



การพัฒนาข้าวทนทานต่อการย่อย

Development of Resistant Milled Rice

พรทิพย์ ศิริสุนทรลักษณ์^{1*} ชนิตร์นันท์ ภูมิพันธ์² ทศนีย์ วันดี² และนันทรัตน์ ณ นครพนม¹

¹สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

²คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ซ. สุขุมวิท 23 เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

*Corresponding Author, E-mail: porntips@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการพัฒนาข้าวทนทานต่อการย่อยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการหุงสุก ระดับการหุงสุก และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นต่อคุณภาพและปริมาณแป้งทนทานต่อการย่อยจากข้าวพันธุ์ที่มีอะมิโลสสูง (พันธุ์ กข 31) โดยนำเมล็ดข้าวสารมาต้มในน้ำเดือดและหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวจนมีระดับการสุก 30% และ 90% ก่อนนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น (4 ± 2 °C) เป็นระยะเวลา 0, 3, 7, 14, และ 21 วัน จากนั้นทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ด้วยเครื่องทำแห้งแบบถาดลมร้อน พบว่าข้าวทนทานต่อการย่อยมีความหนาแน่นรวม 0.74-0.84 g/cm³ ใกล้เคียงข้าวสาร ระยะเวลาหุงสุกและดัชนีความขาวน้อยกว่าข้าวสาร ในขณะที่การดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มและความแข็งของข้าวหุงสุกมากกว่า ความหนืดน้ำแป้งลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายแป้งที่ผ่านเจลาติไนซ์ ยกเว้นข้าวที่ผ่านการหุงด้วยหม้อหุงข้าวที่ระดับการสุก 30% กระบวนการหุงสุกและทำแห้งทำให้ปริมาณแป้งทนทานต่อการย่อย (RS) ของข้าวสาร (15.40 g/100g) ลดลงเหลือ 5.61-7.08 g/100g แต่หากนำข้าวหุงสุกมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นเป็นระยะเวลา 21 วันก่อนทำแห้ง จะทำให้ปริมาณ RS ของข้าวทนทานต่อการย่อยจากวิธีต้มในน้ำเดือดและวิธีหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเพิ่มขึ้นเป็น 21.32 และ 21.67 g/100 g ตามลำดับ โดยระดับการหุงสุก 30% จะให้ปริมาณ RS มากกว่าระดับการหุงสุก 90%

ABSTRACT

The study of development of resistant milled rice aimed to evaluate effects of cooking method, degree of cooking and storing at chilling temperature on qualities and resistant starch content of high amylose rice (variety RD 31). Milled rice was boiled and cooked using rice cooker until 30% and 90% degree of cooking, storing at chilling temperature (4 ± 2 °C) for 0, 3, 7, 14 and 21 days and dried at 50 °C using hot air tray dryer. Resistant rice grain had bulk density of 0.74-0.84 g/cm³, which was close to milled rice. Cooking time and whiteness index were less than those of milled rice. Whereas water absorption and cooked rice hardness were more than those of milled rice. Reduction of paste viscosity was observed. Changes of viscosity were comparable to those of pregelatinized flours except resistant rice grain cooking with rice cooker at 30% degree of cooking. Cooking and drying processes decreased resistant starch content (RS) of milled rice from 15.40 g/100g to 5.61-7.08 g/100g. However, storing cooked rice at chilling temperature for 21 days before drying enhanced RS to 21.32 and 21.67 g/100 g for

resistant rice grain prepared by boiling and cooking with rice cooker, respectively. Cooking at 30% contributed higher RS than those of 90%.

คำสำคัญ: ข้าว อะมิโลสสูง แป้งทนทานต่อการย่อย คุณภาพการหุงต้ม

Keywords: Rice, High amylose, Resistant starch, Cooking quality

บทนำ

การบริโภคอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตปริมาณมากไม่เป็นผลดีต่อสุขภาพ เพราะเป็นอาหารที่มีดัชนีไกลซีมิก (Glycemic Index, GI) สูง แป้งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ ในลำไส้เล็ก และปลดปล่อยกลูโคสเข้าสู่กระแสเลือดทำให้เกิดความอ้วน โรคเบาหวาน โรคหลอดเลือดหัวใจ และโรคเมธิ่ง สำหรับข้าวซึ่งเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงาน ไขมันต่ำ มีคาร์โบไฮเดรตที่เป็นแป้งปริมาณมาก และย่อยง่าย ซึ่งหากแบ่งข้าวตามระดับ GI พบว่าข้าวสารและข้าวหุงสุกเป็นอาหารที่มี GI สูง ซึ่งผู้บริโภคนิยมบริโภคมากกว่าข้าวกล้องซึ่งหุงสุกยาก เนื้อสัมผัสแข็ง และผู้บริโภคบางกลุ่มยังไม่คุ้นเคยในการบริโภค

แป้งทนทานต่อการย่อย (resistant starch, RS) เป็นแป้งที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์เป็น D-glucose ในลำไส้เล็ก ภายใน 120 นาทีที่ภายหลังจากบริโภค แต่จะผ่านและถูกหมักในลำไส้ใหญ่ อาหารที่มีปริมาณ RS มากจะถูกย่อยอย่างช้าหรือไม่ถูกย่อยซึ่งช่วยควบคุมการปลดปล่อยน้ำตาลกลูโคสเข้าสู่กระแสเลือด ลดการตอบสนองของอินซูลิน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ป่วยโรคเบาหวาน RS ทำหน้าที่เหมือนกากใยอาหาร ช่วยระบบขับถ่าย ทำให้รู้สึกอิ่ม สามารถควบคุมน้ำหนักและโรคอ้วน และ RS เป็นอาหารสำหรับจุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ สร้างกรดไขมันสายสั้นที่ยับยั้งการเติบโตของเซลล์มะเร็ง ลดการเกิดมะเร็งลำไส้ (Fuentes-Zaragoza et al., 2010)

กระบวนการแปรรูปสามารถเพิ่มหรือลดปริมาณ RS โดยการหุงสุกซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งที่อยู่ในน้ำ แป้งในข้าวจะเกิดเจลลิตินในซีเซชัน พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่แป้งจะถูกรบกวน เม็ดแป้งบวม และแตกออก ทำให้เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยเข้าถึงสายโซ่แป้งมากขึ้น ปริมาณ RS ลดลง ทั้งนี้ระดับการเกิดเจลลิตินซึ่งจะมีผลต่อปริมาณ RS (Chung et al., 2006) นอกจากนี้วิธีการหุงข้าว เช่น การต้ม (boiling) การหุงสุกภายใต้ความดัน (pressure cooking) ซึ่งใช้ปริมาณน้ำ และอุณหภูมิในการหุงสุกแตกต่างกันจะมีผลต่อปริมาณ RS ทั้งนี้ข้าวหุงสุกที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมี RS

มากกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำและปานกลาง (Sagum and Arcot, 2000) หลังจากการหุงสุก การทำให้ข้าวหุงสุกเย็นลงด้วยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นจะทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัวของผลึก ทำให้แป้งมีความต้านทานต่อเอนไซม์มากขึ้น ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น (Sagum and Arcot, 2000; Frei et al., 2003; Yadav et al., 2010) การเพิ่มปริมาณ RS ชนิดที่ 3 (RS3 หรือแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชัน) ในข้าวสารจึงเป็นไปได้ผ่านวิธีการกายภาพด้วยการทำให้สุกและเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาข้าวทนทานต่อการย่อย โดยศึกษาผลของวิธีการหุงสุก ระดับการหุงสุก และระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นต่อคุณภาพและปริมาณ RS ของข้าวพันธุ์ที่มีอะมิโลสสูง เพื่อให้ได้ข้าวสารที่มีคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพการหุงต้มและบริโภคไม่แตกต่างจากข้าวสารปกติ แต่มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมข้าวทนทานต่อการย่อย

นำข้าวสารพันธุ์อะมิโลสสูง (พันธุ์ กข 31) มาหุงสุกด้วยการต้มในน้ำเดือด (boiling) และหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว (cooking with rice cooker) สำหรับการต้มในน้ำเดือด จะนำข้าวสารมาต้มในน้ำเดือด โดยใช้อัตราส่วนข้าว:น้ำ เป็น 1:10 (w/v) จนระดับการสุกเป็น 30% และ 90% (การประเมินระดับการสุกทำโดยสุ่มตัวอย่างข้าวจำนวน 10 เมล็ด มากดทับด้วยกระจกใส นับจำนวนเมล็ดที่เจลลิตินในซีสมบурณและไม่มีไตขาว) ส่วนวิธีการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว จะนำข้าวสารเติมน้ำ (อัตราส่วนข้าว:น้ำ เท่ากับ 1:2 (w/v)) จากนั้นหุงสุกในหม้อหุงข้าว จนระดับการสุกเป็น 30% และ 90% จากนั้นนำข้าวหุงสุกมาทำให้เย็นทันที สะเด็ดน้ำให้แห้ง เกลี่ยให้เป็นชั้นบางบนถาดลดความชื้นด้วยการผึ่งลมเย็นเป็นระยะเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ก่อนบรรจุในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน (polyethylene, PE) ปิดผนึกถุง ก่อนนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น (4 ± 2 °C) เป็นระยะเวลา 0, 3, 7, 14, และ 21 วัน จากนั้นทำแห้งที่อุณหภูมิ

50 °C ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลาดมร้อน จนข้าวมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 12-14% (wb) จากนั้นนำข้าวมาตรวจสอบคุณภาพ ได้แก่ คุณภาพทางกายภาพ (สี ความหนาแน่นรวม ความหนืดน้ำแป้ง) คุณภาพการหุงต้มและบริโภคนิยม (เวลาหุงสุก อัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงสุก ปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้ม ความแข็งของข้าวสุก) และปริมาณ RS และเปรียบเทียบคุณภาพกับข้าวสารพันธุ์อะมิโลสสูง (พันธุ์ กข 31) ซึ่งบรรจุในถุงพลาสติก โพลีเอทิลีนและเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

2. การตรวจสอบคุณภาพของข้าวทนทานต่อการย่อยและข้าวสาร

สี วัดค่าสี ได้แก่ ค่า L^* (ความสว่าง), ค่า a^* (ความเป็นสีแดง), ค่า b^* (ความเป็นสีเหลือง) ด้วยเครื่อง Color Guide Gloss (BYK Gardner GmbH, Germany) และคำนวณดัชนีความขาว (Whitening Index, WI) จากสูตร

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

ความหนาแน่นรวม (bulk density) หาปริมาตรข้าวที่ทราบน้ำหนัก โดยใส่ข้าวสลักกับเมล็ดแมงลักที่ทราบปริมาตรที่แน่นอน รายงานค่าเป็นน้ำหนักข้าว/ปริมาตรข้าว ส่วน **ความหนืดน้ำแป้ง** บดตัวอย่างข้าวและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 เมช ก่อนนำมาวิเคราะห์ความหนืดน้ำแป้งด้วยด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer ด้วย AACC Approved Method 61-02 (AACC, 2000) สำหรับ **เวลาหุงสุก** ประเมินเวลาหุงสุก โดยการใส่ตัวอย่างข้าวในน้ำเดือดอัตราส่วน 1:5 จับเวลา สุ่มตัวอย่างข้าว 10 เมล็ด มาทดสอบด้วยจานแก้ว บันทึกเวลาหุงสุกที่ข้าว 8 ใน 10 เมล็ด ไม่มีแกนขุ่น และวิเคราะห์อัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงสุก โดยนำตัวอย่างข้าว 2 g ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 20 ml ปิดปากหลอดด้วยสำลี ต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 100 °C ตามระยะเวลาหุงสุก ทำให้หลอดเย็นทันที รินน้ำออกจนหมด ก่อนชั่งน้ำหนักข้าวหลังหุงสุก คำนวณน้ำหนักน้ำที่ถูกดูดซับ รายงานค่าเป็น g water/g rice และ **ปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้ม** โดยหุงสุกตัวอย่างข้าวในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 100 °C (ตามวิธีข้างต้น) และเทน้ำที่เหลือจากการหุงสุกปริมาณ 10 ml ลงในถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบลมร้อน 135 °C นาน 8 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ รายงานค่าเป็น g solids /100 g rice ส่วนเนื้อสัมผัส วิเคราะห์ **ความแข็งของข้าวสุก** โดยนำตัวอย่างข้าว 10 g ใส่ในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 17.5 ml ปิดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ ใส่ในหม้อหุงข้าวที่มีน้ำภายในหม้อ

800 ml หุงข้าวทนทานต่อการย่อยและข้าวสารเป็นระยะเวลา 10 นาที และ 21 นาที อุ่นข้าวในหม้อหุงข้าว 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงนาน 45 นาที จากนั้นวัดความแข็งของข้าวสุกด้วยวิธี Back Extrusion Tests โดยเครื่อง Texture Analyzer (LLOYD Instrument model LRX 5 k, LLOYD Instrument Ltd.) โดยนำข้าวสุก 4 g มาใส่กระบอกสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.5 mm พื้นที่ตัดขวาง 1.55 cm² และสูง 4.91 cm และกดด้วยหัวกดเป็นแท่งสแตนเลสที่มีหัวทรงกลมเป็นเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.4 mm ที่เคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 50 mm/min และหยุดเหนือฐานรองทรงกระบอก 1 mm ความแข็งของข้าวสุกคือค่าแรงสูงสุดในขณะที่ข้าวไหลล้นขึ้นมา

3. การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทนทานต่อการย่อย

วิเคราะห์ปริมาณ RS โดยดัดแปลงจากวิธีของ Goni et al., 1997) ซึ่งตัวอย่างข้าว 0.2 g (น้ำหนักแห้ง) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 ml เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 20 ml ปรับ pH เป็น 2.0 ด้วย 5 M HCl ผสมให้เข้ากันด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) ทำการย่อยโปรตีนในเมล็ดข้าวด้วยเอนไซม์เพปซิน (pepsin enzyme) (EC3.1.23.1, Sigma Chemical, USA) (อัตราส่วนระหว่างเอนไซม์ต่อสับสเตรทเป็น 1:17 ละลายใน 0.01 M HCl ปริมาตร 0.2 ml) บ่มที่ 37°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาตามกำหนด ปรับ pH เป็น 7.0 ด้วย 2 M NaOH ผสมให้เข้ากันด้วยแท่งแม่เหล็ก เป็นเวลา 5 นาที เติมน้ำกลั่นอัลฟาอะมิเลส (alpha amylase enzyme) (A6255, Sigma, Sigma-Aldrich, Inc., Missouri, USA) 100 µl บ่มที่ 37°C เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นหมุนเหวี่ยงที่ 10,000 × g นาน 10 นาที นำตะกอนมาเติม 2 M KOH ปริมาตร 2 ml ปรับ pH เป็น 4.2 ด้วย 2 M HCl และเติมน้ำกลั่นอะมิโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase enzyme) ปริมาตร 0.1 ml บ่มที่ 50°C เป็นเวลา 30 นาที นำไปหมุนเหวี่ยงที่ 12,000 × g เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสด้วย dinitrosalicylic colorimetric method คำนวณความเข้มข้นของกลูโคสโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคส และเปลี่ยนความเข้มข้นของกลูโคสเป็นปริมาณแป้งทั้งหมดด้วยการคูณ factor 0.9

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยคุณภาพข้าวด้วย One Way ANOVA และ Duncan's New Multiple Range

Test ที่ระดับนัยสำคัญ 95% โดยใช้โปรแกรม SPSS Version 11.5

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. คุณภาพข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด

ข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมจากข้าวที่ผ่านการต้มในน้ำเดือด จนระดับการสุกเป็น 30% และ 90% แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นระยะเวลา 0, 3, 7, 14, และ 21 วัน จากนั้นนำไปทำแห้ง (50 °C) พบว่าข้าวที่เตรียมได้มีความหนาแน่นรวม 0.74-0.82 g/cm³ ไม่แตกต่างจากข้าวสาร (0.80 g/cm³) และความหนาแน่นรวมไม่แตกต่างตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น ($p > 0.05$) (ตารางที่ 1) กระบวนการผลิตข้าวทนทานต่อการย่อยคล้ายกับการผลิตข้าวหุงสุกเร็ว โดยความหนาแน่นรวมใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกเร็วจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผลิตด้วยวิธีให้ความร้อนก่อน-แช่น้ำ-หุงสุก-ทำแห้ง ซึ่งเท่ากับ 0.9 g/cm³ (กมลทิพย์, 2532) อย่างไรก็ตามสุภาภรณ์ (2545) รายงานความหนาแน่นรวมของข้าวหุงสุกเร็ว 0.51 g/cm³ เมื่อใช้วิธีหุงสุก-แช่เยือกแข็ง-ทำแห้งด้วยไมโครเวฟ ทั้งนี้ความหนาแน่นรวมต่ำแสดงความสามารถในการดูดซับน้ำกลับของข้าวเมื่อนำข้าวไปเติมน้ำร้อนหรือหุงสุก สำหรับสี ข้าวทนทานต่อการย่อยมีดัชนีความขาว (WI) (60.56- 66.60) น้อยกว่าข้าวสาร (69.48) และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น 21 วัน ทำให้ WI มีแนวโน้มลดลง เมื่อเตรียมจากข้าวที่ผ่านการหุงสุก 30% การลดลงของ WI อาจเกิดเนื่องจากการเจลาติไนซ์ทำให้เมล็ดข้าวมีสีขาวทึบ และการทำให้แห้งด้วยลมร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) หรือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Inprasit and Noomhorm, 2001)

ข้าวทนทานต่อการย่อยมีระยะเวลาหุงสุกประมาณ 5.0-7.5 นาที (ระดับการหุงสุก 30%) และ 3.8-6.3 นาที (ระดับการหุงสุก 90%) ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากระยะเวลาหุงสุกของข้าวสาร (21.3 นาที) ประมาณ 3-4 เท่า โดยข้าวที่ผ่านการหุงสุก 90% จะมีระยะเวลาหุงสุกสั้นกว่า ส่วนการดูดซับน้ำระหว่างการหุงสุกอยู่ระหว่าง 2.51-3.84 g/g ซึ่งส่วนใหญ่มีแนวโน้มมากกว่าข้าวสาร (2.59 g/g) โดยไม่แตกต่างกันตามระดับการหุงสุกและระยะเวลาเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น และปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้มของ

ข้าวทนทานต่อการย่อย (0.74-4.56 g/100g) ซึ่งส่วนใหญ่มีแนวโน้มน้อยกว่าข้าวสาร (1.93 g/100g) โดยเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น ($p < 0.05$) สำหรับเนื้อสัมผัส ความแข็งข้าวหุงสุกจากข้าวทนทานต่อการย่อย (26.17-48.76 N และ 25.62-33.27 N) มากกว่าข้าวสารหุงสุก (23.55 N) และไม่พบผลของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นก่อนทำแห้งต่อความแข็งข้าวสุก (ตารางที่ 1) ทั้งนี้ข้าวทนทานต่อการย่อยเป็นข้าวที่เจลาติไนซ์เซชันบางส่วนหรือเจลาติไนซ์เซชันอย่างสมบูรณ์ก่อนจะทำแห้ง จึงทำให้คุณภาพการหุงต้มของข้าวทนทานต่อการย่อยแตกต่างจากข้าวสาร โดยการทำแห้งข้าวหุงสุกอาจทำให้เกิดโครงสร้างแบบรูพรุน (Luh et al., 1980) เมื่อนำข้าวทนทานต่อการย่อยมาหุงสุกอีกครั้ง น้ำจึงแทรกผ่านเข้าเมล็ดอย่างรวดเร็วและง่าย ทำให้ระยะเวลาหุงสุกสั้นลงและการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มมากขึ้น สำหรับปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้มที่น้อยกว่าข้าวสารอาจเนื่องมาจากอะมิโลสหรือส่วนประกอบทางเคมีที่ละลายน้ำสูญเสียปริมาณมากแล้วในระหว่างการหุงสุกด้วยการต้มในน้ำเดือด อย่างไรก็ตามความแข็งของข้าวทนทานต่อการย่อยที่นำมาหุงสุกอีกครั้งกลับมากกว่าข้าวสารหุงสุก ซึ่งแตกต่างจากพรทิพย์และคณะ (2551) ที่รายงานความแข็งของข้าวหุงสุกเร็วที่ผลิตด้วยวิธีใช้ความร้อนแห้งลดลงหลังนำมาหุงสุกอีกครั้ง และน้อยกว่าความแข็งของข้าวสารหุงสุก ทั้งนี้อาจเนื่องจากการบวนการผลิตที่แตกต่างกัน

