



การผลิตข้าวกล้องหอมมะลิสุภาพ โดยใช้เทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับ การเก็บในที่อับอากาศ*

ดลฤดี ใจสุทธิ^๑
สมเกียรติ ปรัชญารากร^๒
วารุณี วารัญญานนท์^๓
พัชรี ตั้งตระกูล^๔
สมชาติ โสภณธฤทธิ^๕
ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

แม้ว่าข้าวกล้องหอมมะลิ (พันธุ์ข้าวดอกมะลิ ๑๐๕) จะเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพที่นิยมบริโภคในประเทศไทย แต่เนื่องจากการเกิดกลิ่นเหม็นหืนทำให้อายุการเก็บรักษาสั้น และการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลแล้วดูดซึมเข้าร่างกายหลังการบริโภคเกิดได้เร็ว จึงไม่เหมาะแก่ผู้ที่ป่วยเป็นโรคเบาหวานประเภทที่ ๒ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมในการลดการเกิดกลิ่นเหม็นหืนและอัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้อง ในขณะที่คุณภาพของข้าวกล้องด้านร้อยละต้นข้าว ความขาวของข้าว จมูกข้าว ร้อยละข้าวท้องไข และความหนืดของน้ำแป้ง ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ผู้วิจัยได้ออบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ ๑๐๕ ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง ด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันที่อุณหภูมิอากาศร้อน ๑๓๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ให้ความชื้นหลังอบแห้งประมาณร้อยละ ๒๑.๙ มูลฐานแห้ง หลังจากนั้นจึงเก็บข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วไว้ในที่อับอากาศเป็นเวลา ๓๐, ๖๐ และ ๑๒๐ นาที แล้วนำไปแปดด้วยอากาศแวดล้อมต่อจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ ๑๖.๕ มูลฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งโดยเฉลี่ยและร้อยละต้นข้าวกล้องเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอบแห้งและความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความขาวของข้าวกล้องและปริมาณกรดไขมันอิสระจะลดลง ส่วนปริมาณข้าวท้องไขของข้าวกล้องแตกต่างกันเล็กน้อย สำหรับอิทธิพลของการเก็บในที่อับอากาศต่อคุณภาพของข้าวกล้อง พบว่า กรณีข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ การเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา ๓๐ นาทีนั้น เพียงพอแก่การรักษาคุณภาพทางด้านร้อยละต้นข้าวกล้อง แต่ต้องใช้เวลา ๖๐ นาที สำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ ในแง่ของคุณภาพด้านความหนืดของน้ำแป้งข้าวกล้อง พบว่า ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เปลี่ยนแปลงน้อย ส่วนความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่า setback จะเพิ่มขึ้น เมื่อเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลาเพิ่มขึ้น ด้านอัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้อง พบว่า จะลดลงเมื่อความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิอบแห้ง และระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : การอบแห้ง, กลิ่นเหม็นหืน, ข้าวกล้อง, ข้าวเปลือก, ปริมาณกรดไขมันอิสระ, ฟลูอิดเซชัน, อัตราการย่อยของแป้ง

* บรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๒๑ มีนาคม พ.ศ. ๒๕๕๐

^๑ นักศึกษาปริญญาเอก คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

^๒ รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

^๓ ผู้อำนวยการ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

^๔ นักวิจัยชำนาญการ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

^๕ ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ



๑. บทนำ

ข้าวกล้องประกอบด้วยวิตามินและแร่ธาตุจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวขาวและข้าวหนึ่งเนื่องจากส่วนที่เป็นรำไม่ได้ถูกขัดสีออกไป^๑ อีกทั้งยังช่วยป้องกันโรคต่าง ๆ เช่น มะเร็ง เบาหวาน และช่วยในการควบคุมน้ำหนักด้วย เนื่องจากข้าวกล้องมีปริมาณของเส้นใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble fibre) สูง ซึ่งนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าช่วยป้องกันมะเร็งได้ อีกทั้งถ้าบริโภคอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต เช่น ข้าวขาว จะส่งผลทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและปริมาณอินซูลินเพิ่มขึ้นรวดเร็ว ปริมาณน้ำตาลในเลือดที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากอาหาร สามารถบ่งบอกได้ด้วยดัชนีที่เรียกว่า glycaemic index โดยค่าดัชนีนี้จะสูงหรือต่ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ร่างกายดูดกลืนว่ารวดเร็วเพียงใด ค่า glycaemic index สูงแสดงว่าร่างกายสามารถดูดกลืนคาร์โบไฮเดรตได้ดี

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าข้าวขาวมี glycaemic index สูงกว่าข้าวกล้อง^๒ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ผู้บริโภคหันมาบริโภคข้าวกล้องเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าข้าวกล้องจะมีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าข้าวขาวและข้าวหนึ่งก็ตาม แต่ข้าวกล้องมีระยะเวลาในการเก็บรักษาสั้น คือประมาณ ๖-๑๒ เดือน เนื่องจากการเสื่อมสภาพของไขมันในข้าวกล้อง ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืน

ในเมล็ดข้าว ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคที่คุ้นเคยกับการบริโภค ข้าวขาว ข้าวกล้องหอมมะลิ (พันธุ์ข้าวดอกมะลิ ๑๐๕) ซึ่งเป็นที่นิยมบริโภคในประเทศไทยมีค่า glycaemic index สูง จึงอาจจะไม่เหมาะแก่การบริโภคสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานประเภทที่ ๒ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคโนโลยีการอบแห้งสามารถหยุดยั้งการทำงานของเอนไซม์ไลเพสที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนในเมล็ดข้าวได้ ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Champagne^๓ ที่ทำการทดลองเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นในข้าวระหว่างข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนกับข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง พบว่าข้าวกล้องที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ ๓๗ องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา ๕๐ วัน ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวที่ผ่านการอบแห้ง เพิ่มขึ้นช้ากว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง ประมาณร้อยละ ๗๐

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิสูง ให้อัตราการอบแห้งสูง และคุณภาพของข้าวเปลือกอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้^๔ หากนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ น่าจะช่วยทำให้คุณภาพของข้าวกล้องสูงขึ้น โดยเฉพาะคุณภาพเชิงสุขภาพและระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์

ประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการผลิตข้าวกล้องหอมมะลิ (พันธุ์ข้าวดอกมะลิ ๑๐๕) สุขภาพที่สามารถเก็บรักษาในลักษณะของข้าวเปลือกได้เป็นระยะเวลานาน โดยที่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการสีแล้ว จะยังคงมีจมูกข้าว (rice germ) ซึ่งมีคุณค่าทางสารอาหารส่วนใหญ่อยู่ และเมื่อนำไปรับประทานจะไม่เกิดกลิ่นเหม็นหืนอันไม่เป็นที่พึงประสงค์ของผู้บริโภค รวมทั้งมีอัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้องช้า เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่ผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวานในการเลือกบริโภค โดยใช้ข้าวหอมพันธุ์ข้าวดอกมะลิ ๑๐๕ เป็นวัตถุดิบในการอบแห้งด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันที่อุณหภูมิสูง ร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม นอกจากศึกษาวิธีการอบแห้งแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศ เพื่อดูแนวโน้มในการเร่งความเป็นข้าวเก่าของข้าวกล้อง โดยศึกษาคุณภาพทางด้านกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเคมี กายภาพของผลิตภัณฑ์

