



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสวน

Energy efficiency of paddy dehydration process using vortex dryer

ขวัญชัย จ้อยเจริญ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

Kwanchai Choicharoen*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi Pathumthani 12110

* Corresponding author.

E-mail: kwanchai_c@rmutt.ac.th; Telephone: 0 2549 3430

วันที่รับบทความ 15 กันยายน 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 8 ธันวาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ 29 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งแบบกระแสวนถือเป็นกระบวนการอบแห้งรูปแบบใหม่ที่เหมาะสมสำหรับใช้ออบแห้งวัสดุอนุภาคที่มีความชื้นที่ผิวสูง อาทิเช่น ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่หรือข้าวเปลือกที่จมน้ำ อย่างไรก็ตาม การศึกษาสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสวนยังมีอยู่น้อยมาก การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องอบแห้งแบบกระแสวนและทำการศึกษาสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งในโหมดของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งที่มีห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 mm ความกว้าง 84 mm ความสูงช่องอากาศเข้า 24 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านขาออก 72 mm โดยทำการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 22% (d.b.) ซึ่งมีอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกเป็นพารามิเตอร์ในการอบแห้ง ความเร็วของอากาศในกระบวนการอบแห้งมีค่าคงที่ 50 m/s จากผลการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึง 3.63 ถึง 8.87% (d.b.) โดยข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 13.20% (d.b.) สำหรับอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ 475.86 kg_{water}/m³ h ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4,190.79 W/m³ °C โดยเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมีค่าอยู่ในช่วง 14.07 ถึง 19.17 s เครื่องอบแห้งมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.6 MJ/kg_{water} ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิการอบแห้ง 160°C และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 70 kg_{dry solid}/h

คำสำคัญ

การอบแห้งข้าวเปลือก ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เครื่องอบแห้งแบบกระแสวน วัสดุอนุภาคที่มีความชื้นสูง

Abstract

Vortex dryer is a novel drying process for drying high-moisture particulate materials such as freshly-harvested paddy or drowned paddy. However, studies of the performance and energy efficiency of the vortex dryer are still incomplete. In this study, a vortex dryer was constructed and study the overall performance in terms of the volumetric water evaporation rate, volumetric heat transfer coefficient, mean particle residence time and specific energy consumption of the dryer was investigated. The drying chamber of the dryer has a diameter of 240 mm, a width of 84 mm, a height of the air inlet of 24 mm and has the chimney outlet diameter of 72 mm. Then, drying the paddy with the initial moisture content of 22% (d.b.) at various drying parameters, namely the drying temperature, the particles feed rate and the

constant inlet air velocity of 50 m/s. It was found that the constructed vortex dryer could reduce the moisture content of paddy by 3.63 to 8.87% (d.b.) and the lowest final moisture content of paddy was found to be around 13.20% (d.b.). For the maximum volumetric water evaporation rate was found to be around 475.86 kg_{water}/m³ h and the maximum volumetric heat transfer coefficient was found to be around 4,190.79 W/m³ °C. In the case of the mean particle residence time it was found that the mean particle residence time was in the range of 14.07 to 19.17 s. For the total specific energy consumption of the vortex dryer it was found that the lowest total specific energy consumption was to be around 5.6 MJ/kg_{water} at a drying temperature of 160°C and a particles feed rate of 70 kg_{dry solid}/h.

Keywords

paddy drying; specific energy consumption; vortex dryer; high-moisture particulate materials

