

Research Article

ผลของสตาร์ชเจลาทีไนซ์เซชันต่อคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวม่วง

Effect of starch gelatinization on textural properties of purple waxy rice

นิตยา จันกา^{1,*}, ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล² และ เฉลิมชัย วงษ์อารี^{3,4}

Nittaya Junka^{1,*}, Chaiwat Rattanamechaikul² and Chalermchai Wongs-Aree^{3,4}

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

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

² สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

² Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

³ หลักสูตรเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน

³ Postharvest Technology Program, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University Technology Thonburi, Bangkhuntian Campus

⁴ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

⁴ Postharvest Technology Innovation Center, Commission on Higher Education

*E-mail: nittaya717@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของสตาร์ชเจลาทีไนซ์เซชันระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวม่วงหุงสุก การทดสอบเริ่มโดยเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกให้อยู่ในช่วงความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวที่ 28.3 และ 33.3% (d.b.) อบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 100 130 และ 150°C จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 22.0% (d.b.) จากนั้นเป่าด้วยอากาศที่อุณหภูมิห้องให้ความชื้นลดลงเหลือ 13.0-15.0% (d.b.) ผลการทดสอบพบว่า ระดับการเกิดเจลาทีไนซ์เซชันภายในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อนำข้าวเหนียวม่วงมาสีและหุงให้สุกพบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเนื้อสัมผัสตามระดับของการเกิดเจลาทีไนซ์เซชันในระหว่างการอบแห้งโดยค่าความแข็งของ

ข้าวเหนียวสุกมีค่าลดลงตรงกันข้ามกับค่าความเหนียวที่มีค่าเพิ่มขึ้น การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวม่วงหุงสุกให้มีความนุ่มเหนียวเพิ่มขึ้นได้ โดยการลดความชื้นข้าวเปลือกภายหลังจากการเก็บเกี่ยวควรรี้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 150°C ในการอบแห้ง เพราะข้าวสุกที่ได้จะมีเนื้อสัมผัสนุ่มเหนียวมากที่สุด

คำสำคัญ: ข้าวเหนียวม่วง, เจลาทีไนซ์เซชัน, คุณสมบัติเนื้อสัมผัส, เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด

Abstract

The present research aimed to investigate the effect of grain starch gelatinization during drying process of paddy rice by fluidized bed system on textural property of the cooked purple waxy rice. The test was initiated by rewetting purple waxy paddy to gain the harvested moisture content of 28.3 and 33.3% (d.b.). The paddy was dried in a fluidized bed dryer at the temperatures of 100, 130 and 150°C until the paddy moisture content was reduced to 22.0% (d.b.). The dried paddy was then ventilated under ambience temperature until the moisture was reduced to 13.0-15.0% (d.b.). It was found that the level of increased gelatinization had a direct relation with the initial moisture of the paddy and drying temperature. The increase in gelatinization of dried paddy lead to the increase of stickiness in contrast to the decrease of hardness in the cooked rice. As a result, drying paddy under different temperatures by fluidized bed system could be used to improve the textural properties of cooked purple waxy rice. To produce cooked purple waxy rice with more tender and sticky texture, the harvested paddy should be dried with the drying temperature of 150°C.

Keyword: purple waxy rice, gelatinization, textural property, fluidized bed dryer

บทนำ

ข้าวกลุ่มสายพันธุ์ข้าวเหนียว (*Oryza sativa* L.) เป็นสายพันธุ์ที่มีผู้บริโภคนิยมภายในประเทศโดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือเป็นอาหารหลัก (ButsoและIsvilanonda, 2010) รูปแบบของการบริโภคข้าวเหนียวสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบคือข้าวเหนียวขาวที่ผ่านการขัดสีเอาชั้นรำออกและข้าวเหนียวกล้องที่ไม่ผ่านการขัดสี โดยกระบวนการหุงสุกนิยมนำข้าวเหนียวขาวที่ผ่านการขัดสีมานึ่ง ได้เป็นข้าวเหนียวสุกที่มีเนื้อสัมผัสนุ่มและเหนียวแตกต่างกับข้าวเหนียวกล้องที่มีเนื้อสัมผัสที่แข็งและมีความเหนียวน้อยกว่า (Jaiboonและคณะ, 2010) เนื่องจากในระหว่างการนึ่งข้าวเหนียวกล้องมีไขมันในรำข้าวซึ่งจะต้านการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ภายในเมล็ด (Billirisและ คณะ, 2012) จึงไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ชั้นของรำเป็นเชื้อหุ้มเมล็ดข้าวที่มีโปรตีน ไขมัน ใยอาหาร เถ้า วิตามิน และเกลือแร่สะสมอยู่ (Babu และคณะ, 2009) นอกจากนี้ข้าวเหนียวบางสายพันธุ์ทางภาคเหนือ

