temperature, ΔT_g – gelatinization temperature range, ΔH_g – enthalpy of gelatinization

ตารางที่ 6 สมบัติทางความหนืดของเพสต์ข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	PT ^{ns} (°C)	PV ^{ns} (RVU)	BD (RVU)	SB ^{ns} (RVU)
ในที่ร่ม	85.90 ± 0.74	181.12 ± 3.74	79.60 ^a ± 4.40	70.72 ± 2.90
ใช้แสงอาทิตย์	86.24 ± 0.79	181.07 ± 5.35	74.98 ^a ± 6.61	70.72 ± 1.77
ฟลูอิดเซชัน	86.65 ± 0.98	182.38 ± 3.73	63.95 ^b ± 3.46	69.42 ± 0.21

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

Key: PT - pasting temperature, PV - peak viscosity, BD – breakdown, SB – setback

ข้อมูลปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดและค่าสีของข้าวกล้องดิบและสุกที่ทำแห้งด้วยวิธีต่างกัน แสดงดังตารางที่ 7 และ 8 ซึ่งพบว่าปริมาณแอนโทไซยานินและค่าสีจากตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นในระดับค่อนข้างต่ำ ซึ่งผู้บริโภคทั่วไปอาจไม่สามารถจำแนกความแตกต่างได้ ซึ่งสีของตัวอย่างข้าวกล้องดิบและสุกที่มองเห็นด้วยตาเปล่านั้นแสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 7 ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดในข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (µg cyanidin/g flour)	
	ข้าวดิบ ^{ns}	ข้าวหุงสุก ^{ns}
ในที่ร่ม	34.29 ± 3.91	46.30 ^b ± 2.94
ใช้แสงอาทิตย์	35.07 ± 3.72	59.66 ^a ± 5.20
ฟลูอิดเซชัน	28.71 ± 1.32	48.89 ^b ± 0.76

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 8 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการทำให้แห้ง	L		a		b	
	ข้าวดิบ ^{ns}	ข้าวหุงสุก ^{ns}	ข้าวดิบ ^{ns}	ข้าวหุงสุก ^{ns}	ข้าวดิบ ^{ns}	ข้าวหุงสุก
ในที่ร่ม	30.32 ± 1.09	36.54 ± 2.33	7.13 ± 0.17	5.48 ± 0.29	6.77 ± 1.01	3.79 ^b ± 0.13
ใช้แสงอาทิตย์	31.10 ± 1.76	35.08 ± 1.83	7.48 ± 0.09	6.36 ± 0.62	7.23 ± 0.99	4.46 ^a ± 0.21
ฟลูออไรเดชัน	30.48 ± 2.17	35.19 ± 1.35	7.19 ± 0.26	6.22 ± 0.30	7.11 ± 0.91	4.53 ^a ± 0.36

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



รูปที่ 3 สีของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบ (ซ้าย) และสุก (ขวา) ที่เตรียมจากข้าวเปลือกที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาข้อมูลเชิงคุณภาพและปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์สารระเหยด้วยเทคนิค SPME/GC-MS ร่วมกับค่า odor threshold ที่มีผู้รายงานไว้ สามารถระบุสารระเหยชนิดหลักที่พบได้ในตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งสารทั้ง 15 ชนิดดังกล่าวจัดเป็นสารให้กลิ่นที่สำคัญในข้าวพันธุ์อื่นๆ ตามที่มีรายงานก่อนหน้านี้ และอาจใช้จำแนกกลิ่นเฉพาะตัวของข้าวแต่ละพันธุ์ปลูกอีกด้วย (Yang และคณะ, 2008a; Yang และคณะ, 2008b; Zeng และคณะ, 2008) ทั้งนี้สารระเหยในกลุ่ม aldehyde ทั้ง 8 ชนิด และสารในกลุ่ม alcohol และ aromatic บางชนิด เช่น 1-Octen-3-ol 1-Octanol และ 2-Pentylfuran จัดเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Frankel, 2005; Lam และ Procter, 2003; Mildner-Szkudlarz และคณะ, 2003) หากมีปริมาณมากอาจส่งผลให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ (off-flavor) ในข้าวหุงสุกได้ ส่วนสารระเหยที่มีความสำคัญต่อกลิ่นหอมของข้าวโดยรวม ชนิดที่สำคัญได้แก่

2-Acetyl-1-pyrroline (2-AP) ซึ่งจัดเป็นสารให้กลิ่นเฉพาะตัวของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผู้บริโภครุ่นเคย (Tulyathan และคณะ, 2008) การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารระเหยเหล่านี้เนื่องจากปัจจัยต่างๆ จึงอาจบ่งถึงลักษณะกลิ่นหอมหรือกลิ่นหืนของข้าวหุงสุกที่อาจเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ตารางที่ 9 คำอธิบายลักษณะกลิ่น (odor description) และค่า odor threshold ของสารระเหยชนิดหลักที่พบในข้าวกล้องหอมมะลิแดง

RI	สารระเหย	ประเภทสาร	คำอธิบายลักษณะกลิ่น	ค่า Odor threshold	
				ในน้ำ (ppb)	ในอากาศ (ng/L)
		Aldehyde	Green tomato, green, grassy	5.00	1.10
1116	Hexanal				
1181	Heptanal	Aldehyde	Fruity, fatty, rancid	3.00	0.90
1216	2-pentylfuran	Aromatic	Floral, fruit, nutty, beany	6.00	19.00
1281	Octanal	Aldehyde	Slightly fruity, citrus, fatty	3.00	0.40
1344	2-Acetyl-1-pyrroline	N-containing compound	Popcorn	0.10	0.02
1408	Nonanal	Aldehyde	Citrus, floral, fruity	1.00	2.60
1483	1-Octen-3-ol	Alcohol	Mushroom	1.00	2.70
1517	Decanal	Aldehyde	Citrus, sweet, waxy, soapy	2.00	2.60
1548	(E)-2-Nonenal	Aldehyde	Beany, cucumber, fatty, woody, tallow	0.08	0.09
1570	1-Octanol	Alcohol	Citrus, fruity, floral	110.00	22.00
1641	1-Nonanol	Alcohol	Fatty	50.00	18.00
1708	(E,E)-2,4-Nonadienal	Aldehyde	Nutty, fatty	-	0.20
1765	Naphthalene	Aromatic	Naphthalene	5.00	-
1933	Geranyl acetone	Ketone	Magnolia, green	60.00	-
2256	4-Vinyl guaiacol	Aromatic	Spicy, clove-like	3.00	2.80

ค่า Kovats retention index ได้จากการแยกสารด้วย HP-FFAP column

คำอธิบายลักษณะกลิ่น อ้างอิงจาก Champagne (2008); Yang และคณะ (2008b); Zeng และคณะ (2008)

ค่า Odor threshold ในน้ำ อ้างอิงจาก Buttery และคณะ (1988); Van Gemert และ Nettenbreijer (1977)

ค่า Odor threshold ในอากาศ อ้างอิงจาก Yang และคณะ (2008a)

ในการพิจารณาคุณภาพด้านกลิ่นของข้าวกล้องนั้น ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SPME/GC-MS สัมพันธ์กับปริมาณสารระเหยแต่ละชนิดที่แยกได้จากตัวอย่าง เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 10 พบว่า การอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดไอเซชันซึ่งใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงที่สุด ส่งผลให้ระดับสารระเหยบางชนิดที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ของไขมันในตัวอย่าง ได้แก่ Hexanal 2,4-Nonadienal และ 2-Pentylfuran มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่สารระเหยกลุ่ม aldehyde บางชนิดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนสารระเหยที่ให้กลิ่นหอม เช่น 2-AP ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้งอีก 2 วิธี โดยทั่วไปแล้วการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและ/หรือเวลานานมักทำให้ปริมาณสารระเหยจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารระเหยที่ให้กลิ่นหอม โดยเฉพาะ 2-AP มีปริมาณลดลง (Wongpornchai และคณะ, 2004; Borompichaichartkul และคณะ, 2007) อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองที่ได้กลับไม่พบการสูญเสีย 2-AP อย่างชัดเจนภายหลังการอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดไเซชันที่ 115 °C

ตารางที่ 10 ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (area ratio) ของสารระเหยชนิดหลักจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

RI	สารระเหย	ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ								
		ในที่รม			ใช้แสงอาทิตย์			ฟลูอิดไเซชัน		
Aliphatic aldehydes										
1116	Hexanal	0.018 ^c	±	0.006	0.036 ^b	±	0.005	0.054 ^a	±	0.010
1181	Heptanal ^{ns}	0.037	±	0.019	0.033	±	0.021	0.035	±	0.002
1281	Octanal ^{ns}	0.051	±	0.025	0.065	±	0.029	0.060	±	0.025
1408	Nonanal ^{ns}	1.150	±	0.052	1.051	±	0.109	0.919	±	0.123
1517	Decanal ^{ns}	0.160	±	0.028	0.182	±	0.022	0.194	±	0.017
1548	2-Nonenal ^{ns}	0.076	±	0.017	0.107	±	0.043	0.129	±	0.028
1708	2,4-Nonadienal	0.014 ^b	±	0.007	0.026 ^{ab}	±	0.001	0.035 ^a	±	0.008
Aliphatic alcohols										
1483	1-Octen-3-ol ^{ns}	0.069	±	0.028	0.077	±	0.020	0.076	±	0.008
1570	1-Octanol ^{ns}	0.266	±	0.026	0.305	±	0.022	0.274	±	0.037
1641	1-Nonanol ^{ns}	0.185	±	0.073	0.154	±	0.020	0.090	±	0.007
Aromatics										
1216	2-Pentylfuran	0.032 ^b	±	0.015	0.044 ^b	±	0.010	0.086 ^a	±	0.016
1765	Naphthalene ^{ns}	0.142	±	0.005	0.131	±	0.021	0.117	±	0.012
2256	4-Vinyl-2-methoxyphenol ^{ns}	0.154	±	0.024	0.158	±	0.012	0.157	±	0.104
N-containing compound										
1344	2-Acetyl-1-pyrroline ^{ns}	0.022	±	0.007	0.026	±	0.005	0.021	±	0.004
Aliphatic ketone										
1933	Geranyl acetone ^{ns}	0.120	±	0.018	0.136	±	0.039	0.130	±	0.023

ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสารระเหยแต่ละชนิด คำนวณเปรียบเทียบกับค่าพื้นที่ใต้กราฟของ TMP standard และรายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในแถวเดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างข้าวสุก (ตารางที่ 11) พบว่า คะแนนด้านความแข็งของข้าวสุกที่ผ่านการทำแห้งทั้งสามวิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และเมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 12 พบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ อย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แม้ว่าการอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดเซชันจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ โดยเฉพาะด้านกลิ่น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็ยังไม่มากพอที่จะส่งผลให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปในระดับที่ผู้บริโภคโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้

