

ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตข้าวหนึ่งด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดอากาศร้อนและฟลูอิดซ์เบดอากาศร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

อีลีหียะ สนิโซ^{1,4*}, ธนิต สวัสดิ์เสวี², สมเกียรติ ปรัชญาวารากร³, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์⁴

¹สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา 95000

²สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

³สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

⁴สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

ผู้เขียนติดต่อ: อีลีหียะ สนิโซ E-mail: eleeyah.s@yru.ac.th

บทคัดย่อ

การผลิตข้าวหนึ่งด้วยวิธีแบบดั้งเดิมประกอบด้วยขั้นตอนการแช่น้ำ การนึ่งและการอบแห้ง ขั้นตอนการนึ่งจำเป็นต้องมีระบบท่อและหม้อนึ่งไอน้ำ ทั้งนี้เพื่อลดระบบการนึ่งในการผลิตข้าวหนึ่งดังกล่าวการวิจัยนี้จึงรวมขั้นตอนการนึ่งและการอบแห้งให้เป็นขั้นตอนเดียวด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดอากาศร้อน (FB) และฟลูอิดซ์เบดอากาศร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (FBMW) ที่อุณหภูมิอากาศร้อนสูงเท่ากับ 150 และ 170°C ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 47±1% d.b. ความสูงเบด 5 และ 10 cm ความเร็วลมและกำลังไมโครเวฟคงที่เท่ากับ 4.6 ms⁻¹ และ 4.0 kW ตามลำดับ พบว่า ที่ความชื้นสุดท้าย 20±2% d.b. การอบแห้งแบบ FBMW สามารถลดเวลาการอบแห้งได้ 14–20% เทียบกับการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียว โดยที่อุณหภูมิ 170°C ความสูงเบด 10 cm การอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวมีผลให้สตาร์ชมีระดับการเจลาติไนซ์ 66% แต่การอบแห้งแบบ FBMW สตาร์ชมีระดับการเจลาติไนซ์ที่สมบูรณ์ ในขณะที่ความสูงเบด 5 cm สามารถผลิตข้าวหนึ่งที่สมบูรณ์ได้ทั้งการอบแห้งแบบ FB และ FBMW ทั้งนี้ ข้าวหนึ่งที่ผลิตด้วยการอบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่ความหนาเบด 5 และ 10 cm มีข้าวหักเพียง 1–2% เท่านั้น ส่วนความขาวจะลดลงตามระยะเวลาและอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น และการอบแห้งแบบ FBMW มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวประมาณ 55%

คำสำคัญ: ข้าวหนึ่ง, การอบแห้ง, ฟลูอิดซ์เบด, ไมโครเวฟ

Comparative study of parboiled rice production using hot air fluidized bed and hot air fluidized bed – microwave drying technique

Eleeyah Saniso^{1*}, Thanit Swasdisewi², Somkiat Prachayawaracorn³, Somchart Soponronnarit⁴

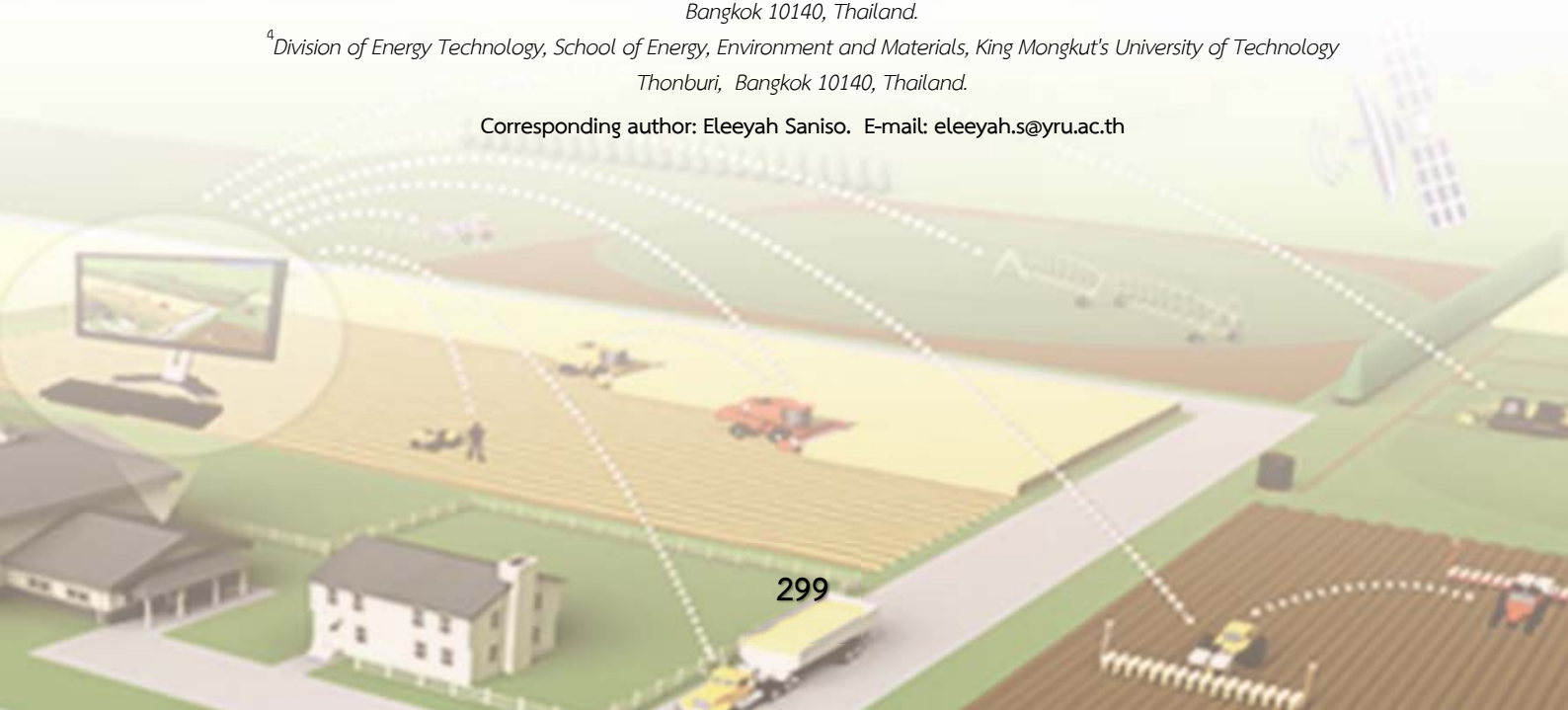
¹Major of Physics, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala 95000, Thailand.