ความหนืดน้ำแป้งของข้าวทนทานต่อการย่อย น้อยกว่าข้าวสาร (ตารางที่ 2) โดย peak viscosity และ final viscosity ของข้าวทนทานต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น 21 วัน ลดลง ($p < 0.05$) ทั้งนี้ไม่พบผลของระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นต่อค่า breakdown, consistency และ setback ($p \geq 0.05$) ในภาพรวมข้าวทนทานต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นนานขึ้นก่อนทำแห้ง จะมีความหนืดน้ำแป้งลดลง ในขณะที่ไม่พบผลของระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นอย่างชัดเจนสำหรับข้าวทนทานต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90%

กระบวนการผลิตข้าวทนทานต่อการย่อย ได้แก่ การหุงสุกด้วยการต้มในน้ำเดือด การเก็บและไม่เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น และการทำแห้ง ซึ่งการเกิดเจลาติไนซ์เซชันบางส่วนหรืออย่างสมบูรณ์ในขั้นตอนการหุงสุกทำให้การจัดเรียงโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบในเม็ดแป้งถูกรบกวนและโครงสร้างผลึกถูกทำลายทำให้

ความหนืดของแป้งข้าวทนต์ต่อการย่อยระหว่างการให้ความร้อนซ้ำลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสาร ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของความหนืดน้ำแป้งของแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์หรือผ่านการแปรรูป เช่น การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง การทำแห้งด้วยลมร้อน (Yadav et al., 2006) การหุงสุกด้วยไอน้ำ (Siddiq et al., 2013) และการหุงสุกด้วยเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Menegassi et al., 2011) นอกจากนี้ความหนืดน้ำแป้งของข้าวหุงสุกเร็วกว่าข้าวสารเช่นเดียวกัน เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของแป้งและลิพิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตขัดขวางการพองตัว (swelling) ของเม็ดแป้ง (Prasert and Suwannaporn, 2009) นอกจากนี้แป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์ (pre-gelatinized flours) จากการให้ความร้อนจะแสดงค่า Setback ต่ำกว่าแป้งดิบ (Yadav et al., 2006) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษานี้ หากพิจารณาความหนืดน้ำแป้งขณะเย็นตัวลง (cold paste viscosity) ของแป้งข้าวทนต์ต่อการย่อยค่อนข้างสูง ซึ่งเหมือนกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้ำแป้งของแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์ซึ่งแสดงสมบัติการดูดซับน้ำอย่างรวดเร็วและระยะเวลาหุงสุกสั้นของผลิตภัณฑ์ (Prasert and Suwannaporn, 2009)

ข้าวที่ผ่านการหุงสุก 30% และ 90% ก่อนทำแห้ง มีปริมาณ RS (5.61-7.08 g/100 g) ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) และเมื่อนำข้าวที่ผ่านการหุงสุก 30% และ 90% เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น 21 วัน ก่อนทำแห้ง ทำให้ข้าวมีปริมาณ RS เพิ่มมากขึ้น ($p < 0.05$) เป็น 21.32 g/100 และ 18.23 g/100 g ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าข้าวสารที่มีปริมาณ RS เป็น 15.40 g/100 g (รูปที่ 1) การทำให้ข้าวหุงสุกเย็นลงหลังการเกิดเจลาติไนซ์และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นจะทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัวของผลึกทำให้แป้งมีความต้านทานต่อเอนไซม์มากขึ้น โดยอาจเป็นการคืนตัวของผลึกอย่างสมบูรณ์และสามารถย้อนกลับได้ของอะมิโลเพกตินและการคืนตัวของผลึกบางส่วนที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ของอะมิโลส สำหรับข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุกและเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นนานขึ้นก่อนนำไปทำแห้งจะมีปริมาณ RS เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RS หรือการลดลงของดัชนีไกลซีมิคของข้าวหุงสุกที่เย็นตัวลงหรือเก็บ

รักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น (Sagum and Arcot, 2000; Frei et al., 2003)

อย่างไรก็ตามการเก็บรักษานานถึง 21 วัน ก่อนทำแห้งทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น (เฉพาะข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30%) ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Hsu et al. (2015) ที่พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RS ของข้าวสายพันธุ์อินดิโกอะมิโลสต่ำและอะมิโลสสูงที่ผ่านการหุงสุก เก็บรักษาอุณหภูมิแช่เย็นเพียง 1 วันก่อนทำแห้ง อาจเนื่องมาจาก Hsu et al. (2015) ใช้วิธีการหุงสุกแบบจำกัดน้ำทำให้เม็ดแป้งไม่บวมเต็มที่และโครงสร้างโมเลกุลสายยาวในข้าวอะมิโลสสูงส่งเสริมการเกิดผลึกแบบไม่สมบูรณ์แสดงให้เห็นจากการลดลงของปริมาณแป้งย่อยเร็วและเพิ่มขึ้นของปริมาณ RS นอกจากนี้โครงสร้างระดับโมเลกุลของข้าวอาจแตกต่างกัน อะมิโลเพกตินมีบทบาทหลักในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยาวของสายโซ่ หากข้าวมีปริมาณอะมิโลสใกล้เคียงกัน แต่องค์ประกอบย่อยอะมิโลสและอะมิโลเพกตินมีความยาวสายโซ่ต่างกันจะให้ผลึกไม่สมบูรณ์และการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกต่างกันระหว่างรีโทรเกรเดชัน ส่งผลให้ปริมาณ RS เปลี่ยนแปลงต่างกัน

