

Research Article

การประยุกต์ใช้ความร้อนแฝงของการควบแน่นสำหรับการลด
การก่อตัวของกรดไขมันอิสระในข้าวกล้องโดยเครื่องอบแห้งแบบ
ฟลูอิดไดซ์เบดด้วยอากาศร้อนชื้น

**Applying latent heat of condensation for deceleration of free
fatty acid formation in brown rice by humidified hot air
fluidized bed dryer**

นิตยา จันกา^{1*}, เฉลิมชัย วงษ์อารี^{2,3} และ ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล⁴

Nittaya Junka^{1*}, Chalermchai Wongs-Aree^{2,3} and Chaiwat Rattanamechaiskul⁴

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

¹Division of Crop Production Technology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand

²หลักสูตรเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วิทยาเขตบางขุนเทียน เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150

²Postharvest Technology Program, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University Technology Thonburi, Bangkhuntian Campus, Bang Khun Thian, Bangkok 10150, Thailand

³ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

³Postharvest Technology Innovation Center, Commission on Higher Education, Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160

⁴Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Pathiu, Chumphon 86160, Thailand

*E-mail: nittaya.jun@gmail.com

Received: 29/08/2018; Accepted: 06/11/2018

บทคัดย่อ

ความร้อนแฝงของการควบแน่นเป็นการปลดปล่อยพลังงาน เมื่อไอน้ำสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิจุดน้ำค้างของตัวกลางอบแห้ง ระหว่างการควบแน่นวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจากการเปลี่ยนเฟสของไอน้ำจะ ดูดซับพลังงานความร้อนในระบบ ผลที่ตามมา คือ อุณหภูมิของวัตถุนั้นจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิจุด น้ำค้างของอากาศร้อนขึ้น งานวิจัยนี้จึงนำประโยชน์จากพลังงานในการควบแน่นมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการ อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน เพื่อลดกลิ่นเหม็นหืนของข้าวกล้องซึ่งมีสาเหตุจากการแยกสลายลิพิดด้วยน้ำใน ไร่ข้าวกลายเป็นกรดไขมันอิสระโดยเอนไซม์ลิเพสในระหว่างการเก็บรักษา โดยการอบแห้งข้าวเปลือกหลังการเก็บ เกี่ยวที่มีความชื้น 33.3 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ด้วยอากาศร้อนขึ้นหรือไอน้ำจากหม้อต้มไอน้ำไฟฟ้าและฉีดเข้าสู่ ระบบ ผสมกับอากาศร้อนในห้องอบแห้ง โดยปรับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนอยู่ในช่วง 100-150 องศาเซลเซียสและ 1-30 เปอร์เซ็นต์ ผลของจลนศาสตร์การอบแห้งแสดงให้เห็นว่า การควบแน่นเกิดขึ้นในช่วงแรก ของกระบวนการให้ความร้อนจากการที่อุณหภูมิของข้าวเปลือกต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศร้อนขึ้น ระหว่าง การควบแน่นอุณหภูมิของเมล็ดข้าวจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ การควบแน่นระหว่างการอบแห้งทำให้กรดไขมันอิสระของข้าวกล้อง ที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 6 เดือน (ทำการวิเคราะห์ทุกเดือน) ลดลง เมื่อ เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

คำสำคัญ: การควบแน่น, อากาศร้อนขึ้น, ฟลูอิดไอเซชัน

Abstract

Latent heat of condensation is an energy-releasing reaction when water vapor comes in contact with the surface of an object containing temperature lower than the dew point or saturation temperature of a drying media. During the condensation, the thermal energy in the system is suddenly absorbed by the lower temperature object in order to make the phase change. Subsequently, the object temperature rapidly increases to the mentioned temperature of the drying media. In this research work, the energy-releasing property from condensation was applied to paddy during fluidizing process to prevent the rancidity, caused by hydrolysis process of lipids in rice bran by lipase enzyme into free fatty acid (FFA), of the brown rice during storage. Paddy with post harvested moisture content of 33.3% dry basis was dried out in various conditions under humidified hot air (HHA) condition generated of saturated water vapor by electrical boiler. The hot water vapor was injected into drying systems of fluidized bed dryer to blend with the hot air (HA) which was set in different drying temperature of 100-150°C and 1-30% of relative humidity (RH). The drying kinetic result revealed that the condensing reaction occurred at the initial stages of drying process

when the paddy temperature was lower than the dew point temperature of HHA media. During the condensation process carried on, the grain temperature rapidly increased to the higher level than that under the normal drying process with HA. Its increase, moreover, was depended on increasing RH of the HA. The occurrence of condensation resulted in better deceleration of FFA content of the brown rice compared to drying by HA during storage for 6 months (analyzed every month).