๒. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

๒.๑ เครื่องอบแห้ง

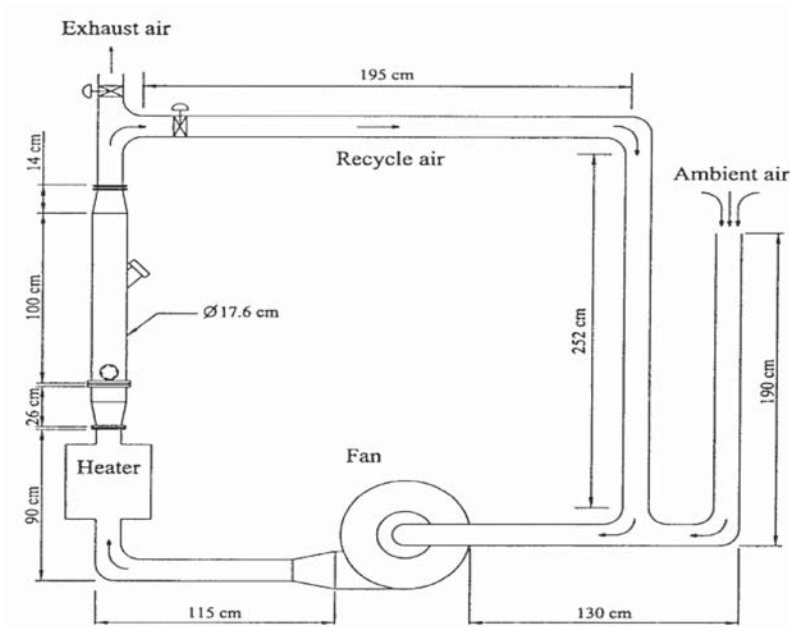
เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันแบบงวดโดยใช้อากาศร้อน แผนภาพของอุปกรณ์ชุดนี้แสดงดังรูปที่ ๑ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้ ห้องอบแห้ง



รูปทรงกระบอกที่ทำด้วยเหล็กกล้า ไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๒๐ เซนติเมตร สูง ๑๔๐ เซนติเมตร มีตัวให้ความร้อนจำนวน ๓ ตัว ขนาดกำลังวัตต์ละ ๓ กิโลวัตต์ และพัดลมแบบหนีศูนย์กลางชนิดใบพัดโค้งหลัง (backward-curved-blade centrifugal

fan) ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด ๑.๕ กิโลวัตต์ มีตัวปรับความเร็วรอบเพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศ ระบบอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว เพื่อลดการสูญเสียความร้อน อากาศบางส่วนที่ผ่านห้องอบแห้งแล้วจะถูกนำกลับมาผสมกับอากาศใหม่ที่เข้า

มา และทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อใช้ในการอบแห้งต่อไป อุณหภูมิของระบบอบแห้งควบคุมด้วยระบบ PID Controller มีความถูกต้อง ± 1 องศาเซลเซียส



รูปที่ ๑ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดแบบวงด

๒.๒ วิธีการทดลอง

นำข้าวเปลือกหอมมะลิ (พันธุ์ขาวดอกมะลิ ๑๐๕) มาเพิ่มความชื้นให้ได้ความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกับความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว คือประมาณร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ มวลฐานแห้ง (ที่ความชื้นเริ่มต้นสูงจะทำให้เมล็ดข้าวเกิดความเก่าได้เร็วขึ้น^๕) โดยพรมน้ำลงบนเมล็ดข้าวเปลือก จากนั้นนำไปเก็บไว้ในถังที่ปิดสนิท ในห้องเย็นที่

ควบคุมอุณหภูมิที่ ๔ องศาเซลเซียส ในช่วงประมาณ ๓-๔ วันแรก นำข้าวเปลือกออกมากลุก แล้วนำกลับไปเก็บดังเดิมจนครบ ๗ วัน ก่อนการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด ปล่อยให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิที่ใช้เท่ากับ ๓๓๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วอากาศ ๒.๖ เมตรต่อวินาที และอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

ร้อยละ ๘๐ จากนั้นนำไปเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา ๐.๕, ๑ และ ๒ ชั่วโมง โดยเก็บไว้ในขวดแก้วที่ปิดสนิทที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิของเมล็ดหลังการอบแห้ง แล้วจึงนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนความชื้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ ๑๖.๕ มวลฐานแห้ง จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณภาพด้านต่าง ๆ ต่อไป

สำหรับการหาความชื้นของข้าวเปลือกจะเก็บตัวอย่างครั้งละประมาณ



๕๐ กรัม ไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ ๑๐๓ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๗๒ ชั่วโมง การวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกผลของบริษัท YOKO-KAWA (รุ่น C8510 ช่วงวัดอุณหภูมิ -๑๐๐ ถึง ๑๓๐๐ องศาเซลเซียส ความละเอียดร้อยละ ± 0.2 องศาเซลเซียส) และการวัดความเร็วลมใช้มาตรความเร็วลมแบบลวดร้อน (hot-wire anemometer) มีความละเอียด ± 0.1 เมตรต่อวินาที

๒.๓ การวิเคราะห์คุณภาพ

ในการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพ สมบัติทางเคมีและสมบัติทางเคมีกายภาพ จะทำซ้ำ ๓ ครั้งในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ร้อยละต้นข้าวกล้อง (head brown rice yield) โดยชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่สะอาดแล้ว ๒๕๐ กรัม หลังจากนั้นกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก Satake จากนั้นแยกข้าวกล้องเต็มเมล็ดด้วยเครื่องคัดแยกแบบตะแกรงกลม แล้วจึงคำนวณหาร้อยละต้นข้าวกล้อง ทั้งนี้ ต้นข้าวกล้องอ้างอิงได้จากการนำข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเดียวกันกับที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนมาอบแห้งโดยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนเหลือความชื้นร้อยละ ๑๖.๕ มูลฐานแห้ง

การวิเคราะห์ความขาวของข้าวกล้อง (whiteness of brown rice) ใช้อุปกรณ์วัดความขาว Kett C-300

การวิเคราะห์จมูกข้าวกล้อง (brown rice germ) โดยนำต้นข้าวของข้าวกล้องมาจำนวน ๑๐๐ เมล็ด แยกจำนวนข้าวที่มีจมูกข้าวออกจากต้นข้าวของข้าวกล้องโดยใช้ไฟส่องและบันทึกจำนวนข้าวที่มีจมูกข้าวที่นับได้ ทำซ้ำกันตัวอย่างละ ๓ ครั้ง แล้วนำไปเฉลี่ยเป็นร้อยละจมูกข้าวกล้อง

การวิเคราะห์หาร้อยละข้าวท้องไข่ของข้าวกล้อง (white belly of brown rice) นำต้นข้าวของข้าวกล้องมาจำนวน ๑๐๐ เมล็ด แล้วแยกจำนวนข้าวที่เป็นข้าวท้องไข่ออกจากต้นข้าวของข้าวกล้องโดยใช้ไฟส่อง โดยเลือกเฉพาะเมล็ดที่มีจุดขุ่นทึบแสงเกินร้อยละ ๕๐ ขึ้นไป และบันทึกจำนวนข้าวที่เป็นข้าวท้องไข่ที่นับได้ ทำซ้ำกันตัวอย่างละ ๓ ครั้ง แล้วนำไปเฉลี่ยเป็นร้อยละข้าวท้องไข่ของข้าวกล้อง

ส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระและการย่อยของแป้ง การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระดัดแปลงมาจาก Fat Acidity-General Method โดย AACC Method O2-01^๖ วิธีการเป็นดังนี้ นำข้าวกล้องไปชักร้าออกด้วยเครื่อง Satake miller จำนวน ๓ ครั้ง แล้วชั่งน้ำหนักที่ได้ประมาณ ๒ กรัม ใส่ในตัวกรองหมายเลข ๑ ที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นบรรจุตัวกรองลงในขวดแก้ว แล้วเติมสารละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) ๒๐๐ มิลลิลิตร และนำ

ไปหมุนเหวี่ยง (centrifuge) เป็นเวลาประมาณ ๒ วัน จากนั้นนำไปแยกปิโตรเลียมอีเทอร์ออก ด้วยวิธีการระเหยจนเหลือแต่ปริมาณไขมัน และเตรียมสารละลายโทลูอีน (toluene) ด้วยโทลูอีน ๑ ลิตร แอลกอฮอล์ ๑ ลิตร และฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein) ๐.๘ กรัม แล้วจึงนำสารละลายโทลูอีนที่เตรียมไว้เติมลงในขวดปริมาณ ๕๐ ml จากนั้นนำไปไทเทรตด้วย ๐.๐๑๗๘ M KOH จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู อ่านปริมาณ ๐.๐๑๗๘ M KOH ที่ใช้ไปบันทึกค่าไว้ แล้วนำมาคำนวณหาร้อยละกรดไขมัน ดังนี้

ร้อยละกรดไขมัน

$$\text{อิสระ} = \left(\frac{A - B}{100 - C} \right) \times 10 \quad (๑)$$

โดยที่ A คือ ปริมาณ ๐.๐๑๗๘ M KOH ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B คือ ปริมาณ ๐.๐๑๗๘ M KOH ที่ใช้ในการไทเทรตไร้สิ่งตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