สำหรับระดับการหุงสุก ข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% ก่อนทำแห้ง จะมีปริมาณ RS มากกว่าข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90% ซึ่งยืนยันว่าระดับการเกิดเจลาติไนซ์เซชันจะมีผลต่อคุณสมบัติการย่อยของแป้ง โดย Chung et al. (2006) พบว่าแป้งดิบของข้าวเหนียวจะมีปริมาณ RS มากที่สุด จากนั้นจะลดลงเมื่อผ่านการเจลาติไนซ์บางส่วนและลดลงเหลือน้อยที่สุดเมื่อผ่านการเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ เม็ดแป้งที่พองตัวโดยส่วนใหญ่จะถูกทำลายด้วยความร้อนที่มากเกินไปและแรงทางกลจากการเขย่า ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นอสัณฐานที่ต่อเนื่อง (continuous amorphous structure) ซึ่งเอนไซม์สามารถเข้าย่อยได้ง่าย ในขณะที่แป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์บางส่วน จะมีแป้งที่ทนทานต่อเอนไซม์เหลือในปริมาณใกล้เคียงกับแป้งดิบ และยังมีแป้งที่พองตัวบางส่วนไม่ถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ เพราะได้รับความร้อนและน้ำในปริมาณจำกัด จึงทำให้เอนไซม์สามารถเข้าย่อยได้ยากกว่าแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นรวม, ดัชนีความขาวและคุณภาพการหุงต้มของข้าวทันทานต่อการย่อยที่เตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด

ระดับการสุก (%)	เวลาเก็บรักษา (วัน)	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ดัชนีความขาว	เวลาหุงสุก (นาที)	อัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงสุก (g/g)	ปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้ม (g/100g)	ความแข็งของข้าวสุก (N)
30	0	0.80±0.03ab	66.60±0.70a	7.5±0.6	3.07±0.06b	0.74±0.08b	36.67±4.37bc
	3	0.74±0.02c	63.11±1.02b	7.5±0.0	3.49±0.06a	1.44±0.10b	48.76±9.03a
	7	0.76±0.02bc	64.96±0.55ab	6.0±0.8	2.93±0.31b	1.15±0.66b	32.23±3.61c
	14	0.77±0.02a-c	63.26±1.12b	6.0±0.8	2.51±0.06c	1.24±0.30b	44.51±3.65ab
	21	0.82±0.02a	64.64±0.72b	5.0±0.0	3.84±0.25a	4.56±0.58a	26.17±0.70c
90	0	0.81±0.05a	62.97±0.81a	5.3±0.5	3.15±0.13a	0.89±0.11c	33.27±4.67a
	3	0.81±0.03a	63.27±0.34a	6.3±0.5	3.18±0.10a	0.75±0.06c	31.78±3.73a
	7	0.82±0.02a	60.56±1.65b	3.8±0.5	2.59±0.09a	0.99±0.15bc	25.62±1.84b
	14	0.78±0.02a	61.88±1.19ab	6.0±0.8	2.71±0.12a	1.33±0.19ab	29.58±3.81ab
	21	0.78±0.03a	63.38±0.14a	5.0±0.0	2.74±0.56a	1.66±0.29a	29.07±2.93ab
Milled rice	-	0.80±0.03	69.48±0.35	21.3±0.4	2.59±0.05	1.93±0.22	23.55±1.96

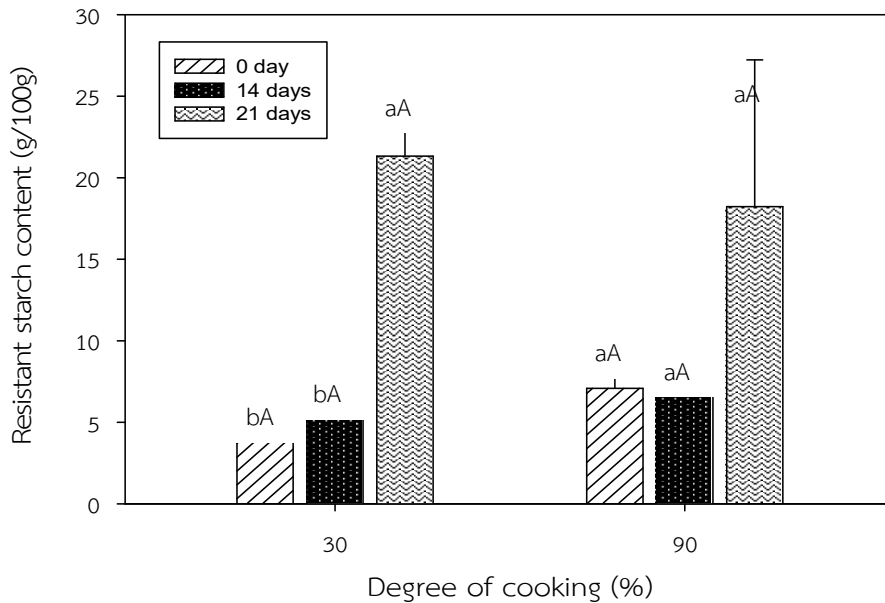
สำหรับแต่ละระดับการสุก ค่าเฉลี่ย±SD ที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวแถว หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 2 ความหนืดน้ำแป้งของข้าวทันทานต่อการย่อยที่เตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด

ระดับการสุก (%)	เวลาเก็บรักษา (วัน)	ความหนืดน้ำแป้งจาก Rapid Visco Analyzer*				
		PV	BD	FV	CS	SB
30	0	29.5±0.3b	0.1±0.0a	39.9±0.6b	10.5±0.9a	10.5±0.9a
	3	46.6±3.3a	0.0±0.2a	57.3±2.9a	10.8±0.1a	10.8±0.4a
	7	28.6±3.3b	0.2±0.4a	38.5±2.2bc	10.1±0.6a	9.9±1.1a
	14	23.3±0.7bc	0.3±0.1a	31.8±0.2cd	8.8±0.8a	8.5±0.8a
	21	16.8±0.0c	0.0±0.0a	27.5±0.0d	10.8±0.0a	10.8±0.0a
90	0	32.3±0.4ab	0.1±0.0a	43.3±0.5a	11.1±0.1a	11.0±0.1a
	3	36.0±3.8a	0.2±0.2a	47.8±4.1a	12.0±0.5a	11.8±0.4a
	7	25.4±1.9b	0.3±0.4a	35.3±2.5a	10.2±1.0a	9.9±0.6a
	14	30.8±1.2ab	0.2±0.1a	43.9±1.3a	13.4±0.2a	13.2±0.1a
	21	24.4±3.8b	0.8±0.6a	36.3±6.1a	12.6±1.7a	11.9±2.3a
Milled rice	-	171.9±6.3	57.3±5.5	289.2±8.4	174.6±9.2	117.3±14.7

* PV = peak viscosity, BD = (PV-minimum viscosity), FV = final viscosity, CS = consistency (FV-minimum viscosity), SB setback (FV-PV)