Keywords: condensation, humidified hot air, fluidization

บทนำ

กลิ่นเหม็นหืนในข้าวกล้องที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลานานมีสาเหตุมาจากการแยกสลายลิพิดด้วยน้ำ (hydrolysis of lipid) ในรำข้าวกลายเป็นกรดไขมันอิสระโดยเอนไซม์ลิเพส (lipase) (Cepková et al., 2014; Qu et al., 2016; Chen et al., 2017; Wang et al., 2018) กลิ่นเหม็นหืนเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการกำหนดราคาข้าว เนื่องจากกลิ่นดังกล่าวไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค แม้ว่ามีงานวิจัยได้รายงานการลดการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ลิเพสโดยการควบคุมอุณหภูมิการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้การก่อตัวของกรดไขมันอิสระมีค่าลดลงระหว่างการเก็บรักษา (Ramezanzadeh et al., 1999) แต่วิธีการดังกล่าวอาจไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ หากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างห้องควบคุมอุณหภูมิและค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานในกรณีที่ต้องการเก็บรักษาข้าวปริมาณมากและมีระยะเวลานานหลายเดือน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการทางความร้อนสามารถชะลอการทำงานของเอนไซม์ลิเพสได้ (Keying et al., 2009; Loypimai et al., 2009; Tran and Chang, 2014; Xu et al., 2016) กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันแบบอากาศร้อนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาการเกิดกลิ่นเหม็นหืนในข้าวได้ เนื่องจากวิธีการอบแห้งดังกล่าวสามารถใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ในการอบแห้ง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคนิคฟลูอิดไอเซชันสามารถยับยั้งเอนไซม์ลิเพส ส่งผลให้ข้าวกล้องที่มีลิพิดเป็นส่วนประกอบหลักในชั้นรำนั้นเกิดกรดไขมันอิสระระหว่างการเก็บรักษาลดลง (Jaisut et al., 2009) นอกจากการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งแล้ว เทคนิคนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้อากาศร้อนขึ้นในการอบแห้งได้อีกทางหนึ่ง อากาศร้อนขึ้นเกิดจากการที่มีไอน้ำอิ่มตัวถูกฉีดเข้าไปในระบบผสมกับอากาศร้อนภายในห้องอบแห้ง กลายเป็นอากาศร้อนขึ้น ความพิเศษของอากาศร้อนขึ้นคือมีการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้นในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง จากการที่อุณหภูมิของเมล็ดข้าวมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) เมื่อมีการควบแน่นเกิดขึ้นไอน้ำจะคายพลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนเฟสสู่เมล็ดข้าว ทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ระยะเวลาและอุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน (Rattana-

mechaikul et al., 2013) จากข้อมูลดังกล่าวการใช้อากาศร้อนขึ้นจึงน่าจะประหยัดพลังงานได้ดีกว่าการใช้อากาศร้อน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษารวดการก่อตัวของกรดไขมันอิสระ ของข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซนแบบอากาศร้อนเปรียบเทียบกับอากาศร้อนขึ้น ภายหลังการทดสอบข้อมูลจลนศาสตร์การอบแห้งรวมทั้งปริมาณกรดไขมันอิสระในระหว่างการเก็บรักษาจะถูกทำการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมในการควบคุมการก่อตัวของกรดไขมันอิสระของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษา

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

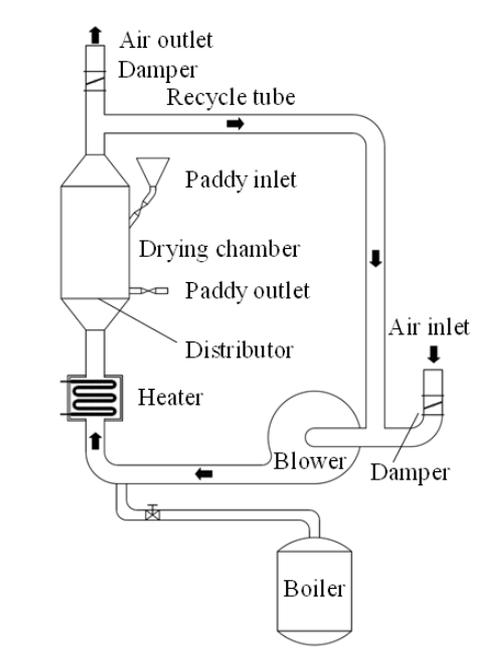
วัสดุ

ข้าวเปลือกสายพันธุ์ปทุมธานี 80 จากแปลงเพาะปลูกเดียวกัน ควบคุมการปลูกโดยผู้เชี่ยวชาญจากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ประเทศไทย ข้าวเปลือกมีความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวที่ 33.3 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