C คือ ปริมาณน้ำหนักของน้ำใน ๑๐๐ กรัมตัวอย่าง (กรัม)

ส่วนการวิเคราะห์การย่อยของแป้งข้าวกล้องดัดแปลงมาจากวิธีวิเคราะห์ของ Goni และคณะ^๗ โดยเตรียมข้าวกล้องสุก ๕๐ มิลลิกรัม ใส่ในขวดทดลองขนาด ๓๐ มิลลิลิตร



จากนั้นเติมบัฟเฟอร์ HCl-KCl พีเอช ๑.๕ ปริมาณ ๑๐ มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปปั่นเป็นเวลา ๒ นาที และเติมสารละลายเพปซิน (pepsin) หรือพอร์ซัน (porcine) ๑ มิลลิกรัม ปริมาณ ๐.๒ มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ ๔๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๖๐ นาที จากนั้นปรับสารละลายเป็น ๒๕ มิลลิลิตร โดยเติม Tris-Maleate buffer (พีเอช ๖.๘) ปริมาณ ๑๕ มิลลิลิตรลงในขวดและเพื่อวัดอัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้องจะเติม Tris-Maleate buffer ที่มี ๒.๖ IU α -amylase porcine ปริมาณ ๕ มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ ๓๗ องศาเซลเซียส โดยดูดตัวอย่างปริมาณ ๐.๑ มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองทุก ๆ ๓๐ นาที เป็นเวลา ๑๘๐ นาที โดยหลอดทดลองทั้งหมดจะถูกนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา ๕ นาที แล้วจึงเติม ๐.๔ M sodium acetate buffer (พีเอช ๔.๗๕) ปริมาณ ๐.๑ มิลลิลิตร และ AMG ปริมาณ ๓๐ ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ ๖๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๔๕ นาที เพื่อหาปริมาณกลูโคส ทั้งนี้ อัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้องสามารถคำนวณได้จากสมการของ Goni และคณะ^๖ คือ

$$C = C_{\infty} (1 - e^{-kt}) \quad (๒)$$

โดยที่ C คือ ร้อยละของอัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้องที่เวลา t

C_{∞} คือ ร้อยละของอัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้องที่เวลา ๑๘๐ นาที
k คือ ค่าคงที่ของอัตราการย่อย
t คือ เวลาที่ใช้ในการย่อย, นาที

$$AUC = C_{\infty} (t_f - t_0) - (C_{\infty}/k) [1 - \exp[-k(t_f - t_0)]] \quad (๓)$$

โดยที่ t_f คือ เวลาสุดท้ายที่ใช้ในการย่อย (๑๘๐ นาที) และ t_0 คือ เวลาเริ่มต้นที่ใช้ในการย่อย (๐ นาที) ส่วนค่า HI คำนวณได้จากการหารพื้นที่ใต้โค้งของอัตราการ

$$GI = 39.71 + (0.549HI) \quad (๔)$$

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพจะเน้นค่าความหนืดของแป้งจากข้าวกล้อง ก่อนที่จะวัดค่าความหนืดของน้ำแป้ง เริ่มจากการนำตัวอย่างข้าวกล้องมาบดให้ละเอียดโดยใช้เครื่อง ultracentrifugal mill จากนั้นนำผงแป้งมาร่อนในตะแกรงขนาด ๐.๒๕ มิลลิเมตร แบ่งแป้งเป็น ๒ ส่วน ส่วนหนึ่งนำไปหาความชื้นมูลฐานเปียก โดยชั่งน้ำหนักแป้งให้ได้น้ำหนักแน่นอนประมาณ ๕ กรัม แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ ๑๐๓ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๒.๓๐ ชั่วโมงหลังจากนั้นนำอีกส่วนหนึ่งไปทดสอบ ด้วยเครื่อง Rapid visco analyser (RVA) และนำผลที่ได้จากการทดสอบ ไปวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS

สำหรับพื้นที่ใต้โค้ง (AUC) ที่ จะนำไปคำนวณหาค่า hydrolysis index (HI) สามารถคำนวณได้จากสมการ

ย่อยตัวอย่างด้วยพื้นที่ใต้โค้งอ้างอิง ซึ่งในที่นี้คือพื้นที่ใต้โค้งของอัตราการย่อยขนมปังขาว และค่า glycemic index (GI) คำนวณได้จากสมการ

วิเคราะห์สถิติ ANOVA (Analysis of variance) โดยวิธี DMRT (Duncan's new multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ ๙๕

๓. ผลและวิจารณ์

๓.๑ การลดความชื้นของข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดิเซชันด้วยอากาศร้อน

จากการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง ที่อุณหภูมิ ๑๓๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส มาเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลาต่าง ๆ และนำมาลดความชื้นต่อด้วยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม ได้ผลดังแสดงในรูปที่ ๒ และ ๓ ช่วงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดิเซชัน ข้าว

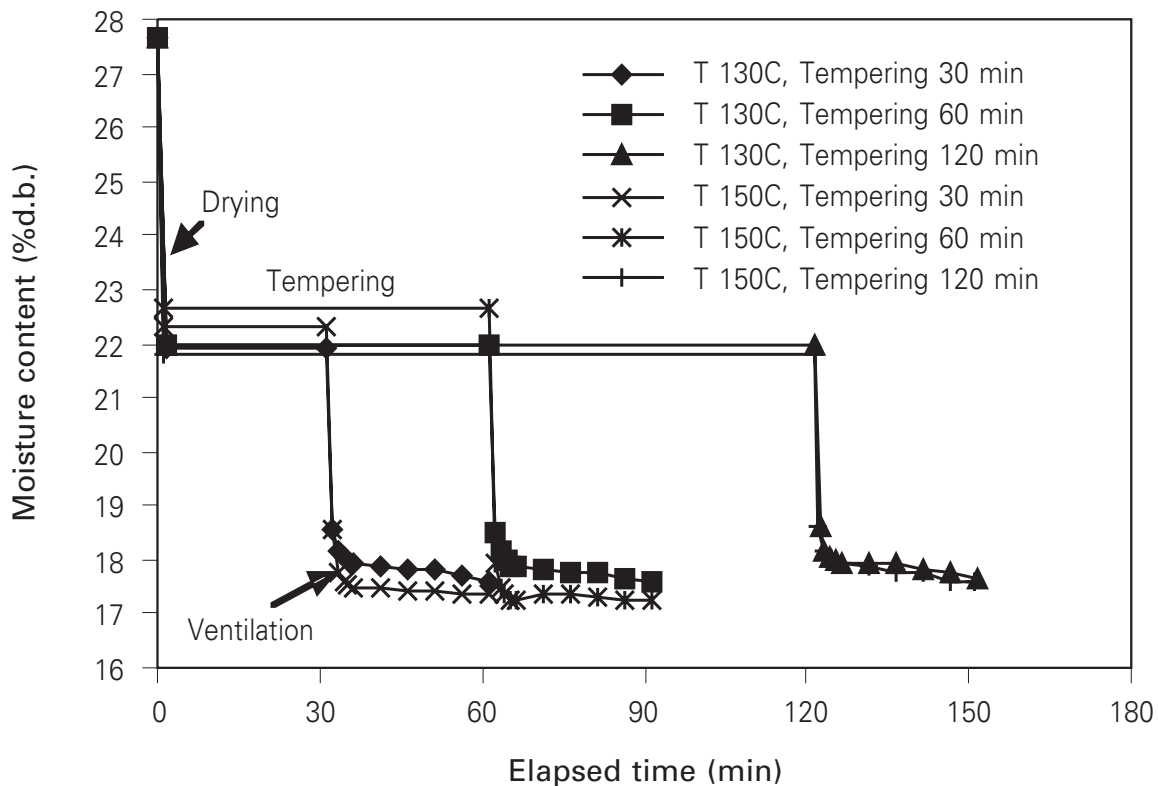


เปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงชันจะใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้นดังแสดงในรูปที่ ๔ และ ๕ และที่ความชื้นเริ่มต้นเดียวกันที่อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย จึงใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า

