



ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและคุณภาพของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

Energy Efficiency and Paddy Quality during Drying of Paddy with Impinging Stream Dryer

ฉัตรชัย นิมมอล¹* และอนุชา หิรัญวัฒน์¹

Chatchai Nimmol¹* and Anucha Hirunwat¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

*Correspondent author: ccnimmol@gmail.com

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งแบบกระแสนเป็นเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดความชื้นที่ผิวของวัสดุอนุภาค ซึ่งรวมถึงข้าวเปลือกด้วย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนยังสามารถปรับปรุงให้มีค่าสูงขึ้นได้อีก หนึ่งในวิธีที่เป็นไปได้ในการลดพลังงานที่ป้อนให้แก่เครื่องอบแห้งแบบกระแสนคือการนำอากาศร้อนที่ออกจากระบบอบแห้งกลับมาใช้ในกระบวนการอบแห้งอีกครั้ง ในงานวิจัยนี้ เครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่มีระบบหมุนเวียนอากาศร้อนได้ถูกพัฒนาขึ้น สมรรถนะของระบบการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบการอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ ได้ถูกศึกษา ในขณะที่คุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งได้ถูกประเมินด้วย จากการศึกษา พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งลดลง 3.30 ถึง 6.00% (d.b.) จากค่าความชื้นเริ่มต้นโดยใช้เวลาอบแห้งสั้นมาก (น้อยกว่า 2.1 s) อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่า 144 kg_{water}/m³ h ในขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่า 6871 W/m³ K ส่วนความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งต่ำสุดมีค่า 4.2 MJ/kg_{water} ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 100 °C อัตราการป้อนข้าวเปลือก 120 kg_{dry solid}/h และอัตราส่วนอากาศหมุนเวียน 40% ด้วยการนำอากาศร้อนที่ออกจากกระบวนการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ ความสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการอบแห้งสามารถลดลงได้ 20% ในแง่ของคุณภาพข้าวที่ได้จากการอบแห้ง พบว่า ร้อยละต้นข้าวที่ได้ลดลงเฉพาะเมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิอากาศ อัตราการป้อนข้าวเปลือก และอัตราส่วนอากาศหมุนเวียนไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความขาวของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ

Abstract

Impinging stream dryer (ISD) is the energy efficient dryer for removing surface moisture of particulate materials including freshly-harvested paddy. However, energy efficiency of ISD can still be improved. One of the possible methods that can be used to reduce the net energy supply to the ISD is the reuse of exhaust air leaving a drying system. In this study, an impinging stream dryer with exhaust air recycle system was therefore developed. The overall performance and specific energy consumption of the drying system at various conditions was investigated. The quality of dried paddy was also evaluated. It was found that the moisture content of paddy was reduced from its original value by 3.30 to 6.00% (d.b.) within a very short period of time (less than 2.1 s). The maximum value of the volumetric water evaporation rate was found to be about $144 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$, while the maximum value of the volumetric heat transfer coefficient was about $6871 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$. The lowest total specific energy consumption of the process was $4.2 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ when using inlet air temperature of 100°C , particle flow rate of $120 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ and air recycle ratio of 40%. With the use of exhaust air recycle, the energy consumption of the drying process could be reduced by 20%. The head rice yield significantly decreased only with an increase in the inlet air temperature. The effects of inlet air temperature, paddy feed flow rate and air recycle ratio on whiteness of the product was not significant, however.

คำสำคัญ: การอบแห้ง ข้าวเปลือก ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ อัตราส่วนอากาศหมุนเวียน

Keywords: drying, paddy, specific energy consumption, impinging stream dryer, air recycle ratio

1. บทนำ

สำหรับประเทศไทยได้มีการประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ในการลดความชื้นข้าวเปลือก (paddy) เช่น เครื่องอบแห้งแบบสปาด์เบด (spouted bed dryer) [1,2] และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed dryer) [3-5] นอกจากนี้ การอบแห้งข้าวเปลือกยังสามารถกระทำโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic dryer) ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบนี้มีความเหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกในขั้นตอนซึ่งข้าวเปลือกยังคงมีความชื้นสูงอยู่ [6,7] นอกจากนี้เครื่องอบแห้งข้างต้นแล้ว ยังมีเครื่องอบแห้งอีกแบบหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการลดความชื้นของวัสดุอนุภาค (particulate material) ซึ่งข้าวเปลือกจัดเป็นวัสดุในกลุ่มนี้ด้วย โดยเครื่องอบแห้งที่กล่าวถึงนี้ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ (impinging stream dryer: ISD) [8-10]

หลักการของการอบแห้งแบบกระแสน้ำคือการให้กระแสน้ำไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งสองกระแส (หรือมากกว่า) มาชนกัน [11] โดยให้กระแสน้ำแต่ละกระแสหนึ่ง (หรือมากกว่า) พาวด์เข้าสู่ระบบ ผลของการชนกันของกระแสน้ำไหลของตัวกลางที่ใช้การอบแห้งจะทำให้เกิดบริเวณการชน (impingement zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และโมเมนตัมสูงมาก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีแรงเฉือนและความปั่นป่วนของกระแสน้ำไหลสูงมาก นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในระบบยังมีลักษณะพิเศษ กล่าวคือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะสวนทางกลับไปกลับมา (oscillatory motion) ภายในบริเวณการชน ส่งผลให้อนุภาคอยู่ในระบบเป็นระยะเวลานานยิ่งขึ้น เวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารระหว่างอนุภาคกับตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งจึงมากขึ้นด้วย ดังนั้นระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำจึงมีประสิทธิภาพทาง

ความร้อนสูงกว่าระบบอบแห้งชนิดอื่นมาก

ในประเทศไทย Sathapornprasath et al. [9] ถือเป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่ใช้อากาศร้อน (hot air) เป็นตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งขึ้นมา แต่เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีข้อจำกัดหลายประการจนไม่สามารถนำมาใช้กับวัสดุทางการเกษตรได้ ต่อมา Choicharoen et al. [10] ได้ปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบกระแสนของ Sathapornprasath et al. [9] ให้สามารถใช้กับวัสดุทางการเกษตรที่มีความชื้นสูงได้ โดยได้นำมาใช้ในการอบแห้งกากถั่วเหลือง (ผลพลอยได้จากการผลิตน้ำมันถั่วเหลือง) และได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในแง่ของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (volumetric water evaporation rate) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heat transfer coefficient) ซึ่งพบว่า อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดที่ $520 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ และ $4500 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เครื่องอบแห้งดังกล่าวยังมีปัญหาในการควบคุมปริมาณอากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง เมื่อไม่นานมานี้ Nimmol and Devahastin [12] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนเพื่อลดความชื้นข้าวเปลือก โดยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถลดข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนข้างต้นได้ทั้งหมด อีกทั้งยังลดความชื้นของข้าวเปลือกลงได้ 3.4 ถึง 7.7 % (d.b.) ภายในเวลาอันสั้น ในขณะที่อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดที่ $198 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ และ $7013 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$ ตามลำดับ ต่อมา Nimmol et al. [13] ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic dryer) โดยผลการศึกษาพบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งลดลง 6.6 ถึง 9.7% (d.b.) ภายในเวลาอันสั้น นอกจากนี้ เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบจะเพิ่มขึ้น 33 ถึง 41% ส่งผลให้อัตราการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้น 55 ถึง 166% เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเพียงลำพัง

นอกเหนือจากการใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งแล้ว เมื่อไม่นานมานี้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (super-heated steam) ได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งแบบกระแสน โดย Choicharoen et al. [14] ได้พัฒนาระบบการอบแห้งแบบกระแสนที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้งโดยมีระบบการนำไอน้ำที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ จากการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าวเทียบกับการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าระบบที่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้งประมาณ 9 ถึง 46% ที่อัตราส่วนการนำไอน้ำกลับมาใช้ใหม่ (steam recycle ratio) 46 ถึง 63% ในขณะที่ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดที่ $807 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ และ $7950 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$ ตามลำดับ ต่อมา Swasdisevi et al. [15] ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนโดยมีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้งทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง รวมถึงส่งผลให้ระดับการเกิดเจลาคีโนเซนของสตาร์ชข้าวสูงกว่ากรณีใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน

หากพิจารณาการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งจากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้น จะพบว่า อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ออกจากเครื่องแบบกระแสนยังคงมีค่าสูงซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ในระบบการอบแห้งได้อีกด้วยเหตุดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่มีระบบหมุนเวียนอากาศร้อนสำหรับลดความชื้นข้าวเปลือก นอกจากนี้ ยังศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น รวมถึงที่มีต่อคุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งอันได้แก่ ร้อยละต้นข้าว (head rice yield) และความขาว (whiteness)

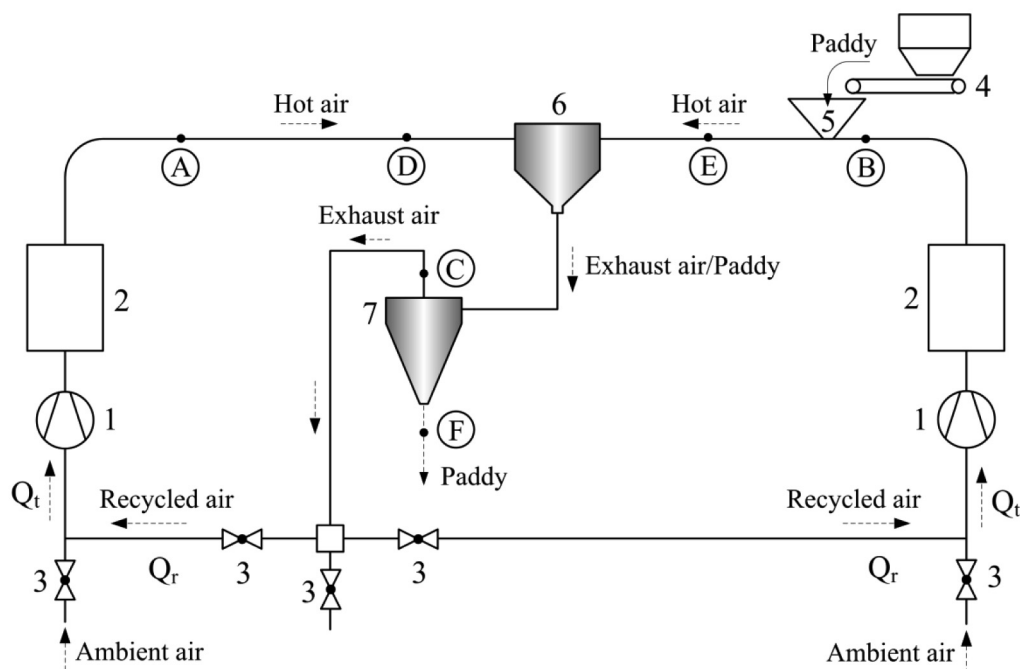
2. วิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย พัดลมแรงดันสูง (high-pressure blower) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (electric heater) โกลบวาล์ว (globe valve) สายพานป้อนวัสดุ (belt feeder) ห้องอบแห้ง (drying chamber) และไซโคลน (cyclone) อุปกรณ์ดังกล่าวเชื่อมต่อกันด้วยระบบท่อ ทั้งห้องอบแห้ง (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.254 m) ไซโคลน และระบบท่อ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.050 m) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งทั้งหมดได้รับการหุ้มฉนวนใยแก้วเพื่อลดการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม อากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้งจะเข้าสู่ห้องอบแห้งแต่ละด้านด้วยพัดลมแรงดันสูง (Crelec, model HB-629, Shanghai, China) อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งเกิดจาก

การทำงานของชุดทำความร้อนแบบใช้ไฟฟ้าขนาด 20 kW จำนวน 2 ชุด ซึ่งควบคุมด้วยชุดควบคุมแบบ PID (DHC, model DHC1T-D, Wenzhou, China) ที่มีความแม่นยำ $\pm 1^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb temperature: T_d) และอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature: T_w) ของอากาศที่เข้าและออกจากระบบอบแห้ง (จุด A และ C ตามลำดับ) ถูกวัดและบันทึกอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบพกพา (Vaisala, model HM70, Helsinki, Finland) ความเร็วของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง (จุด D และ E) ปรับได้ด้วยโกลบวาล์ว อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เข้าสู่ระบบถูกควบคุมด้วยความเร็วของสายพานป้อนวัสดุ ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจะแยกออกจากอากาศชื้น (moist air) ด้วยไซโคลน ในขณะที่ปริมาณอากาศที่จะนำกลับไปใช้ประโยชน์ (ที่ออกจากไซโคลน) หรืออากาศหมุนเวียน (recycled air) ถูกควบคุมด้วยโกลบวาล์ว



- 1) พัดลมแรงดันสูง 2) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า 3) โกลบวาล์ว 4) สายพานป้อนวัสดุ 5) ฮอปเปอร์
6) ห้องอบแห้ง 7) ไซโคลน