1. บทนำ

ข้าวเป็นอาหารหลักและเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่จะมีความชื้นค่อนข้างสูง [1] กอปรกับประเทศไทยมักประสบปัญหาจากภัยน้ำท่วมทำให้ชาวนาต้องรีบเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกที่จมน้ำเพื่อไม่ให้ข้าวเปลือกเกิดการเน่าเสีย ข้าวเปลือกต้องถูกนำไปลดความชื้นลงไม่ให้สูงเกินกว่า 14% (d.b.) [2] อย่างรวดเร็วเพื่อให้ความชื้นเพียงพอต่อการเก็บรักษา วิธีการที่นิยมทำกันโดยทั่วไปคือการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งในหลายรูปแบบ อาทิเช่น ฟลูอิดไรเซอร์ สเปาเต็ดเบด และพาหะลม เป็นต้น [3,4] ซึ่งการอบแห้งด้วยเทคนิคเหล่านี้มักใช้เวลาในการอบแห้งนาน [5] ต่อมาได้มีการศึกษาเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ [6] ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งแบบแฟลชที่สามารถระเหยนํ้าออกจากผิววัสดุอนุภาคได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นมีการทดลองใช้อบแห้งข้าวเปลือกที่เตรียมการให้มีความชื้นที่ผิวสูง [7-9] พบว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้มีสมรรถนะการอบแห้งสูง ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นมาก เนื่องจากเครื่องอบแห้งชนิดนี้ใช้หลักการให้วัสดุอนุภาคกับตัวกลางการอบแห้งมีความเร็วสัมพัทธ์กันสูงมากในบริเวณที่ได้รับออกแบบ เพื่อให้มีความเข้มข้นในการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัมที่สูงมาก โดยเกิดขึ้นในระยะเวลาน้อย ๆ ทำให้เครื่องอบแห้งชนิดเหล่านี้มีขนาดกะทัดรัดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งรูปแบบอื่น [10] อย่างไรก็ตาม ยังมีเครื่องอบแห้งอีกรูปแบบหนึ่งที่มีหลักการทำงานที่จะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัม ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ ซึ่งเร็ว ๆ นี้ได้มีการศึกษาโดยเสถียรพงษ์ และขวัญชัย [11] เพื่อจะรู้ถึงคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ยังมีข้อมูลอยู่น้อยมากในเทอมของเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ใน

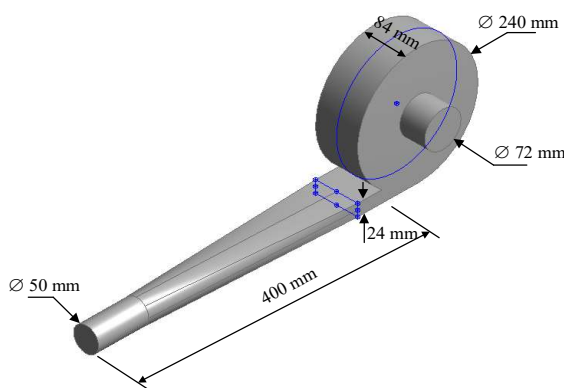
ระบบที่มีผลต่อตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ ได้แก่ ความเร็วอากาศขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และชนิดของวัสดุทดลอง โดยใช้ข้าวเปลือกเป็นวัสดุทดลองรวมอยู่ด้วย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำเป็นเครื่องอบแห้งที่จัดอยู่ในกลุ่มของเครื่องอบแห้งแบบแฟลชที่มีเวลาเฉลี่ยของวัสดุอยู่ในระบบสั้น จึงเหมาะที่จะนำไปใช้อบแห้งวัสดุอนุภาค เช่น ข้าวเปลือกที่มีความชื้นที่ผิวสูง แต่เนื่องจากข้อมูลทางสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำยังมีอยู่น้อยมากหรือแทบจะไม่มีข้อมูล การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำและทำการศึกษสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งในเทอมของอัตราการระเหยนํ้าเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

