

การศึกษาสภาวะการนึ่งและอบแห้งข้าวฮางในขั้นตอนเดียวด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด สั่นร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Study of Steaming and Drying of Khao Hang in Single Process by using Vibrated Fluidized Bed with Superheated Steam Techniques

พรพรรณ จิ๋ว¹ และ เซาว์ อินทร์ประสิทธิ์^{1*}
Phornpan Ji-u¹ and Chouw Inprasit^{1*}

Received 27 November 2018, Accepted 30 April 2019

ABSTRACT

This research was conducted to study a novel process for Khao Hang production, the concurrent process of steaming and drying, by using vibrated fluidized bed with superheated steam techniques. The process was conducted at 95, 105 and 115°C with seven processing times, (3, 6, 9, 12, 15, 18 and 21 min). The quality of Khao Hang from the new process was compared with the traditional process. The result showed that high temperature production caused the moisture content of Khao Hang decrease faster than low temperature. At 115°C, 9 min, 105°C, 12 min and 95°C, 21 min, the moisture content of Khao Hang was reduced from 44.85 – 45.21% (d.b.) to 17.06 – 15.50% (d.b.) and could be de-hulled without other drying process. In addition, the specific energy consumption values used in these three conditions were not significantly different ($p>0.05$). The degree of gelatinization of Khao Hang produced by the concurrent process at 115°C for all and 105°C (9 and 12 min) were not significantly different from traditional processed Khao Hang ($p>0.05$). Head rice yield of high temperature processed Khao Hang (115°C and all processing times) was significantly lower than low temperatures processed (105 °C, 95°C) and traditional processed ($p\leq 0.05$). However, the color values and white belly of the concurrent processed and traditional processed Khao Hang were not significantly different ($p>0.05$). The suitable condition of the process was at 105°C and 12 min. At this condition, moisture content of Khao Hang was reduced from 45.01% (d.b.) to 15.57% (d.b.) and the specific energy consumption of the process was 20.51 MJ/kg water evap. Properties of Khao Hang that received from this condition were 89.67% degree of gelatinization, 68.86% head rice yield, 1.5% white belly, 13.99 b* value and 2.03 of ΔE^* . Properties of Khao Hang produced in this condition (i.e., degree of gelatinization, head rice yield, white belly and color quality) were not significantly different from the traditional processed ($p>0.05$) but the production time could be reduced by this new process.

Keywords: Steamer, Dryer, Khao Hang, Vibrated Fluidized Bed, Superheated Steam

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

*Corresponding author: Tel. 0-3435-1896, Fax. 0-3435-1896, E-mail address: fengchi@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการใหม่สำหรับการผลิตข้าวฮางโดยรวมขั้นตอนการนึ่งและอบแห้งไว้ด้วยกัน โดยใช้เทคนิคฟลูอิดซ์เบดสั้่นร่วมกับการใช้อัน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 95, 105 และ 115°C และ 7 ระยะเวลา คือ 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 นาที จากนั้นเปรียบเทียบคุณภาพกับข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิม ผลการศึกษาพบว่าสภาวะการผลิตด้วยอุณหภูมิสูงทำให้ความชื้นของข้าวฮางลดลงได้เร็วกว่าที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ โดยการผลิตที่สภาวะ 115°C เวลา 9 นาที, 105°C เวลา 12 นาที และ 95°C เวลา 21 นาที สามารถลดความชื้นข้าวฮางจาก 44.85 – 45.21% (d.b.) ให้เหลือ 17.06 – 15.50% (d.b.) และสามารถนำไปกะเทาะเปลือกได้โดยไม่ต้องมีกระบวนการลดความชื้นอื่นอีก นอกจากนี้ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในทั้งสามสภาวะก็ไม่ต่างกัน ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาการเกิดเจลลาคีในเซชันของข้าวฮางที่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการใหม่ พบว่าข้าวฮางที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 115°C ในทุกระยะเวลาและข้าวฮางที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 105°C ที่ระยะเวลา 9 และ 12 นาที มีการเกิดเจลลาคีในเซชันไม่ต่างจากการข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิม ($p > 0.05$) ในส่วนของคุณภาพการสีพบว่าข้าวฮางที่ได้จากการผลิตที่อุณหภูมิ 115°C ในทุกระยะเวลาการผลิตมีเปอร์เซ็นต์ตันข้าวต่ำกว่า ข้าวฮางที่ได้จากการผลิตที่อุณหภูมิต่ำ (105°C และ 95°C) และข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ข้าวฮางที่ผลิตจากกระบวนการผลิตใหม่นี้ในทุกอุณหภูมิและระยะเวลามีค่าสีและค่าร้อยละข้าวท้องไขไม่แตกต่างจากข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิมโดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตข้าวฮาง คือการนึ่งและอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C นาน 12 นาที สามารถลดความชื้นของข้าวฮางจาก 45.01% (d.b.) เป็น 15.57% (d.b.) มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 20.51 MJ/kg water evap. เกิดการเจลลาคีในเซชัน 89.67% มีเปอร์เซ็นต์ตันข้าว 68.86% ร้อยละข้าวท้องไข 1.5 ค่าสี b^* 13.99 และ ค่า ΔE^* 2.03 ซึ่งเป็นสภาวะที่มีเปอร์เซ็นต์เจลลาคีในเซชัน เปอร์เซ็นต์ตันข้าว ค่าร้อยละข้าวท้องไข และคุณภาพด้านสีไม่แตกต่างจากข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิม ($p > 0.05$) แต่ใช้เวลาในการผลิตสั้นกว่า

คำสำคัญ: เครื่องนึ่ง เครื่องอบแห้ง ข้าวฮาง ฟลูอิดซ์เบดแบบสั้่นสะเทือ้น อัน้ำร้อนยวดยิ่ง

คำนำ

ข้าวฮาง (Khao Hang) หรือข้าวนึ่ง (Parboiled Rice) ก่อ่นสี เป็นผลิตภัณ์ข้าวที่ผลิตขึ้นตามกรรมวิธีโบราณจากภูมิปัญญาท้องถิ่นของชาวเผ่ากูไทในภาคอีสาน โดยการผลิตข้าวฮางเดิมมีวัตถุประสงค์ในการผลิตเพื่อบริโภคในครัวเรือน แต่ในปัจจุบันกระแสการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพมีมากขึ้น และประกอบกับมีการศึกษาถึงประโยชน์ด้านคุณค่าทางโภชนาการและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวฮางที่มีอยู่สูงได้ถูกเผยแพร่มากขึ้น (ทัศนีย์ และคณะ, 2551; กสิณา, 2552; ชนิษฐา, 2552; อรรถพล และคณะ, 2552; กรมส่งเสริมการเกษตร, 2553) ทำให้ผลิตภัณ์ข้าวฮางเป็นที่นิยมมากยิ่งขึ้น แต่กระบวนการผลิตยังคงเป็นการผลิตแบบดั้งเดิมโดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือขนาด

เล็กที่เป็นเทคโนโลยีขั้นต้นอย่างง่าย ซึ่งทำให้ใช้เวลานานทั้งในกระบวนการแช่ (24-48 ชั่วโมง) การนึ่ง (40-60 นาที) และการอบแห้ง (48 ชั่วโมงขึ้นไป) (จักรวาท, 2554) นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเรื่องคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอจากกระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยความชำนาญและประสบการณ์ของกลุ่มผู้ผลิต ส่งผลให้การผลิตข้าวฮางไม่ทันต่อความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มมากขึ้นและปัญหาเหล่านี้ยังเป็นข้อจำกัดหากต้องการขยายตลาดและเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อการส่งออก

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตข้าวฮางพบว่า มีขั้นตอนการผลิตคล้ายกับข้าวนึ่งจึงสามารถนำเทคโนโลยีการผลิตข้าวนึ่งมาปรับใช้กับกระบวนการผลิตข้าวฮางได้ แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตข้าวนึ่งก็พบปัญหาการใช้ต้นทุนการผลิตสูงจากค่าสิ้นเปลืองพลังงาน