รูปที่ 1. แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนที่มีระบบหมุนเวียนอากาศร้อน

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ข้าวเปลือก (พันธุ์พิษณุโลก-2) ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30% (d.b.) ถูกใช้เป็นวัสดุทดสอบ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเตรียมได้โดยการเติมน้ำตามจำนวนที่กำหนดผสมกับข้าวเปลือก จากนั้นนำข้าวเปลือกไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 วัน ก่อนเริ่มการทดลอง ข้าวเปลือกจะถูกนำออกจากตู้เย็นเพื่อผึ่งในบรรยากาศเป็นระยะเวลา 30 min เพื่อปรับอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง

2.3 วิธีทดลอง

พัฒนาระบบแรงดันสูงและชุดทำความร้อนจะทำงานก่อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนด ข้าวเปลือกในอัตราการป้อนที่กำหนดจะถูกป้อนเข้าระบบ การเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกจะเริ่มเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจะถูกเก็บที่ช่องทางออกของไซโคลน (จุด F ของรูปที่ 1) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกจำนวน 3 ครั้ง ตัวอย่างข้าวเปลือกจะนำไปวิเคราะห์คุณภาพและหาความชื้นด้วยการนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h

การทดลองจะกระทำที่อุณหภูมิของอากาศขาเข้า (drying temperature: T) ซึ่งวัดที่จุด A และ B เท่ากับ 100 120 และ 140 °C อัตราการป้อนข้าวเปลือก (paddy feed flow rate: W_p) เท่ากับ 80 100 และ 120 kg_{dry solid}/h (หรือ 104 130 และ 156 kg/h ตามลำดับ) และอัตราส่วนอากาศหมุนเวียน (air recycle ratio: R_r) เท่ากับ 0 10 และ 20% ในการทดลองได้กำหนดให้ใช้ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้งคงที่เท่ากับ 20 m/s ตลอดการทดลอง อัตราส่วนอากาศหมุนเวียน (R_r) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Q_r) และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง (Q_t) สามารถคำนวณได้จาก

$$R_r = (Q_r/Q_t) \times 100\%$$

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรม SPSS (Version 16) ผลที่ได้ในแต่ละการทดลองจะแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยซึ่งจะเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ค่าเฉลี่ยจะพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ p = 0.05

2.4 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวนพิจารณาได้จากอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยสามารถคำนวณได้จาก [8]

$$N_v = W_p (X_i - X_o) / V_r \quad (2)$$

$$h_v = W_p \lambda (X_i - X_o) / V_r \Delta T_{lm} \quad (3)$$

โดยที่ N_v คือ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (kg_{water}/m³h) h_v คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (W/m³K) X คือ ความชื้นของวัสดุ (kg/kg d.b.) W_p คือ อัตราการป้อนวัสดุ (kg_{dry solid}/h) V_r คือ ปริมาตรของห้องอบแห้ง (m³) ซึ่งเป็นผลรวมของปริมาตรห้องอบแห้ง ท่อทางเข้าทั้งสองข้าง และไซโคลน (0.0360 m³) λ คือ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (kJ/kg) และ ΔT_{lm} คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (logarithmic mean temperature difference) สำหรับอากาศที่เข้าและออกจากห้องอบแห้ง (°C) ซึ่งหาได้จาก

$$\Delta T_{lm} = [(T_d - T_{w_o}) - (T_d - T_{w_i})] / \ln[(T_d - T_{w_o}) / (T_d - T_{w_i})] \quad (4)$$

เมื่อตัวห้อย o และ i แสดงถึงทางออกและทางเข้าของห้องอบแห้ง ตามลำดับ

2.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งซึ่งประกอบไปด้วยพลังงานที่ป้อนให้แก่พัฒนาระบบแรงดันสูงและที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อนสามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดความสิ้นเปลืองพลังงาน โดยความสิ้น

เปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption: SEC) ถูกใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งซึ่งคำนวณได้จาก [16]

$$SEC = E / m_w \quad (6)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (MJ/kg_{water}) E คือ พลังงานที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูงหรือชุดทำความร้อน (MJ) และ m_w คือ ปริมาณน้ำที่นำออกจากวัสดุที่นำมาอบแห้ง (kg) ซึ่งขึ้นกับความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่นำมาอบแห้ง ($X_i - X_o$) โดยประเมินได้จาก [12]

$$m_w = W_p (X_i - X_o) t \quad (7)$$

เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2.6 การประเมินเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

เพื่อยืนยันผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำวน เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (mean residence time: τ) ได้ถูกประเมินโดยใช้สมการต่อไปนี้ [16]

$$\tau = m_p / W_p \quad (8)$$

โดยที่ τ คือ เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (s) m_p คือ ปริมาณของข้าวเปลือกที่ค้างในระบบ (kg) และ W_p คือ อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/s) โดยค่า m_p สามารถหาได้โดยให้ระบบการอบแห้งและระบบป้อนวัสดุทำงาน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ให้หยุดการทำงานของระบบ (ทั้งพัดลมแรงดันสูงและสายพานป้อนวัสดุ) แบบฉับพลัน จากนั้นให้พัดลมแรงดันสูงทำงานอีกครั้งเพื่อให้ข้าวเปลือกที่ค้างในระบบออกจนหมดที่จุด F หลังจากนั้นให้นำข้าวเปลือกที่ได้ออกจากระบบมาชั่งน้ำหนักซึ่งค่าที่ได้ก็คือปริมาณของข้าวเปลือกที่ค้างในระบบ หรือ m_p