ของไทย เช่น พันธุ์เก่าคอตยสะเก็ดยังมีสารแอนโทไซยานิน ในชั้นรำจึงมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งเซลล์มะเร็ง (Netzel และคณะ, 2007)

กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยอากาศร้อน นอกจากเป็นวิธีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง (Soponronnarit และคณะ, 1995) ในการลดความชื้นข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมก่อนการเก็บรักษาแล้ว วิธีการดังกล่าวยังทำให้สตาร์ชในข้าวเกิดเจลาทีไนซ์เซชันระหว่างการอบแห้ง กระบวนการเกิดเจลาจะเกิดขึ้นเมื่อเมล็ดข้าวยังคงมีความชื้นสูงในช่วงความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว (28.3-33.3 % (d.b.)) มีอุณหภูมิเมล็ดสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลา (Tirawanichakul และคณะ, 2004) เมื่อเมล็ดข้าวเกิดเจลาทีไนซ์เซชัน เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวขึ้นในส่วน amorphous region ส่งผลให้เกิดการสูญเสียลำดับของโมเลกุลสตาร์ช เกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ สูญเสียค่าแสงหักเหสองแนว สูญเสียสภาพเป็นผลึก โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินจะหลุดออกจากเม็ดแป้ง โครงสร้างที่เป็นระเบียบของสตาร์ชถูกทำลาย (Donald, 2004) ส่งผลให้คุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกเปลี่ยนแปลงไป

มีการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเนื้อสัมผัสพบการเกิดเจลาทีไนซ์เซชันของข้าวในสายพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลาง (20-25%) และสูง (26-33%) (Juliano, 1992; Suwannaporn และคณะ, 2007) เมื่อสตาร์ชในเมล็ดเกิดเจลาจะทำให้โมเลกุลอิสระของอะมิโลสหลุดออกจากเม็ดแป้งและมีการจัดเรียงตัวกันขึ้นมาใหม่เมื่อเม็ดแป้งเย็นตัวลงภายหลังการอบแห้ง การจัดเรียงตัวใหม่นี้จะต้านการดูดซึมน้ำของข้าวระหว่างหุง ทำให้ข้าวเจ้าที่หุงสุกมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและค่าความเหนียวลดลง (Zavareze และคณะ, 2012; Jaisut และคณะ, 2009) โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับการเกิดเจลาทีไนซ์เซชัน (Rattanamechaiskul และคณะ, 2013) แต่ให้ผลตรงกันข้ามกับกับกรณีของข้าวเหนียว (อะไมโลส < 5%) การศึกษาผลของการเกิดเจลาทีไนซ์เซชันต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการหุงของข้าวเหนียวขาว หลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนพบว่า โมเลกุลของอะไมโลเพกทินจำนวนมากที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง ในระหว่างการเกิดเจลาจะมีการจัดเรียงตัวกันขึ้นมาใหม่ได้ยาก เนื่องจากตัวโมเลกุลของอะไมโลเพกทินมีกิ่งก้านสาขาจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อโครงสร้างที่เป็นระเบียบของเม็ดแป้งถูกทำลาย จะส่งผลให้เม็ดแป้งที่เกิดเจลาสามารถดูดน้ำ (water uptake) ได้มากกว่าเม็ดแป้งที่ไม่ได้เกิดเจลาทีไนซ์เซชันระหว่างการหุงต้ม ผลที่ตามมาคือคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวขาว มีค่าความแข็งลดลงและมีค่าความเหนียวเพิ่มมากขึ้น (Jai boon และคณะ, 2011) แต่ยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวม่วง เมื่อสตาร์ชเกิดเจลาทีไนซ์เซชันที่ระดับต่างๆ ภายหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการหุงของข้าวเหนียวม่วง ภายหลังจากอบข้าวเปลือกให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิสูง และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลาทีไนซ์

เซชันภายในข้าวเปลือกที่ระดับต่างๆและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการหุงของข้าวเหนียวม่วง เพื่อให้ได้ข้าวเหนียวม่วงที่สามารถรองรับความต้องการของผู้บริโภคที่หลากหลาย