²Division of Thermal Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

³Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

⁴Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

Corresponding author: Eleeyah Saniso. E-mail: eleeyah.s@yru.ac.th



Abstract

Traditional method for parboiled rice production consists of soaking, steaming and drying, with the steaming process requiring a piping system and a boiler. In this work, the steps of steaming and drying were combined as one step. Drying kinetics and quality of parboiled rice produced by hot air fluidized bed (FB) and hot air fluidized bed – microwave (FBMW) drying were investigated. Paddy samples with an initial moisture content of $47\pm 1\%$ d.b. were dried in FB and FBMW dryers at the drying air temperatures of 150 and 170°C with microwave power fixed at 4.0 kW, superficial air velocity 4.6 ms^{-1} , and bed depths of 5 and 10 cm. Results showed that the drying time to reach an intermediate moisture content of $20\pm 2\%$ d.b. for FBMW was 14–20% shorter than for FB. At a drying air temperature of 170°C and bed depth of 10 cm, soaked paddy dried by FB had starch gelatinization of 66% but FBMW drying produced parboiled rice with 100% starch gelatinization. At bed depth of 5 cm both FB and FBMW drying techniques could produce complete starch gelatinization. Parboiled rice produced by FB and FBMW drying at bed depth of 5 and 10 cm contains only 1–2% broken rice. Whiteness value decreased with increasing drying time and drying air temperature, while FBMW drying required 55% higher specific energy consumption than the FB technique.

Keywords: Parboiled rice, Drying, Fluidization, Microwave.

1. บทนำ

ข้าวหนึ่ง (Parboiled rice) คือ ข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่น้ำ (Soaking or steeping) เพื่อเพิ่มความชื้น ซึ่งมีวิตามินและเกลือแร่ บางส่วนที่ละลายน้ำสามารถแทรกเข้าไปในเมล็ดและคงอยู่ในเมล็ด ถึงแม้ผิววนอกถูกขัดออกไปแล้ว จากนั้นนำไปนึ่ง (Steaming) ให้สุก แล้วจึงลดความชื้น (Dehydration) หรืออบแห้ง (Drying) ก่อนขัดสี เาเปลือกและรำออก ข้าวหนึ่งสามารถแบ่งตามสีได้ 2 ลักษณะ คือ ข้าวหนึ่งสีเข้ม (Dark parboiled rice) และข้าวหนึ่งสีอ่อน (Light parboiled rice) ทั้งนี้ข้าวหนึ่งสีเข้มเป็นที่ต้องการของตลาดและมีราคา อยู่ในเกณฑ์สูงกว่าข้าวหนึ่งสีอ่อน ประเทศไทยส่งออกข้าวไปยังตลาด แอฟริกามากที่สุดคิดเป็น 44% และส่วนใหญ่เป็นข้าวหนึ่ง (อิทธิพงษ์ มหาธนเศรษฐ์, 2557) นอกจากนี้ประเทศไทยยังส่งออกข้าวหนึ่งไปยัง ประเทศต่างๆ ในตะวันออกกลาง สหรัฐอเมริกา และยุโรป

การผลิตข้าวหนึ่งด้วยวิธีดั้งเดิม (Traditional parboiled rice method) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การแช่น้ำ การนึ่ง และการอบแห้ง (Adhikaritanayake and Noomhorm, 1998; Bhattacharya, 1985; Itoh et al., 1985) ทั้งนี้ การแช่น้ำข้าวเปลือกนั้น เพื่อให้แป้งอ่อนตัวที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ช (Starch) เกิดการเจลาติไนซ์ (Gelatinization) ส่วนการนึ่งข้าวเปลือก ที่ผ่านการแช่น้ำด้วยไอน้ำร้อนเพื่อให้สตาร์ชในเมล็ดข้าวเกิดการเจลาติไนซ์ (Starch gelatinization) ที่สมบูรณ์ และการอบแห้ง ข้าวเปลือกที่ผ่านการนึ่งให้เหลือความชื้น 14–16% d.b. เพื่อให้เก็บ ได้นาน ป้องกันการทำลายโดยเชื้อราและคงคุณภาพให้เป็นที่ยอมรับ ในระดับอุตสาหกรรม

ทั้งนี้ Taweerattanapanish et al. (1999) ได้รายงานว่าการ อบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันจะได้ข้าวที่มีลักษณะคล้าย ข้าวกึ่งนึ่ง ซึ่งมีจุดขาวที่บ่งแสง (White belly) อยู่ภายในเมล็ด เนื่องจากสตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ไม่สมบูรณ์ (สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ 13.1–34.7%) ในขณะที่ Rattanamechaiskul et al. (2013)

และ Rattanamechaiskul et al. (2011) ได้อบแห้งข้าวกล้องกึ่งนึ่ง ด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันที่ใช้อากาศร้อนชื้น (Humidified hot air drying, HHD) เป็นตัวกลางอบแห้ง เพื่อให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ สมบูรณ์ขึ้น พบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันข้าวกล้องที่อบแห้งด้วย เทคนิคฟลูอิดเซชันซึ่งใช้อากาศร้อนชื้นให้ค่าเจลาติไนซ์สูงกว่าการ อบแห้งด้วยอากาศร้อนอย่างเดียว โดยการอบแห้งแบบ HHD สตาร์ช เกิดเจลาติไนซ์ 15.4–70.5% เพื่อให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนซ์และเป็นข้าว หนึ่งที่สมบูรณ์ จึงมีการอบแห้งข้าวเปลือกที่แช่น้ำด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam drying, SSD) เป็น ตัวกลางการอบแห้ง ซึ่งพบว่า สตาร์ชเกิดเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือ สตาร์ชมีระดับการเกิดเจลาติไนซ์เท่ากับ 100% (Rattana- mechaiskul et al., 2011; Rordprapat et al., 2005)

อย่างไรก็ตาม การอบแห้งเพื่อผลิตข้าวหนึ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำเป็นต้องใช้หม้อนึ่ง (Boiler) ซึ่งต้องวางท่อ และติดตั้งระบบควบคุมหม้อนึ่งที่ซับซ้อน รวมทั้งยังต้องมีเจ้าหน้าที่ คอยควบคุมและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังนั้น การผลิต ข้าวหนึ่งที่ไม่ต้องใช้ไอน้ำซึ่งรวมขั้นตอนการนึ่งและอบแห้งไว้ในเครื่อง เดียวกันด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันเบดอากาศร้อนร่วมกับ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นทางเลือกหนึ่งซึ่ง จะช่วยให้การผลิตข้าวหนึ่งทำได้ง่ายขึ้นและโรงงานผลิตมีขนาดลดลง เนื่องจากการอบแห้งด้วยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave, MW) เป็นการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งให้ความ ร้อนโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ช่วง ความถี่ไมโครเวฟส่งผ่านเข้าไปในวัสดุ ทำให้โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็น โมเลกุลที่มีขั้วเคลื่อนที่ไปมาเพื่อจัดเรียงตัวในทิศทางตามทิศของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านและสะท้อนกลับไปกลับมาในห้องอบแห้ง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุเกิดการหมุนและเสียดสีกันจนเกิด ความร้อนและอุณหภูมิภายในวัสดุสูงขึ้นทำให้น้ำในวัสดุระเหย ออกมาได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก

(Sangdao et al., 2011; Sangdao and Krairiksh, 2008) และถั่วเหลือง (Zare and Ranjbaran, 2012) เป็นต้น โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสี (Alibas, 2007; Alibas, 2006) และการคั่ว (Dev et al., 2011; Askari et al., 2009) ที่ดี รวมทั้งมีผลให้การหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งลดลงอีกด้วย (Maskan, 2000)

ในขณะที่ การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน (Fluidization) เป็นการอบแห้งที่ทำให้วัสดุลอยตัวอย่างอิสระในอากาศร้อนส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างอากาศร้อนและวัสดุเกิดขึ้นอย่างทั่วถึง ทำให้อุณหภูมิภายในเบตสม่ำเสมอเท่ากันทุกตำแหน่ง สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงกว่าวิธีการอบแห้งอื่นทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลง รวมทั้งสามารถควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติและทำงานแบบต่อเนื่องได้ ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก (Golmohammadi et al., 2012; Khanali et al., 2012) ข้าวกล้องนึ่ง (Poomsa-ad and Wiset, 2012) เมล็ดข้าวโพด (Janas et al., 2010) แอปเปิ้ล (Kaleta et al., 2013) และถั่วเหลือง (Soponronnarit et al., 2001) เป็นต้น

การวิจัยนี้จึงทดลองผลิตข้าวนึ่งด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันเบตอากาศร้อนและฟลูอิดเซชันเบตอากาศร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพของข้าวนึ่ง ได้แก่ ระดับการเจลาทิไนซ์ของสตราซ ร้อยละข้าวตัน และความขาว

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ตัวอย่างทดลอง

การทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (Suphan Buri 1) ซึ่งเป็นข้าวเจ้าชนิดเมล็ดยาว (ข้าวเปลือกมีความยาว x ความกว้าง x ความหนา เท่ากับ 10.0 x 2.4 x 2.0 mm³) มีปริมาณอะไมโลสสูง (27–29%) ที่มีอายุการเก็บรักษาประมาณ 6 เดือน มาเพิ่มความชื้นโดยแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 5 h เพื่อให้ได้ความชื้น 46–48% d.b.

2.2 เครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ทดลองเป็นแบบฟลูอิดเซชันเบตอากาศร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดอบแห้งเป็นงวด (Batch) ดัง Figure 1 ซึ่งมีห้องอบแห้ง (Drying chamber) เป็นสแตนเลสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 21 cm สูง 80 cm มีแมกนีตรอน (Magnetrons) สำหรับกำเนิดคลื่นไมโครเวฟติดตั้งโดยรอบแบบบันไดวนจำนวน 5 ตัว ขนาดกำลังตัวเลข 800 W ความถี่ 2.45 GHz

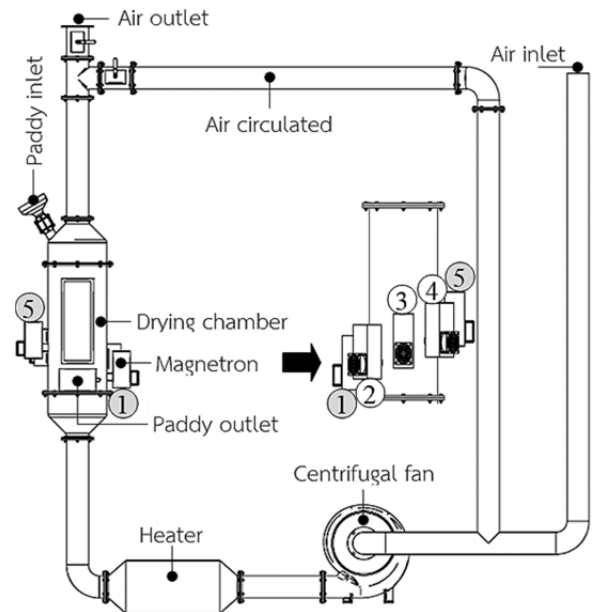


Figure 1 A schematic diagram of a MWFB dryer.

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ขนาด 19 kW ซึ่งควบคุมอุณหภูมิโดย PID controller ความแม่นยำ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ มีพัดลมแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง (Backward-curved blade centrifugal fan) ทำงานด้วยมอเตอร์ขนาด 2.2 kW (3 HP) โดยมีตัวปรับความเร็วรอบของพัดลมควบคุมให้อัตราการไหลของอากาศเป็นไปตามที่กำหนด โดยอากาศถูกส่งผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการและถูกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80%

2.3 วิธีทดลอง

นำข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ที่ผ่านการแช่น้ำความชื้นเริ่มต้น $47 \pm 1\%$ d.b. มาอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันเบตอากาศร้อน (FB) และฟลูอิดเซชันเบตอากาศร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (FBMW) ที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C กำลังไมโครเวฟคงที่ 4 kW (โดยจ่ายคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงนาที่ที่ 3 ของการอบแห้ง) ความเร็วอากาศร้อน 4.6 ms^{-1} ความสูงเบต 5 cm ($\approx 1 \text{ kg wet paddy}$) และ 10 cm ($\approx 2 \text{ kg wet paddy}$) จากนั้นนำตัวอย่างข้าวเปลือกหลังการอบแห้งที่เวลาต่างๆ ไปหาความชื้นและเก็บในที่อับอากาศ (Tempering) ที่อุณหภูมิเมล็ดเป็นเวลา 30 min แล้วนำมาพักไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อมซึ่งมีอากาศถ่ายเทตลอดเวลาที่ความสูงเบต 0.5–1 cm เป็นเวลา 24–72 h จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 14–16% d.b. จึงนำไปเก็บในตู้เย็นซึ่งควบคุมอุณหภูมิในช่วง 4–6°C เป็นเวลา 14 วัน จึงวิเคราะห์คุณภาพของข้าวนึ่ง ได้แก่ ระดับการเจลาทิไนซ์ของสตราซ ร้อยละข้าวตัน และความขาว

