

<http://journal.rmutp.ac.th/>

อิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก

ณัฐพงษ์ วงศ์บัพพา¹ กระวี ตรีอำนาจ^{1*} และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 16 สิงหาคม 2564 แก้ไขบทความ 6 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 16 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือก เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมต้นแบบถูกใช้ในการศึกษานี้ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม 15 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นเป็นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก โดยใช้ความเร็วอากาศอบแห้งสองแบบคือ ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ตลอดกระบวนการทดลองที่ 12.80 เมตรต่อวินาทีและความเร็วอากาศอบแห้งที่ปรับลดทุก 15 นาที ตลอดกระบวนการทดสอบ (มีค่าจาก 12.80 - 8.44 เมตรต่อวินาที) อบแห้งในหอบแห้งแบบท่อตั้งตรงแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 เซนติเมตร สูง 1 เมตร เพื่อศึกษาผลการอบแห้งจาก พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้ง ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า ใช้พลังงานจำเพาะป้อนภูมิน้อยกว่า และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าในช่วงความชื้นข้าวเปลือกสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งในระหว่างกระบวนการทดสอบ

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกพาหะลม; ความเร็วอากาศอบแห้ง; อัตราการอบแห้ง; พลังงานในการอบแห้ง

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Influence of Drying Air Velocity Characteristics on Paddy Drying

Nuttapong Wongbubpa¹ Krawee Treeamnu^{1*} and Tawarat Treeamnu²

¹ School of mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

² School of agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

^{1,2} 111 University Avenue, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 16 August 2021; Revised 6 September 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

The objective of this research was to study the influence of drying air velocity characteristics on paddy drying. The pneumatic dryer prototype was used in this study. Test drying 15 kg of Hom Pathum paddy at 22 – 25% initial wet basis moisture content was tested drying under the drying air temperature 80°C until its moisture is 14% wet basis with the two drying air velocity characteristics. The first characteristic of drying air velocity is constant at 12.80 m/s and another is reduced velocity every 15 minutes throughout the test process from 12.80 - 8.44 m/s. Drying in a vertical tube with a diameter of 3.81 cm and height 1 m for study the drying behavior, drying rate (DR), specific energy consumption (SEC), and thermal efficiency of drying. The results showed that drying with constant air velocity gives a shorter time, higher drying rate, lower primary SEC consumption, and higher thermal efficiency than drying with reducing air velocity.

Keywords : Pneumatic Paddy Drying; Drying Air Velocity; Drying Rate; Energy Consumption

* Corresponding Author. Tel.: +66 4422 4766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th

1. บทนำ

ผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะข้าวเปลือกมักจะมีความชื้นสูงประมาณ ร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก [1] ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ข้าวเปลือกเกิดเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษาอันเป็นผลมาจากความชื้นที่สูงเกินไป ดังนั้นการอบแห้งข้าวเปลือกจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อการถนอมรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนาน ความชื้นข้าวเปลือกที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาควรมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 12-14 มาตรฐานเปียก [1] และในการลดความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งหลากหลายชนิด เช่น เครื่องอบแห้งแบบถาด เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เครื่องอบแห้งแบบกระแสน และเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในไมโครเวฟ เป็นต้น ซึ่งเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ มีจุดเด่นและจุดด้อยที่ต่างกัน ในกระบวนการอบแห้งส่วนใหญ่นิยมใช้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนซึ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้งไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยกระบวนการระเหยน้ำ การทบทวนบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยลมร้อนพบว่า การถ่ายเทความร้อนแบบเป่าผ่านใน 2 มิติได้ถูกนำมาใช้กับวัสดุเกษตร 3 ชนิด คือ ข้าวเปลือก ข้าวโพด และถั่วเหลือง และมีการศึกษาถึงผลความเร็วของลมร้อนที่มีต่อการอบแห้ง [2] Z. Sun et al. [3] ได้ทำการวิเคราะห์ความร้อนของข้าวเปลือกเมล็ดยาวตามอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้ง 3 ระดับ คือ อุณหภูมิต่ำ 45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิปานกลาง 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูง 180 องศาเซลเซียส พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเมล็ดอยู่ระหว่าง 60-100 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับความชื้นของข้าวเปลือก T. Chitsomboon et al. [4] ได้ศึกษาอัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานของ

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ พบว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจำนวน 1.5 กิโลกรัม จากความชื้นร้อยละ 23.75 มาตรฐานแห้ง ให้เหลือ 15.5 มาตรฐานแห้ง โดยใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 30 วินาที ในขณะที่ความเร็วอากาศอบแห้งมีผลอย่างมากต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวแบบหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง โดยระยะเวลาการอบแห้งลดลงจาก 150 นาที เหลือ 82 นาที และ 130 นาที เหลือ 60 นาที เมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศอบแห้งจาก 1 เมตรต่อวินาที เป็น 4 เมตรต่อวินาที [5] โดยข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ สามารถให้ร้อยละข้าวตันได้สูงถึง 55-60 [6] T. Wichinthanasan et al. [7] พบว่าเครื่องอบแห้งแบบกระแสนทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกลงได้ร้อยละ 10.78 มาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 110 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนวัสดุ 62 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ร้อยละข้าวตันและค่าความขาวของเมล็ดข้าวจะลดลงตามอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่สูงขึ้น งานวิจัยของ A.G. Clossen et al. [8] ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวที่ใช้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition) พบว่าวิธีดังกล่าวช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง และการให้ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ความชื้นมีสถานะสมดุลต่ำทำให้พื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลี่ยนจากสถานะเจลเป็นสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition) และลดอัตราการอบแห้งได้ด้วย งานวิจัยของ P. Ondokmai et al. [9] ได้ทำการวิจัยเชิงสำรวจเพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งข้าวเปลือกของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่มีลักษณะเป็นโดมทำงานร่วมกับเครื่องเติมอากาศโดยใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิง ที่ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นร้อยละ 25 มาตรฐานเปียก พบว่าระบบปรับรังสีดวงอาทิตย์ 350 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิภายในโดมมีค่า 48

องศาเซลเซียส ในขณะที่ภายนอกมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อทำให้อุณหภูมิภายในโดมเพิ่มขึ้น 25 องศาเซลเซียสโดยใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วมกันสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือร้อยละ 15 มาตรฐานเปียกได้ งานวิจัยของ S. Aktar et al. [10] ได้ศึกษาการดำเนินการเพื่อประเมินประสิทธิภาพทางเทคนิคของเครื่องอบแห้งแบบ Low cost mechanical batch dryer (STR) ในประเทศบังคลาเทศ สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ถึง 42 องศาเซลเซียส ความจุในการอบแห้ง 300 กิโลกรัม พบว่าประสิทธิภาพการอบแห้งและการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องอบแห้งมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 22.7 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของชุดเครื่องอบแห้งแบบมาตรฐาน งานวิจัยของ C.K. Saha et al. [11] จาก Bangladesh Agricultural University (BAU) ประเทศบังคลาเทศได้เผยแพร่บทความวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ถูกพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยของตนเองโดยให้ชื่อว่า BAU-STR ซึ่งมีความจุข้าวเปลือกในการอบแห้งที่ 500 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบแห้ง 4-4.7 ชั่วโมง ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีความสามารถในการกระจายความร้อนของอุณหภูมิอากาศอบแห้งผ่านถึงบรรจุเมล็ดข้าวได้อย่างสม่ำเสมอเป็นผลดีต่อการอบแห้ง ประสิทธิภาพของเครื่องอยู่ในเกณฑ์ดีและเครื่องอบแห้งดังกล่าวอาจถูกพัฒนาให้สามารถนำไปใช้งานในประเทศที่กำลังพัฒนาได้ ปี 2018 N. Saelim et al. [12] ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี โดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อนจากการติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าเข้าไปที่แกนกลางของชุดทดสอบทรงกระบอกที่สร้างขึ้น ทำการทดสอบกับข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 23-26 มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของข้าวเปลือก 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 กิโลกรัมต่ออนาที ผล

การทดสอบพบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกมีอิทธิพลต่อสมรรถนะการอบแห้งเป็นอย่างมาก โดยสำหรับอัตราการไหลที่ 1.875 กิโลกรัมต่ออนาที คือค่าที่เหมาะสมต่อสมรรถนะการอบแห้งที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงสุด ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด อีกทั้งยังให้ค่าร้อยละข้าวต้นและดัชนีความขาวของเมล็ดข้าวใกล้เคียงกับชุดควบคุมมากที่สุดอีกด้วย ปี 2020 N. Wongbubpa et al. [13] ได้นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ขึ้น โดยเป็นการป้อนอากาศอบแห้งจากด้านล่างของหอ เมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ในหอบแห้งภายใต้การไหลของลมร้อนแบบตั้งกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่แบบ ขึ้น-ลงตลอดความสูงของหอบแห้งซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หลายแบบภายในหอบแห้ง ทั้งแบบไหลไปพร้อมอากาศ (Co-current flow) แบบไหลสวนทางกัน (Counter current flow) และแบบไหลขวาง (Cross current flow) โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ขวางภายในหอบแห้งเลย ซึ่งเชื่อว่าจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเชื่อว่าจะเป็นแนวทางที่ดีต่อการนำไปปรับใช้ในการอบแห้งวัสดุเกษตรชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็นเมล็ดเช่นเดียวกัน และในปี 2021 N. Wongbubpa et al [14] ได้รายงานผลการศึกษาค่าเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ที่จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้ง โดยได้ทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งการเคลื่อนที่ ความเร็ว เรย์โนลด์นัมเบอร์ และระยะทางรวมของการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกเมื่ออยู่ในหอบแห้งภายในระยะเวลา 3 วินาที ที่ความยาวหอบแห้ง 2 เมตร ผลการจำลองพบว่าการสร้างการไหล

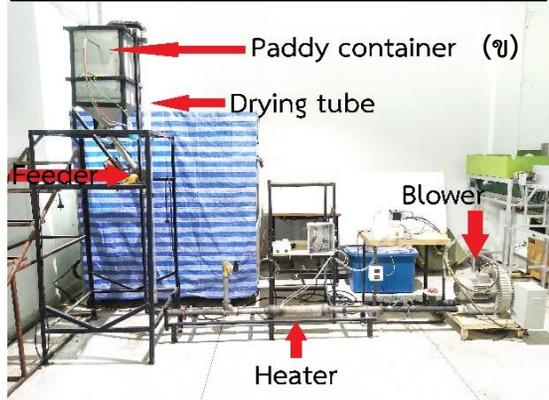
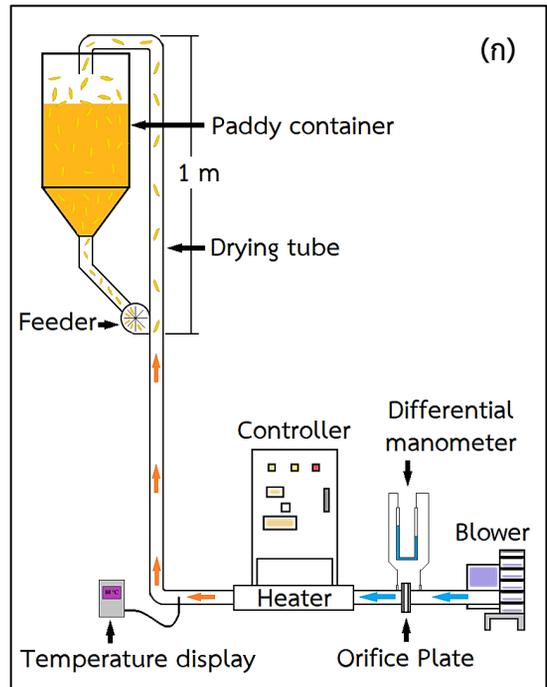
ของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse Flow) สามารถเพิ่มระยะเวลาเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งได้มากกว่าความยาวของหอบแห้ง ความเร็วของไหลในหอบแห้งมีสภาวะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของช่วงอากาศที่กำหนด ซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วนสำหรับการไหลได้เป็นอย่างดีและส่งผลต่อค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ด้วยเช่นกัน