2.7 คุณภาพของข้าวเปลือก

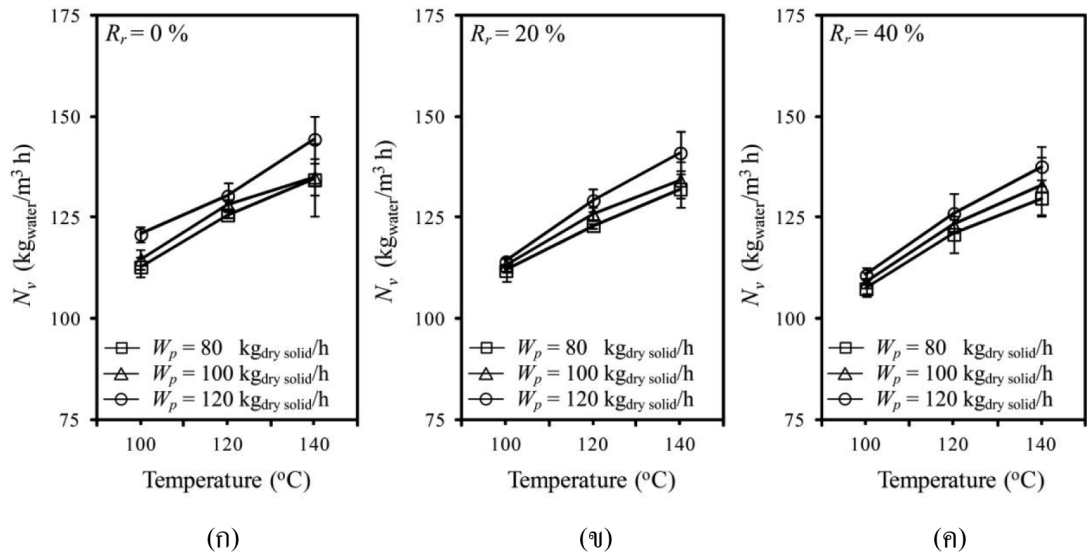
คุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแสดงในเทอมของร้อยละต้นข้าวและความขาว ร้อยละต้นข้าวที่ผ่านการอบแห้งจะนำไปเปรียบเทียบกับกรณีของข้าวอ้างอิง (ข้าวเปลือกที่แห้งด้วยอากาศแวดล้อม) ในเทอมของร้อยละต้นข้าวสัมพัทธ์ (relative head rice yield) ในกรณีของความขาวจะแสดงค่าความขาวที่ได้ในเทอมของความขาวสัมพัทธ์ (relative whiteness) เช่นกัน ปริมาณต้นข้าวหาได้โดยนำข้าวเปลือก 125 g มากะเทาะเปลือก จากนั้นนำมาขัดขาวจนกระทั่งได้เป็นข้าวสาร สุดท้ายจึงคัดแยกต้นข้าวออกจากข้าวหัก [17] สำหรับค่าความขาวของข้าวสารที่ได้จากการสีสามารถทำได้ด้วยเครื่องวัดความขาว (digital whiteness meter) (Kett, model C300, Japan)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

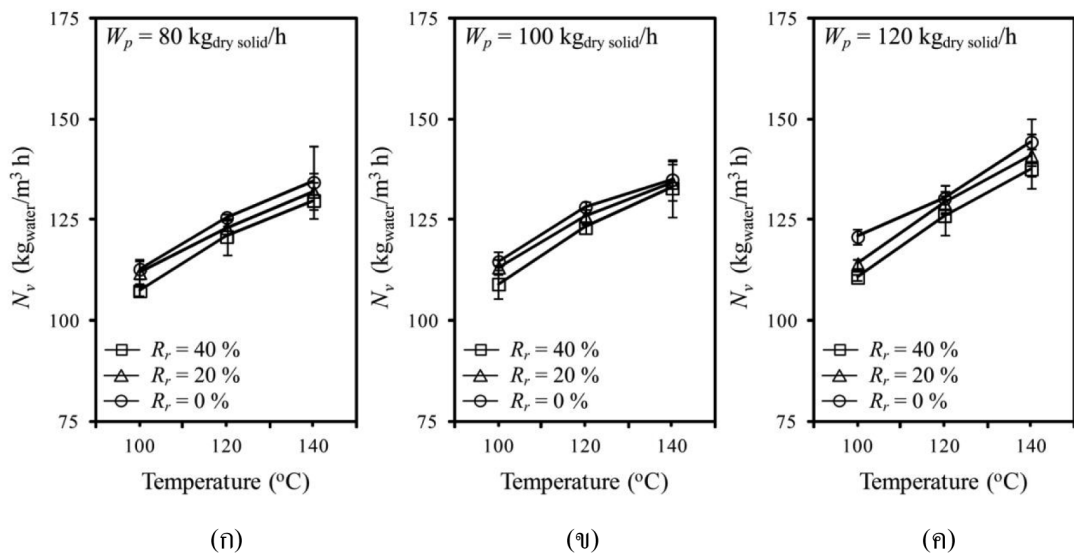
3.1 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้ง

รูปที่ 2 และรูปที่ 3 รวมถึงตารางที่ 1 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้า (อุณหภูมิอบแห้ง) อัตราการป้อนข้าวเปลือก และอัตราส่วนอากาศหมุนเวียน ที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของอากาศขาเข้า (หรืออุณหภูมิอบแห้ง) พบว่า อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศ (ตัวกลางในการอบแห้ง) และอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือก (ในที่นี้คืออุณหภูมิกระเปาะเปียก) เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้าสูง (อุณหภูมิอบแห้งมีค่ามาก) แรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล (ความชื้น) จะมีค่ามากและเมื่อพิจารณาค่าของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 จะพบว่า อุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 2. อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร



รูปที่ 3. อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอัตราส่วนอากาศหมุนเวียนที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

เมื่อพิจารณาอัตราการป้อนข้าวเปลือกดังรูปที่ 2 พบว่า การเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือกทำให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งที่โดยทั่วไปแล้ว การเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือกเข้าสู่ระบบการอบแห้ง (อัตราส่วนระหว่างมวลของข้าวเปลือกและอากาศร้อนมีค่ามาก) จะทำให้ศักยภาพของอากาศร้อนในการระเหยน้ำ (หรือความชื้น) ที่อยู่ภายในข้าวเปลือกลดลงก็ตามที่เห็นเช่นนี้เนื่องจากเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นยังมีขีดความสามารถมากพอที่จะรองรับภาระในการระเหยน้ำ (หรือความชื้น) ที่เข้ามาในระบบภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งดังกล่าวได้อีก สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อนข้าวเปลือกสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกเนื่องจากการทำงานของเครื่องอบแห้งยังไม่อยู่ภายใต้สถานะอื่น (chocking point) [18] อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ทางสถิติตามตารางที่ 1 กลับแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือกไม่ส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนอากาศหมุนเวียน (R_r) ดังรูปที่ 3 พบว่า การใช้อัตราส่วนอากาศหมุนเวียนมาก (นำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณมาก) มีแนวโน้มทำให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรลดลง เนื่องจากอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่เป็นอากาศที่มีความชื้น (จากการระเหยของน้ำในข้าวเปลือก) ส่งผลให้ศักยภาพในการถ่ายเทความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกลดลง ความชื้นจึงระเหยออกจากข้าวเปลือกได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนอากาศหมุนเวียนไม่ส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ (ดูตารางที่ 1)