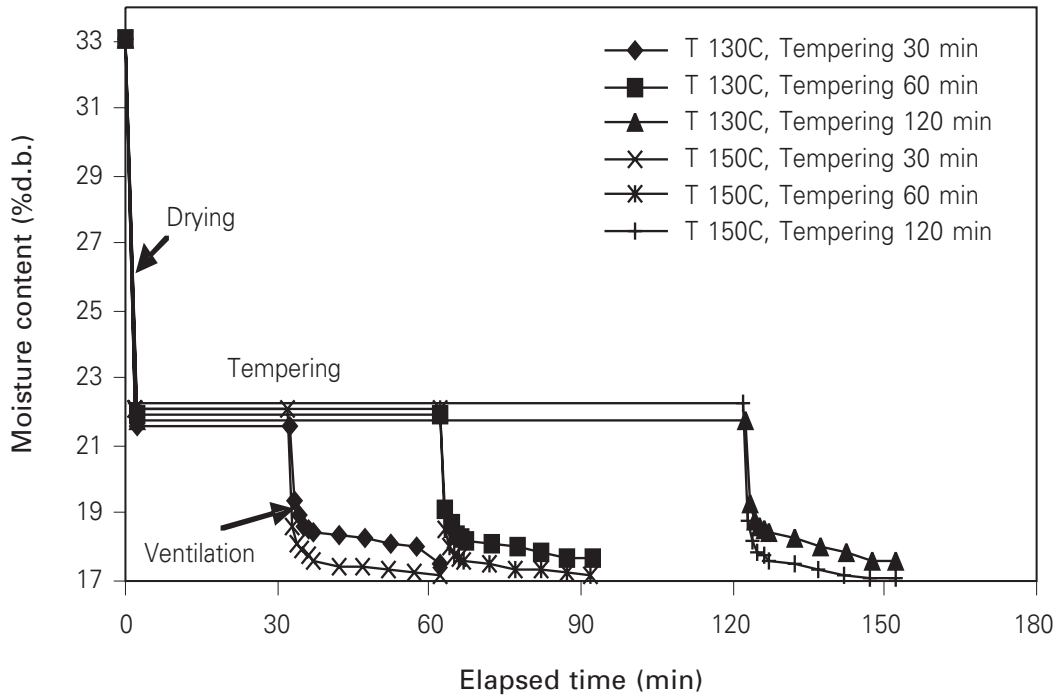
เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศต่อการลดลงของความชื้นในช่วงการเป่าลมเย็น

ในข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ ในรูปที่ ๒ พบว่า การเก็บในที่อับอากาศนานกว่า ๓๐ นาที ไม่ส่งผลต่อการลดลงของความชื้นในช่วงของการเป่าลมเย็นมากนัก ดังนั้น การเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา ๓๐ นาที ก็น่าจะเพียงพอ แต่เมื่อความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ ๓๓.๓ ดังรูปที่ ๓ ความชื้นที่ลดลงได้ในช่วงการเป่าลมเย็นหลังจากเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา ๓๐ นาที น้อยกว่าที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ แต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศเพิ่มขึ้นเป็น ๖๐

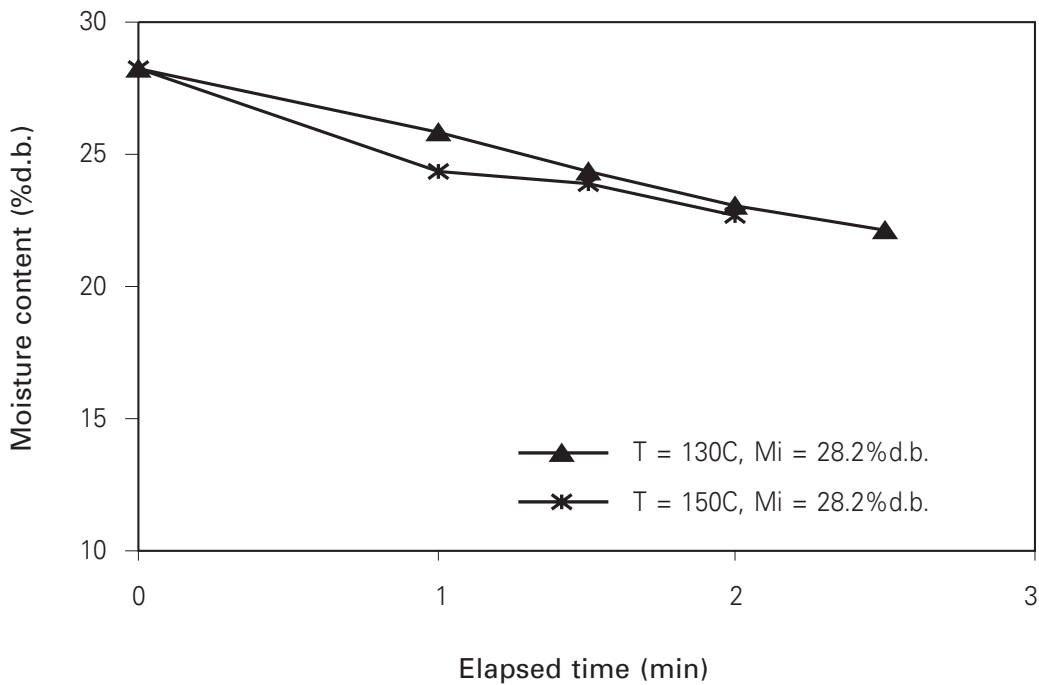
นาที จากนั้นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากกรณีดังกล่าวอาจเนื่องมาจากที่ความชื้นสูงนั้น หลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดาเซชัน ในช่วงแรกจะเกิดความแตกต่างของความชื้นระหว่างแกนกลางในเมล็ดกับที่ผิว อีกทั้งที่ความชื้นเริ่มต้นสูงเกิดเจลได้ดีกว่า จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการเก็บในที่อับอากาศนานขึ้น เพื่อให้ให้ความชื้นที่แกนกลางของเมล็ดแพร่มาที่ผิว ซึ่งระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ น่าจะเป็น ๖๐ นาที



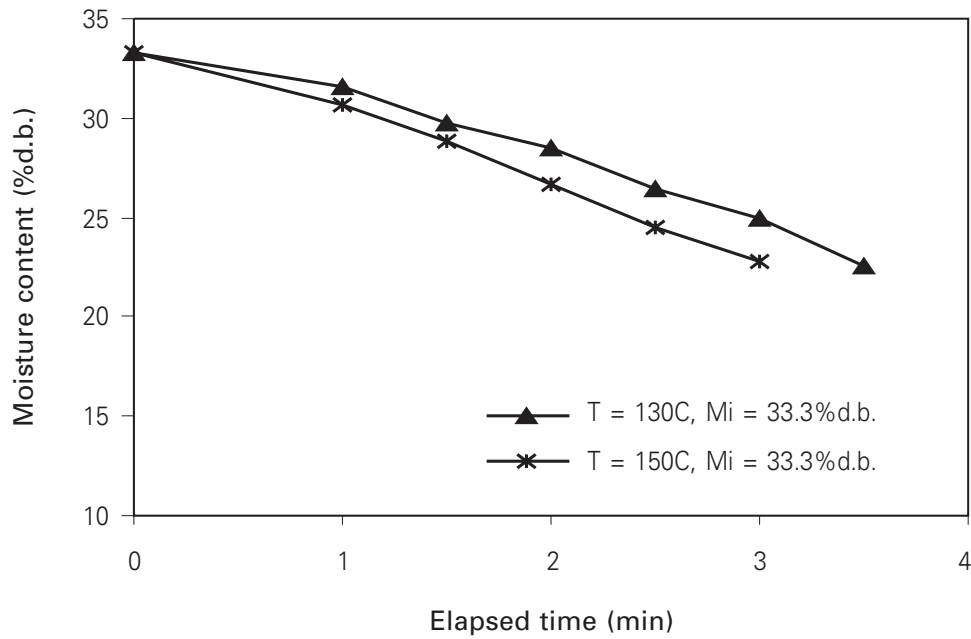
รูปที่ ๒ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกตามเวลา (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒)