วัสดุและวิธีการทดลอง

การเตรียมตัวอย่าง

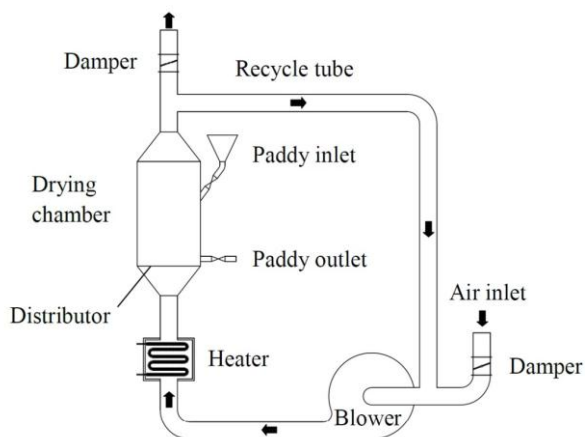
ข้าวเหนียวม่วง (*Oryza sativa* L. cv. 'Kum Doi Saket') พันธุ์ก่ำคอดยสะเกิดเก็บเกี่ยวจากศูนย์วิจัยข้าวก่ำ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยข้าวเปลือกที่ได้รับมามีการลดความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวจนเหลือ 14.0% (d.b.) ด้วยวิธีการตากแดด ดังนั้นก่อนการทดลอง ข้าวเปลือกจะถูกเพิ่มความชื้นอีกครั้งด้วยการสเปรย์น้ำ คลุกเคล้าให้ทั่วเพื่อการกระจายความชื้นให้เป็นที่ไปอย่างสม่ำเสมอทุกๆ 24 ชั่วโมง เพื่อจำลองความชื้นให้อยู่ในช่วงความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวที่ 28.3 และ 33.3% (d.b.) แล้วเก็บภายในกล่องพลาสติกปิดสนิทในห้องเย็นอุณหภูมิประมาณ 4°C เป็นเวลา 7 วัน ก่อนการทดลองการอบแห้ง ตัวอย่างจะถูกนำมาวางไว้จนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องจึงนำมาทำการทดสอบ

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดที่ใช้เป็นแบบวงดัดแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยห้องอบแห้ง (drying chamber) รูปทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 100 cm พื้นที่ผิวของห้องอบแห้ง และท่อลมทั้งหมดหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 2.5 cm ให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน (heater) ขนาด 12 kW ควบคุมโดย PID controller ที่มีความละเอียด $\pm 1^\circ\text{C}$ พัดลมที่ใช้เป็นแบบ backward-curved blade centrifugal blower มีมอเตอร์ขนาด 1.5 kW เป็นตัวขับเคลื่อน ที่ท่ออากาศออกและท่ออากาศเวียนกลับ (recycle tube) มี damper เพื่อปรับอัตราส่วนของอากาศ ภายในระบบให้ได้อัตราการไหลตามที่ต้องการ

การอบแห้งข้าวเหนียวม่วง

การอบแห้งโดยใส่ตัวอย่างที่ช่อง paddy inlet ให้ความสูงของเบด 10 cm กำหนดอัตราการไหลอากาศที่ 0.08 kg/s จะถูกส่งผ่านขดลวดความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงช่วงอุณหภูมิ 100 130 และ 150°C หลังจากอากาศร้อนได้ไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อถ่ายเทพลังงานให้กับข้าวเปลือกแล้ว อากาศส่วนหนึ่งจะไหลออกสู่ห้องอบแห้ง และอีกส่วนหนึ่งจะถูกดึงกลับมาใหม่ด้วยอัตราส่วน 0.8 ข้าวเปลือกจะถูกอบแห้งจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 22.0% (d.b.) จึงจะนำออกมาจากห้องอบแห้ง (Soponronnarit และ Prachayawarakorn, 1994) และถูกนำมาเก็บไว้ในที่อับอากาศเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อลดรอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งหลังจากนั้นจะถูกเป่าลมด้วยอากาศอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 13-15% (d.b.) (Poomsa-ad และคณะ, 2002)