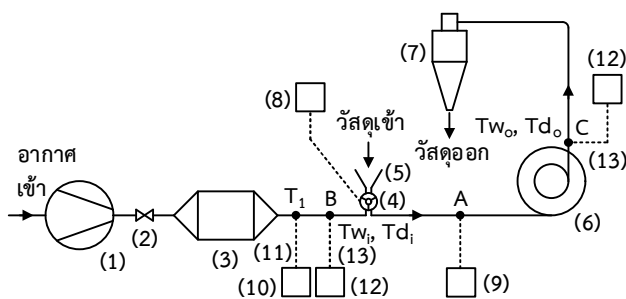
2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงลักษณะห้องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้ในการศึกษามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 mm มีความกว้าง 84 mm มีความสูงช่องอากาศขาเข้า 24 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านขาออก 72 mm และมีปริมาตรรวม 0.0052 m³ รูปที่ 2 แสดงแผนผังเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องเป่าลมแรงดันสูงมีกำลัง 4 kW (Norvax, NVT-400, Taiwan) สามารถสร้างอัตราการไหลอากาศได้สูง 318 m³/h ที่ความดัน 300 mbar ความเร็วของอากาศปรับด้วยโกลบวาล์ว และวัดความเร็วด้วยพีโตรีดาร์ (CEM, DT-8920, Taiwan) ที่จุด A อัตราการป้อนข้าวเปลือกปรับด้วยตัว

ควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Hantek, HT3005PA, Taiwan) ซึ่งใช้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงที่มีกำลัง 8 W ที่ใช้ขับเพลาคีร์บ้อนวัสดุ อุณหภูมิอากาศเข้าสร้างโดยเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าที่มีกำลัง 6 kW และควบคุมอุณหภูมิด้วยพีไอดี (TAIE, FY900, Taiwan) มีความแม่นยำ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศทั้งขาเข้า (วัดที่จุด B) และขาออก (วัดที่จุด C) (ดูรูปที่ 2) ถูกวัดและบันทึกด้วยตัวรับรู้ความชื้นและอุณหภูมิ (Vaisala, HM70, Finland) มีความแม่นยำ $\pm 0.6\%$ RH และ $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ส่วนไฮโคลนใช้แยกข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งออกจากอากาศขาออก การใช้พลังงานของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าวัดโดยมาตรวัตติ์โลวัตต์ชั่วโมง (Primus, KM-03, Thailand) ที่มีความแม่นยำ $\pm 1\%$ FS



รูปที่ 1 ลักษณะห้องอบแห้งแบบกระแสวน



(1) เครื่องเป่าลมแรงดันสูง (2) โกลบวาล์ว (3) เครื่องทำความร้อนไฟฟ้า (4) เครื่องป้อนวัสดุแบบสตาร์ (5) ที่พักวัสดุ (6) ห้องอบแห้ง (7) ไฮโคลน (8) ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (9) หัววัดความเร็วลม (10) ตัวควบคุมพีไอดี (11) สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (12) ตัววัดบันทึกข้อมูล ความชื้นและอุณหภูมิ (13) สายสัญญาณความชื้นและอุณหภูมิ

รูปที่ 2 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบกระแสวน

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้ใช้ข้าวเปลือกเป็นวัสดุในการทดลอง โดยข้าวเปลือกถูกเตรียมให้มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 22% (d.b.) จากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้แช่ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 2 วัน โดยก่อนเริ่มทำการทดลองจะนำข้าวเปลือกออกจากตู้แช่ จากนั้นนำมาวางแผ่ให้กระจายสม่ำเสมอและผึ่งไว้ในบรรยากาศประมาณ 30 min เพื่อให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องเพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นของไอน้ำที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดลอง

2.3 วิธีการทดลอง

ในขั้นแรก เครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าจะเริ่มทำงานก่อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ทางออกของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า (T_1) เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนด ข้าวเปลือกที่เตรียมไว้จะถูกป้อนด้วยเครื่องป้อนวัสดุแบบสตาร์เข้าสู่ระบบในอัตราที่กำหนด การเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ทางออกของไฮโคลนจะเริ่มขึ้นเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว โดยดูจากอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศทั้งที่ด้านขาเข้า (T_{wi} และ T_{di}) และด้านขาออก (T_{wo} และ T_{do}) มีค่าคงที่ ซึ่งใช้เวลาหลังการป้อนข้าวเปลือกเข้าสู่ระบบแล้วประมาณ 4 min ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจำนวน 3 ครั้ง โดยมีช่วงห่างของเวลาในการเก็บตัวอย่างเท่า ๆ กัน ค่าความชื้นของตัวอย่างข้าวเปลือกสามารถหาได้โดยการนำข้าวเปลือกดังกล่าวมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert, UF55, Germany) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 h หลังจากนั้นจะหาค่าความชื้นของข้าวเปลือกจากมวลของข้าวเปลือกทั้งก่อนนำเข้าสู่ตู้อบลมร้อนและหลังนำออกจากตู้อบลมร้อน การทดลองจะใช้อุณหภูมิการอบแห้งของอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า (T_1) เท่ากับ 120 140 และ 160°C และอัตราการป้อนข้าวเปลือกเท่ากับ 30 50 และ $70 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ โดยในการทดลองจะใช้ความเร็วของอากาศที่เครื่องเป่าลมแรงดันสูงทำได้สูงสุดเท่ากับ 50 m/s ในทุกเงื่อนไขการทดลอง

2.4 การหาอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์

การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งจะหาในเทอมของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$N_v = \frac{W_p(X_i - X_o)}{V_r} \quad (1)$$

$$h_v = \frac{W_p(X_i - X_o)h_{fg}}{V_r \Delta T_{lm}} \quad (2)$$

เมื่อ N_v คืออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$) h_v คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ($\text{W}/\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$) X คือปริมาณความชื้นของวัสดุ ($\text{kg}/\text{kg d.b.}$) W_p คืออัตราการป้อนวัสดุ ($\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$) h_{fg} คือความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg) V_r คือปริมาตรห้องอบแห้ง (m^3) และ ΔT_{lm} คือผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม ($^\circ\text{C}$) ของอากาศทั้งขาเข้าและขาออกเครื่องอบแห้ง ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3) ดังนี้

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_d - T_w)_o - (T_d - T_w)_i}{\ln[(T_d - T_w)_o / (T_d - T_w)_i]} \quad (3)$$

เมื่อตัวห้อย i และ o แสดงถึงด้านขาเข้าและขาออกเครื่องอบแห้ง

2.5 การหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานระหว่างการลดความชื้นข้าวเปลือกหาได้จากดัชนีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำปริมาณ 1 kg ออกจากวัสดุอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$\text{SEC} = \frac{E}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$) E คือปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า (MJ) m_w คือปริมาณน้ำที่ถูกระเหย (kg_{water}) คำนวณได้จากสมการที่ (5) ดังนี้

$$m_w = W_p(X_i - X_o)t \quad (5)$$

เมื่อ t คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2.6 การหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบทำการหาเพื่อยืนยันผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ดังนี้) (6)

$$\tau = \frac{m_p}{W_p} \quad (6)$$

เมื่อ τ คือเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ (s) m_p คือปริมาณวัสดุที่ค้างอยู่ในระบบหลังจากหยุดเดินเครื่องอบแห้งแบบทันทีทันใด (kg) W_p คืออัตราการป้อนวัสดุ (kg/s) [11,12]

2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

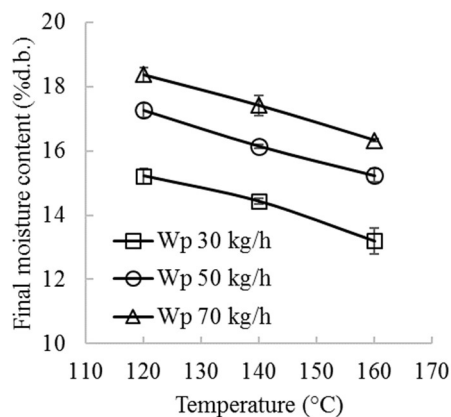
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยผลที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ค่าเฉลี่ยจะพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ $p < 0.05$ การทดสอบทางสถิตินี้คำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS (Version 17)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของตัวแปรอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกพบว่าความชื้นของข้าวเปลือกลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งกับอุณหภูมิผิวข้าวเปลือก ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกเพิ่มสูงขึ้น [5] ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร (ความชื้น) เพิ่มสูงขึ้น ความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกจึงระเหยออกได้มากกว่า ทำให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกลดลงได้มากกว่า โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [6] และ [13]