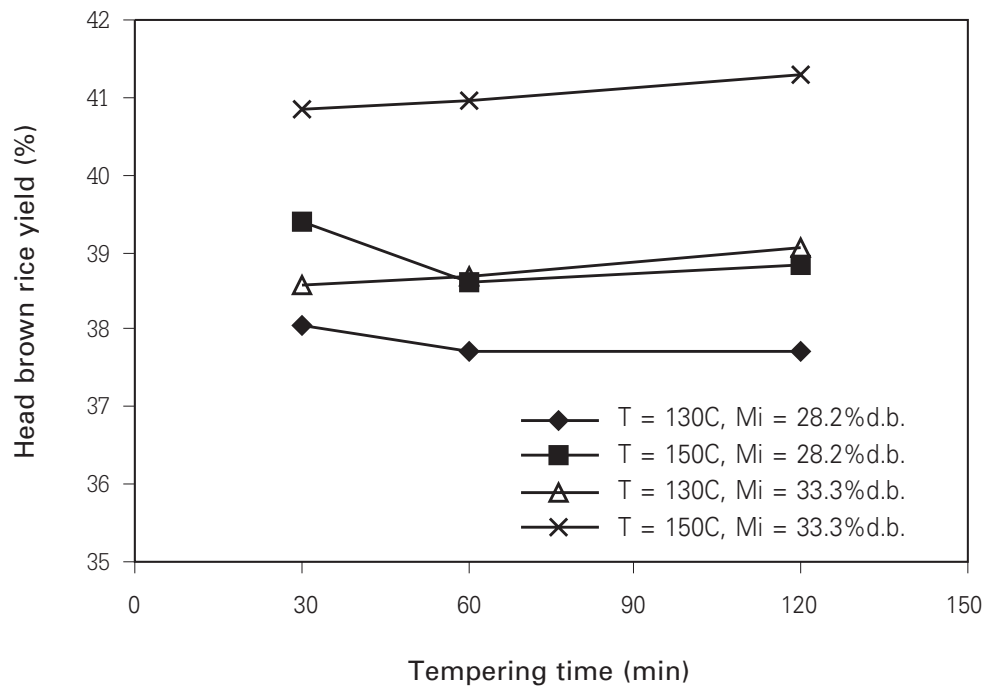
รูปที่ ๓ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกตามเวลา (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓)



รูปที่ ๔ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกตามเวลา ช่วงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดาเจชัน (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒)



รูปที่ ๕ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกตามเวลา ช่วงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓)



รูปที่ ๖ การเปลี่ยนแปลงของร้อยละต้นข้าวกล้องกับเวลาการเก็บในที่อบอากาศที่เสื่อแห้งต่าง ๆ (ร้อยละต้นข้าวของข้าวกล้องอ้างอิงที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ เท่ากับ ๔๑.๗ และ ๔๒.๑ ตามลำดับ)



๓.๒ ร้อยละต้นข้าวกล้อง

รูปที่ ๖ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกล้องกับระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศที่อุณหภูมิอบแห้ง ๑๓๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส และความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ มูลฐานแห้งจากผลการทดลองพบว่า ที่ความชื้นเริ่มต้นเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ร้อยละต้นข้าวกล้องจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ทั้งนี้ยังมีปริมาณที่ต่ำกว่าข้าวกล้องอ้างอิง ซึ่งร้อยละต้นข้าวกล้องที่เพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นนั้น เชื่อว่าน่าจะมาจากการเกิดเจล (gelatinization) ในเมล็ดข้าวเปลือก โดยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีอุณหภูมิของเมล็ดสูงกว่าจะเกิดเจลได้ดี ทำให้ได้ปริมาณต้นข้าวกล้องมากกว่า^๕ เนื่องจากเมื่อแป้งได้รับความร้อน ส่วนที่เป็นแอมิโลสจะละลายและดูดซับน้ำได้มาก ทำให้เกิดการพองตัวได้มากขึ้น โมเลกุลจะเข้ามาใกล้ชิดกันและยึดเข้าด้วยกันทำให้โครงสร้างโมเลกุลแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้รอยร้าวหรือรอยแตกภายในเมล็ดข้าวสามารถประสานกันอย่างสนิท^๖ แต่ในกรณีที่มีปริมาณต้นข้าวกล้องของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าปริมาณต้นข้าวกล้องของข้าวเปลือกที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง อาจจะเนื่องมาจากปริมาณความร้อนส่วนใหญ่ที่ใช้ในการระเหยน้ำ ถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิแก่ข้าวเปลือก ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อ

อุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งข้าวกล้องแล้ว แต่ความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกเหลืออยู่น้อยจึงส่งผลให้ระยะเวลาการเกิดเจลสั้น และในขณะที่อัตราการอบแห้งลดลง จึงเกิดความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยแตก ร้าวและหัก เมื่อนำไปสีจึงได้ร้อยละต้นข้าวกล้องลดลง สำหรับการเก็บในที่อับอากาศจะเห็นได้ว่าการเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลานานขึ้นไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของร้อยละต้นข้าวกล้อง ดังนั้น การเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา ๓๐ นาที จึงน่าจะเพียงพอ

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าให้ค่าร้อยละต้นข้าวกล้องสูงกว่า เนื่องจากข้าวเปลือกความชื้นสูงมีเวลาการอบแห้งนานกว่า ดังนั้น จึงมีผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อการเกิดเจลได้ดีกว่า

๓.๓ ความขาวของข้าวกล้อง

รูปที่ ๗ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวกับระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิ ความชื้นเริ่มต้น และระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศ มีผลต่อความขาวของข้าวกล้อง โดยที่ความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้น และการเก็บในที่อับอากาศเป็น

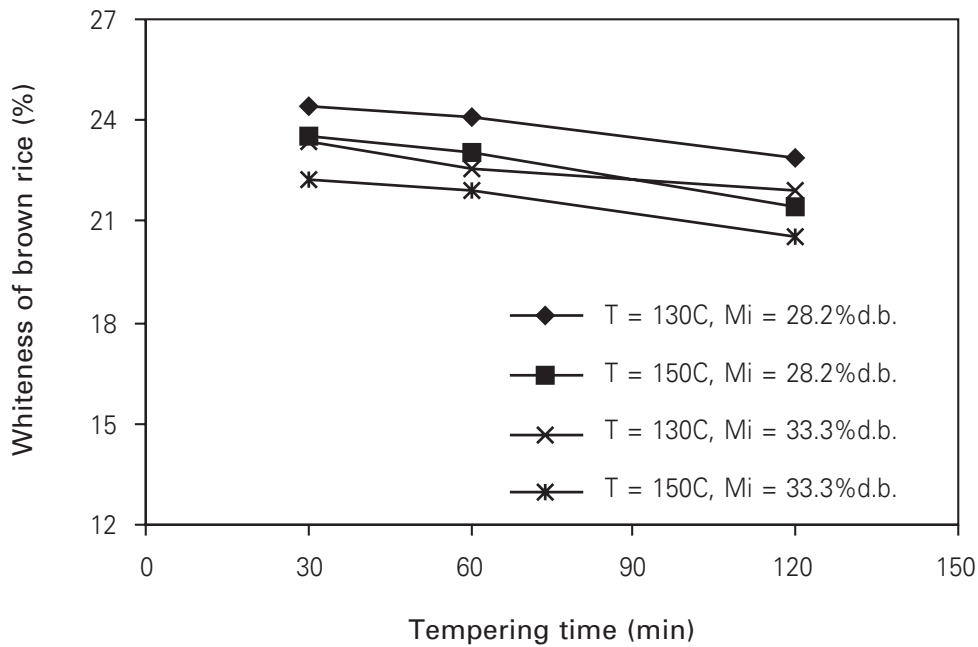
เวลานานขึ้น จะทำให้ข้าวกล้องมีสีเหลืองขึ้น และเมื่อเทียบกับข้าวกล้องอ้างอิง ข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีสีเหลืองกว่า ทั้งนี้ เชื่อว่าเนื่องมาจากกระบวนการเกิดสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อน้ำตาลที่มีอยู่ในข้าวกล้องได้รับความร้อน พันธะระหว่างโมเลกุลภายในน้ำตาลจะหลุดออกจากกันกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลต่ำ และเมื่อให้ความร้อนต่อไป พันธะภายในน้ำตาลโมเลกุลต่ำจะหลุดออกจากกัน เกิดเป็นสารประกอบคีโตน ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารที่ทำให้เกิดสีเหลืองในเมล็ดข้าวกล้อง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ข้าวมีค่าความขาวลดต่ำลง