งานวิจัยจำนวนมากพยายามค้นหาเทคนิคใหม่ในกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือก เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศที่ส่งผลต่อเวลาการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยทดสอบเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยความเร็วอากาศสองรูปแบบ คือ ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ และความเร็วอากาศอบแห้งที่ถูกปรับลดลงต่อเนื่องระหว่างทดสอบ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) ขนาดเล็ก (รูปที่ 1) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้ง (Drying tube) ขนาด 3.81 เซนติเมตร (1.5 นิ้ว) ความยาวท่ออบแห้ง 1 เมตร ใช้เครื่องทำความร้อนขนาด 4 กิโลวัตต์ (ขดลวดความร้อนประดิษฐ์) มอเตอร์เครื่องเป่าลมขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ของ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ซึ่งสามารถปรับความร้อนและความเร็วลมได้ การทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก เริ่มจากเครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ของ Frecon รุ่น F003b-4 ดูดอากาศจากสิ่งแวดล้อมผ่านชุดออริฟิซเพลท (Orifice plate) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการเทียบวัดความเร็วอากาศอบแห้งด้วย Differential manometer ของ Kimo รุ่น CP103-



รูปที่ 1 (ก) ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ
(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

PO แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความร้อน (Heater) ที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ของ Shinko รุ่น JCS-33A เพื่อใช้เป็นอากาศอบแห้ง จากนั้นอากาศอบแห้งจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ท่ออบแห้ง (Drying tube) ที่วางตัวในแนวตั้ง ในขณะที่เดียวกันข้าวเปลือกชั้นจะถูกปล่อยจากถังเก็บ (Paddy container) ด้วยตัวป้อนข้าวเปลือก (Feeder) และถูกลำเลียงไปพร้อมกับอากาศอบแห้งจากส่วนล่างของท่อขึ้นสู่ด้านบนและ

ถูกนำออกที่ทางปลายท่อด้านบน ข้าวเปลือกจะตกลงสู่ถังเก็บอีกครั้งและรอการอบแห้งในรอบต่อไป ข้าวเปลือกชื้นและอากาศอบแห้งจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน (Concurrent Flow) เป็นลักษณะของการหอบเอาเมล็ดข้าวให้ไหลไปตามกระแสอากาศ ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นได้เป็นอย่างดี

2.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ

การทดสอบใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม ทำการจำลองความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่จากแปลง ซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก [1] ด้วยการพ่นละอองน้ำลงในกองข้าวเปลือกและคลุกเคล้าให้ทั่วกันก่อนนำไปเก็บในพาชนะที่บดแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวในกองมีความชื้นทั่วถึงกัน [15] ในงานวิจัยนี้เลือกความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยที่ประมาณร้อยละ 24 มาตรฐานเปียก และจะทำการลดความชื้นด้วยชุดทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา [1] โดยใช้ข้าวเปลือกในการทดสอบครั้งละ 15 กิโลกรัม อัตราการป้อนข้าวเปลือก 1.00 กิโลกรัมต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งให้คงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Thermocouple type K เป็นตัววัดค่าอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าท่ออบแห้งและส่งสัญญาณให้กับ Temperature control ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมเครื่องทำความร้อน (Heater) เลือกใช้ความเร็วของอากาศอบแห้งเฉลี่ยสำหรับการทดสอบสองรูปแบบคือ ความเร็วอากาศอบแห้งแบบคงที่ตลอดกระบวนการทดสอบ ที่ 12.80 เมตรต่อวินาที และ ความเร็วอากาศอบแห้งแบบปรับลดลงให้สัมพันธ์กับน้ำหนักของข้าวเปลือกที่ลดลงทุกหนึ่งรอบของการป้อนข้าวเปลือก จนหมดถัง (เท่ากับเวลา 15 นาที คำนวณได้จากอัตราการป้อนข้าวเปลือก) ตลอดการทดสอบ ซึ่งพบว่ามีความลดลงจาก 12.80 จนถึง 8.44 เมตรต่อวินาที อ่านค่าเพื่อ

ปรับตั้งความเร็วทั้งสองรูปแบบจากชุด Differential manometer และ Orifice plate ที่ติดตั้งในระบบ

ขณะทำการอบแห้งข้าวเปลือกเมล็ดข้าวจะไหลเวียนอย่างช้า ๆ และเป็นชั้น ๆ ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ตกลงสู่ถังเก็บ (Paddy container) ทุก 20 นาที จนกระทั่งถึงค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (ประมาณร้อยละ 14) จึงยุติการทดลอง ทำการทดสอบซ้ำรูปแบบความเร็วละ 3 ซ้ำ วัดและบันทึกค่าพลังงานของเครื่องเป่าลมและฮีตเตอร์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าของ Chauvin Arnoux รุ่น C.A 8435 และรุ่น C.A 8334 ตามลำดับ ตัวอย่างข้าวเปลือกถูกนำไปหาค่าความชื้นตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [16] โดยนำเมล็ดข้าวเปลือกจำนวนประมาณ 10 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมจากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วจึงคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่อไป