ตารางที่ 11 ความแข็งของข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ จากการทดสอบด้วยวิธี descriptive analysis

วิธีการทำแห้ง	ความแข็ง ^{ns}
ในที่รม	3.75 ± 1.00
ใช้แสงอาทิตย์	3.94 ± 0.86
ฟลูอิดเซชัน	3.25 ± 0.93

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน 8 คน และใช้แบบทดสอบ 10-point intensity scale (1 คือ น้อยที่สุด และ 10 คือ มากที่สุด)

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 12 การยอมรับทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	คะแนนความชอบในแต่ละด้านที่ทดสอบ			
	สี ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	เนื้อสัมผัส ^{ns}	การยอมรับโดยรวม ^{ns}
ในที่รม	3.5 ± 0.8	3.4 ± 1.0	3.9 ± 1.2	3.7 ± 0.9
ใช้แสงอาทิตย์	3.5 ± 0.6	3.6 ± 0.8	3.9 ± 0.8	3.8 ± 0.7
ฟลูอิดเซชัน	3.3 ± 0.9	3.5 ± 0.9	4.1 ± 1.0	3.9 ± 0.8

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากผู้บริโภค 34 คน และใช้แบบทดสอบ 5-point hedonic scale (1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 5 คือ ชอบมาก)

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

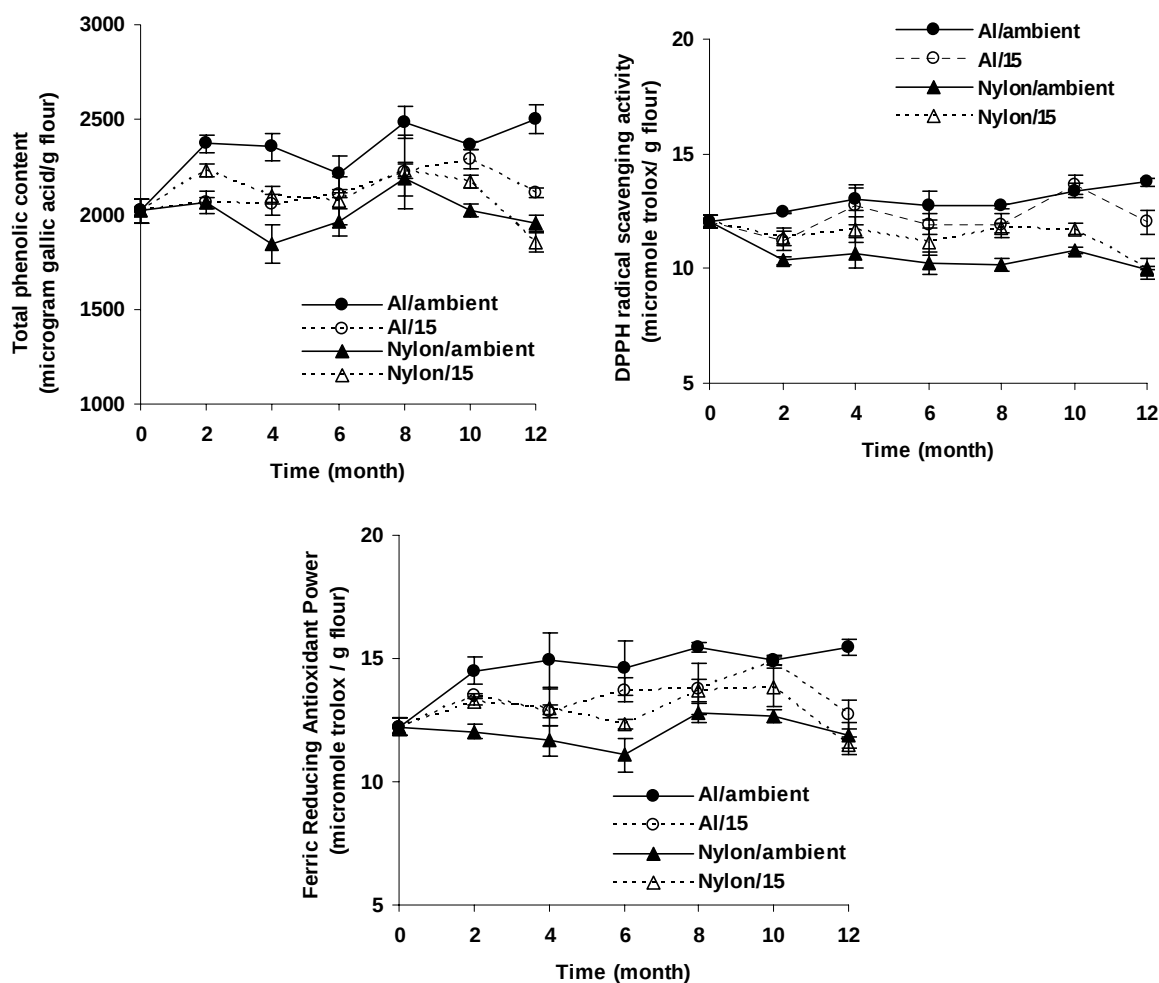
2. ผลของภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพด้านต่าง ๆ ของข้าวกล้องหอมมะลิแดง

2.1. คุณภาพด้านเภสัชโภชนาการของข้าวกล้อง ทั้งที่ไม่ได้ผ่านการหุงสุก และหุงสุกแล้ว

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดเมทานอลจากตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (รูปที่ 4) พบว่าไม่สามารถสรุปแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวระหว่างการเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ ได้อย่างชัดเจน ซึ่งค่าต่างๆ ที่ตรวจวัดได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 30% ของค่าที่เวลาเริ่มต้นระหว่างการเก็บรักษาในช่วงเวลา 12 เดือน อย่างไรก็ตาม ที่เวลาการเก็บรักษาเท่ากัน ตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ในระดับที่สูงกว่าตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (15 °C) เนื่องจากภาวะการเก็บรักษาไม่ส่งผลให้ค่าต่างๆ ที่วัดได้จากสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องดิบเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน การพิจารณาอิทธิพลของภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องสุก และสารสกัดจากการย่อยด้วยเอนไซม์จากข้าวกล้องสุกและดิบ จึงพิจารณาผลเฉพาะที่เวลาการเก็บรักษา 6 และ 12 เดือน ในบางภาวะของการเก็บรักษา ดังแสดงในตารางที่ 13 และ 14 ซึ่งจะเห็นได้ว่า คุณภาพทางเภสัชโภชนาการของสารสกัดจากตัวอย่างข้าวดิบและสุก ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างทั้งสองวิธี ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักภายในเวลา 12 เดือน แม้ว่าจะเก็บรักษาที่ภาวะต่างกัน

อนึ่ง งานวิจัยเกี่ยวกับผลของภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันในธัญพืชยังมีอยู่จำกัด และยังให้ผลที่ขัดแย้งกัน Dimberg และคณะ (1996) พบว่า ปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมดของตัวอย่างข้าวโอ๊ตที่เก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน (30 55 และ 80% RH) และ/หรือเวลาต่างกัน (3.5 และ 15.5 เดือน) มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Zhou และคณะ (2004) ที่พบว่าปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวจะมีค่าลดลงเมื่อเก็บเป็นเวลา 6 เดือน โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37°C จะทำให้ปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งหมดลดลงมากกว่าการเก็บรักษาที่ 4°C อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ความแตกต่างของผลการทดลองอาจเป็นผลมาจากวิธีในการสกัดและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ไม่เหมือนกันในแต่ละงานวิจัย สำหรับในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถสรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างที่ชัดเจนได้ อาจเป็นเพราะความชื้นและค่า a_w ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีค่าต่ำและเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างการเก็บรักษา อีกทั้งตัวอย่างมีการบรรจุแบบสุญญากาศ จึงอาจทำให้ปฏิกิริยาต่างๆ เกิดขึ้นได้อย่างช้าๆ และไม่เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่าที่ตรวจวัด อนึ่ง การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันระหว่างการเก็บรักษาอาจเกิดปฏิกิริยาประเภท enzymatic หรือ non-enzymatic hydrolysis ซึ่งช่วยทำลายพันธะเอสเทอร์ของสารกลุ่มฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึง ทำให้มีปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดในรูปอิสระเพิ่มขึ้น (Zhou และคณะ,

2004) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสารกลุ่มฟีนอลิกระหว่างการเก็บรักษาอาจเกิดจาก enzymatic หรือ non-enzymatic oxidation ได้เช่นกัน (Nicoli และคณะ, 1999)



รูปที่ 4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 - 12 เดือน โดย error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ 13 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดเมทานอลจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบ และข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน

ระยะเวลา การเก็บรักษา (เดือน)	อุณหภูมิการเก็บรักษา	บรรจุภัณฑ์	ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด		ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ		กำลังการรีดิวซ์	
			(µg gallic acid/ g flour)		(µmole trolox/g flour)		(µmole trolox/g flour)	
			ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก
0	-	-	2017 ^c ± 60	412 ^{bc} ± 8	12.03 ^b ± 0.30	1.51 ^b ± 0.04	12.23 ^b ± 0.34	2.03 ^d ± 0.05
6	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	1958 ^{cd} ± 71	385 ^c ± 8	10.23 ^d ± 0.48	1.47 ^b ± 0.06	11.09 ^c ± 0.67	2.02 ^d ± 0.09
6	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	2212 ^b ± 100	444 ^{ab} ± 14	12.74 ^b ± 0.63	1.60 ^a ± 0.04	14.61 ^a ± 1.07	2.36 ^b ± 0.05
6	15 °C	Nylon/LLDPE	2073 ^{bc} ± 129	395 ^c ± 43	11.15 ^c ± 0.59	1.45 ^b ± 0.02	12.34 ^b ± 0.20	2.05 ^d ± 0.02
12	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	1951 ^{cd} ± 43	407 ^{bc} ± 19	9.88 ^d ± 0.45	1.48 ^b ± 0.04	11.88 ^{bc} ± 0.50	2.04 ^d ± 0.04
12	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	2502 ^a ± 74	473 ^a ± 23	13.76 ^a ± 0.17	1.66 ^a ± 0.02	15.47 ^a ± 0.32	2.60 ^a ± 0.04
12	15 °C	Nylon/LLDPE	1852 ^d ± 45	393 ^c ± 26	10.01 ^d ± 0.09	1.50 ^b ± 0.07	11.47 ^{bc} ± 0.37	2.16 ^c ± 0.07

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 14 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากการย่อยด้วยเอนไซม์จากข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน

ระยะเวลา การเก็บ รักษา (เดือน)	อุณหภูมิการ เก็บรักษา	บรรจุภัณฑ์	ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด		ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ		กำลังการรีดิวซ์	
			(µg gallic acid/ g flour)		(µmole trolox/g flour)		(µmole trolox/g flour)	
			ข้าวดิบ ^{ns}	ข้าวหุงสุก ^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก ^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุงสุก
0	-	-	6109 ± 74	6299 ± 87	12.51 ^a ± 0.41	8.27 ± 0.10	15.95 ^a ± 0.45	12.93 ^{ab} ± 0.65
6	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	6017 ± 130	6227 ± 147	11.18 ^b ± 0.19	8.05 ± 0.72	15.44 ^{abc} ± 0.29	12.05 ^b ± 0.21
6	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	6229 ± 137	6326 ± 126	12.29 ^a ± 0.35	8.27 ± 0.33	15.52 ^{abc} ± 0.64	13.01 ^a ± 0.28
6	15 °C	Nylon/LLDPE	6147 ± 228	6282 ± 109	11.23 ^b ± 0.67	8.10 ± 0.39	15.14 ^{abc} ± 0.45	12.58 ^{ab} ± 0.34
12	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	5991 ± 199	6217 ± 292	10.55 ^b ± 0.88	8.07 ± 0.48	14.87 ^{bc} ± 0.45	12.12 ^b ± 0.32
12	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	6326 ± 282	6462 ± 246	12.36 ^a ± 0.22	8.21 ± 0.41	15.63 ^{ab} ± 0.09	13.37 ^a ± 0.22
12	15 °C	Nylon/LLDPE	6001 ± 203	6208 ± 333	10.98 ^b ± 0.68	8.04 ± 0.33	14.72 ^c ± 0.61	12.58 ^{ab} ± 0.81

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

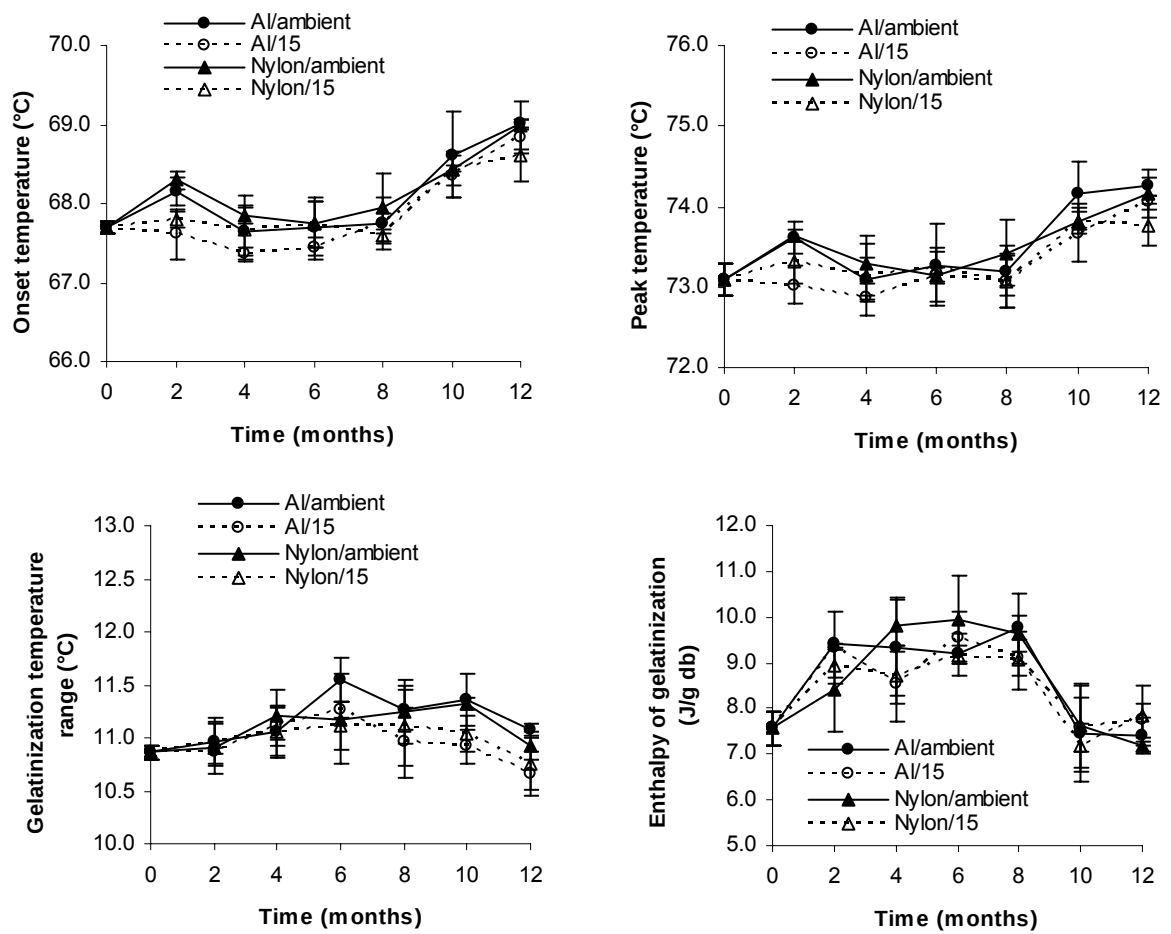
ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

2.2. คุณภาพทางการบริโภคและคุณภาพทางประสาทสัมผัส

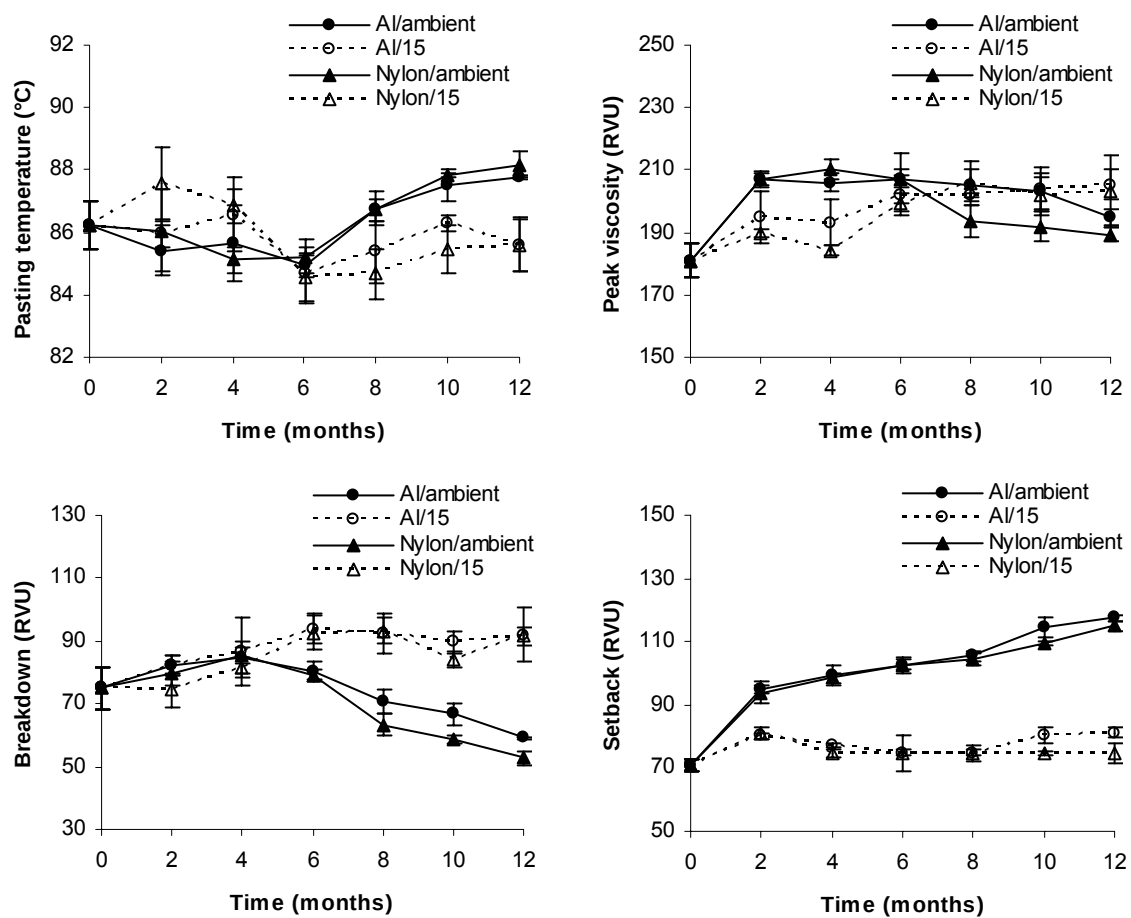
สำหรับสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่แต่ละภาวะ (รูปที่ 5) พบว่าค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน ซึ่งพิจารณาจาก onset temperature (T_o) และ peak temperature (T_p) มีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังเดือนที่ 6 หรือ 8 ของการเก็บรักษา ส่วนช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ผลต่างระหว่าง conclusion temperature และ onset temperature) มีแนวโน้มลดลงภายหลังการเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 6 – 10 เดือน ในขณะที่ค่าเอนทาลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นภายใน 2 หรือ 4 เดือนแรกของการเก็บรักษา จากนั้นจึงลดลงอย่างเด่นชัดภายหลังเดือนที่ 8 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นบ่งถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดแป้งข้าวระหว่างกระบวนการเก็บรักษา กล่าวคือ เม็ดแป้งเกิดเจลลิตีในเซชันได้ดีขึ้นในช่วงต้นของการเก็บรักษา (2 – 4 เดือนแรก) หรืออีกนัยหนึ่งคือ เม็ดแป้งสามารถดูดซับน้ำและดูดความร้อนเพื่อสลายโครงสร้างภายในเม็ดแป้งได้ในระดับที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลานานขึ้น (มากกว่า 6 เดือน) กลับส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดเจลลิตีในเซชันได้น้อยลง

ผลของภาวะการเก็บรักษาต่อสมบัติทางความหนืดของเพสต์ เมื่อพิจารณาจากค่า pasting temperature peak viscosity breakdown และ setback แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าสำหรับตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง pasting temperature มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน ส่วน peak viscosity และ breakdown มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนภายใน 2 เดือนแรกของการเก็บรักษา และลดลงภายหลังเดือนที่ 6 ของการเก็บรักษา ในขณะที่ setback เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอด 12 เดือน แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดซึ่งแตกต่างกันตามช่วงเวลาการเก็บรักษานี้ สอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Pearce และคณะ, 2001; Sowbhagya และ Bhattacharya, 2001; Wiset และคณะ, 2003; Zhou และคณะ, 2003)