โดย วรณิ และคณะ (2538) ได้ศึกษาการใช้พลังงานในโรงสีข้าวหนึ่ง พบว่าพลังงานความร้อนในขั้นตอนการอบแห้งข้าวหนึ่งเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุดคือ 86% ของพลังงานทั้งหมดเนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของข้าวหนึ่งมีค่าสูง ประกอบกับโครงสร้างของเมล็ดข้าวหลังการนึ่งจะเกิดการเจลาทิไนเซชันทำให้เม็ดแป้งในข้าวเกาะตัวกันแน่นขึ้น (อรอนงค์, 2547) และเมล็ดข้าวเกิดการปริเล็กน้อยทำให้เกิดการเกาะตัวกันของเมล็ดข้าว จึงทำให้สมบัติการถ่ายเทความร้อนและมวลเป็นไปได้อย่างยากขึ้น ดังนั้นหากใช้เทคนิคฟลูอิดิซ์เบดสั่น (Vibro - Fluidized Bed) จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ลอยตัวอยู่ในอากาศได้ โดยใช้ความเร็วลมน้อยลง (รุ่งนภา, 2535; วุฒิกรณ์, 2541; Soponronnarit *et al.* 2001) ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานมากกว่าการใช้เทคนิคฟลูอิดิซ์แบบไม่สั่น (สมชาติ และคณะ, 2545; Wetchacama *et al.* 2000) และการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางทำให้ได้ปริมาณร้อยละต้นข้าวสูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน (วาทัญญู, 2547; สุชาติ, 2554) จากรายงานผลการศึกษาของนักวิจัยหลายคนแสดงให้เห็นว่ากระบวนการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดิซ์เบดแบบสั่นและการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนนั้นสามารถลดการใช้พลังงานจำเพาะจากกระบวนการอบแห้งได้ แต่ยังไม่มีการศึกษาการรวมกระบวนการนึ่งและอบแห้งข้าวฮางโดยใช้เทคนิคฟลูอิดิซ์เบดแบบสั่นร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวฮาง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและคุณภาพของข้าวฮางในด้านเปอร์เซ็นต์การเจลาทิไนเซชัน คุณภาพการสีร้อยละข้าวท้องไข และสีของข้าวฮางที่ได้จากการรวมกระบวนการนึ่งและอบแห้งข้าวฮางในขั้นตอนเดียวด้วยเทคนิคฟลูอิดิซ์เบดแบบสั่นร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก

จัดซื้อข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากโรงสีในจังหวัดนครสวรรค์ทำความสะอาดข้าวเปลือกด้วยเครื่องทำความสะอาดข้าวเปลือกแบบใช้แรงลมแยกเพื่อกำจัดสิ่งเจือปน แช่วข้าวเปลือกในน้ำโดยควบคุมให้คงที่ตลอดระยะเวลาการแช่ที่ 50°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมงเพื่อให้ข้าวเปลือกหลังแช่มีความชื้นประมาณ 42.85% (d.b.) (30% (w.b.)) เมื่อแช่ข้าวเปลือกครบเวลาที่กำหนดแล้วสุ่มตัวอย่างเพื่อนำไปวัดความชื้น (ASAE method, 1998) เป็นค่าความชื้นเริ่มต้น จากนั้นนำข้าวเปลือกหลังแช่มาเก็บในที่อบอากาศ (Tempering) เป็นเวลา 30 นาที (Soponronnarit *et al.* 2006)

2. การนึ่งและอบแห้งข้าวฮาง

ข้าวเปลือกหลังการแช่จะถูกแบ่ง ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ใช้เป็นตัวอย่างควบคุม (Control) นึ่งด้วยวิธีการดั้งเดิม คือนึ่งด้วยไอน้ำร้อนโดยใช้หวดเป็นเวลา 40 นาที สุ่มตัวอย่างวัดความชื้นเพื่อเป็นข้อมูลความชื้นหลังนึ่ง หลังจากนั้นนำข้าวเปลือกหนึ่งไปตากแดดจนมีความชื้นเหลือประมาณ 16.3% (d.b.) (14%w.b.) เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกไว้ในภาชนะปิดสนิทมากกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายตัวสม่ำเสมอ แล้วนำมาแปรสภาพเป็นข้าวฮางและข้าวฮางขัดขาว ทดสอบคุณภาพของข้าวฮาง กลุ่มที่ 2 ใช้สำหรับศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนึ่งและอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับนึ่งและอบแห้งข้าวฮางด้วยเทคนิคฟลูอิดิซ์เบดสั่นร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางส่วนประกอบหลักๆ ของเครื่องต้นแบบสำหรับนึ่งและอบแห้งข้าวฮาง (Figure 1) มีดังนี้ 1) พัดลม (Blower) 2) ชุดให้ความร้อน (Heater) 3) ชุดกลไกการเขย่า (Vibrating Mechanism) 4) ห้องนึ่งและอบแห้ง (Steaming and Drying Chamber) และ 5) เครื่องตักฝุ่น

(Cyclone) โดยใช้ไอน้ำร้อนอิ่มตัวที่ผลิตจากหม้อไอน้ำขนาด 24 KW มีอัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำเท่ากับ 28.06 kg/h (ความดัน 0.8 bar_g) กำหนดความสูงของเบดข้าวเปลือก 1.5 cm ค่าความเข้มข้นในการสั่นสะเทือนที่ 1.6 และความเร็วลมที่ 1.4 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมที่เหมาะสมในการเกิดฟลูอิดไอส์เซชันร่วมกับการใช้เบดสั่นของข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองโดยแปรอุณหภูมิสำหรับหนึ่งและอบแห้ง 3 ระดับ คือ 95°C, 105°C และ 115°C และระยะเวลาหนึ่งและอบแห้ง 7 ระยะ คือ 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 นาที วัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกก่อนเข้าเครื่องต้นแบบสำหรับหนึ่งและอบแห้งข้าวฮางด้วยเทคนิคฟลูอิดไอส์เซชันร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง

และระหว่างทดลองบันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจาก Watt-hour Meter สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อวัดค่าความชื้นตามวิธี ASAE method (1998) สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้น จากนั้นเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกหนึ่งในที่อับอากาศเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำข้าวเปลือกหนึ่งฝู่งในที่ร่มให้เหลือความชื้น ประมาณ 16.3% (d.b.) แต่ถ้าวอย่างข้าวเปลือกมีค่าความชื้นต่ำกว่า 16.3% (d.b.) ให้เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดสนิทมากกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายตัวสม่ำเสมอก่อนนำไปกะเทาะเปลือก หลังจากกะเทาะเปลือกแล้วเก็บในถุงพลาสติกปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพกับข้าวฮางที่ได้จากการนึ่งแบบดั้งเดิม

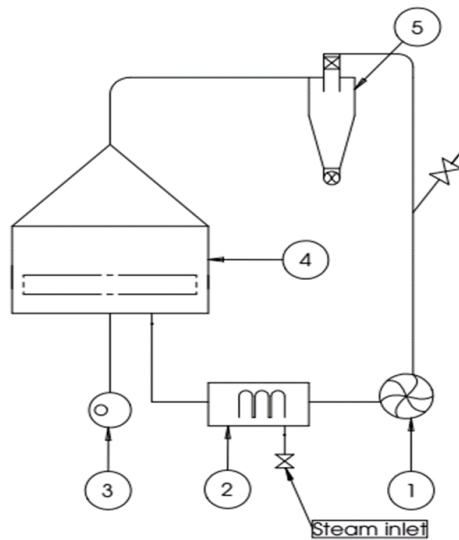


Figure 1 Schematic diagram of a batch vibrated fluidized bed steamer and dryer.