สำหรับแต่ละระดับการสุก ค่าเฉลี่ย±SD ที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวแถว หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



รูปที่ 1 ปริมาณแป้งทนทานต่อการย่อยของข้าวทนทานต่อการย่อยที่เตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด สำหรับแต่ละระดับการสุก ค่าเฉลี่ย±SD ที่มีตัวอักษรตัวเล็กต่างกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และสำหรับแต่ละเวลาเก็บรักษา ค่าเฉลี่ย±SD ที่มีตัวอักษรตัวใหญ่ต่างกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. คุณภาพข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมโดยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว

ข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมโดยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวมีความหนาแน่นรวม $0.76-0.84 \text{ g/cm}^3$ ไม่แตกต่างจากข้าวสาร (0.80 g/cm^3) และความหนาแน่นรวมไม่แตกต่างกันตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น ($p \geq 0.05$) สำหรับดัชนีความขาวของข้าวทนทานต่อการย่อยใกล้เคียงกับข้าวสาร และข้าวทนทานต่อการย่อยที่เตรียมจากข้าวหุงสุก 30% จะมีดัชนีความขาวลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นก่อนทำแห้ง ในขณะที่เตรียมจากข้าวหุงสุก 90% จะมีค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) (ตารางที่ 3) ทั้งนี้ข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมด้วยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวมีค่าสีแตกต่างจากข้าวทนทานต่อการย่อยจากวิธีต้มในน้ำเดือด อาจเนื่องมาจากวิธีการให้ความร้อน ระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ข้าวสัมผัสความร้อนแตกต่างกัน

ข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมด้วยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวมีระยะเวลาหุงสุกประมาณ 8.1-11.5 นาที ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากระยะเวลาหุงสุกของข้าวสาร (21.3 นาที) ประมาณ 2-3 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบระดับการหุงสุกพบว่าข้าวทนทานต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% และ 90% จะมีระยะเวลาหุงสุก

ใกล้เคียงกัน (9.8-11.3 นาที และ 8.1-11.5 นาที ตามลำดับ) การดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มของข้าวทนทานต่อการย่อย (2.82-3.28 g/g) มีแนวโน้มมากกว่าข้าวสาร (2.59 g/g) ในขณะที่ปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้มอยู่ในช่วง 1.54-3.64 g/100g ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้มของข้าวสาร (1.93 g/100g) ยกเว้นข้าวที่ผ่านการหุงสุก 30% เก็บรักษา 21 วันก่อนทำแห้ง โดยทั้งสองค่าไม่แตกต่างกันตามระดับการหุงสุก และระยะเวลาเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น สำหรับความแข็งข้าวหุงสุกของข้าวทนทานต่อการย่อย (20.60-41.57 N) โดยส่วนใหญ่มากกว่าข้าวสารหุงสุก (23.55 N) โดยความแข็งของข้าวทนทานต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น (ตารางที่ 3)

หากเปรียบเทียบระหว่างวิธีการหุงต้ม ข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมด้วยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวมีระยะเวลาหุงสุกนานกว่าการต้มในน้ำเดือด อาจเนื่องมาจากการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเป็นการหุงสุกปริมาณน้ำจำกัดและความร้อนที่ใช้ไม่มาก ภายหลังจากหุงสุกจึงอาจมีแป้งที่ยังไม่เจลาติไนซ์เหลืออยู่ และอาจไม่มีการชะอะมิโลสหรือส่วนประกอบทางเคมีที่ละลายน้ำออกมา ทำให้เมื่อให้ความร้อนอีกครั้งจึงมีปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้มใกล้เคียงกับข้าวสาร

ความหนืดน้ำแป้งของข้าวทนต์ต่อการย่อยเตรียมด้วยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวมีค่าน้อยกว่าข้าวสาร เช่นเดียวกับข้าวทนต์ต่อการย่อยเตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด โดย peak viscosity และ final viscosity ของข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% ลดลง ($p < 0.05$) ในขณะที่ข้าวที่ผ่านการหุงสุก 90% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นก่อนทำแห้ง แต่ไม่พบผลของระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นต่อค่า breakdown และ consistency ของข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% และค่า breakdown ของข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90% ($p \geq 0.05$) แต่พบแนวโน้มการลดลงก่อนเพิ่มขึ้นของ ค่า breakdown ของข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90% ส่วน setback พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเฉพาะในข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90% เท่านั้น ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4) ในภาพรวมการเปลี่ยนแปลงความหนืดคล้ายกับแป้งข้าวสารโดยแป้งข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% มีความหนืดน้ำแป้งสูงกว่าแป้งข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90% และมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาแช่เย็น ในขณะที่ความหนืดน้ำแป้งของแป้งข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90% กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเป็นการหุงสุกปริมาณน้ำจำกัดและความร้อนที่ใช้ไม่สูงมาก ภายหลังจากหุงสุกจึงอาจมีแป้งที่ยังไม่เจลาติไนซ์เหลืออยู่ โดยเฉพาะข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% จึงยังคงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้ำแป้งคล้ายกับข้าวสาร แต่แป้งข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90% การเกิดเจลาติไนซ์เซชันทำให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้ำแป้งคล้ายกับข้าวทนต์ต่อการย่อยเตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด ซึ่งเหมือนแป้งผ่านการแปรรูป (processed flour) หรือแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์ (Yadav et al., 2006; Menegassi et al., 2011) และแม้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้ำแป้งของข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% จะคล้ายกับข้าวสาร แต่ปรากฏค่าความหนืดต่ำกว่าข้าวสาร เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของแป้งและลิปิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตขัดขวางการพองตัว (swelling) ของเม็ดแป้ง (Prasert and Suwannaporn, 2009)

ผลของระดับการหุงสุกเห็นได้ค่อนข้างชัดเจนในข้าวทนต์ต่อการย่อยเตรียมด้วยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว โดยที่ระดับเจลาติไนซ์ต่ำกว่า แป้งข้าวจะมี breakdown มากกว่าซึ่งแสดงว่าน่าจะพองตัวได้มากกว่า เช่นเดียวกับค่า setback ซึ่งมีแนวโน้มมากกว่า แต่ยังคงต่ำกว่าข้าวสารมาก ซึ่งสอดคล้องกับ Yadav et al. (2006)

ข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว 30% และ 90% ก่อนทำแห้ง มีปริมาณ RS (4.23-7.28 g/100g) ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) และเมื่อนำข้าวที่ผ่านการหุงสุก 30% เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น 21 วัน ก่อนทำแห้ง ทำให้ข้าวมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เป็น 21.67 g/100 g อย่างไรก็ตาม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS ของข้าวที่ผ่านการหุงสุก 90% เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น (9.62 g/100 g) ($p \geq 0.05$) (รูปที่ 2) โดยข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น 21 วัน ก่อนทำแห้ง มีปริมาณ RS มากกว่าข้าวสาร (15.40 g/100 g)

