



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

อิทธิพลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงต่อการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

Influence of Pulse Flow Drying Air on Paddy Drying with Pneumatic Dryer

ณัฐพงษ์ วงศ์บุบผา^{1)*} กระวี ตรีอำนรรค²⁾ และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค³⁾Nuttapong Wongbubpa^{1)*} Krawee Treeamruk²⁾ and Tawarat Treeamruk³⁾¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี³⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี¹⁾ เลขที่ 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000^{2,3)} เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000¹⁾ School of mechatronics engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan

²⁾ School of mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology³⁾ School of agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology¹⁾ 744 Suranarai Road, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000^{2,3)} 111 University Avenue, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received: 19 April 2022

Revised: 25 October 2022

Accepted: 7 November 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงในท่ออบแห้งแนวดิ่งที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เครื่องต้นแบบที่ถูกใช้ในการศึกษานี้ใช้ท่ออบแห้งแบบท่อตั้งตรงแนวดิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก

พันธุ์หอมปทุม 15 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นเป็นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ทำการอบแห้งด้วยรูปแบบการป้อนอากาศเข้าหอบแห้งที่แตกต่างกันสองสภาวะคือ ที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ และที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้ง ผลการทดสอบพบว่าที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า ใช้พลังงานรวมจำเพาะน้อยกว่า และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าในช่วงความชื้นข้าวเปลือกสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม ความเร็วอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง อัตราการอบแห้ง

Abstract

The objective of this research was to study the influence of drying air velocity by pulse flow in vertical chamber with pneumatic dryer on paddy drying. The pneumatic dryer prototype was used in this study. has the vertical tube with a diameter of 3.81 cm and height 100 cm as a drying chamber. The drying of 15 kg of Hom Pathum paddy at 22–25% initial wet basis moisture content is tested under the drying air temperature 80°C until its moisture is 14% wet basis. The test are performed with two different drying air conditions: 1) constant velocity and 2) pulse flow velocity of drying air for study the drying behavior, drying rate (DR), specific energy consumption (SEC), and thermal efficiency of drying. The results showed that drying with pulse flow velocity conditions gives a shorter time, higher drying rate, lower total SEC consumption, and higher thermal efficiency than drying with constant velocity conditions.

Keywords: Pneumatic Paddy Dryer: Pulse Flow Air Velocity: Drying Rate

*ติดต่อ: nuttapong.wn@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 062-714-9796

1. บทนำ

การอบแห้งวัสดุเกษตรโดยเฉพาะข้าวเปลือกเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ตลอดจนมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวเปลือกในขณะที่ทำการอบแห้ง ซึ่งเป็น

กระบวนการที่ขึ้นกับเวลา อีกทั้งยังได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เช่น มวลของข้าวเปลือกที่ใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความเร็วของอากาศอบแห้ง เป็นต้น อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับงานทางด้านการอบแห้งวัสดุเกษตร การทำวิจัยเพื่อหาวิธีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพยังคงต้องดำเนินการต่อไป

ปัจจุบันเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยอากาศเป็นตัวกลาง เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในงานทางด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานทางด้านการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร เทคนิคที่จะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปแล้วแบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน [1] คือ 1) Active technique เป็นการใช้พลังงานภายนอกเข้ามาช่วยในการกระตุ้น เช่น การใช้อุปกรณ์ทางกลที่ทำให้เกิดการสั่นของของไหล หรือการทำให้พื้นผิวของวัสดุเกิดการสั่น 2) Passive technique เป็นการใช้พลังงานที่สร้างขึ้นมาจาก เช่น การเพิ่มพื้นผิว การทำให้ผิวขรุขระ หรือติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลของอากาศหมุนวน 3) Compound technique เป็นการรวม Active technique และ Passive technique เข้าด้วยกัน นั่นคือ การใช้อุปกรณ์ทางกลที่ทำให้เกิดการสั่นของของไหลพร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลของอากาศแบบหมุนวน โดยวิธีที่นิยมที่สุดสำหรับเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน คือ Passive technique เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการคิดค้นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive technique ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน หรือท่ออบแห้ง เช่น การใส่ไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) [2, 3] การใส่หลอดขด [4] การใส่คียบ [5] การใส่ปีก [6] ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะทำหน้าที่ในการขัดขวางการไหลของอากาศร้อน ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ต้องการนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าที่สูงขึ้น และหากนำเทคนิคเหล่านี้มาใช้กับการอบแห้งวัสดุเกษตรก็จะช่วยให้เกิดการอบแห้งที่รวดเร็วยิ่งขึ้น Bhuiya et al.