2.4 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวขึ้น

2.4.1 ระดับการเจลลิตไนซ์ของสตาร์ช

การเจลลิตไนซ์ของสตาร์ช (Starch gelatinization) วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Perkin Elmer, model DSC-7, Norwalk, USA) แล้วคำนวณระดับการเจลลิตไนซ์ของสตาร์ช (Degree of starch gelatinization, DSG) ดังสมการ (1)

$$DSG = \left[1 - \frac{\Delta H}{\Delta H_c} \right] \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ DSG คือ ระดับการเจลลิตไนซ์ของสตาร์ช (%), ΔH คือ เอนทาลปีที่เปลี่ยนแปลงของสตาร์ชที่เจลลิตไนซ์ (J/g dry matter) และ ΔH_c คือ เอนทาลปีที่เปลี่ยนแปลงของสตาร์ชที่ไม่เจลลิตไนซ์ (J/g dry matter)

2.4.2 ร้อยละข้าวต้น

ร้อยละข้าวต้น (Head rice yield, HRY) คำนวณจากสัดส่วนของน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด (รวมเมล็ดข้าวหักที่มีความยาวประมาณ 3 ใน 4 ของข้าวเต็มเมล็ด) กับน้ำหนักข้าวเปลือก

2.4.3 ความขาว

ค่าความขาว (Whiteness value) วัดโดยใช้เครื่อง Kett digital whiteness tester (Model C-300, Japan) ซึ่งปรับเทียบค่าสีขาวมาตรฐานเท่ากับ 86.3

2.4.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ (ความชื้น) ออกจากข้าวเปลือกหว่านอบแห้ง ซึ่งคำนวณจากพลังงานที่ให้กับพัดลมอุปกรณ์ให้ความร้อนและแม่กนิตอน ดังสมการ (2)

$$SEC = \frac{E_{electric} + E_{thermal}}{m_{Water\ evap.}} \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{water evap.}), $E_{electric}$ คือ พลังงานที่ให้กับพัดลมและแม่กนิตอน (MJ), $E_{thermal}$ คือ พลังงานที่ให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อน (MJ) และ $m_{water\ evap.}$ คือ มวลน้ำ (ความชื้น) ที่ถูกระเหยออกจากข้าวเปลือก (kg)

3. ผลและวิจารณ์

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

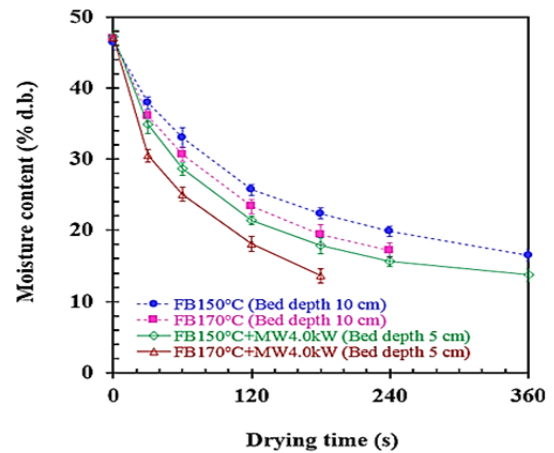


Figure 2 Moisture content of soaked paddy dried by FB and MWFB at drying air temperatures of 150 and 170°C and bed depths of 5 and 10 cm.

Figure 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C ความหนาเบด 5 และ 10 cm พบว่า การลดลงของความชื้นมีลักษณะเอ็กโปเนนเชียล (Exponential) ตามระยะเวลาการอบแห้ง โดยความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2 นาทีแรก จากนั้นการลดลงของความชื้นจะช้าลง ทั้งนี้ที่ความหนาเบดเดียวกันการอบแห้งที่อุณหภูมิ 170°C สามารถลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ส่งผลให้การอบแห้งที่อุณหภูมิ 170°C ใช้เวลาอบแห้งให้ได้ความชื้นเดียวกันน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C

โดยที่ความชื้นสุดท้าย $20.5 \pm 0.5\%$ d.b. การอบแห้งแบบ FB ที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบด 5 และ 10 cm สามารถลดเวลาการอบแห้งได้ 20.7% และ 26.0% ตามลำดับ เทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ในทำนองเดียวกันการอบแห้งแบบ FBMW ที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบด 5 และ 10 cm สามารถลดเวลาการอบแห้งได้ 26.9% และ 20.6% ตามลำดับ เทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 170°C มีผลให้อุณหภูมิของเมล็ดมีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ประมาณ 10-15°C ดัง Figure 3 มีผลทำให้น้ำระเหยไปยังอากาศอบแห้งได้เร็วขึ้น

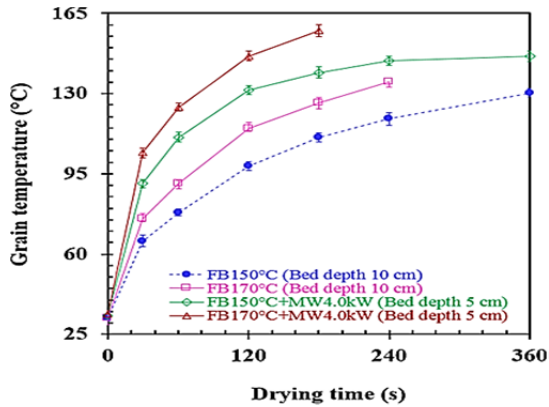


Figure 3 Grain temperatures of soaked paddy dried by FB and MWFB at drying air temperatures of 150 and 170°C and bed depths of 5 and 10 cm.

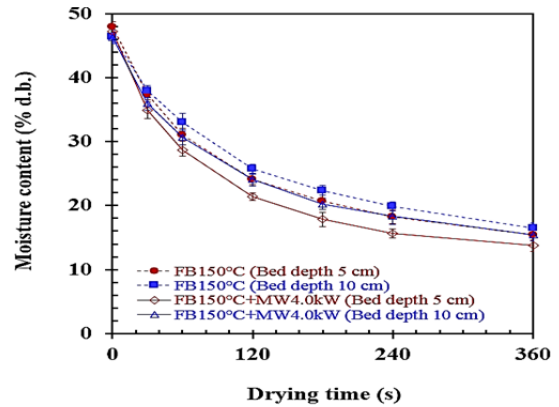


Figure 4 Moisture content of soaked paddy dried by FB and MWFB at drying air temperature of 150°C and bed depths of 5 and 10 cm.