การทำให้ข้าวหุงสุกเย็นลงหลังการเกิดเจลาติไนซ์เซชัน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นจะทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ทำให้ปริมาณ RS ของข้าวทนต์ต่อการย่อยเตรียมด้วยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับข้าวทนต์ต่อการย่อยเตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด (Sagum and Arcot, 2000; Frei et al., 2003) และหากพิจารณาระดับการหุงสุก พบว่าข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 30% และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น 21 วัน ก่อนทำแห้ง จะมีปริมาณ RS เพิ่มมากกว่าข้าวทนต์ต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุก 90% เนื่องจากระดับการเกิดเจลาติไนซ์เซชันจะมีผลต่อคุณสมบัติการย่อยของแป้ง (Chung et al., 2006) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาวิธีการหุงสุก ปริมาณ RS ของข้าวทนต์ต่อการย่อยเตรียมด้วยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวใกล้เคียงกับข้าวทนต์ต่อการย่อยเตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด ซึ่งแตกต่างจากการหุงสุกภายใต้ความดันด้วยหม้ออัดความดันที่ทำให้แป้งถูกย่อยมากกว่า และปริมาณ RS น้อยกว่าการต้มในน้ำเดือด (Sagum and Arcot, 2000; Eyearu et al., 2009)

ตารางที่ 3 ความหนาแน่นรวม, ดัชนีความขาวและคุณภาพการหุงต้มของข้าวทันทานต่อการย่อยที่เตรียมโดยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว

ระดับการสุก (%)	เวลาเก็บรักษา (วัน)	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ดัชนีความขาว	เวลาหุงสุก (นาที)	อัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงสุก (g/g)	ปริมาณของแข็งในน้ำหุงต้ม (g/100g)	ความแข็งของข้าวสุก (N)
30	0	0.81±0.05a	71.35±0.27a	11.1±0.3	3.07±0.12a	2.17±0.05b	38.85±6.71ab
	3	0.83±0.02a	71.28±0.69a	9.8±1.0	3.28±0.22a	2.19±0.34b	40.29±7.15a
	7	0.78±0.02a	69.72±0.69b	11.3±0.5	2.93±0.47a	1.58±0.43b	36.33±4.88ab
	14	0.81±0.03a	69.28±0.64b	10.0±0.0	2.87±0.28a	1.54±0.25b	35.91±5.59ab
	21	0.84±0.03a	67.68±0.33c	10.8±0.5	2.83±0.23a	3.64±0.60a	29.61±3.09b
90	0	0.77±0.02a	65.73±0.31b	11.5±0.6	3.13±0.09a	1.93±0.28a	35.41±2.28ab
	3	0.76±0.04a	65.72±0.72b	9.9±0.3	3.10±0.36a	2.30±0.62a	34.85±4.7b
	7	0.81±0.03a	65.19±0.64b	9.6±0.5	3.06±0.31a	1.91±0.51a	31.64±4.9b
	14	0.76±0.02a	63.80±0.71c	8.1±0.6	2.82±0.21a	1.66±0.68a	20.60±2.11c
	21	0.80±0.04a	68.26±0.59a	11.5±0.6	3.19±0.31a	2.06±0.31a	41.57±3.14a
Milled rice	-	0.80±0.03	69.48±0.35	21.3±0.4	2.59±0.05	1.93±0.22	23.55±1.96

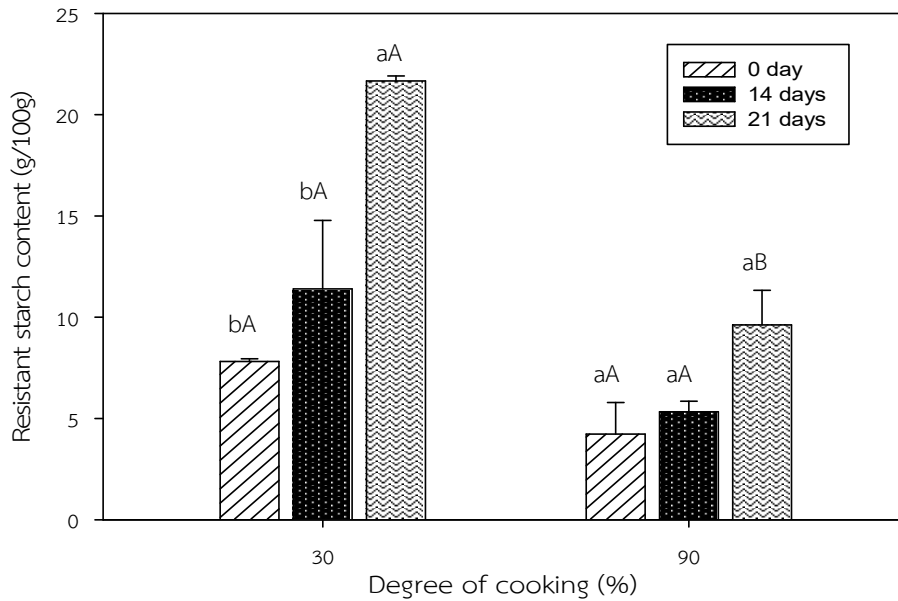
สำหรับแต่ละระดับการสุก ค่าเฉลี่ย±SD ที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวแถว หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4 ความหนืดน้ำแป้งของข้าวทันทานต่อการย่อยที่เตรียมโดยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว

ระดับการสุก (%)	เวลาเก็บรักษา (วัน)	ความหนืดน้ำแป้งจาก Rapid Visco Analyzer*				
		PV	BD	FV	CS	SB
30	0	105.0 ±15.9a	28.1±7.4a	142.8±22.9a	66.0±14.3a	37.8±7.0a
	3	76.1±6.2ab	9.1±0.7a	111.5±9.0ab	44.5±2.1a	35.4±2.8a
	7	75.8±27.0ab	18.7±10.4a	107.1±36.2ab	50.0±19.5a	31.3±9.1a
	14	63.7±8.3ab	12.2±7.1a	97.2±7.4ab	45.6±6.2a	33.5±0.9a
	21	38.5±4.7b	3.1±0.8a	58.1±4.3b	22.8±0.4a	19.6±0.4a
90	0	45.5±2.7b	5.3±3.3a	63.8±4.0b	23.6±4.6ab	18.3±1.3b
	3	41.9±2.0b	5.2±0.8a	57.4±2.2b	20.7±0.9ab	15.5±0.2b
	7	47.5±4.2b	4.1±2.7a	62.7±3.0b	19.3±1.5b	15.2±1.2b
	14	7.1±0.7c	0.6±0.2a	14.0±1.3c	7.5±0.8c	6.9±0.6c
	21	62.0±0.1a	2.2±0.8a	90.8±3.2a	31.0±3.9a	28.8±3.1a
Milled rice	-	171.9±6.3	57.3±5.5	289.2±8.4	174.6±9.2	117.3±14.7