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะการในอบแห้งจะพิจารณาจากความรวดเร็ว (ระยะเวลา) ในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพที่ใช้ในการอบแห้ง

2.3.1 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

นำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การคำนวณแสดงดังสมการ (1) [12]

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (1)$$

โดยที่

DR คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง)

W_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)

W_f คือ น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

$$Q_s = W_d C_{pd} (T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw} (T_{p2} - T_{p1}) M_i \quad (6)$$

$$Q_a = \dot{m}_a (C_a + C_v H_1) \cdot (T_2 - T_1) \quad (7)$$

2.3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานป้อนภูมิจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) และความสิ้นเปลืองพลังงานพัดยภูมิจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ในการขับลม, SEC_{Blower}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) และ (3) [12]

$$SEC_{Heater} = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (2)$$

$$SEC_{Blower} = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (3)$$

โดยที่

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย)

E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้ง และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับลม (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

2.3.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Paddy Drying, η_{dry})

พิจารณาจากผลรวมของปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำและปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกส่วนด้วยปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ แสดงดังสมการ (4) (5) (6) และ (7) [17]

$$\eta_{dry} = \left(\frac{Q_{evap} + Q_s}{Q_a} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$Q_{evap} = W_d (M_i - M_f) h_{fg} \quad (5)$$

โดยที่

Q_{evap} คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (กิโลจูล)

W_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)

M_i คือ ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

M_f คือ ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของน้ำที่อุณหภูมิ T_{p2} (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

Q_s คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (กิโลจูล)

C_{pd} คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

C_{pw} คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

T_{p1} คือ อุณหภูมิวัสดุก่อนอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

T_{p2} คือ อุณหภูมิวัสดุหลังอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

Q_a คือ ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (กิโลจูล)

\dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง)

C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง-องศาเซลเซียส)

C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง-องศาเซลเซียส)

H_1 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)

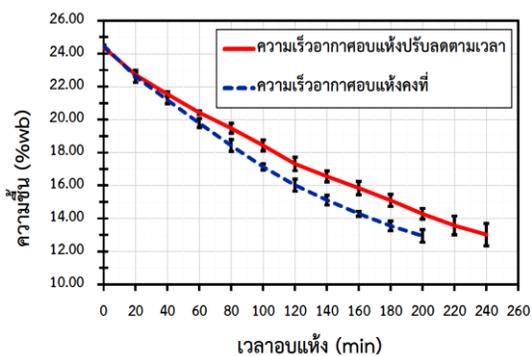
T_1 คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_2 คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง (Drying Behavior)

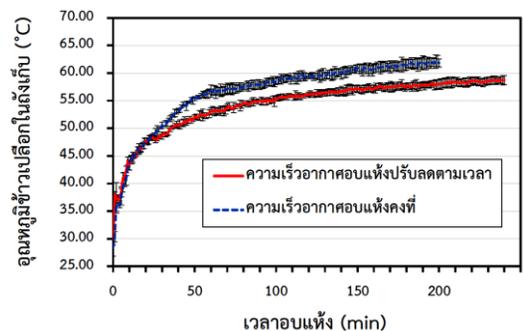
ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการลดลงของความชื้นระหว่างรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งคงที่และความเร็วอากาศอบแห้งที่ถูกปรับลดลงตลอดการทดสอบ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส มีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา

เมื่อพิจารณาการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลาในการอบแห้ง (รูปที่ 2) พบว่ามีลักษณะลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปตลอดช่วงที่ทำการศึกษจากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าหลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที การใช้ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่จะทำให้ความชื้นข้าวลดลงต่ำกว่าการใช้ความเร็วอากาศที่มีการปรับลดความเร็วลงอย่างเห็นได้ชัด และในทางกลับกันเมื่อพิจารณาที่ความชื้นค่าเดียวกัน (หลังจากที่เวลาอบแห้งผ่านไป 20 นาที) การปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งก็จะใช้เวลาอบแห้งที่นานมากกว่าการทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วอากาศอบแห้งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้งที่ทำหน้าที่ช่วยในการระเหยความชื้นออกจากเมล็ดข้าว อีกทั้งความเร็วอากาศอบแห้งทำหน้าที่ช่วยในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศ

สู่เมล็ดข้าวเปลือก ในกรณีการอบแห้งที่ใช้อากาศอบแห้งแบบคงที่ 12.80 เมตรต่อวินาที จะสามารถถ่ายเทความร้อนจากอากาศเข้าสู่เมล็ดข้าวเปลือกได้ดีกว่าในกรณีการอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็วจาก 12.80-8.44 เมตรต่อวินาที ซึ่งหากการอบแห้งมีการถ่ายเทความร้อนไปยังเมล็ดข้าวได้สูง ความร้อนนี้จะช่วยในการขับเคลื่อนความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีตามด้วยเช่นกัน ผลของพฤติกรรมการอบแห้งนี้สอดคล้องกันกับผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บกรณีที่ทำการทดสอบอบแห้งด้วยความเร็วอากาศอบแห้งแบบคงที่จะมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีที่ทำการทดสอบอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็ว และความแตกต่างนี้เริ่มสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่เวลา 20 นาทีเช่นกัน ความแตกต่างระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งดังกล่าวมีค่าประมาณ 5 องศาเซลเซียส ตลอดการทดสอบ



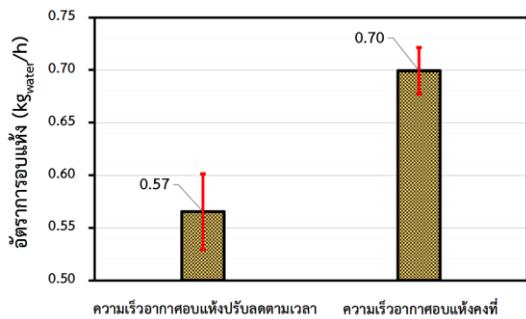
รูปที่ 3 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ

แม้ว่าการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะช่วยชะลอเวลาให้ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งในหอบแห้งได้นานขึ้นแต่กลับมีพฤติกรรมการอบแห้งแตกต่างกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ [4] และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ [18] ซึ่งระบบอบแห้งทั้งสองแบบมีการชะลอการเคลื่อนที่ของ

ข้าวเปลือกเพื่อหน่วงเวลาให้ข้าวเปลือกสัมผัสอากาศร้อนได้นานขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เพราะระบบทั้งสองใช้การหน่วงการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกโดยไม่มี การลดความเร็วของอากาศอบแห้ง จึงทำให้สองระบบนั้นมีข้อได้เปรียบทั้งในเรื่องความเร็วอากาศและระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสอากาศร้อนที่นานเช่นกัน จึงทำให้อัตรการอบแห้งสูงกว่านั่นเอง

3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

คือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งลดถึงความชื้นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรูปที่ 4



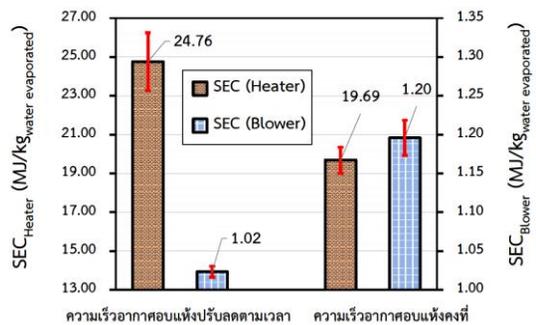
รูปที่ 4 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความเร็วอากาศอบแห้งแตกต่างกัน

พบว่า การปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งลงนั้นให้อัตรการอบแห้งอยู่ที่ 0.57 กิโลกรัม น้ำต่อชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่าการทดสอบในกรณีที่มีความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.70 กิโลกรัม น้ำต่อชั่วโมง เนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวเปลือกได้รับ หากเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้สามารถถ่ายเทมวลความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีขึ้นและอิทธิพลของความเร็วอากาศอบแห้งที่แม้จะมีอุณหภูมิเท่ากันแต่ความเร็วที่สูงกว่าย่อมทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าและทำให้ข้าวเปลือกอุณหภูมิสูงกว่าไปด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้