1) Blower, 2) Heater, 3) Vibrating Mechanism, 4) Steaming and Drying Chamber, 5) Cyclone

3. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง สามารถใช้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption,

SEC; MJ/kg-water evap.) เป็นดัชนีบ่งชี้ได้โดยค่า SEC จะแสดงให้เห็นถึงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำจำนวน 1 kg ออกจากตัวอย่างข้าวเปลือก ซึ่งสามารถคำนวณค่า SEC ได้จากสมการ (1)

$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการนึ่งและอบแห้ง (MJ) ซึ่งประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูง ชุดทำความร้อน ชุดกลไกการเขย่า และเครื่องกำเนิดไอน้ำ, m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก (ความชื้น) (kg-water evap.) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำในข้าวเปลือกเริ่มต้นและปริมาณน้ำหลังการนึ่งและอบแห้งของข้าวเปลือก

4. เปอร์เซ็นต์การเจลาทีไนเซชันของข้าวฮาง (Degree of gelatinization)

วิเคราะห์การเกิดเจลาทีไนเซชัน โดยใช้ Differential Scanning Calorimetry (DSC) (Pyris Diamond DSC,

PerkinElmer, Inc) เตรียมตัวอย่างแป้งข้าวฮางที่ทราบความชื้นแน่นอน ซึ่งแป้งข้าวฮาง 3.5 - 4.0 mg โดยทำเป็นสารละลายให้ความเข้มข้น 30% (w/v) ด้วยน้ำกลั่นใสในภาชนะ (aluminum pan) ปิดฝาอบม้วนนาน 1 ชั่วโมง นำ aluminum pan ที่บรรจุตัวอย่างและ reference pan วางในเครื่อง DSC โดยใช้ profile ที่อุณหภูมิ 40 - 110°C ที่อัตรา 10°C/min (ตัดแปลงจาก Jaisut *et al.* 2008) โดยใช้ indium ในการ calibrate ค่าพหุคูณทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้ระบบ auto calculation และคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเจลาทีไนเซชันของข้าวฮางจากสมการ (2)

$$\% \text{Degree of gelatinization} = \left(1 - \left(\frac{\Delta H_{gel}}{\Delta H_{raw}} \right) \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ ΔH_{gel} = พลังงานที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเกิดเจลาทีไนเซชันของเมล็ดข้าวหนึ่ง (J/g dry matter)

ΔH_{raw} = พลังงานที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเกิดเจลาทีไนเซชันของเมล็ดข้าวที่ไม่ผ่านการนึ่ง (J/g dry matter)

5. คุณภาพการสี (Milling Quality)

คุณภาพการสีของข้าวฮางที่นำมาพิจารณา คือ เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (Head rice yield) ของข้าวฮาง (ข้าวกล้องหนึ่ง) และข้าวฮางขัดขาว

ทดสอบตามมาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 4004-2555 คำนวณหาปริมาณเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวฮางและข้าวฮางขัดขาว ดังสมการ (3)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว} = \frac{\text{น้ำหนักต้นข้าว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (3)$$

6. ร้อยละข้าวท้องไข่

ตรวจสอบร้อยละข้าวท้องไข่ของตัวอย่างข้าวฮางด้วยเครื่องสแกนแบบ flatbed scanner (Epson scanner, Model Perfection V19, Japan) เลือก Home Mode, Document type: reflective, image type: 8-bit grayscale และ resolution: 1200 dpi (ตัดแปลงจาก Bautista *et al.* 2009) โดยสุ่มต้นข้าวที่ได้จากการทดสอบคุณภาพการสี จำนวน 100 เมล็ด เรียงบนกระจกใส (Scanner glass) ของเครื่องสแกน เว้นระยะห่างระหว่างเมล็ดเล็กน้อย เพื่อสะดวกต่อการสังเกตจำนวนข้าวท้องไข่จากนั้นนำกระดาษสีดำวางทับให้สนิทเพื่อป้องกันผลของแสงสะท้อนและง่ายต่อการตรวจนับ สแกนและ

บันทึกภาพ แล้วนับจำนวนเมล็ดที่มีพื้นที่ขาวขุ่นที่บ่งแสงเกิน 50% ของพื้นที่ทั้งเมล็ด (มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 4004-2555) โดยทำซ้ำกันจำนวน 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยทางสถิติ

7. สีของข้าวฮาง

ตรวจสอบสีของข้าวฮางและข้าวฮางขัดขาว โดยใช้เครื่องวัดสีแบบ spectro photometer (Spectro-guide sphere gloss, model CD-6834, BYK-Gardner GmbH; Geretsried, Germany) ในระบบ CIE Lab Scale (L^* , a^* และ b^*) วัดค่าสีโดยนำตัวอย่างใส่ลงในภาชนะใส (plate) ให้เต็มปาดผิวหน้าให้เรียบกลับไปมา 5 ครั้งแล้วใช้พิมพ์กดด้านบนผิวหน้า

ของตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นเท่ากันทุกครั้งที่วัด จากนั้นปิดฝาด้วยภาชนะใส วัดค่าสีที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางซ้ำ 3 ครั้งบันทึกค่า (L^*),

(a^*), (b^*) ในแต่ละตัวอย่าง นำค่าไปคำนวณความแตกต่างของสี (ΔE^*)

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2} \quad (4)$$

เมื่อ L_0^*, a_0^*, b_0^* = ค่าสีของตัวอย่าง Control

L_1^*, a_1^*, b_1^* = ค่าสีของตัวอย่างข้าวฮางที่เงื่อนไขต่าง ๆ

โดย ค่า ΔE^* เป็นค่าเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง Control กับตัวอย่างที่เงื่อนไขต่าง ๆ หากไม่มีความแตกต่างกัน ค่าที่ได้จะเป็นศูนย์

ผลและวิจารณ์

1. ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการนึ่งและอบแห้ง

จากผลการทดลองนึ่งและอบแห้งที่สภาวะต่างๆ พบว่าในช่วงแรกของการนึ่งและอบแห้งค่าความชื้นของข้าวเปลือกจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงใน Figure 2 เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการนึ่งและอบแห้งเดียวกัน พบว่าในช่วง 3 นาทีแรก อัตราการนึ่ง และอบแห้งเกิดขึ้นสูงมาก (เมื่อพิจารณาพร้อมกับเปอร์เซ็นต์การเกิดเจลลิ่งในเซชันและความชื้นในเมล็ดข้าว (Table 3) โดยที่อุณหภูมิ 95°C, 105°C และ 115°C จะมีค่าความชื้นลดลงจาก 44.85 – 45.21% (d.b.) เหลือเพียง 28.85% (d.b.), 26.64% (d.b.) และ 21.75% (d.b.) ตามลำดับและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนอัตราการอบแห้งเกือบคงที่

สภาวะในการนึ่งและอบแห้งที่ทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้นจาก 44.85 – 45.21% (d.b.) ลดลงจนเหมาะต่อการกะเทาะเปลือกและการเก็บรักษาคือที่อุณหภูมิ 115°C เวลา 9 นาที, 105°C

เวลา 12 นาที และ 95°C เวลา 21 นาที ทั้ง 3 สภาวะนี้มีความชื้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งที่อุณหภูมิการนึ่งและอบแห้งสูงสามารถลดความชื้นของเปลือกได้เร็วกว่าการนึ่งและอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากอุณหภูมิต่ำสูงทำให้น้ำมีความสามารถในการระเหยสูง และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำทำให้ความร้อนถ่ายเทจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปยังข้าวเปลือกเพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่าดังนั้นการระเหยน้ำในเมล็ดข้าวเปลือกจึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าและจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งเกิดขึ้นได้สูงกว่าด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมนตรี (2548) ในการทดลองอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสุกโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำ 130 – 170°C พบว่าที่อุณหภูมิ 170°C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าที่ 130°C และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taechapiroj *et al.* (2004) ที่อบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูง 41 – 42.5% (d.b.) พบว่าที่อุณหภูมิ 170°C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า 150°C

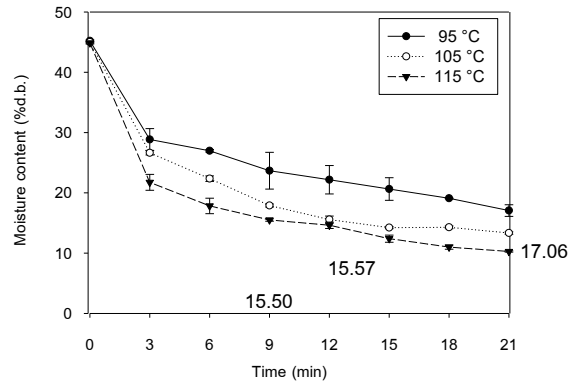


Figure 2 Effect of steaming and drying conditions on moisture content of KDML 105 paddy.