* PV = peak viscosity, BD = (PV-minimum viscosity), FV = final viscosity, CS = consistency (FV-minimum viscosity), SB setback (FV-PV)

สำหรับแต่ละระดับการสุก ค่าเฉลี่ย±SD ที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวแถว หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 2 ปริมาณแป้งทนทานต่อการย่อยของข้าวทนทานต่อการย่อยที่เตรียมโดยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว สำหรับแต่ละระดับการสุก ค่าเฉลี่ย±SD ที่มีตัวอักษรตัวเล็กต่างกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และสำหรับแต่ละเวลาเก็บรักษา ค่าเฉลี่ย±SD ที่มีตัวอักษรตัวใหญ่ต่างกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สรุปผลการวิจัย

ข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด และการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวมีความหนาแน่นรวมไม่แตกต่างจากข้าวสาร ดัชนีความขาวมีแนวโน้มน้อยกว่าข้าวสาร ส่วนระยะเวลาหุงสุกลดลงประมาณ 2-4 เท่า การดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มและความแข็งของข้าวสุกมากกว่าข้าวสาร ในขณะที่ความหนืดน้ำแป้งน้อยกว่าข้าวสาร โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดคล้ายแป้งที่ผ่านเจลาตินไนซ์ ยกเว้นข้าวทนทานต่อการย่อยที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวที่ระดับ 30% ที่ยังคงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดคล้ายข้าวสาร ทั้งนี้การเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นไม่มีผลต่อ setback ของข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือด แต่ค่า setback จะเพิ่มขึ้นในข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว 90% ก่อนทำแห้ง กระบวนการหุงสุกและทำแห้งทำให้ปริมาณ RS ลดลงเหลือ 5.61-7.08 g/100g เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสาร (15.40 g/100g) แต่หากนำข้าวหุงสุกมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นเป็นระยะเวลา 21 วันก่อนทำแห้ง จะทำให้ปริมาณ RS ของข้าวทนทานต่อการย่อยเตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือดและการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเพิ่มขึ้นเป็น 21.32 และ 21.67 g/100 g ตามลำดับ ทั้งนี้การใช้ข้าวที่ผ่านการหุงสุก 30% จะให้ปริมาณ RS มากกว่าข้าวที่ผ่านการหุงสุก 90%

ดังนั้นข้าวทนทานต่อการย่อยที่เตรียมด้วยการต้มในน้ำเดือดและการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็นเป็นระยะเวลา 21 วันก่อนทำแห้ง จะมีคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพการหุงต้มและคุณภาพการบริโภคไม่แตกต่างจากข้าวสารปกติ แต่มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2556

เอกสารอ้างอิง

- กมลทิพย์ มั่นภักดี. (2532). ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการผลิตข้าวหุงสุกเร็ว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 112 หน้า
- พรทิพย์ ศิริสุนทรลักษณ์ พิชญากรณ์ สถาพรวงษา และ พิมลพรรณ พูลสุขเสริม. (2551). การพัฒนากระบวนการผลิตข้าวหุงสุกเร็วด้วยวิธีให้ความร้อนแห้ง. ใน: รายงานการเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, ปัตตานี. 1-14.
- สุภาภรณ์ ธัญญะวานิช. (2545). การปรับปรุงคุณภาพข้าวหุงสุกเร็วโดยใช้วิธีการแช่เยือกแข็งร่วมกับการใช้ไมโครเวฟในการผลิต.

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ. 83 หน้า

- AACC. (2000). Approved methods of the American Association of Cereal Chemists. (10th Eds.), (Vol II). Method 61-02. Minnesota: The American Association of Cereal Chemists Inc.
- Chung, H., Lim, H. and Lim, S. (2006). Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. *Journal of Cereal Science* 43(3): 353-359.
- Eyaru, R., Shrestha, A.K. and Arcot, J. (2009). Effect of various processing techniques on digestibility of starch in Red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) and two varieties of peas (*Pisum sativum*). *Food Research International* 42(8): 956-962.
- Frei, M., Siddhuraju, P. and Becker, K. (2003). Studies on the in vitro starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines. *Food Chemistry* 83(3): 395-402.
- Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M.J., Sanchez-Zapata, E. and Perez-Alvarez, J.A. (2010). Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International* 43(4): 931-942.
- Goni, L., Garia-Alonso, A. and Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research* 17(3): 427-437.
- Hsu, R.J., Chen, H.J., Lu, S. and Chiang, W. (2015). Effects of cooking, retrogradation and drying on starch digestibility in instant rice making. *Journal of Cereal Science* 65: 154-161.
- Inprasit, C. and Noomhorm, A. (2001). Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of dryer and operation on rice quality. *Drying Technology* 19(2): 389-404.
- Luh, B.S., Roberts, R.L. and Li, C.F. (1980). Quick Cooking Rice. In: Luh, B.S. (Ed.), *Rice Production and Utilization*. Westport: AVI publishing Co., Inc. pp. 566-588.
- Menegassi, B., Pilosof, A. M. R. and Areas, J. A. G. (2011). Comparison of properties of native and extruded amaranth (*Amaranthus cruentus* L.-BRS Alegria) flour. *LWT-Food Science and Technology* 44(9): 1915-1921.
- Prasert, W. and Suwannaporn, P. (2009). Optimization of instant jasmine rice process and its physicochemical properties. *Journal of Food Engineering* 95(1): 54-61.
- Sagum, R. and Arcot, J. (2000). Effect of domestic processing methods on the starch, non-starch polysaccharides and in vitro starch and protein digestibility of three varieties of rice with varying levels of amylose. *Food Chemistry* 70(1): 107-111.
- Siddiq, M., Kelkar, S., Harte, J. B., Dolan, K. D. and Nyomba, G. (2013). Functional properties of flour from low-temperature extruded navy and pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *LWT-Food Science and Technology* 50(1): 215-219.
- Yadav, A. R., Guha, M., Tharanathan, R. N. and Ramteke, R. S. (2006). Changes in characteristics of sweet potato flour prepared by different drying techniques. *LWT-Food Science and Technology* 39(1): 20-26.
- Yadav, B.S., Sharma, A. and Yadav, R.B. (2010). Effect of storage on resistant starch content and in vitro starch digestibility of some pressure-cooked cereals and legumes commonly used in India. *International Journal of Food Science and Technology* 45(12): 2449-2455.