อนึ่ง เมื่อพิจารณาถึงผลของชนิดบรรจุภัณฑ์หรืออุณหภูมิการเก็บรักษาต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางความหนืดของตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ต่างชนิดยังคงมีสมบัติต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน การเลือกบรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการกันแสงและกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซ ดังเช่น OPP/Al/LLDPE จึงไม่สามารถชดเชยหรือยับยั้งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของข้าวตัวอย่างได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wiset และคณะ (2003) และ Zhou และคณะ (2003) การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางความหนืดของตัวอย่างอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีนภายในเมล็ดข้าวระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป



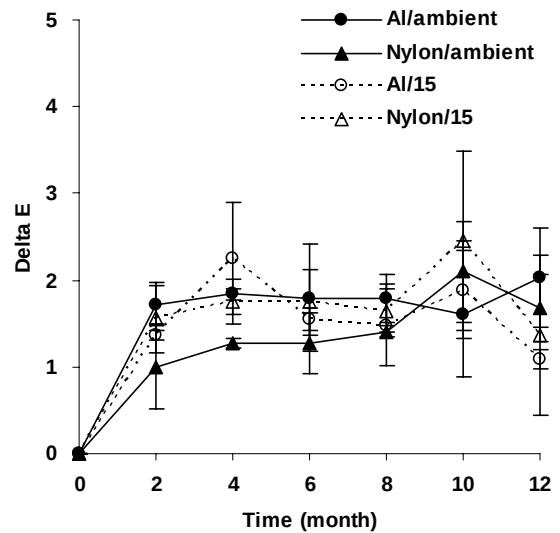
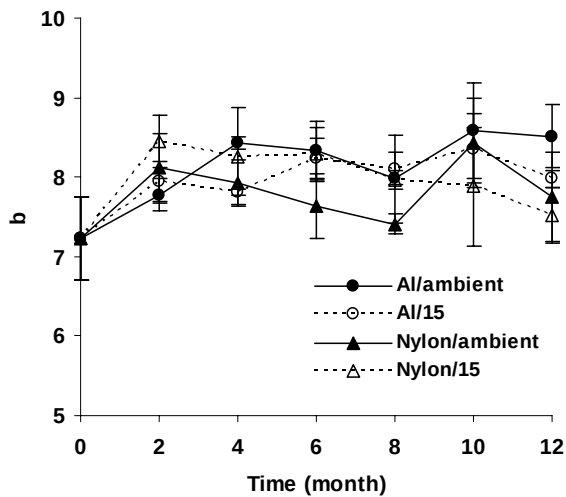
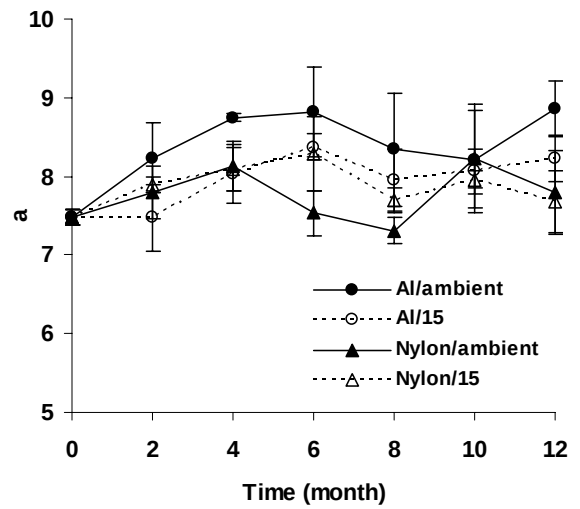
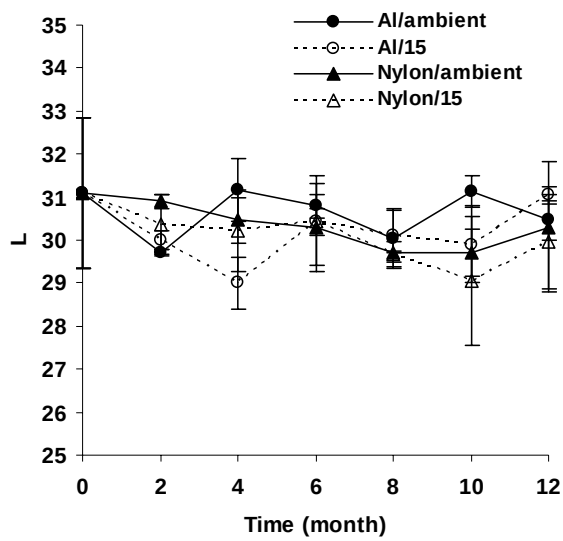
รูปที่ 5 สมบัติทางความร้อนของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 - 12 เดือน โดย error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ (Key: Al – OPP/Al/LLDPE, Nylon – Nylon/LLDPE, ambient – ambient temperature, 15 - 15°C)



รูปที่ 6 สมบัติทางความหนืดของเพสต์ข้าวกล้างหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 - 12 เดือน โดย error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ (Key: Al – OPP/Al/LLDPE, Nylon – Nylon/LLDPE, ambient – ambient temperature, 15 - 15°C)

Chrastil (1990) รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ oryzenin ซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหลักที่พบในเมล็ดข้าว ระหว่างการเก็บรักษาข้าวสาร กล่าวคือ น้ำหนักโมเลกุลของ oryzenin มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บข้าวเป็นเวลา 12 เดือน ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ในโมเลกุลของ oryzenin การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนนี้เองที่อาจเป็นกลไกหลักของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางความหนืดของข้าวตัวอย่าง ดังนั้นจึงเสนอสมมติฐานที่สามารถอธิบายผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ไว้ดังต่อไปนี้ คือ ในระยะแรกๆ ของการเก็บรักษาตัวอย่างข้าว (2 – 4 เดือนแรก) การออกซิไดซ์หมู่ thiol (-SH) อิสระไปเป็นพันธะไดซัลไฟด์อาจเกิดขึ้นไม่มากนัก หมู่ thiol อิสระจึงลดลงเล็กน้อย และความสามารถในการละลายของโปรตีนอาจลดลงเล็กน้อยเมื่อโมเลกุลโปรตีนมีขนาดใหญ่ขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและโปรตีน ซึ่งจะส่งผลให้เม็ดสตาร์ชเป็นอิสระเพิ่มขึ้น กระบวนการเจลาติไนเซชันอาจเริ่มต้นได้ที่อุณหภูมิต่ำลง เม็ดสตาร์ชสามารถดูดน้ำ พองตัวและให้ความหนืดได้ดีขึ้น เกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันได้สมบูรณ์ขึ้น อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้น (มากกว่า 6 เดือน) พันธะไดซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นมากในโครงสร้างของ oryzenin ส่งผลให้เกิดโครงร่างโปรตีนที่ใหญ่และแข็งแรง ซึ่งสามารถขัดขวางการดูดน้ำและพองตัวของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งจึงเกิดเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ให้ความหนืดได้ต่ำลงขณะร้อน และมีระดับการเกิดเจลาติไนเซชันที่ลดลงด้วย

การเปลี่ยนแปลงค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบระหว่างการเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งไม่สามารถสรุปแนวโน้มที่ชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าสี (ΔE) พบว่าทุกตัวอย่างมีค่า ΔE น้อยกว่า 3 Garcia-Viguera และ Zafrilla (2001) รายงานว่าหากค่า ΔE น้อยกว่า 5 มนุษย์จะไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีด้วยสายตาได้ ดังนั้น การเก็บรักษาตัวอย่างข้าวกล้องดิบที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 12 เดือน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวดิบในระดับที่ผู้บริโภคทั่วไปไม่สามารถสังเกตได้ การพิจารณาอิทธิพลของภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดในข้าวกล้องดิบ และค่าสีของข้าวกล้องสุก จึงพิจารณาเฉพาะที่เวลาการเก็บรักษา 6 และ 12 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 15 และ 16 ซึ่งพบว่า ค่าดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงมากนักระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 12 เดือน ที่ภาวะการเก็บรักษาต่างๆ กัน



รูปที่ 7 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) และความแตกต่างของค่าสี (ΔE) ข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 - 12 เดือน โดย error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ 15 ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน

ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	อุณหภูมิการเก็บรักษา	บรรจุภัณฑ์	ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (μg cyanidin/g flour)	
			ข้าวดิบ ^{ns}	ข้าวหุง ^{ns}
0	-	-	35.07 $\pm$ 3.72	59.66 $\pm$ 5.20
6	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	36.43 $\pm$ 4.15	55.02 $\pm$ 3.62
6	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	41.11 $\pm$ 3.89	53.80 $\pm$ 5.05
6	15°C	Nylon/LLDPE	35.21 $\pm$ 3.77	61.00 $\pm$ 6.21
12	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	38.18 $\pm$ 2.51	55.56 $\pm$ 6.43
12	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	40.65 $\pm$ 1.97	62.43 $\pm$ 5.00
12	15°C	Nylon/LLDPE	34.00 $\pm$ 3.09	52.67 $\pm$ 1.43

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 16 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและข้าวหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่ภาวะต่างๆ เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน

ระยะเวลา การเก็บ รักษา (เดือน)	อุณหภูมิการ เก็บรักษา	บรรจุภัณฑ์	L		a		b	
			ข้าวดิบ ^{ns}	ข้าวหุง ^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุง ^{ns}	ข้าวดิบ	ข้าวหุง
0	-	-	31.10 ± 1.76	35.08 ± 1.83	7.48 ^c ± 0.09	6.36 ± 0.62	7.23 ^c ± 0.99	4.46 ^a ± 0.21
6	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	30.29 ± 1.03	34.56 ± 1.03	7.53 ^{bc} ± 0.29	5.61 ± 0.15	7.64 ^{bc} ± 0.92	3.74 ^c ± 0.03
6	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	30.79 ± 0.28	36.77 ± 2.27	8.82 ^a ± 0.57	5.44 ± 0.38	8.33 ^{ab} ± 0.83	4.29 ^{ab} ± 0.18
6	15°C	Nylon/LLDPE	30.45 ± 1.03	37.90 ± 0.73	8.29 ^{ab} ± 0.47	5.59 ± 0.19	8.29 ^{ab} ± 0.81	3.62 ^c ± 0.23
12	อุณหภูมิห้อง	Nylon/LLDPE	30.31 ± 1.51	34.97 ± 0.15	7.80 ^{bc} ± 0.53	5.64 ± 0.49	7.75 ^{abc} ± 1.02	3.90 ^{bc} ± 0.29
12	อุณหภูมิห้อง	OPP/AL/LLDPE	30.46 ± 0.45	34.56 ± 0.86	8.87 ^a ± 0.35	6.33 ± 0.52	8.52 ^a ± 0.77	4.18 ^{ab} ± 0.27
12	15°C	Nylon/LLDPE	29.97 ± 1.10	36.93 ± 2.91	7.68 ^{bc} ± 0.39	5.97 ± 1.26	7.53 ^{bc} ± 0.90	3.68 ^c ± 0.27