(●) 95°C, (○) 105°C, (▼) 115°C.

2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สภาวะการนิ่งและอบแห้งต่างๆ แสดงใน Table 1 เมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้ระยะเวลาการนิ่งและอบแห้งต่างกัน พบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงตามระยะเวลาการนิ่งและอบแห้งที่เพิ่มมากขึ้นและที่ระยะเวลาการนิ่งและอบแห้งเท่ากัน ถ้าใช้อุณหภูมิการนิ่งและอบแห้งสูง (105°C และ 115°C) มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 95°C เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ทำให้ปริมาณการระเหยน้ำจากข้าวเปลือกสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wetchacama *et al.* (2000) พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบดสั้นสะท้อนด้วยลมร้อน ขนาดกำลังการผลิต 2.5 – 5 ton/h ข้าวเปลือกอยู่ในเครื่อง 1 นาทีที่อุณหภูมิ 125°C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 6.24 MJ/kg-water evap. แต่เมื่อใช้อุณหภูมิ 140°C ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลงเหลือ 4.28 MJ/kg-water evap.

ในการนิ่งและอบแห้งข้าวฮางจนมีความชื้นเหมาะสมต่อการกะเทาะเปลือกและการเก็บรักษา (สภาวะการนิ่งและอบแห้ง, 115°C เวลา 9 นาที, 105°C เวลา 12 นาที และ 95°C เวลา 21 นาที) พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการนิ่งและอบแห้งทั้ง

3 สภาวะนี้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) คือ 19.44, 20.51 และ 24.93 MJ/kg-water evap. ตามลำดับ (ไม่รวมพลังงานจากหม้อไอน้ำที่ผลิตไอน้ำโดยถักรวมพลังงานจากไอน้ำจะสูงมากเนื่องจากการใช้เครื่องผลิตไอน้ำขนาดเล็ก) ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งค่าพลังงานจำเพาะที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่างานวิจัยของ Wetchacama *et al.* (2000) และงานวิจัยของ Soponronnarit *et al.* (1998) ซึ่งทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบเคลื่อนย้ายได้ด้วยลมร้อน ขนาดกำลังการผลิต 2.5–4.0 ton/h อบแห้งที่อุณหภูมิ 144°C ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบประมาณ 1.3 นาที พบว่าสามารถลดความชื้นจาก 32.6% (d.b.) เหลือ 25.8% (d.b.) มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 4.2 MJ/kg-water evap. และการทดลองของ Soponronnarit *et al.* (2006) ซึ่งทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องต้นแบบฟลูอิดไคซ์โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ขนาดกำลังการผลิต 100 kg/h อบแห้งที่อุณหภูมิ 128 – 164°C นาน 4 – 5 นาที พบว่าสามารถลดความชื้นจาก 43% (db.) เหลือ 22% (d.b.) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 7.2 MJ/kg-water evap. เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้อัตราการระเหยน้ำสูงตามไปด้วย ทั้งนี้ยังเป็นเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องและมีขนาดกำลังการผลิตสูง จึงส่งผลให้มีค่าพลังงานจำเพาะน้อยกว่าในงานวิจัยนี้

Table 1 Evaluation of Specific energy consumption (SEC) of Steaming and Drying conditions.

Steaming and Drying condition		SEC			
Temperature (°C)	time (min)	Blower+Heater+Vibrating Mechanism (MJ/kg-paddy)	Water evap. (kg-water evap.)	(Blower+Heater+Vibrating Mechanism)	SEC(Blower+Heater+Vibrating Mechanism+Boiler)
				(MJ/kg-water evap.)	(MJ/kg-water evap.)
95	3	0.90 ± 0.00 ^a	0.18 ± 0.02 ^a	8.06 ± 1.03 ^a	28.19 ± 3.57 ^a
	6	2.03 ± 0.95 ^{bc}	0.20 ± 0.00 ^a	16.14 ± 7.64 ^{bc}	47.50 ± 7.72 ^{cde}
	9	2.25 ± 0.00 ^c	0.24 ± 0.04	15.36 ± 2.35 ^{bc}	52.20 ± 8.01 ^{def}
	12	2.59 ± 0.16 ^{cd}	0.25 ± 0.03 ^{bc}	16.36 ± 0.85 ^{bc}	59.19 ± 5.70 ^{fg}
	15	3.38 ± 0.64 ^{def}	0.27 ± 0.02 ^{cd}	19.87 ± 2.04 ^{cd}	71.26 ± 2.39 ^{hi}
	18	3.94 ± 0.47 ^{efg}	0.29 ± 0.00 ^{de}	21.91 ± 2.82 ^{cde}	79.46 ± 3.26 ^{jk}
	21	4.84 ± 0.47 ^{ghi}	0.31 ± 0.01 ^{efg}	24.93 ± 1.39 ^{defg}	84.18 ± 1.13 ^k
105	3	1.01 ± 0.16 ^{ab}	0.21 ± 0.01 ^a	8.03 ± 1.59 ^a	25.80 ± 2.32 ^a
	6	2.03 ± 0.32 ^{bc}	0.25 ± 0.00 ^{bc}	12.97 ± 2.08 ^{ab}	38.17 ± 2.16 ^b
	9	2.93 ± 0.00 ^{cde}	0.30 ± 0.00 ^{def}	15.65 ± 0.06 ^{bc}	44.53 ± 0.19 ^{bcd}
	12	4.16 ± 0.16 ^{fgh}	0.33 ± 0.01 ^{fgh}	20.51 ± 0.13 ^{cd}	53.78 ± 0.92 ^{ef}
	15	5.18 ± 0.64 ^{hij}	0.34 ± 0.00 ^{ghi}	24.39 ± 3.15 ^{defg}	65.21 ± 3.42 ^{gh}
	18	5.51 ± 0.16 ^{ij}	0.34 ± 0.01 ^{ghi}	26.02 ± 0.25 ^{defg}	74.88 ± 0.68 ^{ij}
	21	6.64 ± 0.16 ^k	0.35 ± 0.00 ^{hij}	30.39 ± 0.18 ^{fgh}	82.94 ± 0.74 ^{jk}
115	3	2.03 ± 0.64 ^{bc}	0.26 ± 0.01 ^{bc}	12.80 ± 4.61 ^{ab}	26.91 ± 5.30 ^a
	6	3.71 ± 1.11 ^{ef}	0.30 ± 0.01 ^{def}	19.79 ± 5.16 ^{cd}	40.91 ± 4.30 ^{bc}
	9	3.94 ± 0.48 ^{efg}	0.32 ± 0.00 ^{fgh}	19.44 ± 2.60 ^{cd}	46.08 ± 2.95 ^{bcd}
	12	5.06 ± 0.16 ^{hi}	0.33 ± 0.01 ^{ghi}	24.25 ± 0.20 ^{def}	56.59 ± 0.55 ^f
	15	6.19 ± 0.48 ^{jk}	0.36 ± 0.00 ^{ijk}	27.60 ± 1.77 ^{efg}	66.25 ± 1.28 ^{gh}
	18	7.20 ± 0.32 ^k	0.37 ± 0.01 ^{jk}	30.82 ± 1.83 ^{gh}	75.09 ± 2.51 ^{ij}
	21	8.44 ± 0.48 ^l	0.38 ± 0.00 ^k	35.33 ± 1.72 ^h	83.38 ± 1.34 ^k

Note: * Data are expressed as means ±S.D.