[7] ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อผนังเรียบ และท่อที่มีการใส่ไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) โดยไบบิดดังกล่าวมีสัดส่วนความพูน 4 ค่า ($RP = 1.6, 4.5, 8.9$ และ 14.7%) จากการทดลองพบว่าการใช้ไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) สามารถทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นได้มากกว่าท่อผนังเรียบ อีกทั้งยังทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นอีกด้วย Bhuiya et al. [8] ทำการทดลองด้วยการใส่ไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) แบบคู่ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อศึกษาสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลม จากการศึกษาพบว่าที่ระยะไบบิด 1.95 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.35 ต่อมา Skullong et al. [9] ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ด้วยการใส่ปีกสามเหลี่ยมที่มีมุมปะทะการไหลของอากาศ 3 ค่า ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60°) จากการศึกษาพบว่ากรณีปีกมีการทำมุม 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและความต้านทานการไหลมากที่สุด ในขณะที่กรณีปีกมีการทำมุม 30° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด และยังพบว่าการใช้ปีกภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าการใส่หลอดขดและไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) อีกด้วย

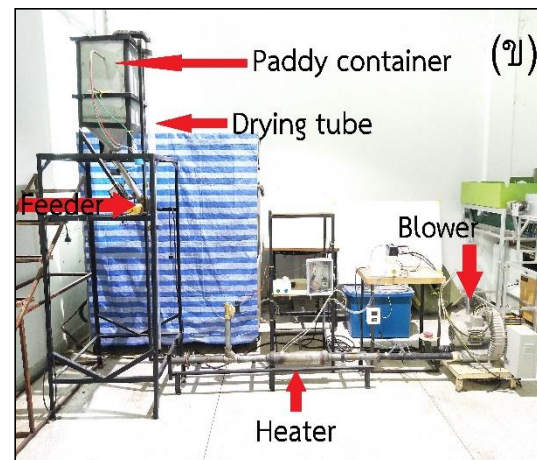
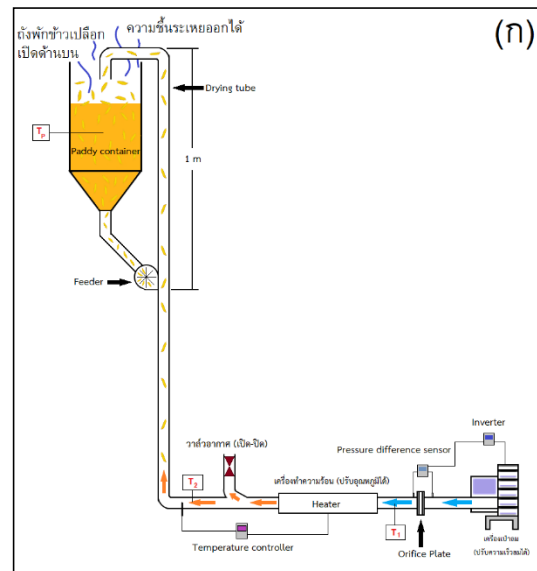
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะคิดค้นต่อยอดและพัฒนาเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนใน

บริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนหรือท่ออบแห้ง อาศัยเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive technique ที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมสร้างการไหลแบบหมุนวนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะพัฒนารูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งให้มีการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) กล่าวคืออากาศจะไหลแบบเป็นช่วงตามคาบเวลาของการจ่ายและหยุดจ่ายอากาศ ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนตัวไปตามพฤติกรรมของอากาศที่ไหลภายในท่ออบแห้ง (เคลื่อนที่แบบขึ้น-ลง ภายในท่ออบแห้งตลอดการทดสอบ) ซึ่งคาดว่าจะช่วยให้เกิดการอบแห้งที่ดีขึ้น เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่หลายรูปแบบภายในท่ออบแห้ง ทั้งแบบไหลไปพร้อมอากาศ (Co-current flow) แบบไหลสวนทางกัน (Counter current flow) และแบบไหลขวาง (Cross current flow) การไหลจะเกิดความปั่นป่วนเป็นอย่างมากและจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ต้องการอบแห้งสูงขึ้นด้วย อีกทั้งด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชแบบ ขึ้น-ลงในท่ออบแห้งนั้นถือเป็นวิธีการที่ดีต่อการอบแห้งที่ช่วยให้เมล็ดพืชมีเวลาได้สัมผัสกับอากาศอบแห้งในท่ออบแห้งนานมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) ขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ก) ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ
(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