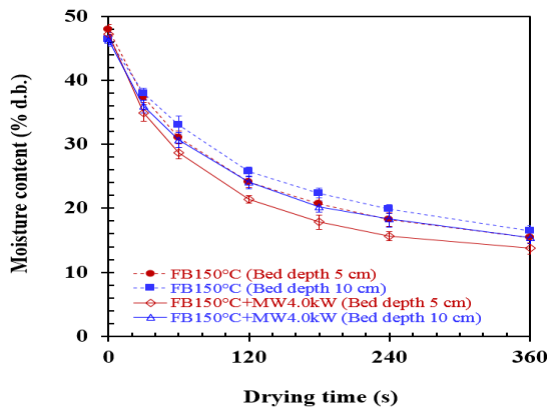


Figure 4 Moisture content of soaked paddy dried by FB and MWFB at drying air temperature of 150°C and bed depths of 5 and 10 cm.

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่ความหนาเบตต่างกัน พบว่า ที่เวลาอบแห้งเดียวกันการลดลงของความชื้นที่ความหนาเบต 5 cm มีค่ามากกว่าการอบแห้งที่ความหนาเบต 10 cm ทั้งการอบแห้งแบบ FB และ FBMW ดัง Figure 4 เนื่องจากปริมาณข้าวเปลือกที่ความหนาเบต 5 cm มีปริมาณน้อยกว่า (≈ 1 kg wet paddy) ที่ความหนาเบต 10 cm (≈ 2 kg wet paddy) จึงส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนระหว่างเมล็ดข้าวกับอากาศร้อนเกิดขึ้นเร็วและสม่ำเสมอว่าที่ความหนาเบต 10 cm ทำให้อุณหภูมิเมล็ดที่ความหนาเบต 5 cm เพิ่มขึ้นเร็วกว่าที่ความหนาเบต 10 cm ดัง Figure 5 ส่งผลให้การแพร่ความร้อนภายในเมล็ดที่ความหนาเบต 5 cm สูงกว่าที่ความหนาเบต 10 cm ทำให้ความชื้นเคลื่อนที่มาจากผิวเมล็ดได้เร็วขึ้น จึงระเหยออกจากเมล็ดข้าวได้เร็วขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งแบบ FB และ FBMW พบว่า ที่ความหนาเบตและอุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน การอบแห้งแบบ FBMW สามารถลดความชื้นได้มากกว่าการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวประมาณ 2-5% d.b. ดัง Figure 4 เนื่องจากเมื่อเมล็ดข้าวได้รับคลื่นไมโครเวฟ โมเลกุลของน้ำ (ความชื้น) ในเมล็ดข้าวจะเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงชั่วฟ้าอย่างรวดเร็วตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (2.45 GHz) ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในเมล็ดข้าวจนเกิดเป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณกลางเมล็ด (Sangdao et al., 2011; Zare and Ranjbaran, 2012) ส่งผลให้เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิสูงกว่าการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวประมาณ 5–10°C ดัง Figure 5 ความร้อนจึงไปเร่งมวลน้ำ (ความชื้น) ให้เปลี่ยนสถานะเป็นไอและระเหยออกมาเติมเต็มผิวหน้าของเมล็ดข้าวเร็วกว่าการอบแห้งแบบ FB เพียงอย่างเดียว ดังนั้น การอบแห้งแบบ FBMW จึงสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งแบบ FB เพียงอย่างเดียว

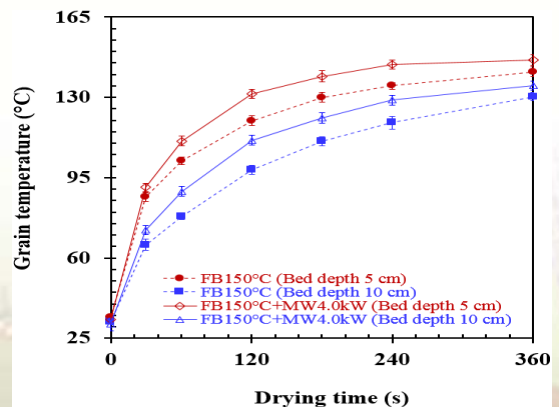


Figure 5 Grain temperatures of soaked paddy dried by FB and MWFB at drying air temperature of 150°C and bed depth of 5 and 10 cm.

3.2 ระดับการเจลาทีไนซ์ของสตาร์ช (DSG)

Table 1 DSG of soaked paddy dried by FB and FBMW with tempering at drying air temperatures of 150 and 170°C and bed depths of 5 and 10 cm (MCF=18–22% d.b.).

Drying conditions		DSG (%)
Bed 10 cm	FB150°C	55.6±2.3 ^a
	FB150°C+MW4.0kW	85.3±1.1 ^b
	FB170°C	65.5±2.5 ^c
	FB170°C+MW4.0kW	100 ^f
Bed 5 cm	FB150°C	80.4±3.6 ^d
	FB150°C+MW4.0kW	91.2±0.7 ^e
	FB170°C	100 ^f
	FB170°C+MW4.0kW	100 ^f
Soaked rice		7.8±1.9

Values in the same column with different superscripts mean that the values are significantly different ($p < 0.05$), MCF=final moisture content.

Table 1 แสดง DSG ของสตาร์ชจากข้าวเปลือกที่อบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C ความหนาเบด 5 และ 10 cm ซึ่งพบว่า ที่ความชื้นสุดท้าย $21 \pm 1\%$ d.b. การอบแห้งแบบ FB อย่างเดียว สตาร์ชมี DSG ต่ำกว่าการอบแห้งแบบ FBMW โดยที่ความหนาเบด 10 cm การอบแห้งแบบ FBMW ที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C มี DSG สูงกว่าการอบแห้งแบบ FB เพียงอย่างเดียว 29.7 และ 34.5% ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาเบด 5 cm การอบแห้งแบบ FBMW ที่อุณหภูมิ 150 มี DSG สูงกว่าการอบแห้งแบบ FB เพียงอย่างเดียว 10.8% ส่วนที่อุณหภูมิ 170°C การอบแห้งแบบ FB และ FBMW ได้ค่า DSG ไม่แตกต่างกันเนื่องจากสตาร์ชเกิดเจลาทีไนซ์ที่สมบูรณ์ คือ มีค่า DSG เท่ากับ 100%

การที่ค่า DSG ของข้าวเปลือกที่อบแห้งแบบ FBMW มีค่าสูงกว่าการอบแห้งแบบ FB นั้น เนื่องจากระหว่างการอบแห้งเมล็ดข้าวซึ่งมีความชื้นสูง ($47 \pm 1\%$ d.b.) ดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟแล้วแปลงเป็นความร้อน (Sangdao et al., 2011; Sangdao and Krairiksh, 2008; Zare and Ranjbaran, 2012) ขึ้นภายในเมล็ดอย่างรวดเร็ว มีผลให้เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิสูงกว่าการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวประมาณ 5–10°C ดัง Figure 5 ดังนั้น การอบแห้งแบบ FBMW จึงช่วยเร่งให้สตาร์ชเกิดเจลาทีไนซ์ได้ดีกว่าการอบแห้งแบบ FB เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ ข้าวหลังการอบแห้งที่มีค่า DSG เท่ากับ 100% นั้น สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าการอบแห้งนั้นสามารถผลิตข้าวนี้ที่สมบูรณ์