^{a-l} = superscript lower case letters in columns indicate a significant ($p \leq 0.05$) difference at each steaming and drying conditions using Duncan's new multiple range test.

3. การเกิดเจลลาคีโนเซชันของข้าวฮาง

ผลของการนึ่งและอบแห้งข้าวฮางที่สภาวะต่างๆ ต่อการเกิดเจลลาคีโนเซชันของข้าวฮางแสดงใน Table 2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการนึ่งและอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดเจลลาคีโนเซชันของข้าวฮางสูงขึ้นด้วย และหากพิจารณาร่วมกับสภาวะที่มีความชื้นเหมาะสมสำหรับการกะเทาะเปลือกและการเก็บรักษา คือที่อุณหภูมิ 115 °C เวลา 9 นาที เกิดการเกิดเจลลาคีโนเซชันสูงที่สุดคือ 94.61% รองลงมาคือที่ 105°C เวลา 12 นาที เกิดการเกิดเจลลาคีโนเซชัน 89.67% ซึ่งไม่แตกต่างจากการเกิดเจลลาคีโนเซชันของ Control (98.81%) ($p > 0.05$) ส่วนที่ 95°C เวลา 21 นาที เกิดการ

เจลลาคีโนเซชันต่ำที่สุด คือ 71.31% ซึ่งแตกต่างกับที่อุณหภูมิ 115°C, 105°C และของตัวอย่าง Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบการเกิดเจลลาคีโนเซชันของข้าวฮางที่ผ่านการนึ่งและอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบสำหรับนึ่งและอบแห้งข้าวฮางด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดส์ ร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิ 115°C และ 105°C พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเกิดเจลลาคีโนเซชันสูงกว่าในรายงานงานวิจัยของ เฉลิมพร (2546) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเกิดเจลลาคีโนเซชัน 88.5% เมื่อแช่ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิ 80°C นาน 3 ชม. แล้วนำมานึ่งและอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบดที่มีไอน้ำร้อน

ยวดยังเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 2 นาที

การนึ่งข้าวเปลือกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่สำคัญคือทำให้แป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดเจลลาคีในเซชัน (Luh, 1991) ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของการนึ่ง ดังนั้นในกระบวนการนึ่งและอบแห้งข้าวฮางนี้จึงสามารถพิจารณาช่วงเวลาที่เกิดการนึ่งได้จากเปอร์เซ็นต์การเจลลาคีในเซชันของเมล็ดข้าวจาก Table 2 พบว่าถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน กระบวนการนึ่งจะเกิดขึ้นในช่วง 3 นาทีแรกเท่านั้น โดยจะสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์การเจลลาคีในเซชันที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ถึงแม้จะเพิ่มระยะเวลาในการผลิตให้นานขึ้นก็ตาม เนื่องจากเมื่อระยะเวลาการนึ่งและอบแห้งเพิ่มขึ้น

น้ำในเมล็ดข้าวถูกระเหยออกไปมากขึ้น จนปริมาณน้ำในเมล็ดข้าวไม่เพียงพอต่อการเกิดเจลลาคีในเซชันทั้งในขณะนึ่งและอบแห้ง รวมไปถึงในขั้นตอนการเทมเปอร์ริงด้วยซึ่งการเกิดเจลลาคีในเซชันจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นในเมล็ดข้าวและระยะเวลาที่เหมาะสมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaisut *et al.* (2008) ซึ่งรายงานผลของอุณหภูมิในการอบแห้งของข้าวกล้องข้าวดอกมะลิ 105 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้แป้งในเมล็ดข้าวเกิดการเจลลาคีในเซชันมากขึ้นและที่ความชื้นก่อนการเทมเปอร์ริงต่ำจะส่งผลให้เกิดการเจลลาคีในเซชันในเมล็ดข้าวระหว่างการเทมเปอร์ริงได้น้อยลงกว่าข้าวที่มีความชื้นสูง

Table 2 Degree of gelatinization and moisture content of Khao Hang.

Temp. (°C)	%Degree of gelatinization			moisture content (% (d.b.))		
	95 ^{ns}	105 ^{ns}	115 ^{ns}	95	105	115
Time(min)						
3	65.80 ± 10.76	84.70 ± 5.30	94.12 ± 1.53	28.85 ± 26.64 ^e	26.64 ± 21.75 ^f	21.75 ± 1.81 ^e
6	69.00 ± 7.66	86.04 ± 3.96	95.61 ± 1.17	26.98 ± 22.36 ^{de}	22.36 ± 17.83 ^e	17.83 ± 0.21 ^d
9	70.67 ± 7.72	90.62 ± 2.88	94.61 ± 0.42	23.67 ± 17.90 ^{cd}	17.90 ± 15.50 ^d	15.50 ± 3.05 ^c
12	72.27 ± 7.52	89.67 ± 1.33	93.92 ± 2.60	22.17 ± 15.57 ^{bc}	15.57 ± 14.62 ^c	14.62 ± 2.36 ^c
15	72.48 ± 7.63	89.25 ± 0.89	93.36 ± 0.35	20.64 ± 14.23 ^{abc}	14.23 ± 12.40 ^b	12.40 ± 1.87 ^b
18	75.46 ± 6.34	88.14 ± 1.41	93.55 ± 2.54	19.10 ± 14.29 ^{ab}	14.29 ± 11.00 ^b	11.00 ± 0.04 ^{ab}
21	71.31 ± 5.25	84.13 ± 0.99	90.03 ± 5.09	17.06 ± 13.34 ^a	13.34 ± 10.27 ^a	10.27 ± 0.96 ^a

Note: * Data are expressed as means ± S.D.

^{a-f} = superscript lower case letters in columns indicate a significant ($p \leq 0.05$) difference at each steaming and drying conditions using Duncan's new multiple range test.

^{ns} = not significant ($p > 0.05$) difference at each steaming and drying conditions using Duncan's new multiple range test.

4. คุณภาพการสี (Milling quality)

เมื่อนำตัวอย่างข้าวเปลือกหลังการนึ่งและอบแห้งในขั้นตอนเดียวด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดส์นึ่งร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยั้งที่สภาวะต่างๆ ไปทดสอบคุณภาพการสี โดยการแปรสภาพเป็นข้าวฮาง (ข้าวกล้องนึ่ง) และขัดขาว 30 วินาที เป็นข้าวฮางขัดขาวได้ผลแสดงใน Figure 3 พบว่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวฮางมีค่าสูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการการนึ่งและอบแห้งที่ทุกสภาวะ โดยการนึ่งและอบแห้งในขั้นตอนเดียวด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดส์นึ่งร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยั้งสามารถเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์

ต้นข้าวของข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการนึ่งและอบแห้งจาก 54.54% เป็น 73.92% เมื่อผ่านการนึ่งและอบแห้งที่อุณหภูมิ 95°C เป็นระยะเวลา 3 นาที มีเปอร์เซ็นต์การเจลลาคีในเซชันเท่ากับ 65.80% และเพิ่มเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวขัดขาวจาก 44.27% เป็น 68% ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงที่สุดทั้งในข้าวฮางและข้าวฮางขัดขาวเนื่องจากข้าวที่ผ่านการนึ่งและอบแห้งจะเกิดการเจลลาคีในเซชันจึงทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงและลดการแตกหักระหว่างการขัดสีได้มากกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการนึ่งและอบแห้งและเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการนึ่งและ