จากตารางที่ 1 พบว่า อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 107 ถึง 144 $\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดเกิดขึ้นที่ $T = 140^\circ\text{C}$ $W_p = 120 \text{ kg}_{\text{dry, solid}}/\text{h}$ และ $R_r = 0\%$ (ไม่นำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่) เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรในกรณีอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด [19] และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชซ์เบด [20] พบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากัน อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่า

ตารางที่ 1 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (N_v) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (h_v) และเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (τ) ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ

T (°C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	R_r (%)	$X_i - X_o$ (% d.b.)	N_v (kg _{water} /m ³ h)	h_v (W/m ³ K)	τ (s)
100	80	0	3.60 ± 0.06^{bc}	113 ± 3^a	5936 ± 147^l	1.4 ± 0.2^a
		20	3.40 ± 0.03^{ab}	112 ± 3^a	5587 ± 130^k	1.4 ± 0.1^a
		40	3.30 ± 0.02^a	107 ± 1^a	5026 ± 54^i	1.4 ± 0.3^a
	100	0	4.10 ± 0.09^{ef}	115 ± 3^{ab}	6551 ± 102^n	1.8 ± 0.2^{abc}
		20	4.05 ± 0.07^{ef}	113 ± 2^a	6183 ± 132^m	1.8 ± 0.4^{abc}
		40	3.90 ± 0.13^{de}	109 ± 4^a	5195 ± 183^{ij}	1.9 ± 0.1^{bc}
	120	0	5.04 ± 0.11^k	121 ± 2^{bc}	6871 ± 78^o	2.1 ± 0.2^c
		20	5.00 ± 0.13^k	114 ± 1^{ab}	6288 ± 57^m	2.1 ± 0.2^c
		40	4.80 ± 0.05^{jk}	111 ± 1^a	5306 ± 62^j	2.2 ± 0.3^c
120	80	0	3.88 ± 0.10^{de}	126 ± 1^{cde}	4616 ± 53^h	1.4 ± 0.3^a
		20	3.85 ± 0.09^{de}	123 ± 1^{cd}	4192 ± 44^{de}	1.4 ± 0.3^a
		40	3.76 ± 0.15^{cd}	121 ± 5^{bc}	4140 ± 150^{de}	1.5 ± 0.2^{ab}
	100	0	4.58 ± 0.04^{ij}	128 ± 1^{def}	5751 ± 96^{kl}	1.8 ± 0.1^{abc}
		20	4.50 ± 0.06^{hi}	126 ± 2^{cde}	4543 ± 62^{gh}	1.8 ± 0.2^{abc}
		40	4.40 ± 0.06^{ghi}	123 ± 2^{cd}	4272 ± 63^{def}	1.9 ± 0.3^{bc}
	120	0	5.61 ± 0.03^{lm}	130 ± 3^{defg}	5888 ± 89^l	2.1 ± 0.2^c
		20	5.50 ± 0.03^l	129 ± 3^{def}	4557 ± 110^{gh}	2.1 ± 0.4^c
		40	5.40 ± 0.20^l	126 ± 5^{cde}	4464 ± 159^{fgh}	2.1 ± 0.1^c
140	80	0	4.30 ± 0.17^{fgh}	134 ± 9^{fgh}	3637 ± 192^{bc}	1.4 ± 0.1^a
		20	4.20 ± 0.16^{fg}	132 ± 5^{efg}	3369 ± 103^a	1.4 ± 0.2^a
		40	4.10 ± 0.14^{ef}	130 ± 4^{def}	3358 ± 91^a	1.4 ± 0.2^a
	100	0	4.83 ± 0.16^{jk}	135 ± 5^{fgh}	4358 ± 155^{efg}	1.8 ± 0.3^{abc}
		20	4.80 ± 0.16^{jk}	134 ± 4^{fgh}	4092 ± 114^d	1.8 ± 0.2^{abc}
		40	4.75 ± 0.25^{jk}	133 ± 7^{efg}	3513 ± 188^{ab}	1.9 ± 0.2^{bc}
	120	0	6.00 ± 0.40^n	144 ± 6^i	4624 ± 177^h	2.1 ± 0.3^c
		20	5.90 ± 0.20^n	141 ± 5^{hi}	4284 ± 154^{def}	2.1 ± 0.1^c
		40	5.80 ± 0.20^{mn}	138 ± 5^{gh}	3837 ± 147^c	2.1 ± 0.2^c

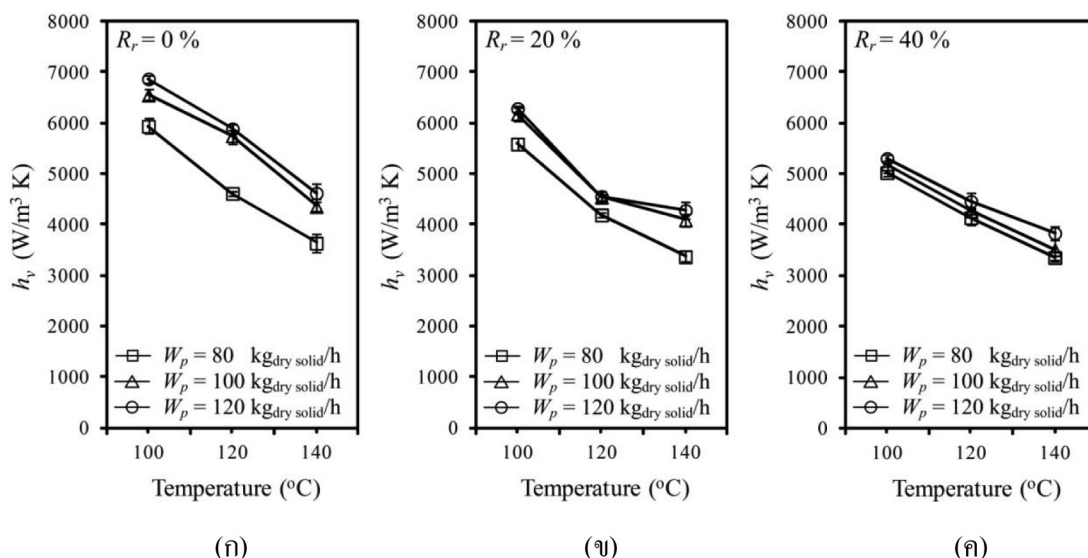
ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันหมายความว่าค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 1 ยังแสดงให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึงประมาณ 3.30 ถึง 6.00% (d.b.) ในเวลาอันสั้น ซึ่งใกล้เคียงกับการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำของ Nimmol and Devahastin [12] เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบค [2] และฟลูอิดไคซ์เบค [17] ซึ่งความชื้นของข้าวเปลือกสามารถลดลงได้ 3 ถึง 8% (d.b.) และ 3 ถึง 11% (d.b.) ตามลำดับ พบว่า การลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าแตกต่างกันมาก กล่าวคือ เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบคและฟลูอิดไคซ์เบคข้างต้นใช้เวลาอบแห้ง 720 ถึง 900 s และ 120 ถึง 150 s ตามลำดับ ดังนั้น อัตราการอบแห้ง (drying rate) ที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในงานวิจัยนี้ (ประเมินจากการปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง) จึงมีค่าสูงกว่ามาก