ตามสมการของ Fick's Law Diffusion [19] สอดคล้องกันกับผลในรูปที่ 3 กล่าวคือการทดสอบในกรณีที่มีความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ ค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บมีค่าสูงกว่าการทดสอบในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้ง ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารออกจากเมล็ดได้ดี จึงทำให้อัตรการอบแห้งสูงกว่า

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งลดความชื้นได้ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก แบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) ที่คำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 19.69 และ 24.76 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย และ ความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ในการขับลม, SEC_{Blower}) ที่คำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 1.02 และ 1.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ความเร็วอากาศอบแห้งแตกต่างกัน

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่สูงกว่าการทดสอบในกรณีที่มีความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ อันเป็นผลมาจากระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานกว่าซึ่งสอดคล้องกันกับรูปที่ 1 ทำให้มีการใช้

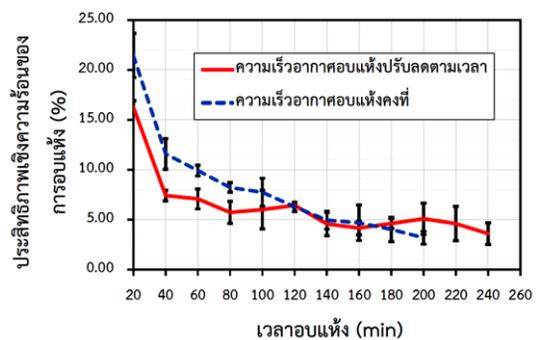
พลังงานไฟฟ้ามากกว่าและทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะสูงตามไปด้วย ในขณะที่การทดสอบในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะต่ำกว่า การทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ อันเป็นผลมาจากเครื่องเป่าลม (Blower) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเนื่องจากอากาศอบแห้งถูกปรับลดความเร็วลงตลอดกระบวนการทดลอง จึงทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะนั้นต่ำลง

3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Paddy Drying, η_{dy})

เมื่อนำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง โดยพิจารณาทุก ๆ 20 นาที ดังรูปที่ 6 พบว่าในช่วงต้นของการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่าในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้ง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเวลาของการอบแห้งนานขึ้น (มีลักษณะที่สอดคล้องกันทั้งสองกรณีการทดสอบ) เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าสูงและเริ่มจากมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงท้ายการทดลอง (มีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยลง ดังรูปที่ 3) ทำให้ปริมาณความร้อนที่ข้าวเปลือกรับไว้และใช้ในการระเหยน้ำในแต่ละรอบเวลาดน้อยลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาที่มากขึ้น

จากผลการทดสอบทั้งหมดนี้ พบว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูง ซึ่งต้องอาศัยอุณหภูมิของอากาศอบแห้งในการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดข้าว แต่การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมุมิจำเพาะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากต้องใช้

พลังงานในการทำความร้อนให้อากาศมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งที่สำคัญ คือความเร็วอากาศอบแห้งและระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งเพื่อถ่ายเทความร้อน โดยที่ต้องไม่ทำให้ความเร็วของอากาศอบแห้งลดลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้กับข้าวเปลือกได้ดีและความชื้นที่ถ่ายเทออกจากข้าวเปลือกยังสามารถระบายสู่อากาศอบแห้งที่เป็นตัวกลางได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นแล้วการเพิ่มอัตราการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมจึงควรเป็นการเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งหรือปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งในแบบอื่น ที่ช่วยห้วงเวลาการสัมผัสถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่มีผลทำให้ความเร็วอากาศอบแห้งลดลง การศึกษาปรับเปลี่ยนการไหลของอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) [13] [14] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยห้วงเวลาการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกในระบบการอบแห้งแบบพาหะลมได้ จึงอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความน่าสนใจ ซึ่งต้องมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งตามเวลา

4. สรุป

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุมด้วยรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน พบว่า อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีผลต่อการอบแห้ง ความเร็วอากาศอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง ผลการทดสอบที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ให้อัตราการ