อบแห้งเท่ากัน พบว่าผลของอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งและอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวฮางและข้าวฮางขัดขาวมีค่าลดลง ในทุกช่วงระยะเวลา ถึงแม้ว่าจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดเจลลาทีโนเซชันสูงกว่าก็ตามแต่ผลจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิที่บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าวอย่างรวดเร็วมีความรุนแรงมากกว่าจึงทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดข้าวส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเมื่อนำมาแกะเปลือกสูงกว่า (Tuyen *et al.* 2009; Swasdisevi *et al.* 2013) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเฉลิมพร (2546) ซึ่งรายงานว่าการเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งข้าวเปลือกจาก 2 นาที เป็น 7 นาที จะมีปริมาณต้นข้าวลดลงจาก 67.9% เป็น 22.8% และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Soponronnarit *et al.* (2006) ซึ่งรายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการอบข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 จาก 128°C เป็น 164°C จะมีปริมาณต้นข้าวลดลงจาก 65.9% เป็น 59.0%

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิม (71.92%) กับข้าวฮางที่ได้จากเครื่องต้นแบบสำหรับนึ่งและอบแห้งข้าวฮางด้วยเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบดส์นึ่งร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิ 95°C เวลา 21 นาที และ 105°C เวลา 12 นาที ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวฮางเป็น 71.29% และ 68.86% พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

แต่ที่อุณหภูมิ 115°C เวลา 9 นาที มีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของข้าวฮางเป็น 62.09% ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ส่วนปริมาณต้นข้าวของข้าวฮางขัดขาว พบว่าตัวอย่าง Control และตัวอย่างที่ได้จากเครื่องต้นแบบสำหรับนึ่งและอบแห้งข้าวฮางด้วยเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบดส์นึ่งร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิ 95°C เวลา 21 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) คือ 69.33 และ 66.04% ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิ 105°C เวลา 12 นาที และ 115°C เวลา 9 นาที มีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวของฮางขัดขาวเป็น 60.05 และ 52.04% ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) โดยปริมาณต้นข้าวของฮางขัดขาวที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าในงานวิจัยของ เฉลิมพร (2564) ซึ่งได้ทดลองแช่ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 80°C นาน 3 ชม. และอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิ 150°C นาน 2 นาที มีปริมาณต้นข้าวของฮางขัดขาว 67.9% เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันของข้าวจึงส่งผลให้เม็ดแป้งในข้าวเกิดการเจลลาทีโนเซชันแล้วบางส่วนจึงมีความแข็งแรงมากกว่าข้าวฮางจากงานวิจัยนี้ที่แช่ข้าวที่อุณหภูมิต่ำที่ 50

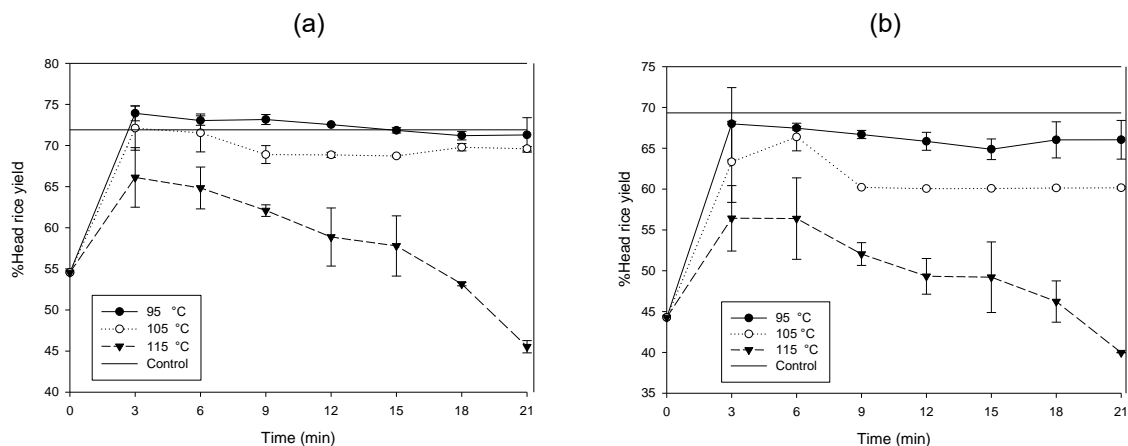


Figure 3 Effect of steaming and drying conditions on head rice yield; (a) Khao Hang (b) Khao Hang milled. (●) 95°C, (○) 105°C, (▼) 11°C, (-) Control.

5. ร้อยละข้าวท้องไข่

ข้าวท้องไข่เป็นลักษณะการทึบแสงของ เมล็ดข้าวซึ่งเกิดจากการเจลาทีไนซ์ที่ไม่สมบูรณ์ (incomplete or partially gelatinized) (Taecha pairaj *et al.* 2003) ผลของการนึ่งและอบแห้งซึ่งที่ สภาวะต่างๆ ต่อร้อยละ ข้าวท้องไข่ แสดงใน Figure 4 จากภาพพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการนึ่ง และอบแห้งจะส่งผลให้ค่าร้อยละข้าวท้องไข่ของ ข้าวฮางมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Cheevitsopon & Noomhorm (2015) ได้ รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 110°C เป็น 150°C ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วย เทคนิคฟลูอิดซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็น ตัวกลางจะส่งผลให้ค่าร้อยละข้าวท้องไข่มีแนวโน้ม ลดลงและเมื่อพิจารณาที่ผลของระยะเวลาในการนึ่ง และอบแห้งจะพบว่าที่อุณหภูมิหนึ่งและอบแห้ง 95°C และ 105°C ค่าร้อยละข้าวท้องไข่มีแนวโน้มลดลง ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง แต่ที่อุณหภูมิ 115°C ค่าร้อยละข้าวท้องไข่มีแนวโน้มลดลงจนถึงเวลา การนึ่งและอบแห้งที่ 12 นาที และกลับเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาในการนึ่งและอบแห้งมากกว่า 12 นาที ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความชื้นและเปอร์เซ็นต์การเกิด เจลาทีไนซ์ของข้าวเปลือกในระหว่างการนึ่ง และอบแห้งเนื่องจากที่อุณหภูมิ 115°C ค่าความชื้น จะลดลงอย่างรวดเร็วจนไม่เพียงพอต่อการเจลาที

ไนเซชัน นอกจากนี้ยังเกิดจากการแพร่ความชื้น ออกมาที่ผิวของข้าวอย่างรวดเร็วจึงทำให้เม็ด แป้งด้านในของเมล็ดข้าวเกิดการเจลาทีไนเซชันไม่ สมบูรณ์ จึงทำให้เกิดลักษณะการทึบแสงในเมล็ด ของข้าวอันเกิดจากการเจลาทีไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์ และจากผลการเพิ่มขึ้นของร้อยละข้าวท้องไข่ของ ข้าวฮางเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการนึ่งและอบแห้งนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ เฉลิม พร (2546) ที่ทดลองอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าเมื่อ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นจะส่งผลให้ ปริมาณข้าวท้องไข่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 10% เป็น 40% และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taechapairoj *et al.* (2003) ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการ อบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดโดยใช้ ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางจะช่วยลดค่าร้อยละ ข้าวท้องไข่

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละข้าวท้องไข่ของ Control กับข้าวฮางที่สภาวะต่างๆ มีข้าวท้องไข่อยู่ ในช่วงร้อยละ 0.5-1.75 พบว่าไม่แตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ยกเว้นสภาวะที่ 115°C เวลา 18 และ 20 นาที มีข้าวท้องไข่เท่ากับ ร้อยละ 2.25 และ 3.25 ซึ่งแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

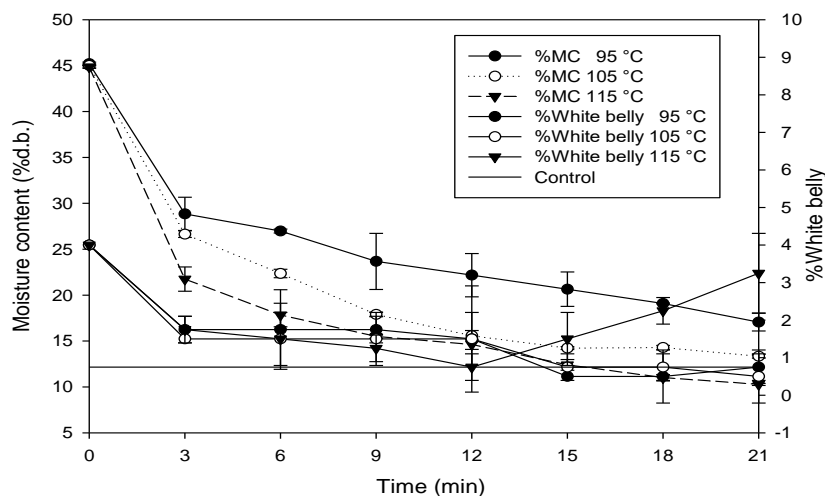


Figure 4 Effect of steaming and drying conditions on white belly.