3.3 ร้อยละข้าวต้น (HRY)

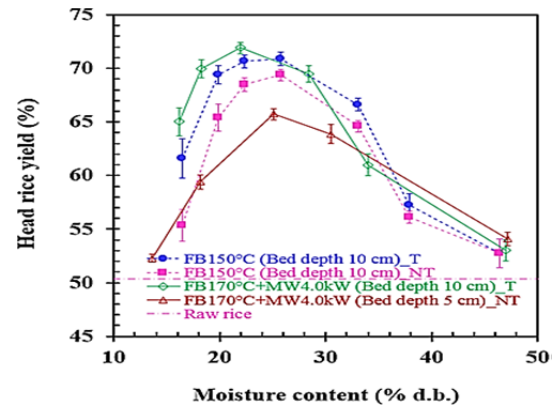


Figure 6 HRY of soaked paddy dried by FB and FBMW at drying air temperatures of 150 and 170°C and bed depth of 5 and 10 cm (T = tempered and NT = no tempered).

Figure 6 แสดง HRY ของข้าวที่อบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C ความหนาเบด 5 และ 10 cm ซึ่งพบว่า HRY มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิตอบแห้งเพิ่มขึ้นและความชื้นลดลง (เวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น) ทั้งกรณีที่ถูกและไม่ถูกในที่อบอากาศ (Tempered and no tempered) เพราะการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ความร้อนจะมีผลให้สตาร์ชที่มีความชื้นเพียงพอไม่น้อยกว่า 28% d.b. (Tirawanichakul et al., 2004; Day et al., 2013; Lund and Lorenz, 1984) เกิดพองตัวและเกิดการเจลาทีไนซ์ของสตาร์ช แบ่งที่เกิดเจลาทีไนซ์จะช่วยในการประสานรอยร้าวหรือรอยแตกภายในเมล็ดเกิดทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงทนต่อการขัดสีได้เพิ่มขึ้น จนถึงที่ความชื้นสุดท้าย 18–22% d.b. ค่า HRY จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าว (Moisture gradient) เพิ่มขึ้นเทียบกับการอบแห้งที่ความชื้น 47–20% d.b. ทำให้เกิดความเค้น (Stress) ภายในเมล็ดนำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าวและหัก (Alizadeh et al., 2011; Abud-Archila et al., 2000) เมื่อนำไปขัดสีจึงได้ HRY น้อยลง



Figure 7 Soaked paddy dried by FBMW at drying air temperature of 170°C and bed depth of 5 cm (MCF = 19% d.b.).

ทั้งนี้ ยกเว้นการอบแห้งแบบ FBMW ที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบด 5 cm ซึ่งพบว่า HRY สำหรับข้าวที่เก็บและไม่เก็บในที่อบอากาศมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 65.6 และ 59.4% ตามลำดับ ดัง Table 2

โดยข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งมีการพองและแตกออก (Puffing) ดัง Figure 7 เนื่องจากเมล็ดข้าวได้รับความร้อนสูงถึง 150°C เมื่อขัดสี จึงได้ HRY ต่ำกว่ากรณีอื่นๆ

Table 2 HRY of soaked paddy dried by FB and FBMW at drying air temperature of 150 and 170°C and bed depth of 5 and 10 cm (MC_f = 18–22% d.b.).

Drying conditions		HRY (%)	
		T	NT
Bed 10 cm	FB150°C	69.4±0.8 ^b	65.4±1.3 ^b
	FB150°C+MW4.0kW	69.2±1.1 ^b	67.3±0.7 ^c
	FB170°C	71.3±0.4 ^c	70.0±0.4 ^d
	FB170°C+MW4.0kW	71.9±0.5 ^c	70.5±0.6 ^d
Bed 5 cm	FB150°C	71.5±0.7 ^c	69.6±0.6 ^d
	FB150°C+MW4.0kW	70.6±1.0 ^{bc}	69.8±1.1 ^d
	FB170°C	69.2±1.1 ^b	64.0±1.3 ^b
	FB170°C+MW4.0kW	65.6±0.9 ^a	59.4±0.8 ^a
Raw rice		50.3±1.1	
Soaked rice		52.8±1.4	

Values in the same column with different superscripts mean that the values are significantly different ($p < 0.05$), MC_f=final moisture content, T=tempered and NT=no tempered.

Table 2 แสดง HRY ของข้าวที่อบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C ความหนาเบต 5 และ 10 cm ซึ่งพบว่ากรณีที่เก็บในที่อับอากาศ HRY ของข้าวที่อบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่ความชื้นสุดท้าย 18–22% d.b. มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 69.4–71.9% และมีข้าวหักเพียง 1–2% เท่านั้น ส่วนข้าวที่ไม่เก็บในที่อับอากาศ HRY จะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างข้าวที่เก็บในที่อับอากาศประมาณ 2–5% เนื่องจากการเก็บในที่อับอากาศช่วยลดความแตกต่างของความชื้น (Moisture gradient) ภายในเมล็ดข้าวทำให้ความเค้นในเมล็ดลดลงส่งผลให้การแตกร้าวและหักของเมล็ดข้าวเกิดขึ้นน้อยลง (Cnossen et al., 2002; Cnossen and Siebenmorgen, 2000) เมล็ดข้าวที่ผ่านการเก็บในที่อับอากาศจึงทนต่อการขัดสีได้มากขึ้นมีผลให้ข้าวแตกหักน้อยลงจึงทำให้ได้ HRY สูงกว่ากรณีที่ไม่เก็บในที่อับอากาศ

3.4 ความขาว (Whiteness)

Table 3 แสดงค่าความขาวของข้าวที่อบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่ความชื้นสุดท้าย 18–22% d.b. อุณหภูมิ 150 และ 170°C ความหนาเบต 5 และ 10 cm ซึ่งพบว่า การอบแห้งแบบ FBMW ข้าวมีความขาวลดลงเช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งให้สูงขึ้นจาก 150 °C ไปเป็น 170 °C นอกจากนี้ข้าวที่เก็บในที่อับอากาศมีค่าความขาวลดลงอย่างเด่นชัดเทียบกับที่ไม่เก็บในที่อับอากาศเนื่องจากการเก็บในที่อับอากาศเมล็ดข้าวสัมผัสกับความชื้นสูงเป็นเวลานาน (30 นาที) กว่าที่ไม่เก็บในที่อับอากาศ (เฉพาะเวลาที่ใช้อบแห้ง 2–4 นาที)

Table 3 Whiteness value of soaked paddy dried by FB and FBMW at drying air temperature of 150 and 170°C and bed depth of 5 and 10 cm (MC_f = 18–22% d.b.).