เครื่องอบแห้งต้นแบบมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้ง (Drying tube) ขนาด 3.81 เซนติเมตร (1.5 นิ้ว) ความยาวท่ออบแห้ง 100 เซนติเมตร ใช้เครื่องทำความร้อนขนาด 4 กิโลวัตต์ (ขดลวดความร้อนไฟฟ้าประดิษฐ์) มอเตอร์เครื่องเป่าลมขนาด 2.2 กิโลวัตต์ (Ventex รุ่น 2RB 710 H16)

ซึ่งสามารถปรับความร้อนและความเร็วลมได้ การทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก เริ่มจาก เครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย อินเวอร์เตอร์ (Frecon รุ่น F003b-4) ดูดอากาศจาก สิ่งแวดล้อมผ่านชุดออริฟิซเพลท (Orifice plate) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการเทียบวัดความเร็วอากาศอบแห้ง ด้วย Differential manometer (Kimo รุ่น CP103-PO) แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความร้อน (Heater) ที่ควบคุม อุณหภูมิด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Shinko รุ่น JCS-33A) เพื่อใช้เป็นอากาศอบแห้ง จากนั้นอากาศ อบแห้งจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ท่ออบแห้ง (Drying tube) ที่วางตัวในแนวตั้ง ในขณะที่เดียวกันข้าวเปลือกขึ้นจะ ถูกปล่อยจากถังเก็บ (Paddy container) ด้วยตัว บ้อนข้าวเปลือก (Feeder) และถูกลำเลียงไปพร้อม ๆ กับอากาศอบแห้งจากส่วนล่างของท่อขึ้นสู่ ด้านบนและถูกนำออกที่ทางปลายท่อด้านบน ข้าวเปลือกจะตกลงสู่ถังเก็บอีกครั้งและรอการ อบแห้งในรอบต่อไป ข้าวเปลือกขึ้นและอากาศ อบแห้งจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน (Concurrent flow) เป็นลักษณะของการหอบเอาเมล็ดข้าวให้ไหล ไปตามกระแสอากาศ ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยน ความร้อนและความชื้นได้เป็นอย่างดี อุณหภูมิของ เมล็ดข้าวเปลือกในถังพักถูกวัดและบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 นาที ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Elitech รุ่น RC-4) ช่วงการวัดอุณหภูมิ -40 ถึง +85°C

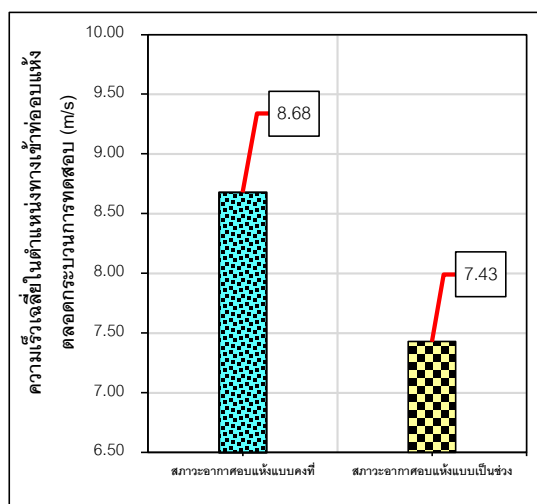
2.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ

การทดสอบใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม ทำการ จำลองความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกที่เก็บ เกียวใหม่จากแปลง ซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก [10] ด้วยการพ่นละอองน้ำลงในกองข้าวเปลือกและคลุกเคล้าให้ทั่วกันก่อนนำไป