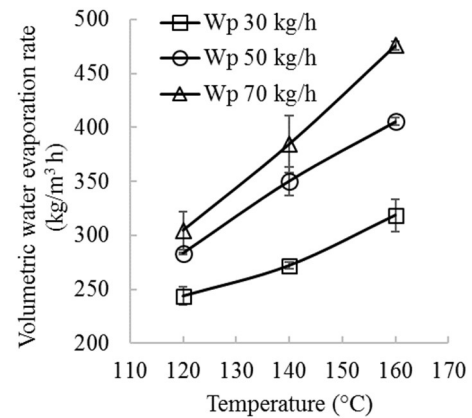
ส่วนกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือก (ดูรูปที่ 3) พบว่า อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่น้อยกว่า จะทำให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่น้อย ปริมาณข้าวเปลือกที่อยู่ในระบบจะน้อยกว่า ทำให้ช่องว่างของอากาศภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น ข้าวเปลือกจึงสามารถกระจายตัวในกระแสดลมไหลอากาศร้อนได้ดีกว่า [11] ส่งผลให้อากาศร้อนที่อยู่โดยรอบเมล็ดข้าวเปลือกถ่ายเทความร้อนและความชื้นกับข้าวเปลือกได้ดีกว่า ซึ่งที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกน้อย เป็นการแสดงถึงว่าเครื่องอบแห้งรับภาระในการลดความชื้นข้าวเปลือกต่ำกว่าที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มากกว่า



รูปที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก

3.2 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้ง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งกับอุณหภูมิผิวข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดแรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเพิ่มสูงขึ้น ความชื้นที่อยู่โดยรอบผิวข้าวเปลือกจึงระเหยออกมาก ซึ่งมักเกิดขึ้นในช่วงของการอบแห้งแบบคงที่ (unhindered rate drying period) โดยเฉพาะในเครื่องอบแห้งแบบฟลัช [14]



รูปที่ 4 อิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

ในกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องอบแห้งนี้ยังมีความสามารถในการระเหยความชื้นออกจากข้าวเปลือกได้ ถึงแม้ว่ามวลข้าวเปลือกจะอยู่ภายในห้องอบแห้งมากขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างมวลข้าวเปลือกกับอากาศภายในห้องอบแห้งสูงขึ้น หรือภาระการอบแห้งของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยปกติจะทำให้ให้อากาศร้อนสามารถระเหยน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกได้น้อยลง (ดูตารางที่ 1) แต่ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเครื่องอบแห้งนี้ยังไม่เกิดสภาวะอื่น (choking point) [15] จึงยังทำให้เครื่องอบแห้งนี้สามารถเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือกได้อีกจนกว่าจะเกิดสภาวะอื่น

3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้ง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิการอบแห้ง (ดูตารางที่ 1) ถึงแม้ว่าอุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิอากาศร้อนกับอุณหภูมิผิวข้าวเปลือกแตกต่างกันมากขึ้น รวมถึงอัตราการระเหยน้ำสูงขึ้น แต่เนื่องจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรคำนวณจากค่าของอัตราการระเหยน้ำ และค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม ซึ่งค่าทั้งสองจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่

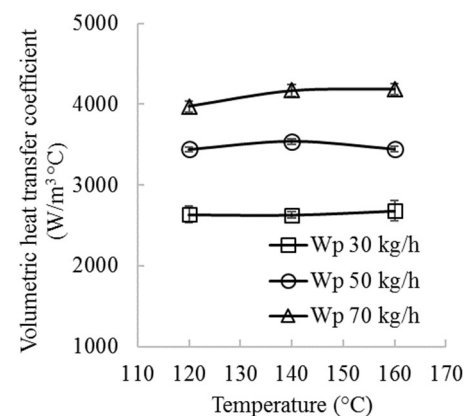
สูงขึ้น (ดูสมการที่ (3)) จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น

สำหรับอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนข้าวเปลือกในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง (ดูรูปที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง การเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือกจะทำให้ผลต่างความชื้นของข้าวเปลือกลดลง (ดูตารางที่ 1) และผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึมลดลง เช่นเดียวกัน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรแปรผันกับอัตราการป้อนข้าวเปลือกตรงไปหาที่เครื่องอบแห้งยังไม่เกิดสภาวะอื่น ดังที่อธิบายแล้วข้างต้น

3.4 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

โดยทั่วไปเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิการอบแห้ง [13] แต่จะมีผลต่ออัตราการป้อนวัสดุ ตารางที่ 2 แสดงผลของอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ พบว่าที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกน้อย ทำให้ข้าวเปลือกอยู่ในระบบนานขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกน้อยทำให้อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อปริมาณข้าวเปลือกมีค่าสูง ส่งผลให้อากาศสามารถถ่ายเทโมเมนต์ให้กับข้าวเปลือกได้มากขึ้น

ข้าวเปลือกจึงถูกอากาศพาเข้าสู่ห้องอบแห้งด้วยแรงหนีศูนย์กลางที่มีค่าสูงกว่าในกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือกมาก ทำให้ข้าวเปลือกสามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวนิ่งของห้องอบแห้งได้นานขึ้นและสามารถลอยตัวอยู่ในกระแสอากาศได้นานกว่าก่อนที่ข้าวเปลือกจะสูญเสียโมเมนต์เนื่องจากผลของความเสียดทานที่ผนังห้องอบแห้ง แรงต้านอากาศ แรงความโน้มถ่วง รวมทั้งข้าวเปลือกชนกันเอง ส่งผลให้ข้าวเปลือกเคลื่อนที่หลุดออกจากแนวนิ่งของห้องอบแห้ง ข้าวเปลือกจึงถูกอากาศพาออกพาท่อออกจากห้องอบแห้ง [11,16]



รูปที่ 5 อิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

W_p (kg _{dry solid} /h)	T (°C)	X_i (% d.b.)	$X_i - X_o$ (% d.b.)	N_v (kg _{water} /m ³ h)	h_v (W/m ³ °C)
30	120	15.22 ± 0.24 ^c	6.78 ± 0.24 ^d	243.77 ± 8.45 ^a	2,632.86 ± 103.57 ^a
	140	14.43 ± 0.08 ^b	7.57 ± 0.08 ^e	272.04 ± 2.88 ^b	2,629.82 ± 40.04 ^a
	160	13.20 ± 0.40 ^a	8.87 ± 0.42 ^f	318.64 ± 14.96 ^d	2,679.06 ± 123.06 ^a
50	120	17.27 ± 0.02 ^e	4.74 ± 0.02 ^b	283.60 ± 0.90 ^{bc}	3,440.26 ± 13.04 ^b
	140	16.15 ± 0.22 ^d	5.85 ± 0.22 ^c	350.38 ± 13.18 ^e	3,537.01 ± 130.53 ^b
	160	15.23 ± 0.06 ^c	6.77 ± 0.06 ^c	405.28 ± 3.46 ^f	3,444.57 ± 27.96 ^b
70	120	18.37 ± 0.21 ^f	3.63 ± 0.21 ^a	304.38 ± 17.93 ^{cd}	3,973.61 ± 238.03 ^c
	140	17.42 ± 0.32 ^e	4.59 ± 0.32 ^b	384.46 ± 26.42 ^f	4,170.05 ± 307.49 ^c
	160	16.32 ± 0.05 ^d	5.68 ± 0.05 ^c	475.86 ± 3.78 ^g	4,190.79 ± 8.35 ^c