Drying conditions		Whiteness value	
		T	NT
Bed 10 cm	FB150°C	25.1±0.7 ^f	29.5±0.3 ^d
	FB150°C+MW4.0kW	21.9±0.5 ^d	25.7±0.5 ^c
	FB170°C	25.8±0.6 ^f	31.0±0.7 ^e
	FB170°C+MW4.0kW	23.3±0.5 ^e	26.7±0.8 ^c
Bed 5 cm	FB150°C	22.3±0.7 ^{de}	26.5±0.4 ^c
	FB150°C+MW4.0kW	17.8±0.7 ^c	23.5±0.6 ^b
	FB170°C	16.4±0.6 ^b	22.9±0.6 ^b
	FB170°C+MW4.0kW	12.5±0.6 ^a	17.8±0.5 ^a
Raw rice		45.2±0.6	
Soaked rice		37.0±0.6	

Values in the same column with different superscripts mean that the values are significantly different ($p < 0.05$), MC_f=final moisture content, T=tempered and NT=no tempered.

การที่ความขาวของข้าวที่อบแห้งแบบ FB และ FBMW ทั้งที่เก็บและไม่เก็บในที่อับอากาศมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับข้าวหลังแช่น้ำนั้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดหรือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Lamberts et al. 2008; Elbert et al. 2001)

ทั้งนี้ เฉพาะการอบแห้งแบบ FBMW ที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบต 10 cm ร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ และการอบแห้งแบบ FB ที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบต 5 cm โดยไม่เก็บในที่อับอากาศ ข้าวที่ได้เป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์ (DSG=100%) มีสีเหลือง รมน้ำตาลหรือเรียกว่าข้าวหนึ่งสีเข้มซึ่งมีค่าความขาวอยู่ระหว่าง 22–24 (Bootkote et al., 2016) และเป็นที่ต้องการของตลาดส่งออกข้าวหนึ่งคุณภาพสูง นอกจากนี้ การอบแห้งแบบ FBMW ที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบต 5 cm ข้าวที่ได้เป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์เช่นเดียวกัน แต่ข้าวมีสีน้ำตาลแดงทั้งที่เก็บและไม่เก็บในที่อับอากาศซึ่งเป็นสีที่ไม่เป็นที่ต้องการของตลาดส่งออกข้าวหนึ่งโดยถือเป็นข้าวหนึ่งที่ได้รับความร้อนมากเกินไป (Over heated)

3.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

Table 4 แสดงค่า SEC ที่ใช้สำหรับอบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่ความชื้นสุดท้าย 18–22% d.b. อุณหภูมิ 150 และ 170°C ความหนาเบต 5 และ 10 cm ซึ่งพบว่า SEC มีค่าอยู่ในช่วง 3.9–6.6 และ 7.6–17.1 MJ/kg_{water evap.} สำหรับการอบแห้งแบบ FB และ FBMW ตามลำดับ โดยการอบแห้งแบบ FBMW มี SEC มากกว่าการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวโดยเฉลี่ย 55% และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C มี SEC มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 170°C โดยเฉลี่ย 30% เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 170°C ใช้เวลาอบแห้งเพียง 2 นาที ซึ่งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 150°C ที่ใช้เวลาอบแห้งถึง 4 นาที จึงได้ความชื้นสุดท้าย 18–22% d.b.

Table 4 SEC of soaked paddy dried by FB and FBMW at drying air temperature of 150 and 170°C and bed depth of 5 and 10 cm ($MC_f = 18-22\%$ d.b.).

Drying conditions		SEC (MJ/kg water evap.)
Bed 10 cm	FB150°C	5.0
	FB150°C+MW4.0kW	10.1
	FB170°C	3.9
	FB170°C+MW4.0kW	7.6
Bed 5 cm	FB150°C	6.6
	FB150°C+MW4.0kW	17.1
	FB170°C	4.6
	FB170°C+MW4.0kW	10.8
Traditional method		6.4-7.5

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า SEC จากการอบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่สามารถผลิตข้าวหนึ่งได้สมบูรณ์ (FB170°C+MW4.0kW ความหนาเบต 10 cm และ FB170°C ความหนาเบต 5 cm) กับการผลิตข้าวหนึ่งด้วยวิธีดั้งเดิม (Traditional methode) ซึ่งหนึ่งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 103-120 °C ตามด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150-170°C ซึ่งมีค่า SEC ในช่วง 6.4-7.5 MJ/kg_{water evap.} (ประมาณ 36% เป็นพลังงานที่ใช้สำหรับหนึ่งข้าวก่อนการอบแห้ง) พบว่า การผลิตข้าวหนึ่งที่สมบูรณ์ด้วยการอบแห้งแบบ FBMW ที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบต 10 cm มีค่า SEC เท่ากับ 7.6 MJ/kg_{water evap.} (ประมาณ 42% เป็นพลังงานที่ป้อนให้กับแมกนิตรอนเพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ) ซึ่งใกล้เคียงกับการผลิตข้าวหนึ่งด้วยวิธีดั้งเดิม

ในขณะที่เดียวกันการผลิตข้าวหนึ่งที่สมบูรณ์ด้วยการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบต 5 cm มีค่า SEC เท่ากับ 4.6 MJ/kg_{water evap.} ซึ่งต่ำกว่าการผลิตข้าวหนึ่งด้วยวิธีดั้งเดิมประมาณ 32% เนื่องจากการผลิตข้าวหนึ่งที่สมบูรณ์ (DSG=100%) ด้วยการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวไม่มีพลังงานที่ป้อนให้กับแมกนิตรอนเพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

4. สรุป

การอบแห้งแบบ FB และ FBMW สามารถผลิตข้าวหนึ่งที่ไม่มี การหนึ่งข้าวเปลือกขึ้นด้วยไอน้ำร้อนจึงมีเพียงขั้นตอนการแช่น้ำและการอบแห้งเท่านั้น จึงลดความซับซ้อนและขนาดของโรงงานลงช่วยให้การผลิตข้าวหนึ่งทำได้ง่ายขึ้น โดยการอบแห้งแบบ FBMW ที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบต 10 cm ร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศสามารถผลิตข้าวหนึ่งได้สมบูรณ์และมีสีเข้ม นอกจากนี้ การผลิตข้าวหนึ่งที่สมบูรณ์ยังทำได้ด้วยการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวที่อุณหภูมิ 170°C แต่ต้องลดความหนาเบตลงเป็น 5 cm