(●) 95°C, (○) 105°C, (▼) 115°C, (-) Control.

6. สีของข้าวฮาง

คุณภาพด้านสีของข้าวฮางและข้าวฮางขัดขาวจะพิจารณาที่ค่า b^* (สีเหลือง) เนื่องจากโดยทั่วไปข้าวฮางและข้าวที่ผ่านการกระบวนการหนึ่งจะมีสีเหลืองทอง ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการให้ความร้อน (Cheevitsopon & Noomhorm, 2015) ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของค่า b^* แสดงใน Figure 5 เมื่อพิจารณาที่ผลของระดับอุณหภูมิในการนึ่งและอบแห้งพบว่าที่อุณหภูมิการนึ่งและอบแห้งสูงจะส่งผลให้ค่าสีเหลือง (b^*) ของข้าวฮางและข้าวฮางขัดขาวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการนึ่งและอบแห้งจะส่งผลให้ค่า b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในข้าวฮางและข้าวฮางขัดขาว ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งและอบแห้งจึงส่งผลให้เมล็ดข้าวมีสีเข้มมากขึ้น (สีเหลืองเข้ม) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) แบบปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนที่ผิวของเมล็ดข้าวเมื่อได้รับความร้อนในระหว่างกระบวนการ ยิ่งใช้เวลานานยิ่งทำให้เมล็ดข้าวมีสีเข้มขึ้น ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Cheevitsopon & Noomhorm (2015) ได้รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของ

ระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งจาก 110°C เป็น 150°C จะทำให้ข้าวกล้องงอกหนึ่งมีค่า b^* เพิ่มขึ้น (สีเข้มขึ้น)

เมื่อเปรียบเทียบค่า b^* ของตัวอย่าง Control กับข้าวฮางที่ได้จากเครื่องต้นแบบสำหรับนึ่งและอบแห้งข้าวฮางด้วยเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบดส์ร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางที่สภาวะต่างๆ พบว่าตัวอย่าง Control มีค่า b^* ไม่แตกต่างกับข้าวฮางที่ทุกสภาวะการนึ่งและอบแห้ง ($p>0.05$) ยกเว้นที่ 115°C เวลา 21 นาทีจะมีสีเข้มมากกว่าตัวอย่าง Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) แต่เมื่อเทียบกับข้าวฮางขัดขาวพบว่าที่สภาวะการนึ่งที่ 95°C เวลา 21 นาที มีค่า b^* ต่ำกว่า Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาค่า ΔE^* (Figure 6) ซึ่งเป็นค่าเปรียบเทียบสีระหว่างตัวอย่าง Control กับตัวอย่างข้าวฮางที่สภาวะต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการนึ่งและอบแห้งจะมีผลให้ข้าวฮางมีสีใกล้เคียงกับตัวอย่าง Control มากขึ้น ยกเว้นข้าวฮางขัดขาวที่สภาวะการนึ่งและอบแห้งที่อุณหภูมิ 115°C ตั้งแต่เวลา 6 นาทีขึ้นไปค่า ΔE^* จะแตกต่างกับตัวอย่าง Control เพิ่มมากขึ้น

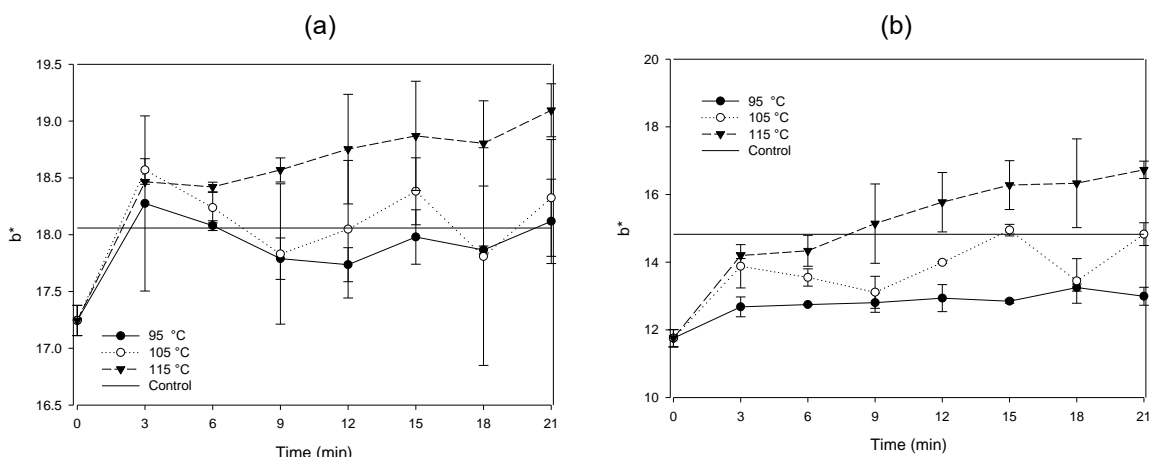


Figure 5 Effect of steaming and drying conditions on color value (b^*); (a) Khao Hang (b) Khao Hang milled. (●) 95°C , (○) 105°C , (▼) 115°C , (-) Control.

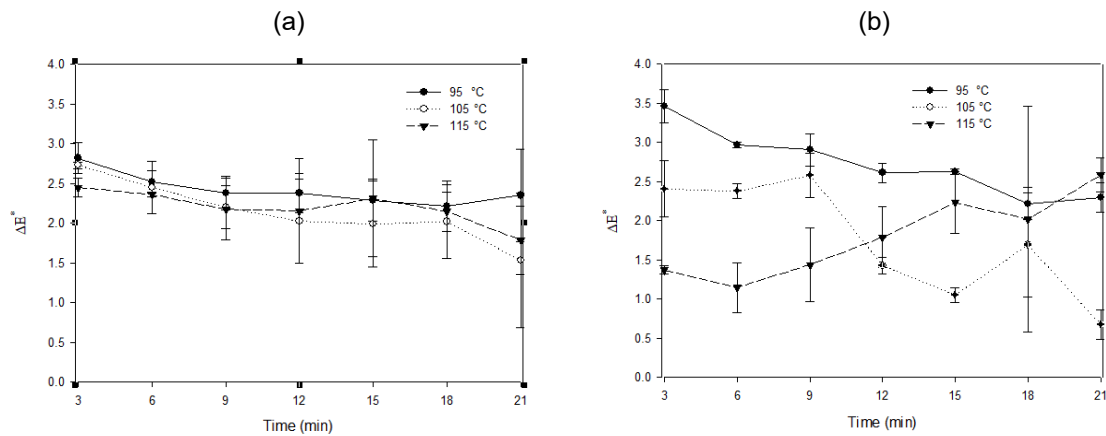


Figure 6 Effect of steaming and drying conditions on ΔE^* ; (a) Khao Hang (b) Khao Hang milled.

(●) 95°C, (○) 105°C, (▼) 115°C.