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างที่เก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือนที่ภาวะต่างกัน (ตารางที่ 17 - 19) พบว่าระดับของสารระเหยในตัวอย่างที่บรรจุใน Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด กล่าวคือ ในช่วง 6 เดือนแรก เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ปริมาณของสารระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ได้แก่ สารกลุ่ม aldehyde และสารอื่นๆ เช่น 2-pentylfuran และ 1-octen-3-ol มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ hexanal และ 2-pentylfuran ซึ่งมีค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 7 และ 4 เท่าตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้นภายในเวลา 4 - 6 เดือน ในขณะที่สารระเหยบางชนิด เช่น 1-octanol 1-nonanol 2-AP และ geranyl acetone มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ภายหลัง 6 เดือนของการเก็บรักษา (เดือนที่ 6 - 12) กลับพบว่าสารระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน โดยเฉพาะ hexanal มีปริมาณลดลง ส่วนสารระเหยอื่นๆ กลับไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก สำหรับตัวอย่างที่บรรจุใน OPP/Al/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง กลับพบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยที่ต่างออกไป กล่าวคือ ฟิล์ม OPP/Al/LLDPE สามารถชะลอการเพิ่มขึ้นของสารระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน และรักษาสารระเหยที่ให้กลิ่นหอมอื่นๆ ให้คงอยู่ในผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าภายใน 6 เดือนแรกของการเก็บรักษา แต่เมื่อพิจารณาปริมาณสารระเหยในเดือนที่ 12 กลับพบว่าสารระเหยส่วนมากยังคงมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนการเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำในถุง Nylon/LLDPE จะให้ผลคล้ายกรณีของการเก็บรักษาตัวอย่างในถุง OPP/Al/LLDPE ที่อุณหภูมิห้อง

การที่ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างในถุง Nylon/LLDPE ที่อุณหภูมิห้องนั้น อาจเนื่องมาจากฟิล์มชนิดนี้มีค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนที่สูงกว่าฟิล์มชนิด OPP/Al/LLDPE (ตารางที่ 1) และฟิล์มมีลักษณะโปร่งแสง ซึ่งทั้งออกซิเจนและแสงที่สัมผัสกับตัวอย่างล้วนส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน อีกทั้งค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซที่สูงกว่ายังอาจส่งผลให้สารระเหยชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะ 2-AP ซึมผ่านออกจากตัวอย่างที่บรรจุในฟิล์ม Nylon/LLDPE ได้ดีกว่าอีกด้วย และยังส่งผลให้เกิดการสูญเสียสารระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลานาน (12 เดือน) ซึ่งการสูญเสียสารระเหยจากตัวอย่างข้าวที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสูงเป็นเวลานาน ได้มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้แล้ว (Tulyathan และคณะ, 2008; Wongpornchai และคณะ, 2004) การใช้บรรจุภัณฑ์ที่ช่วยป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซต่างๆ ได้ดี และสามารถกันแสงได้ ดังเช่นฟิล์ม OPP/Al/LLDPE ช่วยรักษาสารให้กลิ่นหอมของข้าว และชะลอการสร้างสารระเหยจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับกลิ่นหืน) ในตัวอย่างข้าวได้ดีกว่า แม้จะเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง แต่ความสามารถในการป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซหรือสารระเหยเข้าและออกจากบรรจุภัณฑ์ได้ดีนี้อาจส่งผลให้เกิดการสะสมของสารระเหยที่ให้กลิ่นหืนระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลานาน ได้ ส่วนการเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากจะช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้ว ยัง

ช่วยลดอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ ได้อีกด้วย (Mannapperuma และ Singh, 1994) จึงสามารถประยุกต์ใช้ได้ดีในการรักษาคุณภาพด้านกลิ่นของข้าวที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซสูงกว่า (ดังเช่น Nylon/LLDPE)

อนึ่ง จากข้อมูลในตารางที่ 17 – 19 พบว่า 4-vinyl-2-methoxyphenol มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลานานขึ้น ที่ทุกภาวะของการเก็บรักษา โดยการเก็บรักษาในถุง OPP/Al/LLDPE ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสารระเหยชนิดนี้เพิ่มขึ้นมากที่สุด ทั้งนี้ การสังเคราะห์ 4-vinyl guaiacol เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา thermal decarboxylation ของ ferulic acid (Maraval และคณะ, 2008) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับปริมาณออกซิเจนในระบบ ดังนั้น แม้บรรจุภัณฑ์จะมีค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (รวมทั้งก๊าซอื่นๆ) ต่ำ ดังเช่นฟิล์ม OPP/Al/LLDPE ก็ไม่สามารถชะลอปฏิกิริยาดังกล่าวได้ ในทางตรงกันข้าม กลับช่วยเก็บรักษาสารระเหยได้ดีกว่าฟิล์ม Nylon/LLDPE แต่การเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำช่วยชะลอการเพิ่มปริมาณของ 4-vinyl-2-methoxyphenol ได้ดี สารระเหยชนิดนี้ให้กลิ่นเฉพาะตัวในกลุ่ม cooked flavors โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นรสที่ได้จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (McGorin, 2002) และยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าจะทำให้เกิดกลิ่นหอมหรือกลิ่นไม่พึงประสงค์ในข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ศึกษา

ตารางที่ 17 ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (area ratio) ของสารระเหยชนิดหลักจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0 - 12 เดือน

RI	สารระเหย	ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่เวลาต่างๆ														
		0 เดือน			2 เดือน			4 เดือน			6 เดือน			12 เดือน		
Aliphatic aldehydes																
1116	Hexanal	0.036b	±	0.005	0.182a	±	0.014	0.239a	±	0.074	0.256a	±	0.058	0.180a	±	0.015
1181	Heptanal ^{ns}	0.033	±	0.021	0.068	±	0.025	0.084	±	0.026	0.083	±	0.036	0.079	±	0.007
1281	Octanal ^{ns}	0.065	±	0.029	0.070	±	0.025	0.087	±	0.027	0.091	±	0.023	0.102	±	0.022
1408	Nonanal ^{ns}	1.051	±	0.109	1.193	±	0.075	1.061	±	0.074	1.141	±	0.141	1.175	±	0.185
1517	Decanal ^{ns}	0.182	±	0.022	0.180	±	0.014	0.197	±	0.047	0.202	±	0.024	0.172	±	0.008
1548	2-Nonenal ^{ns}	0.107	±	0.043	0.176	±	0.027	0.174	±	0.023	0.181	±	0.048	0.189	±	0.013
1708	2,4-Nonadienal ^{ns}	0.026	±	0.001	0.033	±	0.005	0.055	±	0.011	0.045	±	0.017	0.056	±	0.030
Aliphatic alcohols																
1483	1-Octen-3-ol ^{ns}	0.077	±	0.020	0.097	±	0.031	0.086	±	0.030	0.118	±	0.053	0.110	±	0.009
1570	1-Octanol	0.305ab	±	0.022	0.341a	±	0.024	0.307ab	±	0.030	0.242c	±	0.034	0.255bc	±	0.045
1641	1-Nonanol	0.154ab	±	0.020	0.164a	±	0.015	0.128b	±	0.018	0.092c	±	0.008	0.087c	±	0.028
Aromatics																
1216	2-Pentylfuran	0.044b	±	0.010	0.116a	±	0.008	0.145a	±	0.042	0.161a	±	0.038	0.147a	±	0.012
1765	Naphthalene ^{ns}	0.131	±	0.021	0.117	±	0.022	0.112	±	0.030	0.079	±	0.020	0.098	±	0.014
2256	4-Vinyl-2-methoxyphenol	0.158c	±	0.012	0.248bc	±	0.064	0.272bc	±	0.058	0.397ab	±	0.148	0.465a	±	0.049
N-containing compound																
1344	2-Acetyl-1-pyrroline	0.026a	±	0.005	0.014b	±	0.001	0.004c	±	0.003	0.003c	±	0.000	tr		
Aliphatic ketone																
1933	Geranyl acetone	0.136ab	±	0.039	0.153a	±	0.027	0.087c	±	0.011	0.099bc	±	0.011	0.109abc	±	0.024

ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสารระเหยแต่ละชนิด คำนวณเปรียบเทียบกับค่าพื้นที่ใต้กราฟของ TMP standard และรายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b, c ตัวเลขในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ตัวเลขในแถวเดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); tr – trace ไม่สามารถรายงานผลได้เนื่องจากสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟมีค่าน้อยกว่า 0.001

ตารางที่ 18 ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (area ratio) ของสารระเหยชนิดหลักจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/Al/LLDPE ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0 - 12 เดือน

RI	สารระเหย	ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่เวลาต่างๆ											
		0 เดือน			2 เดือน			4 เดือน			6 เดือน		
	<i>Aliphatic aldehydes</i>												
1116	Hexanal	0.036c	±	0.005	0.086b	±	0.019	0.109b	±	0.027	0.092b	±	0.019
1181	Heptanal	0.033c	±	0.021	0.046bc	±	0.012	0.043bc	±	0.005	0.066ab	±	0.016
1281	Octanal ^{ns}	0.065	±	0.029	0.066	±	0.034	0.096	±	0.012	0.082	±	0.029
1408	Nonanal ^{ns}	1.051	±	0.109	0.975	±	0.239	1.038	±	0.180	0.871	±	0.093
1517	Decanal ^{ns}	0.182	±	0.022	0.154	±	0.019	0.171	±	0.028	0.144	±	0.028
1548	2-Nonenal ^{ns}	0.107	±	0.043	0.133	±	0.022	0.129	±	0.020	0.130	±	0.018
1708	2,4-Nonadienal ^{ns}	0.026	±	0.001	0.044	±	0.021	0.049	±	0.017	0.042	±	0.004
	<i>Aliphatic alcohols</i>												
1483	1-Octen-3-ol ^{ns}	0.077	±	0.020	0.060	±	0.007	0.091	±	0.023	0.068	±	0.009
1570	1-Octanol ^{ns}	0.305	±	0.022	0.262	±	0.039	0.246	±	0.041	0.231	±	0.036
1641	1-Nonanol ^{ns}	0.154	±	0.020	0.116	±	0.009	0.133	±	0.021	0.117	±	0.027
	<i>Aromatics</i>												
1216	2-Pentylfuran	0.044c	±	0.010	0.089b	±	0.025	0.087b	±	0.014	0.086b	±	0.015
1765	Naphthalene ^{ns}	0.131	±	0.021	0.129	±	0.010	0.128	±	0.018	0.114	±	0.003
2256	4-Vinyl-2-methoxyphenol	0.158b	±	0.012	0.266b	±	0.044	0.618a	±	0.069	0.605a	±	0.053
	<i>N-containing compound</i>												
1344	2-Acetyl-1-pyrroline ^{ns}	0.026	±	0.005	0.022	±	0.005	0.020	±	0.011	0.016	±	0.003
	<i>Aliphatic ketone</i>												
1933	Geranyl acetone ^{ns}	0.136	±	0.039	0.096	±	0.023	0.083	±	0.020	0.084	±	0.005

ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสารระเหยแต่ละชนิด คำนวณเปรียบเทียบกับค่าพื้นที่ใต้กราฟของ TMP standard และรายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b, c ตัวเลขในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ตัวเลขในแถวเดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); tr – trace ไม่สามารถรายงานผลได้เนื่องจากสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟมีค่าน้อยกว่า 0.001

ตารางที่ 19 ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟ (area ratio) ของสารระเหยชนิดหลักจากข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE ที่อุณหภูมิ 15 °C เป็นเวลา 0 - 12 เดือน

		ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่เวลาต่างๆ														
RI	สารระเหย	0 เดือน			2 เดือน			4 เดือน			6 เดือน			12 เดือน		
Aliphatic aldehydes																
1116	Hexanal	0.036c	±	0.005	0.120b	±	0.012	0.117b	±	0.046	0.156b	±	0.010	0.215a	±	0.008
1181	Heptanal	0.033b	±	0.021	0.065b	±	0.017	0.059b	±	0.016	0.060b	±	0.048	0.172a	±	0.037
1281	Octanal	0.065b	±	0.029	0.083b	±	0.017	0.085b	±	0.024	0.086b	±	0.007	0.164a	±	0.039
1408	Nonanal ^{ns}	1.051	±	0.109	1.056	±	0.117	1.008	±	0.144	0.962	±	0.037	1.289	±	0.172
1517	Decanal ^{ns}	0.182	±	0.022	0.174	±	0.026	0.163	±	0.033	0.177	±	0.070	0.261	±	0.025
1548	2-Nonenal ^{ns}	0.107	±	0.043	0.099	±	0.018	0.077	±	0.009	0.090	±	0.031	0.132	±	0.037
1708	2,4-Nonadienal ^{ns}	0.026	±	0.001	0.037	±	0.007	0.023	±	0.010	0.040	±	0.003	0.048	±	0.033
Aliphatic alcohols																
1483	1-Octen-3-ol ^{ns}	0.077	±	0.020	0.093	±	0.031	0.090	±	0.020	0.089	±	0.022	0.100	±	0.025
1570	1-Octanol ^{ns}	0.305	±	0.022	0.230	±	0.011	0.226	±	0.035	0.232	±	0.045	0.228	±	0.035
1641	1-Nonanol ^{ns}	0.154	±	0.020	0.104	±	0.019	0.096	±	0.028	0.099	±	0.023	0.117	±	0.036
Aromatics																
1216	2-Pentylfuran	0.044c	±	0.010	0.104b	±	0.008	0.100b	±	0.004	0.116b	±	0.004	0.181a	±	0.020
1765	Naphthalene	0.131b	±	0.021	0.144b	±	0.023	0.122b	±	0.008	0.121b	±	0.017	0.230a	±	0.069
2256	4-Vinyl-2-methoxyphenol	0.158b	±	0.012	0.166b	±	0.003	0.187b	±	0.062	0.152b	±	0.025	0.265a	±	0.038
N-containing compound																
1344	2-Acetyl-1-pyrroline ^{ns}	0.026	±	0.005	0.032	±	0.009	0.022	±	0.001	0.025	±	0.002		tr	
Aliphatic ketone																
1933	Geranyl acetone	0.136a	±	0.039	0.077b	±	0.005	0.061b	±	0.006	0.075b	±	0.004	0.082b	±	0.024

ค่าสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสารระเหยแต่ละชนิด คำนวณเปรียบเทียบกับค่าพื้นที่ใต้กราฟของ TMP standard และรายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ; a, b, c ตัวเลขในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ns ตัวเลขในแถวเดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$); tr – trace ไม่สามารถรายงานผลได้เนื่องจากสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟมีค่าน้อยกว่า 0.001

สำหรับการเลือกตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความแข็งนั้นจะพิจารณาจากแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า setback เนื่องจาก Ong และ Blanshard (1995) พบค่าสหสัมพันธ์เชิงบวกที่มีนัยสำคัญ (significant positive correlation, $p \leq 0.01$) ระหว่างค่า setback ที่วัดได้จากเครื่อง RVA และค่าความแข็งของข้าวสุกที่วัดได้จากเครื่องวัดเนื้อสัมผัส ดังนั้น ค่า setback จึงอาจใช้ทำนายความแข็งของข้าวสุกได้ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลในรูปที่ 6 พบว่า setback ของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างในชุดดังกล่าวจึงน่าจะมีความแตกต่างด้านความแข็งที่ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนสามารถจำแนกได้ ดังนั้นในการทดสอบสมบัติทางประสาทสัมผัสแบบ descriptive analysis ด้านความแข็ง จึงคัดเลือกเฉพาะตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมาทดสอบ จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 20 พบว่า ค่าความแข็งของข้าวสุกที่เตรียมจากตัวอย่างที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ตามระยะเวลาการเก็บรักษา แต่ตัวอย่างที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ต่างกันมีความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากัน ดังนั้น ชนิดบรรจุภัณฑ์จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของตัวอย่างข้าวสุก เช่นเดียวกับที่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางความหนืดของตัวอย่าง

ส่วนตัวอย่างที่เลือกมาทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคนั้นจะใช้เพียงชุดตัวอย่างที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากเป็นภาวะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ โดยเฉพาะด้านสารระเหย (กลิ่นของตัวอย่าง) มากที่สุด ซึ่งอาจส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคได้มากที่สุดด้วย นอกจากนี้ภาวะการเก็บรักษาดังกล่าวยังเป็นตัวแทนของภาวะการเก็บรักษาข้าวอินทรีย์ทั่วไปที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด เมื่อพิจารณาคะแนนการยอมรับจากตารางที่ 21 พบว่า ผู้บริโภคยังคงให้คะแนนความชอบด้านสีและกลิ่นของตัวอย่างที่เก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน ไม่แตกต่างจากตัวอย่างใหม่อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยที่วิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง GC-MS ระหว่างเก็บรักษา (ตารางที่ 17) ยังไม่มากพอที่จะส่งผลต่อการยอมรับของตัวอย่าง แม้ว่าคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ตัวอย่างที่มีอายุการเก็บ 12 เดือนกลับมีคะแนนการยอมรับไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความชอบด้านเนื้อสัมผัสของข้าวที่แตกต่างกันของผู้บริโภค กล่าวคือ ผู้บริโภคบางกลุ่มอาจชอบข้าวสุกที่นุ่ม เหนียว (ข้าวใหม่) ในขณะที่ผู้บริโภคบางกลุ่มอาจชอบข้าวสุกที่แข็ง ร่วน (ข้าวเก่า ในที่นี้คือข้าวที่เก็บเป็นเวลา 12 เดือน) นอกจากนี้ยังพบว่าคะแนนการยอมรับของตัวอย่างในทุกด้านที่ทดสอบมีค่ามากกว่ากึ่งหนึ่ง (3 คะแนนจาก 5 คะแนน) แสดงว่าผู้บริโภคยังคงให้การยอมรับตัวอย่างข้าวสุกที่เตรียมจากข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานถึง 12 เดือน ในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE

ตารางที่ 20 ลักษณะทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องในบรรจุภัณฑ์ต่างชนิด เป็นเวลา 0 – 12 เดือน จากการทดสอบด้วยวิธี descriptive analysis

ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	บรรจุภัณฑ์	ความแข็ง
0	-	3.94 ^e ± 0.86
2	OPP/AL/LLDPE	4.44 ^{de} ± 0.50
4	OPP/AL/LLDPE	4.94 ^{cd} ± 0.42
6	OPP/AL/LLDPE	5.50 ^{bc} ± 0.60
12	OPP/AL/LLDPE	7.25 ^a ± 0.85
2	Nylon/LLDPE	4.38 ^{de} ± 0.52
4	Nylon/LLDPE	5.31 ^{bc} ± 0.46
6	Nylon/LLDPE	5.69 ^b ± 0.65
12	Nylon/LLDPE	7.31 ^a ± 0.65

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน 8 คน และใช้แบบทดสอบ 10-point intensity scale (1 คือ น้อยที่สุด และ 10 คือ มากที่สุด)

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องในบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE เป็นเวลา 0 6 และ 12 เดือน

ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	ลักษณะทางประสาทสัมผัส			
	สี ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	เนื้อสัมผัส	การยอมรับโดยรวม ^{ns}
0	3.5 ± 0.6	3.6 ± 0.8	3.9 ^a ± 0.8	3.8 ± 0.7
6	3.8 ± 0.9	3.4 ± 0.9	3.3 ^b ± 0.9	3.4 ± 0.8
12	3.8 ± 0.9	3.4 ± 1.0	3.6 ^{ab} ± 0.9	3.4 ± 0.9

รายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากผู้บริโภครวม 34 คน และใช้แบบทดสอบ 5-point hedonic scale (1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 5 คือ ชอบมากที่สุด)

a, b, c ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การทำแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีที่ต่างกัน ได้แก่การทำแห้งในที่ร่ม ทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด ทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในด้านสมบัติทางความร้อน สมบัติทางความหนืด และปริมาณสารระเหยที่แยกได้จากตัวอย่างข้าวกล้อง แต่เมื่อพิจารณาคุณภาพทางโภชนาการและการยอมรับของผู้บริโภคต่อข้าวกล้องหอมมะลิแดงหุงสุกที่ได้จากการทำแห้งแต่ละวิธีพบว่า ค่าต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังนั้น การทำแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีฟลูอิดไรซ์ชันที่อุณหภูมิ 115°C (หรือที่อุณหภูมิไม่สูงกว่านี้มากนัก) จึงเป็นทางเลือกในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวอินทรีย์อีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจาก สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือ 18% ได้ในเวลาอันสั้น ซึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้นระดับนี้จะเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากการเจริญของจุลินทรีย์และแมลงได้ช้าลง ความร้อนสูงที่ใช้ในการทำแห้งอาจช่วยทำลายไข่แมลงในข้าวเปลือกได้บางส่วน ซึ่งเป็นผลดีต่อข้าวอินทรีย์ที่ไม่มีการใช้ยาฆ่าแมลงในจัดการศัตรูพืช และยังทำให้ได้ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันในแต่ละเมล็ดอีกด้วย อย่างไรก็ตาม หากต้องการนำวิธีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวอินทรีย์ที่ต้องผ่านการสี อาจต้องใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น เช่น $130 - 150^{\circ}\text{C}$ เพื่อช่วยลดสัดส่วนข้าวหักหลังการสีข้าว (Borompichaichartkul และคณะ, 2007) แต่อาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณภาพของข้าวสารและการยอมรับของผู้บริโภคต่อข้าวหุงสุกที่เตรียมจากข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่ภาวะดังกล่าว