วิธีการอบแห้ง

ทำการอบแห้งตัวอย่างด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไอซ์เบด ซึ่งระบบประกอบไปด้วยหม้อต้มไอน้ำ (boiler) ไฟฟ้า ขนาด 21 กิโลวัตต์ สำหรับผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มความชื้นให้อากาศร้อน ฮีตเตอร์ขนาด 12 กิโลวัตต์ ควบคุมอุณหภูมิโดย PID controller ความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียส ห้องอบแห้งสเตนเลสทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร พัดลมแบบใบพัดโค้งหลังทำงานด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยอากาศแวดล้อมไหลผ่านท่อขาเข้าโดยพัดลม (blower) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยขดลวดความร้อน (heater) จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการและถูกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80 เปอร์เซ็นต์ เพื่อการประหยัดพลังงาน ไอน้ำที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วถูกส่งเข้าระบบ จากนั้นเปิดเครื่องอบแห้งพร้อมทั้งเวียนอากาศกลับก่อนการทดสอบในกรณีของอากาศร้อนขึ้นประมาณ 30 นาที เพื่อรักษาความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ระดับคงที่ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิความละเอียด ± 1.0 เปอร์เซ็นต์และ ± 0.2 องศาเซลเซียส (VAISALA model MI 70, Vantaa, Finland) อุณหภูมิอบแห้งที่ให้อยู่ในช่วง 100-150 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนมีค่า 1-3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนของอากาศร้อนขึ้นมีค่า 6-31 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วอากาศ 2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอซ์เซชันที่ 3.0 เมตรต่อวินาที ความสูงเบด 10 เซนติเมตร ในระหว่างการอบแห้งตัวอย่างข้าวเปลือกจะถูกนำออกจากห้องอบแห้งที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อตรวจสอบความชื้นโดยนำข้าวเปลือกน้ำหนักประมาณ 30 กรัม ใส่กระป๋องวัดความชื้นและนำไปใส่ในตู้อบลมร้อนที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ส่วนอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกตรวจวัดโดยการนำไปใส่ในโถหุ้มฉนวนที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ทำการตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 22.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จึงนำตัวอย่างเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นเป่าลมด้วยอากาศแวดล้อมเป็นเวลา 30 นาที จนความชื้นข้าวเปลือกมีค่าลดลงเหลือ 13-15 เปอร์เซ็นต์

มาตรฐานแห่ง ตามคำแนะนำภาวะการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันที่เหมาะสม โดย Soponronnarit (1994) และ Rattanamechaiskul et al., (2013)



รูปที่ 1. แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน

วิธีการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระ

หลังจากกระบวนการลดความชื้นทำการกะเทาะเปลือกตัวอย่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันที่สภาวะต่าง ๆ และตัวอย่างข้าวอ้างอิงที่ลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดด จากนั้นทำการเก็บรักษาในถุงพลาสติกสาน (polypropylene woven bag) ภายในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะเวลา 6 เดือน เพื่อรอการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (วิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำทุก ๆ 1 เดือน) ตัวอย่างน้ำหนัก 10 กรัม ถูกบดด้วยเครื่องบด (IKA, model A11 Basic, Malaysia) เพื่อการเตรียมสารละลายจากตัวอย่าง ตามวิธีการของ Approved Method of the American Association of Cereal Chemists or AACC (AACC, 1995) จากนั้นทำการไตเตรทด้วย 0.0178 N KOH โดยใช้สารฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์ ไตเตรทจนกระทั่งสีของสารละลายตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนนาน 1 นาที จึงทำการบันทึกปริมาตรที่ใช้และนำมาคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระดังสมการ 1

$$\text{FFA (mg KOH/100 g dry matter)} = [(10 \times \text{mL KOH titrated}) - (\text{mL KOH blank} \times 100)] / [100 - (\text{g water in 100 g sample})] \quad (1)$$

การทดสอบทางสถิติ

การทดลองวางแผนแบบ 4 x 3 x 7 factorial in CRD (Completely Randomized Design) ข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดลองด้วยวิธี DMRT (Duncan's Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

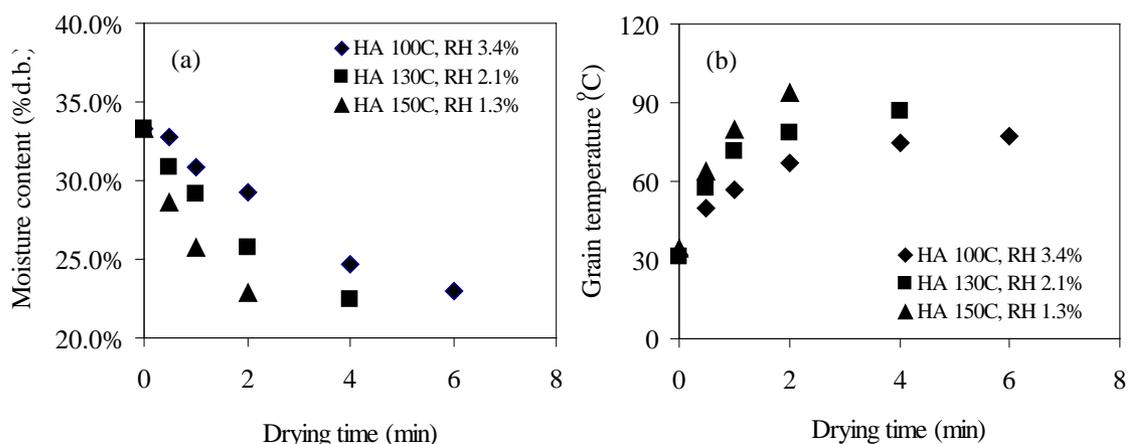
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จนศาสตร์การอบแห้ง