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 2 เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

W_p (kg _{dry solid} /h)	Mean paddy residence time, τ (s)
30	19.17 ± 0.48^c
50	16.95 ± 0.64^b
70	14.07 ± 1.59^a

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าที่ระบุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 3 แสดงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูง (SEC_{blower}) พบว่า SEC_{blower} ลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงจะทำให้อัตราการระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกได้มากขึ้น แต่ในขณะที่เครื่องเป่าลมแรงดันสูงทำงานที่อัตราคงที่ในทุกเงื่อนไขการทดลอง จึงมีอัตราการใช้พลังงานคงที่ ส่งผลให้ SEC_{blower} มีค่าต่ำที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น และยังพบว่าเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ SEC_{blower} ลดลง เพราะเวลาที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงจะทำให้ปริมาณน้ำที่ถูกระเหยเพิ่มมากขึ้นด้วย

ส่วนความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า (SEC_{heater}) พบว่าที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 50 และ 70 kg_{dry solid}/h SEC_{heater} จะลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ถึงแม้ว่าการใช้พลังงานของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าจะมากขึ้น ทั้งนี้เพราะเวลาที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกดังกล่าว เครื่องอบแห้งยังสามารถระเหยน้ำได้มากกว่าดังที่อธิบายแล้วข้างต้น ทำให้ SEC_{heater} ลดลง แต่ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 30 kg_{dry solid}/h กลับพบว่า SEC_{heater} เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะเวลาที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกดังกล่าว มีปริมาณน้ำที่ถูกระเหยโดยรวมน้อยกว่าที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงกว่า ดังที่อธิบายแล้วข้างต้น ถึงแม้ว่าที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 30 kg_{dry solid}/h จะทำให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่าก็ตาม จึงส่งผลให้ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกดังกล่าว SEC_{heater} เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ดูสมการที่ (5)) อย่างไรก็ตามพบว่า SEC_{heater} จะมีค่าสูงกว่า SEC_{blower} ในทุกเงื่อนไข ถึงแม้ว่าเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าจะไม่ได้ทำงานตลอดเวลาเช่นเดียวกับเครื่องเป่าลมแรงดันสูง

เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวม (SEC_{total}) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 5.6 ถึง 7.9 MJ/kg_{water} โดย SEC_{total} ต่ำที่สุด (5.6 MJ/kg_{water}) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิการอบแห้ง 160°C และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 70 kg_{dry solid}/h

ตารางที่ 3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

W_p (kg _{dry solid} /h)	T (°C)	SEC_{blower} (MJ/kg _{water})	SEC_{heater} (MJ/kg _{water})	SEC_{total} (MJ/kg _{water})
30	120	3.9	3.9	7.9
	140	3.5	4.2	7.7
	160	3.0	4.2	7.2
50	120	3.4	4.1	7.4
	140	2.7	3.8	6.6
	160	2.4	3.8	6.1
70	120	3.1	4.4	7.6
	140	2.5	4.0	6.5
	160	2.0	3.6	5.6

4. บทสรุป

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่สร้างขึ้นสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นที่ผิวสูงที่อาจเกิดขึ้นหลังการเก็บเกี่ยวใหม่หรือข้าวเปลือกที่จมน้ำจากเหตุการณ์น้ำท่วม ซึ่งสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งหาได้ในเทอมของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบ ผลการศึกษาพบว่าความชื้นของข้าวเปลือกลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้ง อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่น้อยกว่าจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกสูงสุดเกิดขึ้นที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก $30 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และที่อุณหภูมิการอบแห้ง 160°C มีค่าเท่ากับ 13.20% (d.b.) ในส่วนของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือก อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ $475.86 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ ซึ่งเกิดขึ้นที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก $70 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และที่อุณหภูมิการอบแห้ง 160°C สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิการอบแห้ง แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่แต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ $4,190.79 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเกิดขึ้นที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก $70 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ และที่อุณหภูมิการอบแห้ง 160°C ในกรณีของเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ พบว่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่น้อย ทำให้ข้าวเปลือกอยู่ในระบบนานขึ้น เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบนานที่สุดมีค่าเท่ากับ 19.17 s ซึ่งเกิดขึ้นที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก $30 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ โดยไม่ขึ้นอยู่กับการอบแห้ง สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นและอัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้น ส่วนความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า พบว่าที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 50 และ 70