เมื่อพิจารณาผลของภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพโดยรวมของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงพบว่า ชนิดของบรรจุภัณฑ์ อุณหภูมิ และเวลาการเก็บรักษาไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อคุณภาพด้านโภชนาการและค่าสีของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิแดงดิบและสุก ในขณะที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดในด้านสมบัติทางความร้อน สมบัติทางความหนืด สารระเหย รวมถึงลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัส ส่วนการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วได้ สำหรับชนิดของบรรจุภัณฑ์จะส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงของสารระเหยในข้าวระหว่างการเก็บรักษา โดย OPP/Al/LLDPE ช่วยรักษาคุณภาพด้านกลิ่นของตัวอย่างไว้ได้ดีโดยไม่จำเป็นต้องเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตาม ผู้บริโภคยังคงให้การยอมรับด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และคุณภาพโดยรวมของตัวอย่างที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน ดังนั้น ภาวะการเก็บรักษาที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด และนิยมใช้โดยทั่วไปสำหรับข้าวอินทรีย์ ข้าวกล้อง และข้าวหอม คือ การบรรจุในถุง Nylon/LLDPE (แบบสุญญากาศ) และเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง เหมาะสมดีแล้วสำหรับข้าวที่จำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคโดยทั่วไป ในขณะที่การเลือกภาวะที่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า เช่น เลือกใช้บรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/Al/LLDPE อาจเหมาะสำหรับข้าวเกรดดีพิเศษที่มุ่งจำหน่ายแก่ผู้บริโภคเฉพาะกลุ่มและ/หรือข้าวส่งออก รวมทั้งข้าวสารเคลือบกลิ่นรสหรือสารอาหาร เพื่อช่วยในการคงเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2549). ข้าวหอมแดง. http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_002/e1/rice_xx2-3_ricebreed_Khao_Hawm_Daeng.html.
- วิไล รางสาทอง. (2547). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด.
- อุบลรัตน์ สิริภัทรวารณ, Bruce R. Harte, สุวิสา พงษ์อำไพ และ สุภาภรณ์ ด็กกลาส. 2550. เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของชาเขียวใบหม่อน (เพื่อการส่งออก). รายงานการวิจัยโครงการวิจัยเสนอสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วว.).
- Awika, J. M., Rooney, L. W., & Waniska, R. D. (2004). Anthocyanin from black sorghum and their antioxidant properties. *Food Chemistry*, 90, 293-301.
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239, 70-76.
- Borompichaichartkul, C., Wiset, L., Tulayatun, V., Tuntratean, S., Thetsupamorn, T., Impaprasert, R., & Waedalor, I. (2007). Comparative study of effects of drying methods and storage conditions on aroma and quality attributes of Thai jasmine rice. *Drying Technology*, 25, 1185–1192.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 28, 25-30.
- Brooker, D. B., Bakker-arkema, F. W., and Hall, C. W. (1975). *Drying Cereal Grains*. 2nd ed. Connecticut: AVI Publishing Company.
- Buttery, R. G., Turnbaugh, J. G., & Ling, L. C. (1988). Contribution of volatiles to rice aroma. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 36, 1006-1009.
- Champagne, E. T. (2008). Rice aroma and flavor: a literature review. *Cereal Chemistry*, 84, 445-454.
- Chrastil, J. (1990). Protein-starch interactions in rice grains: Influence of storage on oryzenin and starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 38, 1804-1809.
- Dimberg, L. H., Molteberg, E. L., Solheim, R., & Frolich, W. (1996). Variation in oat groats due to variety, storage and heat treatment. I: Phenolic Compounds. *Journal of Cereal Science*, 24, 263-272.
- Frankel, E. N. (2005). *Lipid Oxidation*. Bridgewater, UK: Oily Press.
- Garcia-Viguera, C., & Zafrilla, P., eds (2001). *Changes in anthocyanins during food*

- processing: influence on color*. New York: American Chemical Society.
- Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2005). Characterization and Measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy In: R. E. Wrolstad, T. E. Acree, E. A. Decker, M. H. Penner, D. S. Reid, S. J. Schwartz, C. F. Shoemaker, D. Smith, & P. Sporns, *Handbook of Food Analytical Chemistry: Pigments, Colorants, Flavors, Texture, and Bioactive Food Components*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Howell, T. A. 2003. Rice storage. In C. W. Smith and R. H. Dilday, *Rice: Origin, History, Technology and Production*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
- Hu, C., Zawistowski, J., Ling, W., & Kitts, D. D. (2003). Black rice (*Oryza sativa* L. indica) pigmented fraction suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide in chemical and biological model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 5271-5277.
- Inprasit, C., & Noomhorm, A. (2001). Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of drying and operation on rice quality. *Drying Technology*, 19, 389-404.
- Juliano, B. O., ed (1985). *Criteria and tests for rice grain qualities*. Minnesota: The American Association of Cereal Chemists.
- Lam, H. S., & Proctor, A. (2003). Milled rice oxidation volatiles and odor development. *Journal of Food Science*, 68, 2676-2681.
- Mannapperuma, J. D., & Singh, R. P., eds (1994). *Modeling of gas exchange in polymeric packages of fresh fruits and vegetables*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Maraval, I., Mestres, C., Pernin, K., Ribeyre, F., Boulanger, R., Guichard, E., & Gunata, Z. (2008). Odor-active compounds in cooked rice cultivars from Camargue (France) analyzed by GC-O and GC-MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 5291-5298.
- McGorin, R. J., ed (2002). *Character impact compounds: flavors and off-flavors in foods*. Rockford, Illinois: Marcel Dekker, Inc.
- Mildner-Szkudlarz, S., Jelen, H. H., Zawirska-Wojtasiak, R., & Wasowicz, E. (2003). Application of headspace—solid phase microextraction and multivariate analysis for plant oils differentiation. *Food Chemistry*, 83, 515-522.
- Nam, S. H., Choi, S. P., Kang, M. Y., Koh, H. J., Kozuke, N., & Friedman, M. (2006). Antioxidant activities of bran extracts from twenty one pigmented rice cultivars.

- Food Chemistry*, 94, 613-620.
- Nicoli, M. C., Anese, M., & Parpinel, M. (1999). Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables. *Trend in Food Science and Technology*, 10, 94-100.
- Ong, M. H., & Blanshard, J. M. V. (1995). Texture determinants of cooked, parboiled rice. II: Physicochemical properties and leaching behaviour of rice. *Journal of Cereal Science*, 21, 261-269.
- Pearce, M., Marks, B., & Meullenet, J. (2001). Effects of postharvest parameters on functional changes during rough rice storage. *Cereal Chemistry*, 78, 354-357.
- Perez-Jimenez, J., & Saura-Calixto, F. (2005). Literature data may underestimate the actual antioxidant capacity of cereals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 5036-5040.
- Shahidi, F., & Naczsk, M. (2004). *Phenolics in Food and Nutraceuticals*. Florida: CRC Press.
- Soponronnarit, S. (1996). Grain drying in Asia: Fluidised-Bed Paddy Drying. In: *Proceedings of an international conference held at the FAO regional office for Asia and the pacific* (pp. 201-209.).
- Soponronnarit, S. (1999). Fluidised-Bed Paddy Drying. *Science Asia*, 25, 51-56.
- Sowbhagya, C. M., & Bhattacharya, K. R. (2001). Changes in pasting behaviour of rice during ageing. *Journal of Cereal Science*, 34, 115-124.
- Tananuwong, K., & Tewaruth, W. (2009). Extraction and application of antioxidants from black glutinous rice. *LWT - Food Science and Technology*. doi:10.1016/j.lwt.2009.09.014 (In Press).
- Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P., Varayanond, W., & Soponronnarit, S. (2004). Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. *Drying Technology*, 22, 1731-1754.
- Toyokuni, S., Itani, T., Morimitsu, Y., Okada, K., Ozeki, M., Kondo, S., Uchida, K., Osawa, T., Hiai., H., & Tashiro, T. (2002). Protective effect of colored rice over white rice on Fenton reaction-based renal lipid peroxidation in rats. *Free Radical Research*, 36, 583-592.
- Tulyathan, V., & Leecharatanaluk, B. (2007). Changes in quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk MaLi 105 during storage. *Journal of Food Biochemistry*, 31, 415-425.
- Tulyathan, V., Srisupattarawanich, N., & Suwanagul, A. (2008). Effect of rice flour