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 100 130 และ 150 องศาเซลเซียส อากาศร้อนในช่วงวันและเวลาที่ทำการทดลองมีอัตราส่วนความชื้นอยู่ในช่วง 20-30 กรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนที่ 100 130 และ 150 องศาเซลเซียส มีค่า 3.4, 2.1 และ 1.3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากรูปที่ 2 ความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าเริ่มต้นที่ 33.3 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง เมื่อกระบวนการอบแห้งเริ่มต้นขึ้นความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากในกลไกการอบแห้ง อัตราการระเหยความชื้นต้องอาศัยการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดข้าวออกสู่บริเวณผิวเพื่อระเหยความชื้นไปยังอากาศร้อน ความสามารถในการแพร่ความชื้นนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเมล็ดข้าว ซึ่งจากรูปที่ 2 พบว่า อุณหภูมิของเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง การใช้อากาศร้อนที่ 100 130 และ 150 องศาเซลเซียส สามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนจากอากาศสู่เมล็ดข้าวจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30-32 องศาเซลเซียส ให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระหว่างการอบแห้ง โดยอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่ความชื้นสุดท้ายที่ 22.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง มีอุณหภูมิ 77 87 และ 94 องศาเซลเซียส ตามลำดับด้วยเหตุผลที่กล่าวมาการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จึงใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นสั้นที่สุดที่ 2 นาที่ จากการที่อุณหภูมิของเมล็ดข้าวมีค่าสูงที่สุดในการอบแห้ง (Rattanamechaiskul et al., 2016; Li et al., 2017; Senadeera et al., 2013; Rumruaytum et al., 2014; Lang et al., 2018)

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างอบแห้งด้วยอากาศร้อนและอากาศร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ในการทดลองการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นไอน้ำอิ่มตัวจะถูกฉีดเข้าสู่ระบบอบแห้งเพื่อเพิ่มอัตราส่วนความชื้นที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าของอากาศร้อนประมาณหนึ่งเท่าที่ 7.6 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนความชื้นมีค่าอยู่ที่ 51 กรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้งและที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 31.3 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนความชื้นที่ 280 กรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง (เป็นความสามารถสูงสุดของหม้อต้มไอน้ำไฟฟ้าที่ผลิตได้) ในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นพบว่า เมื่อเพิ่มความชื้นเข้าสู่ระบบความชื้นของเมล็ดข้าวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วง 30 วินาทีแรกของการอบแห้งให้ความร้อน จากการควมแน่นของไอน้ำ โดยสังเกตได้อย่างชัดเจนที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 31.3 เปอร์เซ็นต์การควมแน่นเกิดจากอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดข้าวมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศร้อนชื้น สำหรับที่ความชื้นสัมพัทธ์ 7.6 และ 31.3 เปอร์เซ็นต์

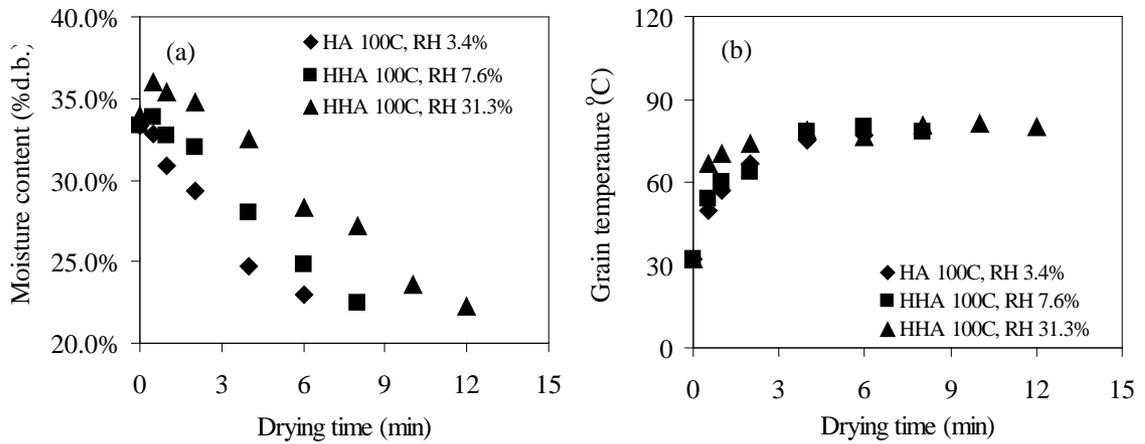
อุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่า 40 และ 70 องศาเซลเซียส ผลของการควบแน่นทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยเฉพะอย่างยิ่งที่ความชื้นสัมพัทธ์ 31.3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการคายพลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนเฟสของไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3b จากนั้นเมื่ออุณหภูมิของเมล็ดข้าวมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง การควบแน่นจะสิ้นสุดลงและเริ่มเข้าสู่ช่วงของการอบแห้ง จากผลที่ได้พบว่าอัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นมีค่าต่ำกว่าการใช้อากาศร้อน เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนชื้นมีค่ามากกว่าอากาศร้อน ทำให้ความสามารถในการพาความชื้นบริเวณผิวของเมล็ดข้าวกับอากาศมีการพาความชื้นที่น้อยกว่า ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นจึงใช้ระยะเวลานานที่อุณหภูมิมอบแห้งเดียวกันและระยะเวลาดังกล่าวยังมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น (Rattanamechaikul et al., 2013; Rattanamechaikul et al., 2014)