$\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก $30 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ กลับพบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น และยังพบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลมแรงดันสูงในทุกเงื่อนไขการทดลอง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของทั้งเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าต่ำที่สุดของระบบมีค่าเท่ากับ $5.6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิการอบแห้ง 160°C และอัตราการป้อนข้าวเปลือก $70 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ทุนงบประมาณแผ่นดิน สัญญาทุนเลขที่ IRF62A0722) ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่สนับสนุนปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นต่องานวิจัย และขอขอบคุณบทความวิชาการและบทความวิจัยที่ได้ใช้อ้างอิงในบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nimmol C. Energy efficiency of paddy dehydration process using pneumatic dryer with spiral- pipe drying column. *KKU Research Journal*. 2012; 17(1): 97-109.
- [2] Sangdao C, Songsermpong S, Krairiksh M. A continuous fluidized bed microwave paddy drying system using applicators with perpendicular slots on a concentric cylindrical cavity. *Drying Technology*. 2011; 29: 35-46.
- [3] Soponronnarit S, Yapha M, Prachayawarakorn S. Cross-flow fluidized bed paddy dryer: Prototype and commercialization. *Drying Technology*. 1995; 13: 2207-2216.
- [4] Nguyen LH, Driscoll RH, Szrednicki G. Drying of high moisture content paddy in a pilot scale triangular spouted bed dryer. *Drying Technology*. 2001; 19(2): 375-387.

- [5] สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. *การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป; 2555.
- [6] Choicharoen K, Devahastin S, Soponronnarit S. Performance and energy consumption of an impinging stream dryer. *Drying Technology*. 2010; 28: 20-29.
- [7] 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.
- [8] Pruengam P, Soponronnarit S, Prachayawarakorn S, Devahastin S. Rapid drying of parboiled paddy using hot air impinging stream dryer. *Drying Technology*. 2014; 32: 1949-1955.
- [9] Pruengam P, Soponronnarit S, Prachayawarakorn S, Devahastin S. Evolution of mechanical properties of parboiled brown rice kernels during impinging stream drying. *Drying Technology*. 2016; 34: 1843-1853.
- [10] Kudra T, Mujumdar AS. Special Drying techniques and novel dryers, In Mujumdar AS. Eds. *Handbook of Industrial Drying*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press; 2014; 433-489.
- [11] เสฐียรพงษ์ บุญวัฒน์, ขวัญชัย จ้อยเจริญ. ผลของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบอบแห้งแบบกระแสนวน. *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม ประเทศไทย 6-7 ธันวาคม 2561*. 2561. หน้า 252-262.
- [12] Kitron Y, Tamir A. Performance of a coaxial gas-solid two-impinging-streams (TIS) reactor: Hydrodynamics, residence time distribution, and drying heat transfer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1988; 27: 1760-1767.
- [13] Nimmol C, Devahastin S. Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy. *Applied Thermal Engineering*. 2010; 30: 2204-2212.
- [14] Choicharoen K, Devahastin S, Soponronnarit S. Numerical simulation of multiphase transport phenomena during impinging stream drying of a particulate material. *Drying Technology*. 2012; 30: 1227-1237.
- [15] 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.
- [16] Kovacevic JZ, Pantzali MN, Heynderickx GJ, Marin GB. Bed stability and maximum solids capacity in a Gas-Solid Vortex Reactor: Experimental study. *Chemical Engineering Science*. 2014; 106: 293-303.