- coating on 2-acetyl-1-pyrroline and n-hexanal in brown rice cv. Jao Hom Supanburi during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 47, 367–372.
- Van Gemert, L. J., & Nettenbreijer, A. H. (1977). *Compilation of Odour Threshold Values in Air and Water*. Voorburg, The Netherlands: National Institute of Water Supply.
- Waterhouse, A. L. (2005). Determination of total phenolics. In: R. E. Wrolstad, T. E. Acree, E. A. Decker, M. H. Penner, C. F. Shoemaker, S. J. Schwartz, D. M. Smith, & P. Sporns, *Handbook of Food Analytical Chemistry: Pigments, Colorants, Flavors, Texture, and Bioactive Food Components* (pp. 463-470). New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Wiset, L., Szrednicki, G., & Driscoll, R. H. (2003). Effects of high temperature drying on physico-chemical properties of rice. In: *Proceedings of the 3rd Asia Pacific Drying Conference* (pp. 261-269).
- Wongpornchai, S., Dumri, K., Jongkaewwattana, S., & Siri, B. (2004). Effects of drying methods and storage time on the aroma and milling quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105. *Food Chemistry*, 87, 407-414.
- Yang, D. S., Lee, K.-S., Jeong, O.-Y., Kim, K.-J., & Kays, S. J. (2008a). Characterization of volatile aroma compounds in cooked black rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 235-240.
- Yang, D. S., Shewfelt, R. L., Lee, K.-S., & Kays, S. J. (2008b). Comparison of odor-active compounds from six distinctly different rice flavor types. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 2780-2787.
- Zeng, Z., Zhang, H., Chen, J. Y., Zhang, T., & Matsunaga, R. (2008). Flavor volatiles of rice during cooking analyzed by modified headspace SPME/GC-MS. *Cereal Chemistry*, 85, 140-145.
- Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (2004). The distribution of phenolic acids in rice. *Food Chemistry*, 87, 401-406.
- Zhou, Z., Robardsa, K., Helliwella, S., & Blanchard, C. (2003). Effect of rice storage on pasting properties of rice flour. *Food Research International*, 36, 625-634.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ
ไม่มี (อยู่ระหว่างการเรียบเรียง manuscript ส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ และจะจัดส่ง reprint ให้แหล่งทุนภายหลัง)
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจ/บุคคลทั่วไป)
ไม่มี
 - เชิงนโยบาย (มีการกำหนดนโยบายอิงงานวิจัย/เกิดมาตรการใหม่/เปลี่ยนแปลงระเบียบข้อบังคับหรือวิธีทำงาน)
ไม่มี
 - เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)
 - มีการสร้างความร่วมมือทางการวิจัยกับรองศาสตราจารย์ ดร. สิทธิวัฒน์ เลิศศิริ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในการทดลองหัวข้อ “การวัดปริมาณสารระเหยที่ให้กลิ่นเฉพาะตัวของข้าวโดย Solid Phase Microextraction/ Gas Chromatography – Mass Spectrometry (SPME/GC-MS)”
 - มีการวางแผนที่จะนำเสนอผลงานวิจัยส่วนหนึ่งที่ได้จากโครงการนี้ในรูปแบบสารคดี เผยแพร่ทางโทรทัศน์ในรายการ “หนึ่งในพระราชดำริ” ผลิตโดยบริษัท Panorama Worldwide ซึ่งเป็นการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการและวิจัยของผู้ที่ได้รับทุน อานันทมหิดล (ผู้วิจัยได้รับทุนฯ แผนกวิทยาศาสตร์ ประจำปี พ.ศ. 2540) เริ่มถ่ายทำรายการเมื่อเดือนตุลาคม 2552 และคาดว่าจะออกอากาศภายในปี พ.ศ. 2553 ซึ่งการนำเสนองานในรูปแบบดังกล่าวจะสามารถสร้างกระแสความสนใจเกี่ยวกับข้าวอินทรีย์ และความสำคัญของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวได้ในวงกว้าง
 - เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)
ไม่มี
3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)
 - นำเสนอผลงานวิจัยแบบบรรยายในที่ประชุมวิชาการ “การประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่..พบ..เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 9” ระหว่างวันที่ 15 – 17 ตุลาคม 2552 และได้รับรางวัลเกียรติบัตรเสนอผลงานวิจัยดีเยี่ยมแบบบรรยาย

ภาคผนวก: บทความสำหรับการเผยแพร่

(สำหรับประชาชนและผู้สนใจทั่วไป)

รหัสโครงการ MRG5180051

ชื่อโครงการ ผลของวิธีการทำแห้งและภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณสารต้านออกซิเดชัน และคุณภาพการบริโภคของข้าวหอมมะลิแดงอินทรี

ชื่อนักวิจัยและสถาบัน อาจารย์ ดร. ขนิษฐา รัตนวงศ์ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address Kanitha.T@chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ 18 เดือน (15 พฤษภาคม 2551 - 14 พฤศจิกายน 2552)

ข้าวกล้องหอมมะลิแดง (*Oryza sativa* L.) เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองอีกพันธุ์หนึ่งของไทย ซึ่งกลายพันธุ์มาจากข้าวหอมพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตามธรรมชาติ ข้าวพันธุ์นี้มีลักษณะเด่นคือ มีกลิ่นที่หอมดังเช่นข้าวหอมมะลิ มีสีแดงที่เยื่อหุ้มเมล็ด และมีสารต้านออกซิเดชัน (หรือสารต้านอนุมูลอิสระ) โดยเฉพาะสารในกลุ่มฟีนอลิกในปริมาณสูงกว่าข้าวกล้องหอมมะลิ หรือข้าวที่ไม่มีสีพันธุ์อื่นๆ ดังนั้นข้าวพันธุ์นี้จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มของอาหารเพื่อสุขภาพได้ ปัจจุบันมีการปลูกข้าวพันธุ์นี้กันมากในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย และส่วนหนึ่งเป็นการปลูกแบบเกษตรอินทรีย์ ซึ่งมีการส่งออกข้าวกล้องหอมมะลิแดงอินทรีนี้ไปยังประเทศในแถบทวีปยุโรปเป็นประจำทุกปี จึงจัดเป็นข้าวอินทรีย์อีกพันธุ์หนึ่งของไทยที่มีศักยภาพในการสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศ มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพของข้าวชนิดต่างๆ ทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งจะมุ่งศึกษาถึงคุณภาพด้านการบริโภค ได้แก่ เนื้อสัมผัสและกลิ่นรสของข้าวหุงสุก อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต้านออกซิเดชัน รวมถึงฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของข้าวกล้องที่มีสี นอกจากนี้ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพของข้าวอินทรีย์อย่างจริงจังในประเทศไทย ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านต่างๆ ของข้าวกล้องหอมมะลิแดงที่อบแห้งและเก็บรักษาต่างกัน จะเป็นประโยชน์ในการเลือกวิธีปฏิบัติที่เหมาะสมหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อช่วยรักษาคุณภาพข้าว ทั้งในด้านเภสัชโภชนศาสตร์ (nutraceuticals) และด้านการบริโภค ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้อาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวอินทรีย์ข้าวหอม และ/หรือข้าวที่มีสีพันธุ์อื่นๆ ได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง และภาวะการเก็บรักษา ซึ่งได้แก่ชนิดของบรรจุภัณฑ์ อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษา ต่อคุณภาพของข้าวกล้องหอมมะลิแดงอินทรีในด้านคุณภาพด้านเภสัชโภชนศาสตร์ ได้แก่ ปริมาณสารต้านออกซิเดชันในกลุ่มฟีนอลิก และฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน และคุณภาพด้านการบริโภคและคุณภาพทางประสาทสัมผัส

อันได้แก่ สีเมล็ด สมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการหุงและเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ปริมาณสารระเหยที่ให้กลิ่นหอมหรือกลิ่นหืนในข้าว

ในการศึกษาผลของวิธีการทำแห้งข้าวเปลือก ได้เลือกศึกษาการทำแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การทำแห้งในที่ร่ม (shade drying) ซึ่งเป็นวิธีควบคุมหรือเป็นวิธีที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (sun drying) ซึ่งเป็นวิธีที่เกษตรกรในประเทศไทยนิยมปฏิบัติ และการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์ (fluidized bed drying) ที่ 115°C ซึ่งอาศัยกระบวนการที่ของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับอากาศร้อนที่พัดขึ้นจากด้านล่างของเครื่องและทำให้อนุภาคของแข็งนั้นเกิดการผสมและกวนอย่างรุนแรง (fluidized) และอนุภาคของแข็งยังสามารถลอยอยู่ในอากาศจนมีคุณสมบัติคล้ายของไหล จึงเป็นวิธีที่ลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วและได้ข้าวที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์นี้จะใช้คู่กับการทำแห้งในที่ร่ม กล่าวคือ ใช้เครื่องอบแห้งลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 26% เหลือ 18% จากนั้นจึงทำแห้งในที่ร่มจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 13% จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของข้าวกล้องสุก รวมถึงสีของตัวอย่างข้าวกล้องดิบและสุกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่างกันยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์ที่อุณหภูมิสูงนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางความหนืดซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพการหุงและเนื้อสัมผัสของข้าวสุก นอกจากนี้ยังส่งผลให้ปริมาณสารระเหยที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นหืนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการยอมรับด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมของตัวอย่างข้าวกล้องสุก กลับพบว่า ผู้บริโภคยังคงให้การยอมรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 วิธี การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ โดยเฉพาะด้านกลิ่นภายหลังการอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดไรซ์ที่อุณหภูมิ 115°C อาจยังไม่มากพอที่จะส่งผลให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปในระดับที่ผู้บริโภคโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ ดังนั้นวิธีฟลูอิดไรซ์ที่ใช้อุณหภูมิใกล้เคียงกับที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จึงอาจนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวกล้องอินทรีย์ได้

สำหรับการศึกษาผลการเก็บรักษาข้าวกล้องที่ภาวะต่างๆ โดยนำตัวอย่างข้าวกล้องที่ผ่านทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ มาบรรจุแบบสุญญากาศในบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด ได้แก่ ถุงพลาสติกใสชนิด Nylon/LLDPE และถุงพลาสติกทึบชนิด OPP/Al/LLDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างกัน 2 ระดับ คือ 15 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง (28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 0-12 เดือน พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน และสีของตัวอย่างข้าวกล้องสุกและดิบไม่เปลี่ยนแปลงมากนักระหว่างการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม สมบัติทางความร้อน สมบัติทางความหนืด ลักษณะเนื้อสัมผัส และปริมาณสารระเหยที่ให้กลิ่นของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงเป็น 'ข้าวเก่า' กล่าวคือ เมื่อหุงด้วยสัดส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากัน เมล็ดข้าวสุกมีความแข็งมากขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณสารให้กลิ่นหืนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนสารให้กลิ่นหอมมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาพบว่า การเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำ (15°C) สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ดังที่

กล่าวมาแล้วได้ ในขณะที่ชนิดบรรจุภัณฑ์มีผลต่อคุณภาพด้านกลิ่นของตัวอย่างเท่านั้น กล่าวคือ OPP/Al/LLDPE ซึ่งสามารถกันแสงและกันการซึมผ่านของก๊าซ (และไอน้ำ) ได้ดีกว่า Nylon/LLDPE นั้น สามารถลดการเกิดกลิ่นหืน และลดการสูญเสียสารให้กลิ่นหอม ดังนั้นจึงช่วยรักษาคุณภาพด้านกลิ่นโดยรวมไว้ได้ดีกว่า อย่างไรก็ดี จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้บริโภคยังคงให้การยอมรับด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และคุณภาพโดยรวมของข้าวกล้องหุงสุกซึ่งเตรียมจากตัวอย่างที่บรรจุในถุง Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 เดือน จึงอาจกล่าวได้ว่า การบรรจุข้าวแบบสุญญากาศในถุง Nylon/LLDPE และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้โดยทั่วไปสำหรับข้าวอินทรีย์ ข้าวกล้อง และข้าวหอมนี้เหมาะสมดีแล้วสำหรับข้าวที่จำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคโดยทั่วไป ส่วนภาวะการเก็บรักษาอื่นๆ ที่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า เช่น ใช้บรรจุภัณฑ์ OPP/Al/LLDPE อาจนำไปประยุกต์ใช้กับข้าวกล้องหรือข้าวสารเกรดดีพิเศษที่มุ่งจำหน่ายแก่ผู้บริโภคเฉพาะกลุ่มและ/หรือข้าวส่งออก รวมทั้งข้าวสารเคลือบกลิ่นรสหรือสารอาหารได้