อบแห้งที่สูงกว่าการทดสอบที่ความเร็วอากาศอบแห้งปรับลดลง อีกทั้งยังพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะต่ำกว่า ถึงแม้ว่าจะให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานหุติยภูมิจำเพาะที่สูงกว่าก็ตาม ผลรวมพลังงานทั้งหมดยังให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะที่ต่ำกว่าและการอบแห้งด้วยความเร็วอากาศคงที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสนับสนุนด้านเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Agriculture, Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice. Bangkok Thailand, Jirawat express co., ltd. 2004.
- [2] S. Prachayawarakorn, S. Ruengnarong and S. Soponronnarit, "Characteristic of heat transfer in two-dimensional spouted bed," *International Journal of Food Engineering Research*, vol. 76, pp 327-333, 2006.
- [3] Z. Sun, W. Yang, T. Siebenmorgen, A. Stelwagen and A. Cnossen, "Thermomechanical transitions of rice kernels," *Cereal Chemistry*, vol. 79, no. 3, pp. 349-353, 2002.
- [4] T. Chitsomboon, S. Khaengkarn and K. Pechnumkheaw, "Free-fall-paddy rice dryer: A fast and energy efficient dryer," in *Proceeding of the 2nd Conference on Energy Network of Thailand*, 2006.
- [5] K. Pechnumkheaw, S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Effect of Air Velocity on Drying Rate of Paddy Using Continuous Free-fall Technique," in *Proceeding of the 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2008.
- [6] S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Free-Fall Dryer: Appropriate Drying Condition for Good Rice Quality," in *Proceeding of the 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2009.
- [7] T. Wichinthanasan, W. Ritthong and K. Sathapornprasath, "Paddy dehydration using Impinging stream dryer combined with Pneumatic dryer," in *Proceeding of the 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2011.
- [8] A.G. Cnossen, T.J. Siebenmorgen and W. Yang, "The glass transition temperature concept in drying and tempering: effect of drying rate," *American Society of Agricultural Engineering (ASAE)*, vol. 45, no. 3, pp 759-766, 2002.
- [9] P. Ondokmai, N. Homdoug, N. Dussadee, P. Yongphet, S. Bouchareon and R. Ramaraj, "Performance of Paddy Greenhouse Solar Dryer Operate with Hybrid Gasification Technology," in *Proceeding of 23rd Tri-U International Joint Seminar and Symposium Bogor Agricultural University*, Indonesia, 2016.
- [10] S. Aktar, R. Kibria, M.M. Alam, M. Kabir and C.K. Saha, "Performance Study of STR

- Dryer for Paddy,” *J. Agril. Mach. Bioresour. Eng.*, vol. 7 no. 1, pp. 9–16, 2016.
- [11] C.K. Saha, Md.A. Alam, Md.M. Alam and P.K. Kalita, “Field Performance of BAU-STR Paddy Dryer in Bangladesh,” *ASABE 2017 Annual International Harvey J.*, 2017.
- [12] N. Saelim, T. Treamnuk and K. Treamnuk, “Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, Jul.-Dec. 2018.
- [13] N. Wongbubpa, K. Treamnuk and T. Treamnuk, “Kinematics motion of paddy in hot air pulse flow,” in *Proceeding of the 13th TSAE International Conferences 187*, Suranaree University of Technology, Thailand, 2020.
- [14] N. Wongbubpa, K. Treamnuk and T. Treamnuk, “Computer Simulation Study of Paddy Motion in Hot Air Drying Chamber,” in *Proceeding of the 22nd TSAE National Conferences*, Khon Kaen University, Thailand, 2021.
- [15] S. Limpiti and V. Changrue, “Effects of rewetting on milling quality of wet season Japanese rice,” *Journal of Agricultural*, vol. 12, no. 2, pp. 134-139, 1996.
- [16] AOAC (Association of Official Analytical Chemists), “Official Methods of Analysis,” 17th ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland, 2000.
- [17] T. Treamnuk, “Drying and Storage of Agricultural Products,” School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, pp. 130-138, 2011.
- [18] N. Wongbubpa and T. Chitsomboon, “Effectiveness of The Elbowed Spouted Bed Paddy Dryer,” in *Proceeding of the 29th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*, Nakhon Ratchasima, 2015.
- [19] Y.A. Cengel, *Heat and Mass Transfer*, 3th ed. Published by McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020, 2006.