สรุปผลการทดลอง

การนึ่งและอบแห้งข้าวฮางในขั้นตอนเดียวด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดส์นั้นร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนนวดยังสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้นจาก 44.85–45.21% (d.b.) เหลือ 15.50–17.06% (d.b.) โดยใช้อุณหภูมิ 115°C เวลา 9 นาที, 105°C เวลา 12 นาที และ 95°C เวลา 21 นาที ซึ่งทั้ง 3 สภาวะนี้มีค่าความชื้นและค่าพลังงานจำเพาะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) คือ 19.44, 20.51 และ 24.93 MJ/kg-water evap. ตามลำดับ และการผลิตข้าวฮางที่ระดับอุณหภูมิสูงจะให้เปอร์เซ็นต์เจลาทีโนเซชันสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่อุณหภูมิต่ำ 115°C เวลา 9 นาที, 105°C เวลา 12 นาที จะมีค่าเปอร์เซ็นต์เจลาทีโนเซชันสูงไม่ต่างกับข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิมแต่การผลิตที่ระดับอุณหภูมิสูง (115°C) ข้าวฮางที่ได้จะมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวต่ำกว่าที่ระดับอุณหภูมิต่ำ (95 และ 105°C) และข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าร้อยละข้าวท้องไข้กับค่า b^* ของข้าวฮางที่ผลิตด้วยวิธีดั้งเดิมกับข้าวฮางที่สภาวะต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวฮางโดยการรวมขั้นตอนการนึ่งและการอบแห้งไว้ในขั้นตอนเดียวด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดส์นั้นร่วมกับการใช้ไอน้ำร้อนนวดคือที่อุณหภูมิ 105°C เวลา

12 นาที ซึ่งสามารถลดเวลาจากกระบวนการผลิตข้าวฮางแบบดั้งเดิมลงไปได้มาก (การนึ่ง 40 – 60 นาที และการอบแห้ง 48 ชั่วโมง ขึ้นไป) โดยข้าวฮางที่ได้สามารถนำไปกะเทาะเปลือกได้โดยไม่ต้องลดความชื้นลงอีก โดยมีเปอร์เซ็นต์เจลาทีโนเซชันเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวค่าร้อยละข้าวท้องไข้ และคุณภาพด้านสีไม่แตกต่างจากข้าวฮางที่ผลิตแบบดั้งเดิม ($p > 0.05$) แต่สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตข้าวหนึ่ง ต้องนำข้าวฮางที่ได้ไปแปรสภาพเป็นข้าวฮางขัดขาวด้วย ดังนั้นควรใช้สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิ 95°C เวลา 21 นาที ซึ่งจะให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเท่ากับ 66.04% ซึ่งไม่แตกต่างกับข้าวฮางขัดขาวที่ผลิตแบบดั้งเดิม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนที่สนับสนุนทุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมส่งเสริมการเกษตร ศูนย์บริการองค์ความรู้ การเกษตร. (2553). การผลิตข้าวฮางอก. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 กันยายน 2557 สืบค้นจาก <http://k-enter.doae.go.th/knowledge/detail.jsp?id=917>.
- กสิณนา เทียงบุรณธรรม. (2552). ฤทธิ์ต้านเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาว U937 ของข้าวฮาง. วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่, 42(2), 132.
- ขนิษฐา ทานีฮิล. (2552). ฤทธิ์ต้านมะเร็งของข้าวฮาง. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- จักรวาท จันท์หล้า. (2554). ภูมิปัญญาท้องถิ่นข้าวฮาง ในเขตเทศบาลตำบลปลาไหลอำเภอลำลูกกา จังหวัดลพบุรี. รายงานการศึกษาอิสระปริญาตมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- เฉลิมพร เอี่ยมมี. (2546). การรวมกระบวนการผลิตของการนึ่งและอบแห้งข้าวหนึ่งสำหรับข้าวหอม. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ทัศนีย์ ผลไม้, ขนิษฐา ทานีฮิล และจอมพจน์ เกษมรุ่งชัยกิจ. (2551). ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณ สารประกอบฟีนอลของข้าวขาว ข้าวกล้อง ข้าวกล้องงอกและข้าวฮาง. ปัญหาพิเศษปริญญาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- มาตรฐานสินค้าเกษตร สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2555). ข้าว มกษ. 4004-2555. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- มนตรี พิลา. (2548). การทดลองเปรียบเทียบข้าวเหนียวหนึ่งปลูกโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. (2535). วิศวกรรมแปรรูปอาหาร: การถนอมอาหาร. กรุงเทพฯ: โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮ้าส์.
- วาทัญญู รอดประพัฒน์. (2547). การพัฒนาเครื่องต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญา ดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- วุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์. 2541. การออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดสันสะเทือน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- วรรณิ เอกศิลป์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และอภิชาติ เทอดโยธิน. (2538). การวิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงสีข้าวสำหรับระบบการผลิตไฟฟ้าความร้อนร่วมในประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์, 29(1), 87-99.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, สุวัฒน์ ตรุทัศน์วินท์ และวุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์. (2545). การออกแบบ ทดสอบ และหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสัน. วารสารราชบัณฑิตยสถาน, 27(4): 59-69.

- สุชาติ วัฒนสุขประเสริฐ. (2554). การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้อากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- อรรถพล แซ่มซ้อย, เชษฐา เกินหน้า, ขนิษฐา ทานีฮิล และจอมพจน์ เกษมรุ่งชัยกิจ. (2551). ผลของข้าวฮางต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย. ใน รายงานวิจัยโครงการโครงการงานอุตสาหกรรมและวิจัยสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี ประจำปี 2551. ภาควิชาเทคนิคการแพทย์ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อรอนงค์น้อยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- American Society of Agricultural Engineers. (1998). *ASAE S352.2 APR1988 (R2012): Moisture easurement— Unground Grain and Seeds*. USA : n.p..
- Bautista, R. C., Siebenmorgen, T. J., & Counce, P. A. (2009). Rice kernel chalkiness and milling quality relationship of selected cultivars. *BR Wells Rice Research Studies*, 581, 220-2009.
- Cheevitsopon, E., & Noomhorm, A. (2015). Effects of superheated steam fluidized bed drying on the quality of parboiled germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(4), 349-356.
- Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varanyanond, W., Tungtrakul, P., & Soponronnarit, S. (2008). Effects of drying temperature and tempering time on starch digestibility of brown fragrant rice. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 251-258.
- Luh, B.S. (1991). *Rice, Volume2: Utilization*. New York, USA: Springer.
- Sopanronnarit, S., Rordprapat, W., & Wetchacama, S. (1998). Mobile fluidized bed paddy dryer. *Drying technology*, 16(7), 1501-1513.
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Trutassanawin 1, S., & Jariyatontivait 1, W. (2001). Design, testing, and optimization of vibro-fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology*, 19(8), 1891-1908.
- Soponronnarit, S., Nathakarakule, A., Jirajindalert, A., & Taechapairoj, C. (2006). Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering*, 75(3), 423-432.
- Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., Rordprapat, W., Nathakarakule, A., & Tia, W. (2006). A superheated-steam fluidized-bed dryer for parboiled rice: Testing of a pilot-scale and mathematical model development. *Drying technology*, 24(11), 1457-1467.7.

- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Thanasookprasert, S., & Soponronnarit, S. (2013). Comparative evaluation of hot-air and superheated-steam impinging stream drying as novel alternatives for paddy drying. *Drying Technology*, 31(6), 717-725.
- Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., & Prachayawarakorn, S. (2003). Superheated steam fluidised bed paddy drying. *Journal of food Engineering*, 58(1), 67-73.
- Taechapairoj, C., Prachayawarakorn, S., & Soponronnarit, S. (2004). Characteristics of rice dried in superheated-steam fluidized-bed. *Drying Technology*, 22(4), 719-743
- Wetchacama, S., Soponronnarit, S., & Jariyatontivait, W. (2000). Development of a commercial scale vibro-fluidized bed paddy dryer. *Agriculture and Natural Resources*, 34(3), 423-430.