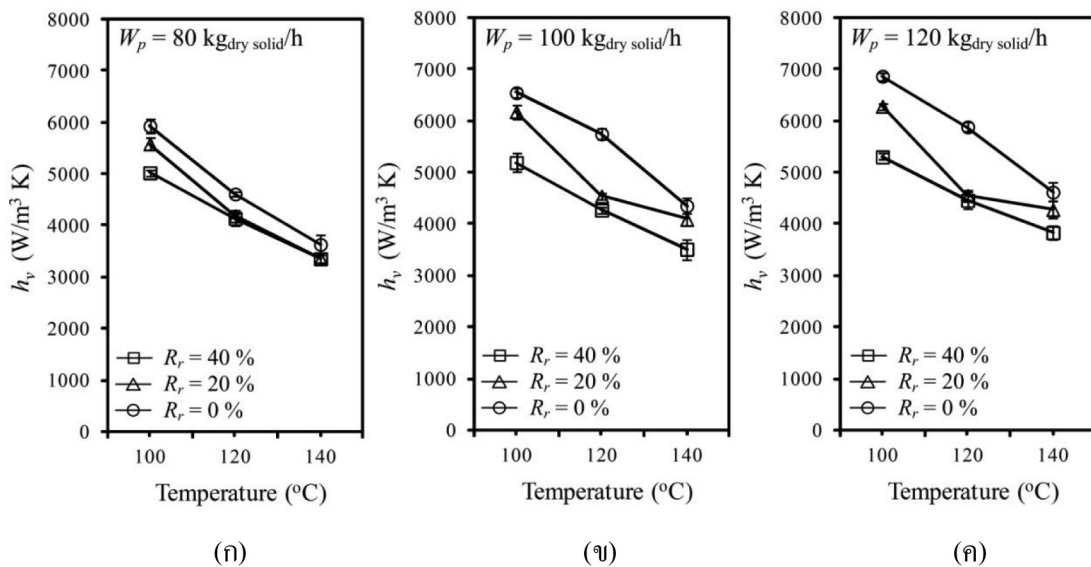
3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้ง

รูปที่ 4 และรูปที่ 5 รวมถึงตารางที่ 1 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้า อัตราการป้อนข้าวเปลือก และอัตราส่วนอากาศหมุนเวียน ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของอากาศขาเข้าดังรูปที่ 4 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขาเข้าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร กล่าวคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขาเข้าส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ΔT_{lm} จึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อรวมปรากฏการณ์ที่กล่าวข้างต้นกับอัตราการระเหยน้ำที่เพิ่มขึ้น (ดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจึงมีค่าลดลง (ตามสมการที่ 4) ในกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือก พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนข้าวเปลือกด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร



รูปที่ 4. อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร



รูปที่ 5. อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอัตราส่วนอากาศหมุนเวียนที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนอากาศหมุนเวียน (R_r) ดังรูปที่ 5 พบว่า การใช้อัตราส่วนอากาศหมุนเวียนมาก (นำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณมาก) ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ดูจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 1) เนื่องจากอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่เป็นอากาศที่มีความชื้น (จากการระเหยของน้ำในข้าวเปลือก) สกปรกในการถ่ายเทความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกจึงลดลง เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 3358 ถึง 6871 W/m² K โดยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเกิดขึ้นเมื่ออบแห้งที่ $T = 100$ °C $W_p = 120$ kg dry solid/h และ $R_r = 0\%$

3.3 เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

ตารางที่ 1 ยังได้แสดงเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบการอบแห้งที่เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ จะเห็นว่าเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมีค่าอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 2.1 s ในงานวิจัยนี้ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและปริมาณอากาศ

ร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่หรือ R_r ไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม อัตราการป้อนข้าวเปลือกกลับเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบการอบแห้ง กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนข้าวเปลือกจะทำให้เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น (ข้าวเปลือกอยู่ในระบบนานขึ้น) ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณข้าวเปลือกที่ค้างในระบบ (m_p) มีค่าเพิ่มขึ้น (ปริมาณข้าวเปลือกที่ค้างในระบบแปรผันโดยตรงกับอัตราการป้อนข้าวเปลือก) ซึ่งนั่นก็เป็นหนึ่งในเหตุผลที่ทำให้อัตราการระเหยนํ้าเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือก

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2 ในกรณีของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูง (SEC_{blower}) พบว่า SEC_{blower} ลดลงเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้อุณหภูมิของอากาศขาสูงจะทำให้ปริมาณน้ำที่ระเหย

ออกจากข้าวเปลือกมีมาก ด้วยเหตุที่พัดลมแรงดันสูง เป่ลือก (ซึ่งปริมาณน้ำที่ระเหยมีค่าเพิ่มขึ้น) อย่างไรก็ตาม
 ต้องการพลังงานในอัตราใกล้เคียงกันในแต่ละเงื่อนไข ค่าSEC_{blower} ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ กลับไม่
 (ความเร็วของอากาศที่) ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจาก แตกต่างกันมากนัก เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วน
 ข้าวเปลือกที่มากกว่าจึงส่งผลให้ SEC_{blower} มีค่าน้อยกว่า อากาศหมุนเวียน (R_r) จะพบว่า R_r ไม่ส่งผลต่อ SEC_{blower}
 ในกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือก พบว่า SEC_{blower} อย่างชัดเจน
 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนข้าว