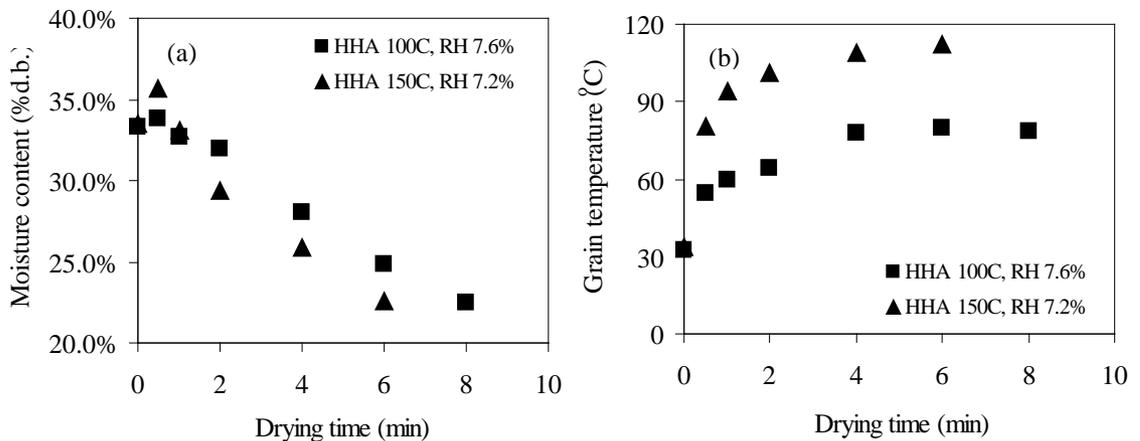
รูปที่ 2. การเปลี่ยนแปลงความชื้น (a) และอุณหภูมิเมล็ด (b) ของข้าวเปลือกระหว่างอบแห้งด้วยอากาศที่มีความร้อนระดับต่าง ๆ

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นอุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียสที่การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ จากรูปพบว่าในช่วง 30 วินาทีแรกของการอบแห้ง ความชื้นของเมล็ดข้าวเมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นที่ 150 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ซึ่งมากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นที่ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้น แม้ว่าที่อุณหภูมิมอบแห้งทั้งสองมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน แต่อัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนชื้นที่ 150 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าที่ 100 องศาเซลเซียส ด้วยความแตกต่างดังกล่าวจึงทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวในช่วงของการควบแน่นมีค่าแตกต่างกันอย่างมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 4b จากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วงของการอบแห้ง การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งตั้งแต่ 2 นาทีเป็นต้นไปนั้นมีความไม่แตกต่างกันมากนัก แม้ว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นที่ 150 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการแพร่ความชื้นที่ดีกว่าตามการเพิ่มขึ้น

ของอุณหภูมิเมล็ดข้าวในระหว่างการอบแห้ง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณไอน้ำอิ่มตัวในอากาศส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความชื้นที่บริเวณผิวของเมล็ดข้าว ตัวแปรดังกล่าวจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่ออัตราการอบแห้ง (Chen et al., 2017)



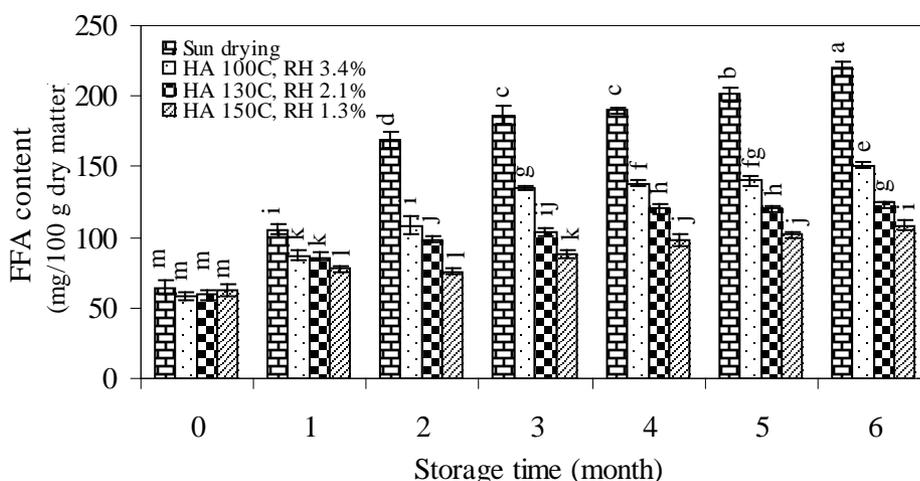
รูปที่ 3. การเปลี่ยนแปลงความชื้น (a) และอุณหภูมิเมล็ด (b) ของข้าวเปลือกระหว่างอบแห้งด้วยอากาศร้อนและอากาศร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสด้วยความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ



รูปที่ 4. การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นอุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียสที่การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์

การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระระหว่างการเก็บรักษา

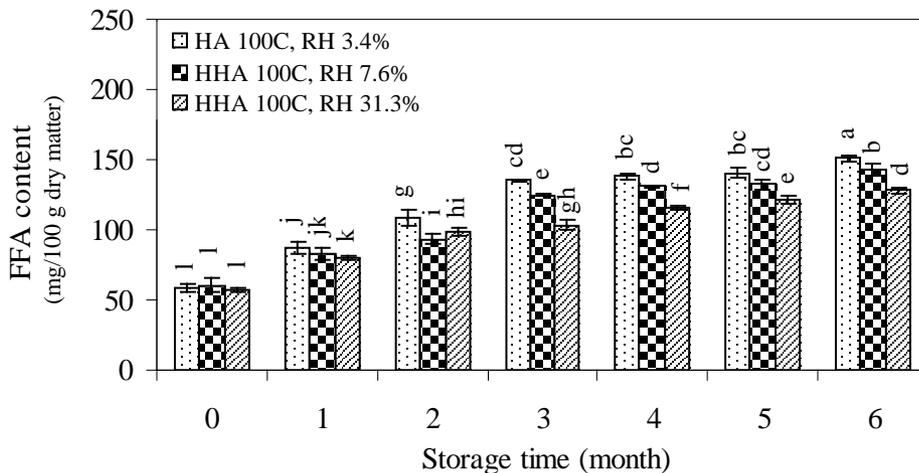
รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องที่ได้ออกจากรอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดเปรียบเทียบกับที่ได้จากฟลูอิดซ์ด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 100 130 และ 150 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการอบแห้งปริมาณกรดไขมันอิสระของทุกตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาผ่านไป 1 เดือน ปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ถูกอบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากเอนไซม์ลิเพสไม่ได้ถูกยับยั้งการทำงานโดยกระบวนการทางความร้อน (Liu et al., 2013) ปริมาณกรดไขมันอิสระยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 6 เดือน ปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดมีค่าอยู่ที่ 220.0 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมมวลแห้ง สำหรับการเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอบแห้งด้วยอากาศร้อนพบว่า การก่อดัวของกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น การใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเอนไซม์ลิเพสได้ดีกว่าการใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า (Owusu et al., 1992; Junka et al., 2017) ทำให้สามารถลดการก่อดัวของกรดไขมันอิสระระหว่างการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 6 เดือนได้ถึง 50.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างอบแห้งด้วยวิธีการตากแดด



รูปที่ 5. การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดเปรียบเทียบกับอากาศร้อน (ตัวหนังสือบนกราฟแห่งที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, $p < 0.05$)

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอบแห้งด้วยอากาศร้อนและอากาศร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าการก่อดัวของกรดไขมันอิสระ

ของข้าวกล้องอบแห้งเริ่มมีค่าแตกต่างกันตั้งแต่เดือนแรกของการเก็บรักษาและมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน การก่อดัวของกรดไขมันอิสระทั้ง 3 สภาวะ ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ที่ระยะเวลาการเก็บรักษานาน 6 เดือน ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอบแห้งที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 3.4 7.6 และ 31.3 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 151.1, 143.2 และ 128.0 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมมวลแห้งตามลำดับ ผลการทดสอบดูเหมือนว่าการก่อดัวของกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มลดลงตามเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนขึ้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 31.3 เปอร์เซ็นต์มีอุณหภูมิของเมล็ดสูงตั้งแต่ในช่วงแรกของการควั่น นอกจากนี้ในระหว่างการอบแห้งยังใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่นานกว่า ส่งผลให้ความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิปเปสทำได้ดีกว่าการใช้อากาศร้อน และอากาศร้อนขึ้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 7.6 เปอร์เซ็นต์ (Kim et al., 2014)