รูปที่ 1 โค้ดแกรมของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไลซ์เบด

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน

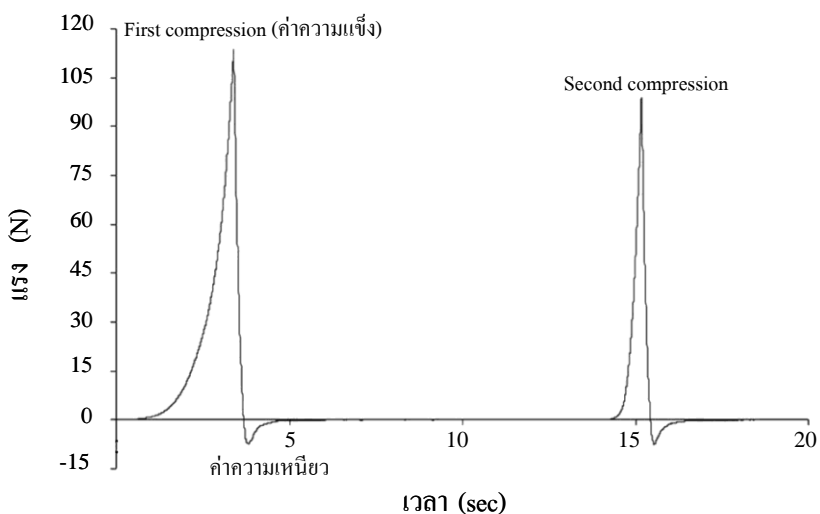
นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการเป่าลมด้วยอากาศอุณหภูมิห้องเพียงอย่างเดียวและตัวอย่างที่ถูกอบแห้งที่สภาวะต่างๆ กระเทาะเปลือกด้วย Paddy dehussing machine (ngeksenghuat, model no. P-1, Bangkok, Thailand) ได้เป็นข้าวเหนียวม่วงที่ไม่ผ่านการขัดสี จากนั้นนำตัวอย่างบดด้วยเครื่อง Ultra centrifugal mill (Retsch, model no. ZM 100, Hann, Germany) นำผงแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 mm ไปทดสอบโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter หรือ DSC (Perkin Elmer Co. Ltd., model DSC-7, Norwalk, USA) วิธีการทดสอบเริ่มจากใส่ผงแป้ง 3 μg ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมและเติมน้ำกลั่น 10 μL ปิดฝาให้สนิทและทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นด้วยตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 40°C ถึง 100°C ที่อัตรา 10°C/min ได้เป็น DSC curve ซึ่งประกอบไปด้วยค่า onset temperature (T_o), peak temperature (T_p), conclusion temperature (T_c) และ delta enthalpy (ΔH) ซึ่งระดับของสตาร์ชเจลลิตีไนซ์เซชัน (DG) (Normand และ Mashall, 1989) สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$\text{Degree of starch gelatinization (\%)} = \left(1 - \left[\frac{\Delta H}{\Delta H_c} \right] \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ ΔH คือ transition enthalpy ของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้ง (J/g dry matter) และ ΔH_c คือ transition enthalpy ของตัวอย่างที่ผ่านการเป่าลมด้วยอากาศอุณหภูมิห้องเพียงอย่างเดียว (J/g dry matter).

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส

ข้าวเหนียวม่วงจะถูกล้างน้ำและแช่เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เหน้าทิ้งและนำตัวอย่างไปนึ่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 30 นาที เมื่อนึ่งเสร็จนำตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 10 นาที ก่อนการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส ค่าความแข็งและค่าความเหนียวคือค่าที่ทำการทดสอบ ซึ่งวิเคราะห์โดย Texture analyzer (Stable Micro System, TA XT Plus, Surrey, UK) ตัวอย่างข้าวจำนวน 6 เมล็ดจะถูกวางลงบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยมีหัวกดทรงกระบอกกดสองครั้งที่ 90% deformation และมีความเร็วที่ใช้ในการกดและดึงออกที่ 0.5 และ 1.0 mm/s ภายหลังการทดสอบจะได้ texture profile แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับตัวอย่างต่อเวลาดังที่แสดงในรูปที่ 2 ค่าความแข็งคือแรงสูงสุดที่หัวกดได้กดลงครั้งแรก ส่วนค่าความเหนียวคือแรงดึงที่หัวกดได้ดึงออกจากตัวอย่าง (Juliano, 1985)



รูปที่ 2 Texture profile ของข้าวเหนียวม่วง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

เวลาอบแห้งและอุณหภูมิเมล็ด

ตารางที่ 1 แสดงเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเหนียวม่วง ที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 28.3 และ 33.3% (d.b.) จนกระทั่งเหลือความชื้น 22.0% (d.b.) และอุณหภูมิเมล็ดก่อนออกจากห้องอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ พบว่า ข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นที่ 28.3% (d.b.) เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 100°C ใช้ระยะเวลา 4.0 นาทีในลดความชื้นเมล็ดให้เหลือ 22.0% (d.b.) ทำให้เมล็ดมีอุณหภูมิ 64.0°C แต่หากความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นเป็น 33.3% (d.b.) จะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอุณหภูมิเมล็ดมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.0 นาที และ 71.9°C ตามลำดับ

จากตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่เท่ากัน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบและอุณหภูมิเมล็ด นั่นคืออุณหภูมิการอบที่สูงขึ้นจะใช้เวลาในการอบลดลงและอุณหภูมิเมล็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความชื้นเริ่มต้นของข้าวที่ 28.3% (d.b.) อบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้นที่สุดที่ 1.5 นาที ส่วนอุณหภูมิเมล็ดมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 106.0°C เมื่อข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 33.3% (d.b.) อบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C

ผลของระยะเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากข้าวเปลือกที่มีความชื้น 33.3% (d.b.) จะมีปริมาณน้ำภายในเมล็ดอยู่มาก ดังนั้นจึงต้องการระยะเวลาที่ใช้ในการระเหยน้ำจนถึงระดับความชื้นที่ต้องการมากกว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้น 28.3% (d.b.) ส่วนการลดลงของระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิมอบแห้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะสามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนจากอากาศร้อนไปสู่เมล็ดข้าวได้มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าทำให้อุณหภูมิเมล็ดมีค่าสูง ความชื้นที่มีอยู่ภายในเมล็ดข้าวจึงสามารถแพร่ออกมาระเหยที่ผิวได้ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในระหว่างการอบแห้งนั้นแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิของเมล็ดระหว่างการอบแห้ง (Madhiyanon และคณะ, 2009; Thuwapanichayananและคณะ, 2011)

ตารางที่ 1 เวลาอบแห้งและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกของข้าวเหนียวม่วงที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)	อุณหภูมิมอบแห้ง(°C)	เวลาอบแห้ง (min)	อุณหภูมิเมล็ด (°C)
	100.0	4.0 ± 0.0	64.0 ± 2.1
28.3 ± 0.4	130.0	3.0 ± 0.1	74.4 ± 1.6
	150.0	1.5 ± 0.1	84.8 ± 0.7
	100.0	6.0 ± 0.3	71.9 ± 1.8
33.3 ± 0.7	130.0	4.0 ± 0.1	82.1 ± 2.7
	150.0	3.0 ± 0.1	106.0 ± 0.4

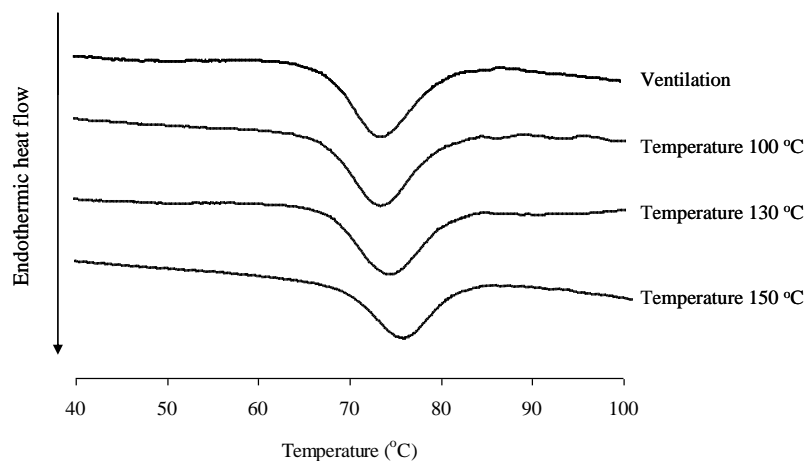
คุณสมบัติทางความร้อนของข้าวเหนียวม่วง

รูปที่ 3 แสดงกราฟ endothermic heat flow ของข้าวเหนียวม่วงที่ผ่านการลดความชื้นด้วยการเป่าด้วยอากาศอุณหภูมิห้องและตัวอย่างผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ความชื้นเริ่มต้น 28.3% (d.b.) จากกราฟแสดงให้เห็นว่า transition temperature ของตัวอย่าง ประกอบไปด้วยที่ onset, peak และ conclusion อยู่ในช่วง 66.0 – 80.3°C

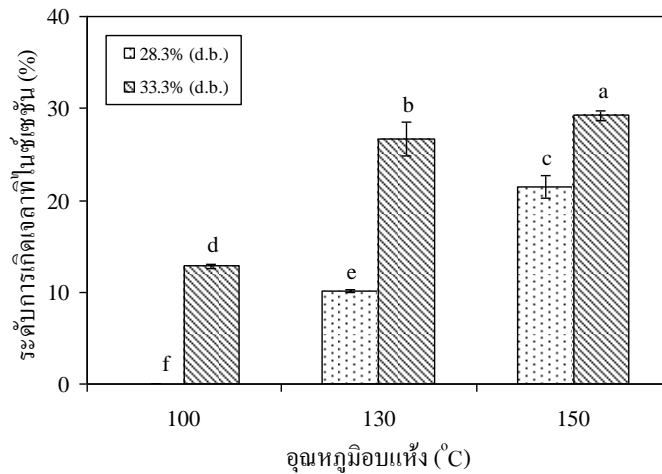
ค่าของพลังงานที่ต้องการใช้ในการทำลายผลึกของเม็ดแป้ง (delta enthalpy) ของตัวอย่างที่ลดความชื้นด้วยอากาศ อุณหภูมิห้องมีค่า 9.91 J/g และของตัวอย่างผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100, 130 และ 150°C มีค่า 9.93, 8.91 และ 7.78 J/g ตามลำดับ

ผลการอบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าค่า delta enthalpy ของตัวอย่างไม่แตกต่างกันกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบแห้งเป็นเพราะการอบแห้งที่สภาวะดังกล่าวสามารถทำให้เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิสูงสุดก่อนออกจากห้องอบแห้งได้เพียง 64.0°C ดังที่แสดงในตารางที่ 1 ในขณะที่อุณหภูมิที่เริ่มทำให้โครงสร้างของสสารจะถูกทำลายได้นั้นต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 66.0°C (อุณหภูมิการเกิดเจล) ส่วนการลดลงของค่า delta enthalpy เมื่อตัวอย่างถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 150°C นั้นมีค่าลดลงตามอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งดังกล่าวสามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนสู่เมล็ดข้าวให้มีอุณหภูมิเมล็ดสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลที่ 66.0°C สสารซึ่งเกิดกระบวนการเจลาทีไนซ์เซชัน (Lai, 2001)

ค่า delta enthalpy ที่ลดลงสามารถนำไปคำนวณในสมการหาค่าการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน เพื่อบ่งบอกถึงระดับการเกิดเจลาทีไนซ์เซชัน ซึ่งระดับของการเกิดเจลาทีไนซ์เซชันนี้แปรผกผันกับค่า delta enthalpy ดังแสดงในรูปที่ 4 ตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้น 28.3% (d.b.) ถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C ไม่สามารถทำให้สสารเกิดเจลาทีไนซ์เซชัน ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 150°C สามารถทำให้สสารเกิดเจลาทีไนซ์เซชันได้ที่ระดับ 10.1 และ 21.5% ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้น 33.3% (d.b.) มีค่าการเกิดสสารเจลาทีไนซ์เซชันเท่ากับ 12.8, 26.7 และ 29.2% เมื่อใช้อุณหภูมิตอบแห้งที่ 100, 130 และ 150°C ตามลำดับ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเหนียวม่วงและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อระดับการเกิดเจลาทีไนซ์เซชัน ระดับของการเกิดเจลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง



รูปที่ 3 กราฟ endothermic heat flow ของข้าวเหนียวม่วงที่ความชื้นเริ่มต้น 28.3% (d.b.)



รูปที่ 4 ระดับของการเกิดเจลลาคีในซีเซชันของข้าวเหนียวม่วงที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ

คุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวม่วงหุงสุก

ตารางที่ 2 แสดงค่าความแข็งและค่าความเหนียวของตัวอย่างที่ผ่านการเป่าด้วยอากาศที่อุณหภูมิห้องและตัวอย่างอบแห้งที่สภาวะต่างๆ พบว่า ข้าวเหนียวม่วงที่ผ่านการเป่าด้วยอากาศที่อุณหภูมิห้องมีค่าความแข็งและค่าความเหนียวของข้าวสุกเท่ากับ 123.9 และ 0.6 N ตามลำดับ ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นที่ 28.3% (d.b.) เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 100°C มีค่าความแข็งและค่าความเหนียวของตัวอย่างหุงสุกไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตัวอย่างที่ผ่านการเป่าด้วยอากาศที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อตัวอย่างข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 33.3% (d.b.) ค่าความแข็งของข้าวหุงสุกจะมีค่าลดลงเป็น 118.2 N และค่าความเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.8 N นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความชื้นของตัวอย่างข้าวเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งส่งผลทำให้ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงและค่าความเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงจะแปรผันโดยตรงและค่าความเหนียวจะแปรผกผันกับระดับของการเกิดเจลลาคีในซีเซชัน เนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งเกิดเจลลาคีในซีเซชันจะทำให้โครงสร้างที่เป็นระเบียบถูกทำลาย ส่งผลให้เมื่อนำไปหุง เม็ดแป้งที่เกิดเจลลาคีในซีเซชันจะสามารถดูดน้ำได้มากกว่าเม็ดแป้งที่ไม่ได้เกิดเจลลาคีในซีเซชัน (Jaiboon และคณะ, 2011) ค่าความแข็งจึงมีแนวโน้มลดลงและค่าความเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับของการเกิดเจลลาคีในซีเซชันที่สูงขึ้น กล่าวคือการเกิดเจลลาคีในซีเซชันระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือกช่วยให้เนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวม่วงหุงสุกมีความนุ่มเหนียวมากขึ้น ดังนั้นข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 33.3% (d.b.) อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 150°C จึงมีค่าความแข็งน้อยที่สุดและมีค่าความเหนียวมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากที่สภาวะการอบแห้งดังกล่าวมีระดับการเกิดเจลลาคีในซีเซชันมากที่สุด