๓.๔ จมูกข้าวกล้อง

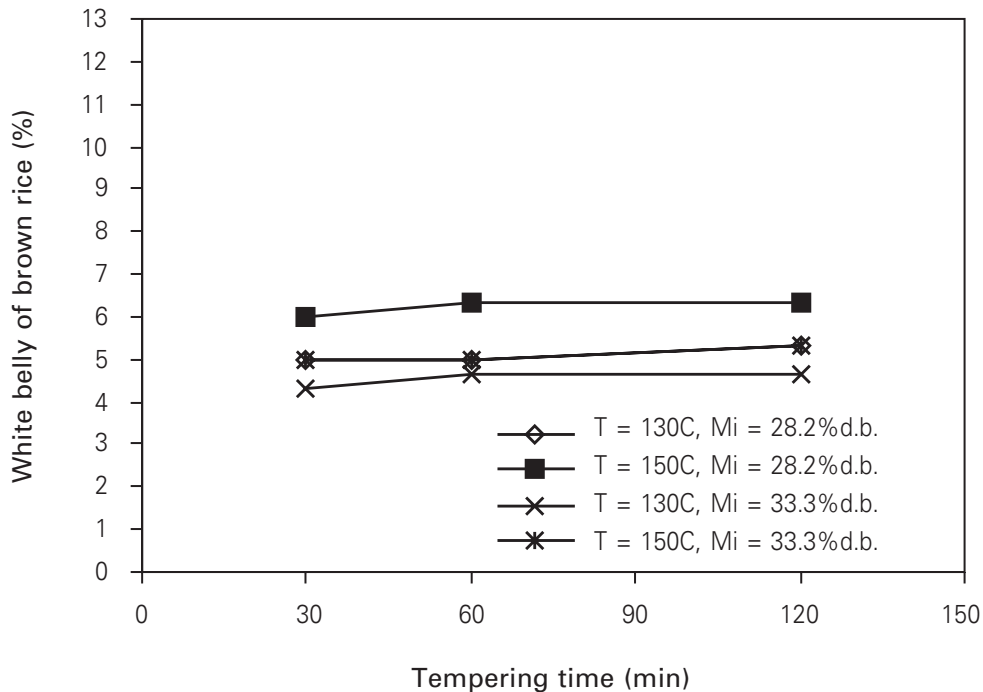
จมูกข้าวกล้อง (brown rice germ) เป็นส่วนเล็ก ๆ อยู่ที่มุมล่างของเมล็ดข้าว จากการนำข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ ๑๐๕ ที่ผ่านการอบแห้ง ไปกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกของ Satake พบว่าอุณหภูมิอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศ ไม่มีผลต่อร้อยละของจมูกข้าวกล้อง ทั้งนี้ จะเห็นได้จากปริมาณของจมูกข้าวกล้องยังคงเหลืออยู่ครบถ้วนร้อยละ ๑๐๐ ทุกกรณี ซึ่งมีค่าเท่ากับข้าวกล้องอ้างอิง

๓.๕ ร้อยละข้าวท้องไข่ของข้าวกล้อง

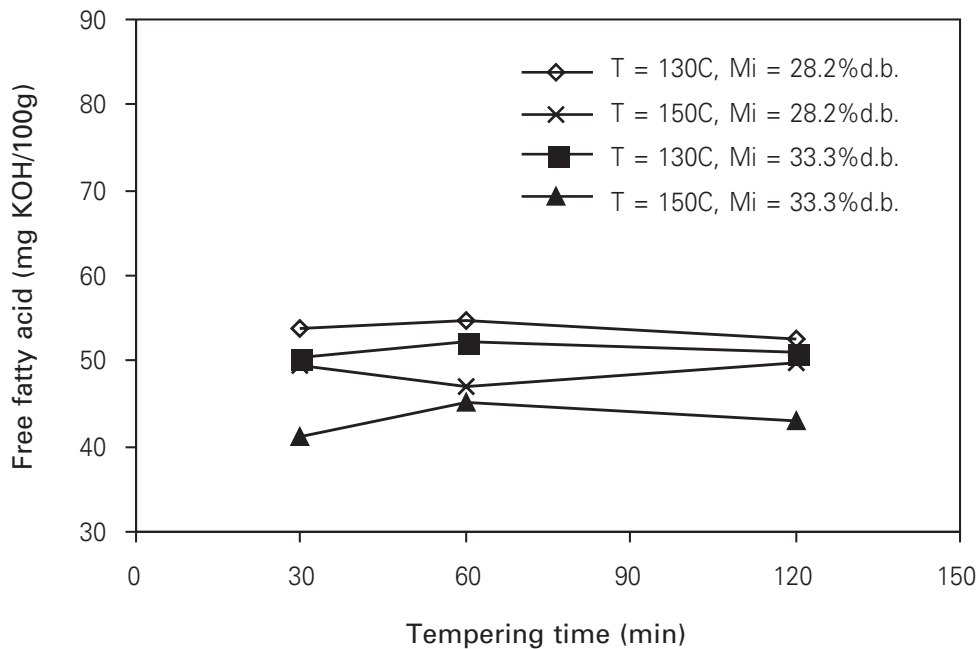
ข้าวท้องไข่ (white belly) เป็นลักษณะของข้าวที่มีจุดขุนขาวทึบแสง ซึ่งเป็นส่วนที่กลุ่มแป้งและ



รูปที่ ๗ การเปลี่ยนแปลงความขาวของข้าวกล้องกับเวลาการเก็บในที่อับอากาศที่เงื่อนไขต่าง ๆ (ร้อยละความขาวของข้าวกล้องอ้างอิงที่ความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ เท่ากับ ๒๕ และ ๒๓.๘ ตามลำดับ)



รูปที่ ๘ การเปลี่ยนแปลงปริมาณข้าวท้องไข้ของข้าวกล้องกับเวลาการเก็บในที่อับอากาศที่เงื่อนไขต่าง ๆ (ร้อยละของข้าวท้องไข้อ้างอิงที่ความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ เท่ากับ ๙.๖)



รูปที่ ๙ การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันอิสระกับเวลา การเก็บในที่อับอากาศที่เงื่อนไขต่าง ๆ (ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอ้างอิงที่ความชื้น เริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ เท่ากับ ๗๙.๙ มิลลิกรัม KOH/100 กรัม และ ๘๓.๒ มิลลิกรัม KOH/100 กรัม ตามลำดับ)

โปรตีนมีการเกาะตัวกันอย่างหลวม ๆ จึงมีส่วนที่เป็นช่องว่างอยู่มากภายในช่องว่างนี้จะมีอากาศแทรกอยู่ ซึ่งจะยังคงอยู่เมื่อข้าวเกิดเจลไม่สมบูรณ์ทั่วทั้งเมล็ด จากรูปที่ ๘ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละข้าวท้องไข้อย่างน้อยของข้าวกล้องกับระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บในที่อับอากาศ จะเห็นว่าข้าวท้องไข้อย่างน้อยที่ผ่านการอบแห้งมีปริมาณข้าวท้องไข้อย่างน้อยต่ำกว่าข้าวท้องไข้อย่างน้อยโดยข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน ปริมาณข้าวท้องไข้อย่างน้อยจะลดลงเมื่อความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้นจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น ส่งผลให้เกิดเจลเพิ่มขึ้น แต่ยังคงเป็นการเกิดเจล

เพียงบางส่วน เพราะการเกิดเจลที่สมบูรณ์จะพบปริมาณข้าวท้องไข้อย่างน้อยมาก หรือไม่พบเลย ในขณะที่เวลาในการเก็บในที่อับอากาศมีผลต่อปริมาณการลดลงของข้าวท้องไข้อย่างน้อย

๓.๖ ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นสาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งของการเกิดกลิ่นเหม็นหืนของข้าวกล้อง^{๑๐} จากการทดลองอบแห้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ ๑๐๕ ด้วยเทคนิคฟลูอิด-เซชัน ที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ และ ๓๓.๓ มวลฐานแห้ง โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง ๑๓๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ปริมาณกรดไขมัน