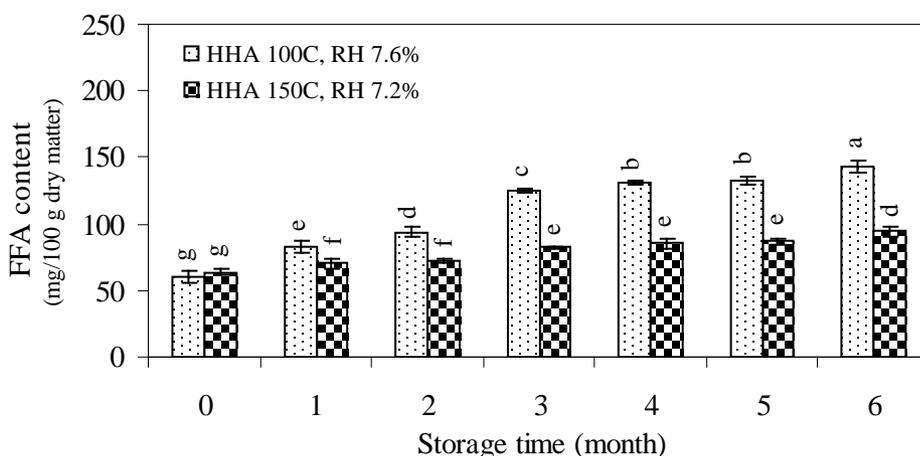


รูปที่ 6. การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอบแห้งด้วยอากาศร้อนและอากาศร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

(ตัวหนังสือบนกราฟแท่งที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, $p < 0.05$)

รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องระหว่างอบแห้งด้วยอากาศร้อนขึ้นอุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียสที่การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่าการก่อดัวของกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าตัวอย่างที่ถูกอบแห้งที่ 150 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เดือนแรกของการเก็บรักษา ที่ระยะเวลาการเก็บรักษานาน 6 เดือน ตัวอย่างที่ถูกอบแห้งที่ 150 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 7.2 เปอร์เซ็นต์ นาน 6 นาที มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 94.4 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมมวลแห้ง ขณะที่ตัวอย่างที่ถูกอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 7.6 เปอร์เซ็นต์ นาน 8

นาที่ มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 143.2 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมมวลแห้ง ผลของการเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระแสดงให้เห็นว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 6 นาที สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิเพสได้ดีกว่าที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 8 นาที อย่างไรก็ตามแม้ว่าสภาวะอบแห้งอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 7.2 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นสภาวะที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สูงที่สุดในขอบเขตการศึกษา ปริมาณการก่อดัวของกรดไขมันอิสระยังคงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา 6 เดือน เนื่องจากระยะเวลาในการให้ความร้อนอาจไม่นานเพียงพอในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิเพส



รูปที่ 7. การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องระหว่างอบแห้งด้วยอากาศร้อนขึ้น อุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียส ที่การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ (ตัวหนังสือบนกราฟแท่งที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, $p < 0.05$)

จากงานวิจัยของ Kim et al. (2014) ที่ได้ศึกษากระบวนการทางความร้อน ในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิเพสในรำข้าว ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน การใช้กระบวนการทางความร้อนด้วยวิธีการต่างๆ การนึ่งรำข้าวด้วยไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที จึงสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิเพสได้ ทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในรำข้าวมีปริมาณค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 6 เดือน

สรุปผลการทดลอง

การควบคุมที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนส่งผลให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการคายพลังงานความร้อนแฝงของไอน้ำ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวอย่างรวดเร็ว มีอิทธิพลต่อความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ลิเพส ทำให้การก่อดัวของกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องมี

แนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอบแห้งด้วยอากาศร้อนและวิธีการตากแดด ซึ่งความสามารถในการยับยั้งขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ในขอบเขตที่ได้ ทำการศึกษา การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไลเซชันแบบอากาศร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 7.2 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด (มีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกิน 100 มิลลิกรัม ต่อหนึ่งร้อยกรัมมวลแห้ง) ที่ระยะเวลาการเก็บรักษานาน 6 เดือน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏ นครปฐม ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย หลักสูตรเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี และห้องปฏิบัติการอบแห้ง สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- American Association of Cereal Chemists (AACC). (1995). *Approved Method of the American Association of Cereal Chemists* (9th ed.). Inc., St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists.
- Cepková, P. H., Dvořáková, Z., Janovská, D. & Viehmannová, V. (2014). Rancidity development in millet species stored in different storage conditions and evaluation of free fatty acids content in tested samples. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 12(2), 101-106. <https://doi.org/10.1234/4.2014.4376>.
- Chen, Q., Bi, J., Chen, R., Liu, X., Wu, X. & Zhou, M. (2017). Comparative study on drying characteristic, moisture diffusivity, and some physical and nutritional attributes of blanched carrot slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13201. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13201>
- Chen, S. S., Luo, S. Z., Zheng, Z., Zhao, Y. Y., Pang, M. & Jiang, S. T. (2017). Enzymatic lipophilization of epicatechin with free fatty acids and its effect on antioxidative capacity in crude camellia seed oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(3), 868-874. doi: 10.1002/jsfa.7808
- Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P., Soponronnarit, S. (2009). Accelerated aging of jasmine brown rice by high-temperature fluidization technique. *Food Research International*, 42(5-6), 674-681. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.02.011>
- Keying, Q., Changzhong, R. & Zaigui, L. (2009). An investigation on pretreatments for inactivation of lipase in naked oat kernels using microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 95(2), 280-284. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.05.002>