การอบแห้งแบบ FB และ FBMW ที่เก็บในที่อับอากาศมีผลให้ข้าวหักเพียง 1-2% โดยการผลิตข้าวหนึ่งที่สมบูรณ์ด้วยการอบแห้งแบบ FB อย่างเดียวที่อุณหภูมิ 170°C ความหนาเบต 5 cm มีค่า SEC ต่ำกว่าการผลิตข้าวหนึ่งด้วยวิธีดั้งเดิม 32%

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้โครงการพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจจังหวัดชายแดนภาคใต้ รวมทั้งสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (Grant no. DPG5980004) ที่ได้สนับสนุนงบประมาณการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- อิทธิพิงค์ มหาธนเศรษฐ์. 2557. การวัดระดับการแข่งขันในตลาดส่งออกข้าวไทย. กรุงเทพมหานคร: สถาบันคลังสมองของชาติ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- Abud-Archila, M., Courtois, F., Bonazzi, C., Bimbenet, J.J. 2000. Processing quality of rough rice during drying - modelling of head rice yield versus moisture gradients and kernel temperature. *Journal of Food Engineering* 45, 161-169.
- Adhikaritanayake, T.B., Noomhorm, A. 1998. Effect of continuous steaming on parboiled rice quality. *Journal of Food Engineering* 36, 135-143.
- Alibas, I. 2006. Characteristics of chard leaves during microwave, convective, and combined microwave-convective drying. *Drying Technology: An International Journal* 24(11), 1425-1435.
- Alibas, I. 2007. Microwave, air and combined microwave air drying parameters of pumpkin slices. *LWT - Food Science and Technology* 40(8), 1445-1451.
- Alizadeh, M.R., Dabbaghi, A., Rahimi-Ajdadi, F. 2011. Effect of final paddy moisture content on breaking force and milling properties of rice varieties. *Elixir Agriculture* 36, 3186-3189.
- Askari, G.R., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, S.M. 2009. An investigation of the effects of drying methods and conditions on drying characteristics and quality attributes of agricultural products during hot air and hot air/microwave-assisted dehydration. *Drying Technology: An International Journal* 27(7-8), 831-841.
- Bhattacharya, K.R. 1985. Parboiling of rice in rice. In: Juliano, B.O. (Ed.), *Rice: Chemistry and Technology* (pp. 289-348). American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, USA.
- Bootkote, P., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. 2016. Process of producing parboiled rice with different colors by fluidized bed drying technique including tempering. *Food and Bioprocess Technology* 9(9), 1574-1586.



- Cnossen, A.G., Siebenmorgen, T.J. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on milling quality. *Transactions of the ASAE* 43(6), 1661-1667.
- Cnossen, A.G., Siebenmorgen, T.J., Yang, W. 2002. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on drying rate. *Transactions of the ASAE* 45(3), 759-766.
- Dev, S.R.S., Geetha, P., Orsat, V., Gariépy, Y., Raghavan, G.S.V. 2011. Effects of microwave-assisted hot air drying and conventional hot air drying on the drying kinetics, color, rehydration, and volatiles of moringa oleifera. *Drying Technology: An International Journal* 29(12), 1452-1458.
- Elbert, G., Tolaba, M.P., Suarez, C. 2001. Effects of drying conditions on head rice yield and browning index of parboiled rice. *Journal of Food Engineering* 47, 37-41.
- Golmohammadi, M., Assar, M., Rajabi-Hamane, M. 2012. Experimental and theoretical investigation of moisture dynamics in intermittent drying of rough rice. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering* 46(2), 87-96.
- Itoh, K., Kawamura, S., Ikeuchi, Y. 1985. Processing and milling of parboiled rice. *J. Fac. Agr. Hokkaido Univ.* 62(3), 312-324.
- Janas, S., Boutry, S., Malumba, P., Elstb, L.V., Bera, F. 2010. Modelling dehydration and quality degradation of maize during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering* 100(3), 527-534.
- Kaleta, A., Gornicki, K., Winiczenko, R., Chojnacka, A. 2013. Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer. *Energy Conversion and Management* 67, 179-185.
- Khanali, M., Rafiee, S., Jafari, A., Banisharif, A. 2012. Study of residence time distribution of rough rice in a plug flow fluid bed dryer. *International Journal of Advanced Science and Technology* 48, 103-14.
- Lamberts, L., Rombouts, I., Brijis, K., Gebruers, K., Delcour, J.A. 2008. Impact of parboiling conditions on Maillard precursors and indicators in long-grain rice cultivars. *Food Chemistry* 110, 916-922.
- Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44(2), 71-78.
- Poomsa-ad, N., Wiset, L. 2012. Pre-germinated parboiled brown rice drying using fluidization technique. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 6, 10-26.
- Rattanamechaikul, C., Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S. 2011. Effect of humidified hot air fluidized bed technique on healthy partially parboiled brown rice quality. *Agricultural Sci. J.* 42(3) (Suppl.), 561-564.
- Rattanamechaikul, C., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P. 2013. Optimal operating conditions to produce nutritious partially parboiled brown rice in a humidified hot air fluidized bed dryer. *Drying Technology: An International Journal* 31(4), 368-377.
- Rordprapat, W., Nathakaranakule, A., Tia, W., Soponronnarit, S. 2005. Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam. *Journal of Food Engineering* 71(1), 28-36.
- Sangdao, C., Krairiksh, M. 2008. Analysis of a continuous fluidised bed microwave rice kernel drying system. *Mj. Int. J. Sci. Tech.* 1(Special Issue), 61-71.
- Sangdao, C., Songsermpong, S., Krairiksh, M. 2011. A continuous fluidized bed microwave paddy drying system using applicators with perpendicular slots on a concentric cylindrical cavity. *Drying Technology: An International Journal* 29(1) 35-46.



- Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S., Wutiw-watchai, W. 2001. Fluidised bed drying of soybeans. *Journal of Stored Products Research* 37(2), 133-151.
- Taweerattanapanish, A., Soponronnarit, S., Wetchakama, S., Kongseri, N., Wongpiyachon, S. 1999. Effects of drying on head rice yield using fluidization technique. *Drying Technology: An International Journal* 17(1-2), 346-353.
- Zare, D., Ranjbaran, M. 2012. Simulation and validation of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Drying Technology: An International Journal* 30(3), 236-247.