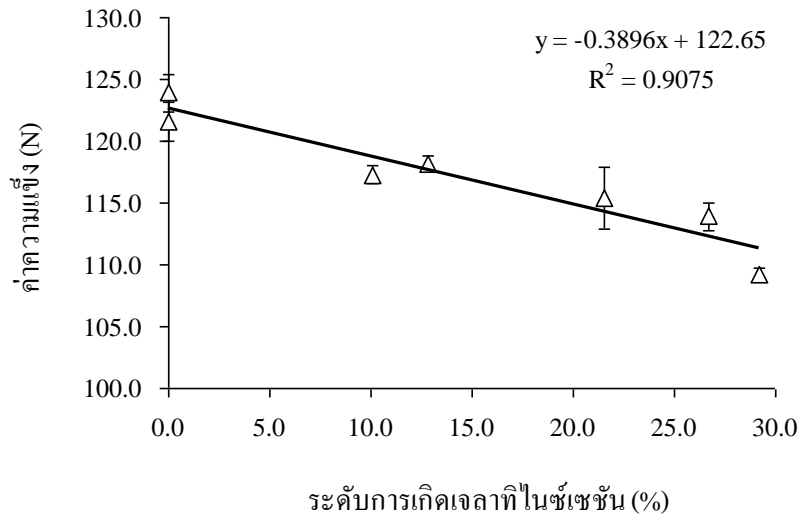
ตารางที่ 2 คุณสมบัติการหุงของข้าวเหนียวม่วงที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ

อุณหภูมิอบแห้ง(°C)	ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)	ค่าความแข็ง (N)	ค่าความเหนียว (N)
100	Ventilation	123.9 ± 1.5 ^a	0.6 ± 0.0 ^{cf}
	28.3	121.6 ± 1.6 ^{ab}	0.6 ± 0.0 ^f
	33.3	118.2 ± 0.6 ^c	0.8 ± 0.0 ^d
130	28.3	117.3 ± 0.7 ^c	0.8 ± 0.1 ^{dc}
	33.3	113.9 ± 1.1 ^d	1.6 ± 0.2 ^b
150	28.3	115.4 ± 2.5 ^{cd}	1.0 ± 0.1 ^c
	33.3	109.2 ± 0.5 ^c	1.9 ± 0.0 ^a

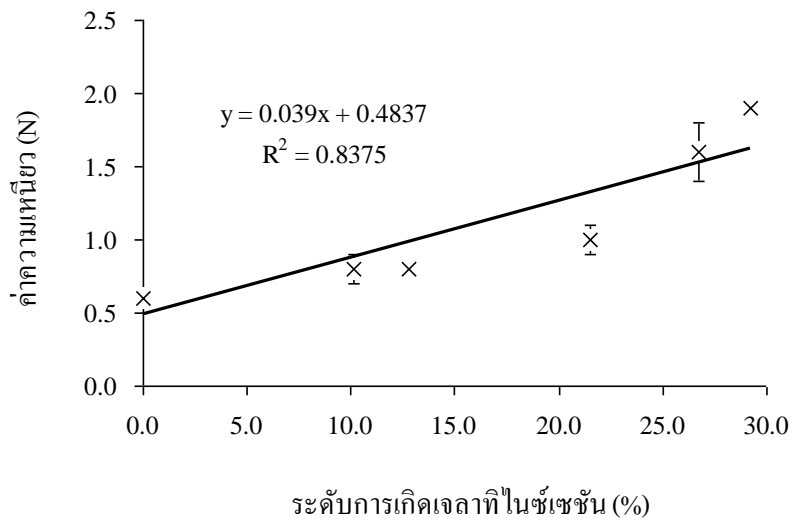
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลาทีไนซ์เซชันระหว่างการอบข้าวเปลือกและคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวม่วงหุงสุก

รูปที่ 5 และ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดเจลาทีไนซ์เซชันระหว่างการอบแห้งข้างเปลือกกับค่าความแข็งและค่าความเหนียวของข้าวเหนียวม่วงหุงสุก เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2 -values) ที่ได้จากรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9075 และ 0.8375 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับการเกิดเจลาทีไนซ์เซชันแปรผกผันกับค่าความแข็งโดยแสดงแนวโน้มลดลง แต่แปรผันโดยตรงกับค่าความเหนียวแสดงให้เห็นแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ 33.3% (d.b.) ในอากาศร้อนอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 150°C จะมีการลดลงของค่าความแข็งและมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนียวของข้าวสุกมากที่สุดเท่ากับ 14.7 และ 1.3 N ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดโรคใบไหม้ระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือกกับค่าความแข็งแรงของข้าวที่
หุงสุก



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดโรคใบไหม้ระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือกกับค่าความเหนียวของ
ข้าวที่หุงสุก

สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดอากาศร้อนที่อุณหภูมิสูงสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวม่วงให้มีความนุ่มเหนียวมากขึ้น โดยปริมาณการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งและค่าความเหนียวนั้นมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับระดับการเกิดเจลลิตินในซ์เซชัน ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงและค่าความเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระดับการเกิดเจล ส่วนระดับของการเกิดเจลจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและอุณหภูมิอบแห้ง ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นมากและถูกอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะสามารถทำให้สตาร์ชเกิดเจลได้มากกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นน้อยและถูกอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ในสภาวะการอบแห้งที่ได้ทำการศึกษาข้าวเหนียวม่วงที่มีความชื้นเริ่มต้น 33.3% (d.b.) ถูกอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 150°C จะมีเนื้อสัมผัสนุ่มเหนียวมากที่สุด เนื่องจากมีระดับการเกิดเจลลิตินในซ์เซชันสูงที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.ชนากานต์ เทโบลด์ พรหมอุทัย ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่สำหรับข้าวเหนียวม่วงสายพันธุ์ก่ำคอยสะเก็ด ห้องปฏิบัติการอบแห้ง สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หลักสูตรเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Babu D.P., Subhasree R.S., Bhakayarajand R. and Vidhyalakshmi R., (2009) Brown rice-beyond the color reviving a lost health food – a review. *Am-Euras.J. agron.*, 2: 67-72.
- Billiris M.A., Siebenmorgen T.J. and Wang Y.J., (2012) Rice degree of milling effects on hydration, texture, sensory and energy characteristics: Part 2 Cooking using fixed, water-to-rice ratios. *J. Food Eng.*, 113: 589-597.
- Butso O. and Isvilanonda S., (2010) Changes in the efficiency of rice production in Thailand. *Kasetsart J.*, 31: 436-444.
- Donald A.M., (2004) "Understanding starch structure and functionality", In: Eliasson, Ann-Charlotte (Eds), *Starch in food*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.

- Jaiboon P., Prachayawarakorn S., Devahastin S. and Soponronnarit S., (2010) Effects of gelatinization on textural properties of brown waxy rice. *Agric. Sci. J.*, 41(Suppl.): 393-396.
- Jaiboon P., Prachayawarakorn S., Devahastin S., Tungtrakul P. and Soponronnarit S., (2011) Effect of high-temperature fluidized-bed drying on cooking, textural and digestive properties of waxy rice. *J. Food Eng.*, 105: 89-97.
- Jaisut D., Prachayawarakorn S., Varayanond W., Tungtrakul P. and Soponronnarit S., (2009) Accelerated aging of jasmine brown rice by high-temperature fluidization technique. *Food Res Int.*, 42: 674-681.
- Juliano B.O., (1985) *Rice. Chemistry and technology: criteria and tests for rice grain qualities*, 3rd edition, American Association of Cereal Chemists, Inc, St. Paul, Minnesota, USA, 774 P.
- Juliano B.O., (1992) Structure and function of the rice grain and its fractions. *Cereal Foods World.*, 37: 772-774.
- Lai, H.M., (2001) Effects of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. *Food Chem.*, 72: 455-463.
- Madhiyanon T., Phila A. and Soponronnarit S., (2009) Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. *Appl. Therm. Eng.*, 29: 2849-2854.
- Netzel M., Netzel G., Kammerer D.R., Schieber A., Carle R., Simons L., Bitsch I., Bitsch R. and Konczak I., (2007) Cancer cell antiproliferation activity and metabolism of black carrot anthocyanins. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 8: 365-372.
- Normand F.L. and Mashall W.E., (1989) Differential scanning calorimetry of whole grain milled rice and milled rice and milled rice flour. *Cereal Chem.*, 66: 317-320.
- Poomsa-ad N., Soponronnarit S., Prachayawarakorn S. and Terdyothin A., (2002) Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidization technique. *Drying Technol.*, 20: 195-210.
- Rattanamechaiskul C., Soponronnarit S., Prachayawarakorn S. and Tungtrakul P., (2013) Optimal operating conditions to produce nutritious partially parboiled brown rice in a humidified hot air fluidized bed dryer. *Drying Technol.*, 31: 368-377.
- Thuwapanichayanan R., Prachayawarakorn S., Kunwisawa J. and Soponronnarit S., (2011) Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT-Food Sci Technol.*, 44: 1502-1510.
- Tirawanichakul S., Prachayawarakorn S., Varayanond W., Tungtrakul P. and Soponronnarit S., (2004) Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. *Drying Technol.*, 22: 1731-1754.

- Soponronnarit S. and Prachayawarakorn S., (1994) Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. *Drying Technol.*, 12: 1667-1686.
- Soponronnarit S., Yapha M. and Prachayawarakorn S., (1995) Cross-flow fluidized bed paddy dryer: prototype and commercialization. *Drying Technol.*, 13: 2207-2216.
- Suwannaporn P., Pitiphunpong S. and Champangern S., (2007) Classification of rice amylose content by discriminant analysis of physicochemical properties. *Starch*, 59: 171-177.
- Zavareze E., Mello El Halal S.L. de los Santos D.G., Helbig E., Pereira J.M. and Guerra Dias A.R., (2012) Resistant starch and thermal, morphological and textural properties of heat-moisture treated rice starches with high-, medium- and low-amylose content. *Starch*, 64: 45-54.