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEE) ของกระบวนการอบแห้ง

T (°C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	R_r (%)	SEC _{blower} (MJ/kg _{water})	SEC _{heater} (MJ/kg _{water})	SEC _{total} (MJ/kg _{water})	Energy saving* (%)
100	80	0	2.8	3.3	6.1	-
		20	2.8	2.5	5.3	13
		40	2.9	2.0	4.9	20
	100	0	2.7	2.6	5.3	-
		20	2.7	2.0	4.7	11
		40	2.8	1.7	4.5	15
	120	0	2.7	2.4	5.1	-
		20	2.7	1.6	4.3	16
		40	2.8	1.4	4.2	18
120	80	0	2.6	4.4	7.0	-
		20	2.6	3.3	5.9	16
		40	2.7	3.2	5.9	16
	100	0	2.5	4.3	6.8	-
		20	2.6	3.3	5.9	13
		40	2.6	3.1	5.7	16
	120	0	2.5	3.8	6.3	-
		20	2.5	3.0	5.5	13
		40	2.5	2.8	5.3	16
140	80	0	2.3	5.0	7.3	-
		20	2.3	4.1	6.4	12
		40	2.4	3.5	5.9	19
	100	0	2.3	4.8	7.1	-
		20	2.3	4	6.3	11
		40	2.3	3.7	6.0	15
	120	0	2.2	4.4	6.6	-
		20	2.3	3.5	5.8	12
		40	2.4	3.3	5.7	14

*เทียบกับกรณีไม่มีการนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ ($R_r = 0$)

ในกรณีของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อน (SEC_{heater}) พบว่า SEC_{heater} ลดลงเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่ระเหยออกมากกว่า อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่มีต่อ SEC_{heater} กลับให้ผลในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ SEC_{heater} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้ามีค่าสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้าต้องทำงานนานกว่า (ใช้พลังงานมากกว่า) เมื่อเทียบกับกรณีใช้อุณหภูมิของอากาศขาเข้าต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนอากาศหมุนเวียน (R) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ SEC_{heater} มีค่าลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้ามีการทำงานลดลงอันเนื่องจากอากาศที่เข้าสู่ชุดทำความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศน้อยลง) เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการนำอากาศร้อนกลับมาใช้ ($R_r = 0\%$) หรือกรณีที่นำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณที่น้อยกว่า

เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้ง (SEC_{total}) ซึ่งเป็นผลรวมของ SEC_{blower} และ SEC_{heater} พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 4.2 ถึง 7.3 MJ/kg_{water} โดยค่าต่ำสุดของ SEC_{total} เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งที่ $T = 100^\circ\text{C}$ $W_p = 120 \text{ kg}_{dry\ solid}/h$ และ $R_r = 40\%$ ผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วนอากาศหมุนเวียนมากจะส่งผลให้ SEC_{total} ลดลงอย่างชัดเจน สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นหากมีการนำปริมาณอากาศร้อนนำกลับมาใช้ใหม่แทนที่จะปล่อยทิ้ง โดยจากตารางที่ 3 พบว่า การนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่สามารถลดการใช้พลังงานได้

สูงสุด (สำหรับงานวิจัยนี้) ประมาณ 20% เมื่อเปรียบเทียบค่า SEC_{total} ที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบกระแสนของ Choicharoen et al. [10] ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5.6 ถึง 9.7 MJ/kg_{water} พบว่า SEC_{total} ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบกระแสนของ Nimmol and Devahastin [12] ซึ่ง SEC_{total} มีค่าอยู่ในช่วง 5.11 ถึง 11.21 MJ/kg_{water} พบว่า SEC_{total} ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจน

หากเปรียบเทียบเฉพาะค่า SEC_{heater} ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับค่า SEC_{heater} ที่ได้จากเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกชนิดอื่น ๆ จะพบว่า SEC_{heater} ที่ได้จากงานวิจัยนี้ (1.4 ถึง 5.0 MJ/kg_{water}) มีค่าอยู่ในระดับเดียวกับพลังงานความร้อนที่ใช้กับเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดระดับห้องปฏิบัติการ [2] และระดับอุตสาหกรรม [16] ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5 ถึง 6 MJ/kg_{water} และ 3.5 ถึง 7 MJ/kg_{water} ตามลำดับ นอกจากนี้ SEC_{heater} ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังอยู่ในระดับเดียวกับพลังงานความร้อนที่ใช้กับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดเชิงพาณิชย์ [18] ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.21 ถึง 7.8 MJ/kg_{water}

3.4 คุณภาพของข้าวที่ผ่านการอบแห้ง

ตารางที่ 3 แสดงผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อคุณภาพของข้าวซึ่งแสดงในเทอมของร้อยละต้นข้าวสัมพัทธ์ (relative head rice yield) และความขาวสัมพัทธ์ (relative whiteness) โดยร้อยละต้นข้าวและความขาวของข้าวอ้างอิง (reference sample) ซึ่งเป็นข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม มีค่าประมาณ 53% และ 44 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 คุณภาพของข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ

T (°C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	R _r (%)	Relative head rice yield (%)	Relative whiteness (%)
100	80	0	93.6	98.3
		20	93.5	97.8
		40	93.4	98.6
	100	0	93.4	98.5
		20	92.9	97.4
		40	92.1	99.4
	120	0	93.3	98.7
		20	93.1	99.7
		40	93.0	98.6
120	80	0	93.2	97.7
		20	93.0	97.3
		40	92.9	99.5
	100	0	93.0	98.1
		20	92.8	97.3
		40	92.6	98.4
	120	0	92.8	98.4
		20	91.8	99.4
		40	90.0	99.0
140	80	0	92.6	97.1
		20	89.7	98.5
		40	88.3	98.8
	100	0	88.6	99.3
		20	88.4	99.7
		40	88.1	97.6
	120	0	89.6	99.0
		20	88.5	98.4
		40	88.5	99.5

จะเห็นว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนมีร้อยละต้นข้าวลดลงในทุกเงื่อนไขเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง หากพิจารณาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อร้อยละต้นข้าวจะพบว่า อุณหภูมิของอากาศเข้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวมีค่าต่ำลง สืบเนื่องจากร้อยละต้นข้าวสัมผัสที่มีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิของอากาศเข้าสูงจะทำให้ความชื้นภายในข้าวเปลือกเคลื่อนที่ออกอย่างรวดเร็วจนเป็นผลให้เกิดความคั้นในเมล็ดข้าวมาก ข้าวจึงเกิดการแตกร้าวภายในซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่ายระหว่างกระบวนการสี [22] ถึงแม้ว่าข้าวเปลือกจะมีโอกาสชนหรือกระแทกกันเองมากขึ้นเมื่อใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือกมาก (ปริมาณข้าวเปลือกในระบบมีมาก) ซึ่งส่งผลทำให้ร้อยละต้นข้าวมีค่าลดลง แต่ผลการทดลองที่ได้ในงานวิจัยนี้กลับแสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นไม่ทำผลให้ร้อยละต้นข้าวมีค่าลดลงมาก ซึ่งอาจเนื่องมาจากความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าไม่สูงมาก ผลที่ได้จากตารางที่ 3 ยังแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนอากาศหมุนเวียนไม่ส่งผลต่อร้อยละต้นข้าวมากนัก