อิสระทั้งหมดในข้าวกล้องจะลดลง และเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิงซึ่งไม่ได้ผ่านการอบแห้ง จะเห็นได้ว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระในข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งมีค่าต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ ๙ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในระหว่างกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้ ข้อดีของการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงยังสามารถหยุดยั้งการทำงานของเอนไซม์ไลเปส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เปลี่ยนไขมันในรำข้าวให้กลายเป็นกรดไขมันอิสระ^{๑๑} ได้อีกด้วย ในขณะที่เมื่อเก็บในที่อับอากาศนานขึ้น ปริมาณกรดไขมันอิสระเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้ น่าจะมาจากการทำงานของเอนไซม์ไลเปสถูกยับยั้ง



การทำงานเกือบทั้งหมดจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ ๑๓๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส

๓.๗ สมบัติทางด้านความหนืด

จากการศึกษาความหนืดของน้ำแป้งจากข้าวกล้องโดยเครื่อง RVA ของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน พบว่าอุณหภูมิที่เม็ดแป้งเริ่มพองตัว (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และความหนืดสุดท้าย (final viscosity) แตกต่างกัน ดังตารางที่ ๑ การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน ร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม มีผลทำให้อุณหภูมิที่เม็ดแป้งเริ่มพองตัวสูงขึ้น เมื่อเทียบกับข้าวกล้องอ้างอิง (ข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง) ทุกเงื่อนไข การทดลอง ทั้งนี้ เชื่อว่าการเกิดเจลบางส่วนมีส่วนขัดขวางการดูดซับของน้ำเข้าสู่เม็ดแป้ง ดังนั้น อุณหภูมิที่เม็ดแป้งต้องใช้ในการพองตัวอีกครั้งจึงสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บในที่อับอากาศ พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในเกือบทุกกรณี

ความหนืดสูงสุดเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการพองตัวของแป้งเมื่อสุก จากตารางที่ ๑ จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศนานขึ้น ค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในเกือบทุกกรณี นั่นแสดงว่าความ

สามารถในการดูดซับน้ำของเม็ดแป้งข้าวกล้องไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ความหนืดสุดท้ายที่เกิดขึ้นคือความหนืดเมื่อน้ำแป้งถูกทำให้เย็นหลังการเกิดเจล ส่วนของแอมิโลส จะเกิดโครงสร้างขึ้นใหม่ในลักษณะโครงสร้างสามมิติ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เจลแข็งขึ้น ความหนืดของน้ำแป้งที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งเรียกว่า การคืนตัวของน้ำแป้งสุก (retrogradation)^๕ จากตารางที่ ๑ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นเดียวกัน ข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันและเก็บในที่อับอากาศ จะมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงกว่าข้าวอ้างอิงในทุกกรณี แสดงให้เห็นว่า ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน มีผลต่อการคืนตัวของน้ำแป้งสุกดีกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง อาจเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งในข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน มีการจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งของข้าวในระหว่างการคืนตัวของน้ำแป้งสุกดีกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง^{๑๐}

ค่า setback เป็นผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด จากตารางที่ ๑ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นเดียวกัน เมื่อเก็บในที่อับอากาศนานขึ้น ค่า setback ที่ได้จะเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าข้าวอ้างอิง ทั้งนี้เชื่อว่าน่าจะมาจากการเกิดเจลของแป้ง ซึ่งอาจจะส่งผลให้คุณภาพข้าวที่ได้

แข็งกระด้างมากขึ้น เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา^{๑๒} กล่าวว่า เมื่อเก็บรักษาข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ ๑๐๕ เป็นเวลานานขึ้น ค่า setback ที่ได้จะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการปรับสภาพการละลายและการเกิดเจลของแป้งและโปรตีนในเมล็ดที่ผ่านการเก็บรักษาให้กลายเป็นสารที่คงตัวขึ้น และละลายน้ำได้น้อยลง มีผลให้เมล็ดข้าวแข็งขึ้นเมื่อนำข้าวสารที่เก็บรักษาไว้ระยะหนึ่งมาหุงต้ม

๓.๘ อัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้อง

จากผลการทดลองในตารางที่ ๒ แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยของข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องอ้างอิงซึ่งไม่ได้ผ่านการอบแห้ง โดยการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ ด้วยอุณหภูมิอบแห้ง ๑๕๐ องศาเซลเซียส และเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา ๑๒๐ นาที จะให้ค่า k ต่ำที่สุด เท่ากับ ๐.๑๐๘ ในขณะที่ค่า k ของข้าวกล้องอ้างอิงเท่ากับ ๐.๑๙๙ แสดงว่ากระบวนการย่อยของเอนไซม์อาจจะถูกขัดขวางการทำงาน ทำให้ย่อยได้ช้าลง ทั้งนี้ น่าจะมาจากการที่ข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน ที่ใช้อุณหภูมิอากาศร้อนสูงเกิดสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิพิด ทำให้ไปขัดขวางกระบวนการย่อยของเอนไซม์^{๑๒} นอกจากนี้ยังพบว่าการเก็บในที่อับอากาศเป็น



ตารางที่ ๑ สมบัติด้านความหนืดของน้ำแป้งจากข้าวกล้องหอมมะลิที่เงื่อนไขต่าง ๆ

Drying Processes	PV (RVU)	FV (RVU)	SB (RVU)	PT (°C)
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๓๐ นาที	303.11 ± 7.5 ^{de}	334.64 ± 20.7 ^{bcdef}	31.53 ± 14.4 ^b	81.58 ± 1.3 ^c
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๖๐ นาที	279.14 ± 22.7 ^{cde}	331.74 ± 22.9 ^{bcdef}	52.60 ± 0.6 ^{cd}	81.85 ± 0.4 ^{cd}
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๑๒๐ นาที	242.68 ± 6.7 ^{bc}	308.85 ± 9.3 ^{abcde}	66.17 ± 2.7 ^{cdef}	83.26 ± 0.5 ^{ef}
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๓๐ นาที	318.96 ± 51.7 ^{de}	370.09 ± 54.2 ^f	51.12 ± 2.5 ^c	82.46 ± 0.2 ^{cdef}
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๖๐ นาที	302.11 ± 5 ^{bc}	374.60 ± 7.1 ^{abcdef}	72.49 ± 2.2 ^{def}	82.95 ± 0.7 ^{def}
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๑๒๐ นาที	298.61 ± 69.5 ^{de}	385.31 ± 71.5 ^{ef}	86.70 ± 2.1 ^{cdef}	83.46 ± 0.3 ^b
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๓๐ นาที	265.00 ± 4.7 ^{bcde}	330.59 ± 5.3 ^{bcdef}	65.59 ± 0.6 ^{cde}	82.80 ± 1 ^{def}
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๖๐ นาที	259.62 ± 36.1 ^{bcd}	340.26 ± 27.3 ^{cdef}	80.63 ± 9.2 ^{efg}	83.13 ± 0.2 ^{ef}
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๑๒๐ นาที	284.16 ± 9.2 ^a	380.56 ± 12 ^{abc}	96.40 ± 13.1 ^g	83.46 ± 0.8 ^f
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๓๐ นาที	299.04 ± 26.5 ^{de}	357.79 ± 34 ^{def}	58.75 ± 7.7 ^{cd}	82.11 ± 0.2 ^{cde}
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๖๐ นาที	288.15 ± 24.6 ^{ab}	350.19 ± 20.2 ^{abcd}	69.04 ± 8.1 ^g	82.51 ± 0.5 ^{cdef}



Drying Processes	PV (RVU)	FV (RVU)	SB (RVU)	PT (°C)
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๑๒๐ นาที	289.92 ± 30.5 ^{bcd}	360.80 ± 34.6 ^{bcd^{ef}}	70.88 ± 4.2 ^{cdef}	84.63 ± 0.1 ^g
ข้าวกล้องอ้างอิงที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๒๘.๒ มูลฐานแห้ง	279.26 ± 1.7 ^{cde}	257.23 ± 1.2 ^a	(-22.03) ± 0.5 ^a	78.10 ± 0.3 ^a
ข้าวกล้องอ้างอิงที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง	281.73 ± 2.4 ^{cde}	261.62 ± 1.5 ^a	(-27.10) ± 1.6 ^a	77.61 ± 0.1 ^a

อักษรเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

เวลานานขึ้น จะส่งผลให้อัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้องลดลง เนื่องจากสารเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิพิดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่าของ hydrolysis index (HI) ที่ลดลง แม้ว่าค่า glycemic index (GI) ที่ได้จากการทดลองจะอยู่ในระดับการย่อยปานกลาง คืออยู่ระหว่าง ๕๕ ถึง ๗๐ เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน^{๑๓} แต่ น่าจะเป็นประโยชน์แก่สุขภาพสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานได้มากกว่าเมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ดังเช่นที่การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ ด้วยอุณหภูมิอบแห้ง ๑๕๐ องศาเซลเซียส และเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา ๑๒๐ นาที จะให้ค่า GI เท่ากับ ๕๙.๙

๔. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิ (พันธุ์ขาวดอกมะลิ ๑๐๕) ด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วม

กับการเก็บในที่อับอากาศ และเป่าด้วยอากาศแวดล้อม พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นของข้าวเปลือกมากที่สุดคือ อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งเพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้นลง ทั้งนี้ การเก็บในที่อับอากาศ (tempering) เป็นเวลานานขึ้น ไม่ส่งผลให้คุณภาพของข้าวกล้องทางด้าน ร้อยละต้นข้าว (head rice yield) ปริมาณจมูกข้าว (rice germ) ปริมาณข้าวท้องไข (white belly) และปริมาณกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่การเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลานานขึ้น ทำให้ความขาวของข้าวกล้อง (whiteness) ลดลง ดังนั้น การเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลา ๓๐ นาที จึงเพียงพอ จากผลการทดสอบคุณภาพทางด้านปริมาณกรดไขมันอิสระ พบว่า การใช้อุณหภูมิสูงสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยที่ปริมาณจมูกข้าวหลังจากผ่าน

กระบวนการสี ยังมีอยู่ครบร้อยละ ๑๐๐ และจากผลการทดสอบความหนืดของน้ำแป้ง พบว่า ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่า setback จะเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลาสั้น ส่วนการวัดอัตราการย่อยของแป้งข้าวกล้อง พบว่า จะลดลงเมื่อความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง และระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศเพิ่มขึ้น

การอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ ด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันที่อุณหภูมิ ๑๓๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส และเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา ๑๒๐ นาที น่าจะเหมาะสมในการผลิตเป็นข้าวกล้องหอมมะลิคุณภาพสูง โดยเฉพาะข้าวสุขภาพ เนื่องจากมีอัตราการย่อย และปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำ รวมทั้งคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ตารางที่ ๒ แสดงค่าอัตราการย่อยของแป้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ

Drying Processes	C_{∞} (%)	k (min^{-1})	HI	GI
ข้าวกล้องอ้างอิง ความชื้นเริ่มต้น ๓๓.๓% d.b.	31.8 ± 0.015	0.199 ± 0.0013	47.2 ± 0.002	70.3 ± 0.0009^f
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๓๐ นาที	29.3 ± 0.015	0.139 ± 0.0006	43.5 ± 0.021	63.6 ± 0.0115^e
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๖๐ นาที	28.1 ± 0.015	0.131 ± 0.0020	41.7 ± 0.019	62.9 ± 0.0103^d
อุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๑๒๐ นาที	27.9 ± 0.021	0.130 ± 0.0023	41.2 ± 0.002	62.6 ± 0.0010^d
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๓๐ นาที	26.3 ± 0.026	0.120 ± 0.0004	38.8 ± 0.046	61.0 ± 0.0253^c
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๖๐ นาที	25.3 ± 0.031	0.118 ± 0.0079	38.2 ± 0.003	60.7 ± 0.0017^b
อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๓.๓ มูลฐานแห้ง เก็บในที่อับอากาศ ๑๒๐ นาที	24.8 ± 0.015	0.108 ± 0.0019	36.8 ± 0.050	59.9 ± 0.0277^a

อักขระเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



๕. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพ.

เอกสารอ้างอิง

1. Rice Quality Categories [Online], Available: <http://www.ars.usda.gov/research/docs.html?docid=7060> [2005, September 29].
2. Health Benefits & Concerns for Rice [Online], Available: <http://www.healthnotes.com> [2005, September 29].
3. Champagne E. Brown rice stabilization, Rice Science and Technology. New York: Pub. Marcel Dekker Inc. 1994.
4. Soponronnarit S, Wetchacama S, Swasdisevi T and Poomsa-ad N. Managing moist paddy by drying, tempering and ambient air ventilation. Drying Technology, 1999; 17(1&2): 335-344.
5. Juliano BO. Rice: Chemical and Technology. 2nd ed. Pub. American Association of Cereal Chemists Inc., Minnesota, 1985.
6. AACC. Approved methods of analysis. Pub. American Association of Cereal Chemists Inc., St Paul, MN, 1980.
7. Goni I, Garcia-Alonso A and Saura-Calixto F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. Nutrition Research 1997; 17: 427-437.
8. ณัฐพล ภูมิสะอาด. การจัดการข้าวเปลือกชื้นโดยการอบแห้งแบบเทคนิคฟลูอิดิเซชัน การเก็บในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี; ๒๕๔๐. หน้า ๓๖-๔๒.
9. จารนัย พานิชยกุล. แป้ง (starch) - การเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำให้แป้งสุก. วารสารจารย์พา ๒๕๓๗; ๑๑: ๒๒-๒๔.
10. Rice [Online], Available : <http://wolton-feed.com/self/rice.html> [2005, September 29].
11. Hoover R, Sailaja Y and Sosulski FW. Characterization of starches from wild and long grain brown rice. Food Research International 1996; 29(27): 99-107.
12. Holm J, Bjorck I, Ostrowska S, Eliasson AC, ASP NG, Larsson K, and Lundquist I. Digestibility of amylose-lipid complexes in-vitro and in-vivo. Starch/Staerke 1983; 35: 294-297.
13. Miller JB, Pang E and Bramall L. Rice: a high or low glycemic index food. American Journal of Clinical Nutrition 1992; 56: 1034-1036.



Abstract **Producing Healthy Jasmine Brown Rice Using Combined Techniques of Fluidization and Tempering**

Donludee Jaisut

School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Prachautid, Tungkru, Bangkok 10140

Somkiat Prachayawarakorn

Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Prachautid, Tungkur, Bangkok 10140

Warunee Varayanond

Patcharee Tungtrakul

Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, 50 Phahonyotin, Lad Yao, Jatujak, Bangkok 10903

Somchart Soponronnarit

Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand; School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Prachautid, Tungkru, Bangkok 10140

Although, Jasmine brown rice (Khao Dawk Mali 105) is a favor consuming healthy product in Thailand but it has a short shelf life due to rancidity. Also, having Jasmine brown rice could result to rapid increase of blood sugar and insulin levels after ingestion due to fast absorption of carbohydrate and risk of type 2 diabetes. Therefore, the purpose of this research is to reduce brown rice rancid and starch hydrolysis rate of brown rice whereas the other qualities of brown rice which are head rice yield, whiteness, rice germ, white belly and pasting properties of brown rice flour, still accepted. Fluidized bed drying was used to reduce moisture content of paddy cv. Khao Dawk Mali 105 from 28.2% dry basis and 33.3% dry basis to 21.9% dry basis. After that, grain was tempered and ventilated with ambient air to reduce moisture content to 16.5% dry basis. The operating conditions used in the experiments were the drying temperatures of 130 and 150 °C and the tempering times of 30, 60 and 120 min. The results showed that the average drying rate and head brown rice yield were increased with increasing of fluidized bed drying temperature and initial moisture content whereas the whiteness and the fat acidity of brown rice were decreased. However, the white belly was slightly different. Regarding to the head rice yield and the rate of moisture reduction during ventilation, paddy which contained initial moisture of 28.2% dry basis, after fluidized bed drying should be tempered for 30 min and tempered for 60 min in the case of initial moisture content of 33.3% dry basis. Further, peak viscosity of brown rice paste was slightly changed but final viscosity and setback were increased as tempering time increased. Starch hydrolysis of brown rice was reduced as initial moisture content, drying temperature and tempering time increased.

Key words: brown rice, drying, fat acidity, fluidized bed, paddy, rancidity, starch hydrolysis