- Kim, S. M., Chung, H. J. & Lim, S. T. (2014). Effect of various heat treatments on rancidity and some bioactive compounds of rice bran. *Journal of Cereal Science*, 60, 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.04.001>
- Lang, G. H., Lindemann, I. D. S., Ferreira, C. D., Pohndorf, R. S., Vanier, N. L. & Oliveira, M. D. (2018). Influence of drying temperature on the structural and cooking quality properties of black rice. *Cereal Chemistry*, 95(4), 564-574. <https://doi.org/10.1002/cche.10060>
- Liu, L., Waters, D. L. E., Rose, T. J., Bao, J. & King, G. J. (2013). Phospholipids in rice: Significance in grain quality and health benefits: A review. *Food Chemistry*, 139(1-4), 1133–1145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.046>
- Li, Y., Su, X., Shi, F., Wang, L., Chen, Z., (2017). High-temperature air-fluidization-induced changes in the starch texture, rheological properties, and digestibility of germinated brown rice. *Starch - Stärke*, 69 (9-10), <https://doi.org/10.1002/star.201600328>.
- Loypimai, P., Moonggarm, A. & Chottanom, P. (2009) Effects of ohmic heating on lipase activity, bioactive compounds and antioxidant activity of rice bran. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 3642-3652.
- Junka, N., Rattanamechaiskul, C. & Wongs-aree, C. (2017). Free fatty acid deformation of treated black glutinous rice during storage by fluidization drying. *Journal of Food Process Engineering*. 40(3), e12427. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12427>
- Owusu, R.K., Makhzoum, A., Knapp, J.S. (1992). Heat inactivation of lipase from psychrotrophic *Pseudomonas fluorescens* P38: Activation parameters and enzyme stability at low or ultra-high temperatures. *Food Chemistry*, 44(4), 261-268. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(92\)90048-7](https://doi.org/10.1016/0308-8146(92)90048-7)
- Qu, Q., Yang, X., Fu, M., Chen, Q., Zhang, X., He, Z., et al. (2016). Effects of three conventional drying methods on the lipid oxidation, fatty acids composition, and antioxidant activities of walnut (*Juglans regia* L.). *An International Journal: Drying Technology*, 34(7), 822-829. doi: 10.1080/07373937.2015.1081931
- Ramezanzadeh, F. M., Rao, R. M., Windhauser, M., Prinyawiwatkul, W., Tulley, R. & Marshall, W. E. (1999). Prevention of hydrolytic rancidity in rice bran during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(8), 3050–3052. doi: 10.1021/jf981335r
- Rattanamechaiskul, C., Junka, N., Wongs-Aree, C., Prachayawarakorn, S. & Soponronnarit, S. (2016). Influence of hot air fluidized bed drying on quality changes of purple rice. *An International Journal: Drying Technology*, 34(12), 1462–1470. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1126720>

- Rattanamechaiskul, C., Soponronnarit, S. & Prachayawarakorn S. (2014). Glycemic Research to Brown Rice Treated by Different Drying Media. *Journal of Food Engineering*, 122(1), 48-55. [https://doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.022](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.022)
- Rattanamechaiskul, C., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. & Tungtrakul, P. (2013). Optimal operating conditions to produce nutritious partially parboiled brown rice in a humidified hot air fluidized bed dryer. *An International Journal: Drying Technology*, 31(4), 368-377. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.709571>
- Rumruaytum, P., Borompichaichartkul, C. & Kongpensook, V. (2014). Effect of drying involving fluidisation in superheated steam on physicochemical and antioxidant properties of Thai native rice cultivars. *Journal of Food Engineering*, 123, 143-147. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.025>
- Senadeera, W., Alves-Filho, O., Eikevik, T. (2013). Influence of drying conditions on the moisture diffusion and fluidization quality during multi-stage fluidized bed drying of bovine intestine for pet food. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 549-557. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.08.008>
- Soponronnarit, S. & Prachayawarakorn, S. (1994). Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. *An International Journal: Drying Technology*, 12(7), 1667-1686. <https://doi.org/10.1080/07373939408962192>
- Kim, S. M., Chung, H. J. & Lim, S. T. (2014). Effect of various heat treatments on rancidity and some bioactive compounds of rice bran. *Journal of Cereal Science* 60(1), 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.04.001>
- Tran, D. T., Chang, J. S. (2014). Kinetics of enzymatic transesterification and thermal deactivation using immobilized burkholderia lipase as catalyst. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 37(3), 481-491. doi: 10.1007/s00449-013-1017-0
- Wang, H., Zhu, S., Ramaswamy, H. S., Hu, F. & Yu, Y. (2018). Effect of high pressure processing on rancidity of brown rice during storage. *LWT - Food Science and Technology*, 93, 405-411. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.042>
- Xu, B, Wang, L.K, Miao, W.J., Wu, Q.F., Liu, Y.X., Sun, Y., et al. (2016). Thermal versus microwave inactivation kinetics of lipase and lipoxygenase from wheat germ. *Journal of Food Process Engineering* 39(3), 247-255. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12216>