ในแง่ของความขาว พบว่า ความขาวของข้าวที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนในทุกเงื่อนไขมีค่าไม่ต่างจากความขาวของข้าวอ้างอิงมากนัก (ความขาวลดลงเล็กน้อย) สืบเนื่องจากค่าความขาวสัมผัสมีค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้อาจเป็นผลจากเวลาการอบแห้งที่สั้นมาก (ถึงแม้ว่าจะใช้อุณหภูมิอบแห้งสูง) นั่นแสดงให้เห็นว่า ทั้งอุณหภูมิของอากาศเข้า อัตราการป้อนข้าวเปลือก และอัตราส่วนอากาศหมุนเวียนไม่ส่งผลกระทบต่อความขาวของข้าว

4. สรุป

เครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้ 3.30 ถึง 6.00% (d.b.) ในเวลาไม่เกิน 2.1 s ในขณะที่การนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่สามารถลดการใช้พลังงานได้สูงสุดประมาณ 20% ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนอากาศหมุนเวียน 40% โดยค่า

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดของกระบวนการอบแห้งมีค่า 4.2 MJ/kg_{water} ในแง่ของคุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้ พบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดลงของร้อยละต้นข้าว ในขณะที่ความขาวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งไม่ได้รับผลกระทบจากเงื่อนไขการอบแห้งที่ใช้มากนักเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกก่อนอบแห้ง หากพิจารณาจากประสิทธิภาพการใช้พลังงาน พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิของอากาศเข้า 100 °C อัตราการป้อนข้าวเปลือก 120 kg_{dry solid}/h และอัตราส่วนอากาศหมุนเวียน 40% ถือเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตาม การอบแห้งที่อุณหภูมิของอากาศเข้า 100 °C ถือเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจากคุณภาพของข้าวที่ได้จากการอบแห้ง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์บางส่วนในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Hung-Nguyen L, Driscoll RH, Srzednicki G. Drying of high moisture content paddy in a pilot scale triangular spouted bed dryer. *Drying Technology*. 2001; 19: 375–387.
- (2) Madhiyanon T, Soponronnarit S. High temperature spouted bed paddy drying with varied downcomer air flows and moisture contents: Effects on drying kinetics, critical moisture content, and milling quality. *Drying Technology*. 2005; 23: 473–495.
- (3) Soponronnarit S, Yapha M, Prachayawarakorn S. Cross-flow fluidized bed paddy dryer: Prototype

- and commercialization. *Drying Technology*. 1995; 13: 2207–2116.
- (4) Inprasit C, Noomhorm A. Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of dryer and operation on rice quality. *Drying Technology*. 2001; 19: 389–404.
 - (5) Tirawanichakul S, Prachayawarakorn S, Waran-anond W, Tungtrakul P, Soponronnarit S. Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. *Drying Technology*. 2004; 22: 1731–1754.
 - (6) Kaensup W, Kulwong S, Wongwises S. A small-scale pneumatic conveying dryer of rough rice. *Drying Technology*. 2006; 24: 105–113.
 - (7) Kaensup W, Kulwong S, Wongwises S. Comparison of drying kinetics of paddy using a pneumatic conveying dryer with and without a cyclone. *Drying Technology*. 2006; 24: 1039–1045.
 - (8) Tamir A. *Impinging-Stream Reactors*. Amsterdam: Elsevier; 1994.
 - (9) Sathapornprasath K, Devahastin S, Soponronnarit S. Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials. *Drying Technology*. 2007; 25: 1121–1128.
 - (10) Choicharoen K, Devahastin S, Soponronnarit S. Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high-moisture particulate materials. *Drying Technology*. 2010; 28: 20–29.
 - (11) Tamir A, Elperin I, Luzzatto K. Drying in a new two impinging streams reactor. *Chemical Engineering Science*. 1984; 39: 139–146.
 - (12) Nimmol C, Devahastin S. Evaluation of performance and energy efficiency of an impinging stream dryer for paddy. *Applied Thermal Engineering*. 2010; 30: 2204–2212.
 - (13) Nimmol C, Sathapornprasath K, Devahastin S. Drying of high-moisture paddy using a combined impinging stream and pneumatic drying system. *Drying Technology*. 2012; 30: 1854–1862.
 - (14) Choicharoen K, Devahastin S, Soponronnarit S. Comparative evaluation of performance and energy consumption of hot air and superheated steam impinging stream dryers for high-moisture particulate materials. *Applied Thermal Engineering*. 2011; 31: 3444–3452.
 - (15) Swasdisevi T, Devahastin S, Thanasookprasert S, Soponronnarit S. Comparative evaluation of hot-air and superheated-steam impinging stream drying as novel alternatives for paddy drying. *Drying Technology*. 2013; 31: 717–725.
 - (16) Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T, Soponronnarit S. Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying. *Applied Thermal Engineering*. 2007; 27: 2483–2494.
 - (17) Prachayawarakorn S, Poomsa-ad N, Soponronnarit S. Quality maintenance and economy with high-temperature paddy-drying process. *Journal of Stored Products Research*. 2005; 41: 333–351.
 - (18) Kitron A, Buchmann R, Luzzatto K, Tamir A. Drying and mixing of solids and particles residence time distribution in four impinging streams and multistage two impinging streams reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1987; 26: 2454–2461.
 - (19) Madhiyanon T, Soponronnarit S, Tia W. Industrial-scale prototype of continuous spouted bed paddy dryer. *Drying Technology*. 2001; 19: 207–216.
 - (20) Tirawanichakul S, Prachayawarakorn S, Tungtrakul P, Warunyanond W, Soponron-

- narit S. Effect of drying temperature on physical property of high and low amylose content paddy. Proceedings of the International Conference on Innovation in Food Processing Technology and Engineering; 2002 December 11–13, AIT, Bangkok, Thailand.
- (21) Soponronnarit S. Fluidised-bed paddy drying. *Science Asia*. 1999; 25: 51–56.
- (22) Poomsa-ad N, Terdyothin A, Prachayawarakorn S, Soponronnarit S. Investigations on head rice yield and operating time in the fluidized-bed drying process: Experiment and simulation. *Journal of Stored Products Research*. 2005; 41: 387–400.