เก็บในพาชนะที่บดแสงเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวในกองมีความชื้นทั่วถึงกัน [11] ในงานวิจัย นี้เลือกความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยที่ประมาณร้อยละ 25 มาตรฐานเปียก และจะทำการลดความชื้นด้วยชุด ทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยให้ความชื้นลดลงเหลือ ประมาณร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นที่ เหมาะสมต่อการเก็บรักษา [10] โดยใช้ข้าวเปลือกใน การทดสอบครั้งละ 15 กิโลกรัม อัตราการบ้อน ข้าวเปลือก 1.00 กิโลกรัมต่อนาที ความเร็วอากาศ อบแห้ง 8.68 เมตรต่อวินาที ควบคุมอุณหภูมิอากาศ อบแห้งให้คงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Thermocouple type K เป็นตัววัดค่าอุณหภูมิอากาศที่ ทางเข้าท่ออบแห้ง และส่งสัญญาณให้กับ Temperature control ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมเครื่องทำ ความร้อน (Heater) และทำการทดสอบเปรียบเทียบ การอบแห้งที่สองสภาวะอากาศคือ ที่สภาวะอากาศ อบแห้งแบบคงที่ และที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็น ช่วง (Pulse flow) ซึ่งการเกิดสภาวะอากาศอบแห้งแบบ เป็นช่วงนั้นเกิดขึ้นจากการระบายอากาศอบแห้งด้วย การเปิด-ปิดวาล์วอากาศ ที่ตำแหน่งต้นทางก่อน ทางเข้าท่ออบแห้ง โดยจะระบายอากาศอบแห้งด้วย โซลินอยด์วาล์วแบบเป็นคาบเวลาผ่านการควบคุม เวลาการเปิด-ปิดวาล์วด้วยชุดควบคุมเวลา (Timer Relay) เมื่อทำการเปิดวาล์วระบายอากาศตาม คาบเวลาแล้วจะมีปริมาณสัดส่วนอากาศที่ไหลเข้า ท่ออบแห้งต่ออากาศที่ถูกระบายออกคิดเป็น 3.472 ต่อ 1 (เกิดขึ้นเฉพาะช่วงเวลาที่ระบายอากาศ) รูปแบบ สภาวะอากาศอบแห้งสำหรับการทดสอบแสดงดัง ตารางที่ 1 และความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยใน ตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 สภาวะอากาศที่ใช้สำหรับการทดสอบอบแห้ง

การทดสอบ 1 (สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่)		
เวลา เปิด-ปิดวาล์ว ระบายอากาศ	เปิด (s)	-
	ปิด (s)	ตลอดการ ทดสอบ
การทดสอบ 2 (สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง)		
เวลาการ เปิด-ปิดวาล์ว ระบายอากาศ	เปิด (s)	3
	ปิด (s)	3



รูปที่ 2 ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ

ขณะทำการอบแห้งข้าวเปลือกเมล็ดข้าวจะไหลเวียนอย่างช้า ๆ และเป็นชั้น ๆ ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ตกลงสู่ถังเก็บ (Paddy container) ทุก 20 นาที จนกระทั่งถึงค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (ประมาณร้อยละ 14) จึงยุติการทดลอง (ยุติการทดลองเท่ากันทั้งสองสภาวะอากาศ ที่ 6 ชั่วโมง)

ทำการทดสอบซ้ำที่สภาวะอากาศละ 3 ซ้ำ อุปกรณ์ในการวัดค่าพลังงานของเครื่องทำความร้อนและเครื่องเป่าลมเป็นของ ของ LUZINO รุ่น DD28-15(45) และ International Power Group รุ่น IPG862-15(45) ตามลำดับ ตัวอย่างข้าวเปลือกถูกนำไปหาความชื้นตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [12] โดยนำเมล็ดข้าวเปลือกจำนวนประมาณ 10 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมจากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วจึงนำไปคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่อไป การคำนวณค่าความชื้นแสดงดังสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{W_{i, oven} - W_{f, oven}}{W_{i, oven}} \quad (1)$$

โดยที่

M_w = เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

$W_{i, oven}$ = น้ำหนักข้าวเปลือกก่อนนำเข้าตู้อบลมร้อน (กรัม)

$W_{f, oven}$ = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังนำออกจากตู้อบลมร้อน (กรัม)

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะการในอบแห้งจะพิจารณาจากความรวดเร็ว (ระยะเวลา) ในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพที่ใช้ในการอบแห้ง

2.3.1 อัตราการอบแห้ง

นำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การคำนวณแสดงดังสมการ (2) [13]

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2)$$

โดยที่

DR = อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัม/น้ำต่อชั่วโมง)

W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)

W_f = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

2.3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) และความสิ้นเปลืองพลังงานทฤษฎีจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ในการขับลม, SEC_{Blower}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3) และ (4) [13]

$$SEC_{Heater} = \frac{3.6E_H}{W_i - W_f} \quad (3)$$

$$SEC_{Blower} = \frac{3.6E_B}{W_i - W_f} \quad (4)$$

โดยที่

SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม/น้ำที่ระเหย)

E = พลังงานไฟฟ้าในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้ง และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับลม (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

2.3.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

พิจารณาจากผลรวมของปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำและปริมาณความร้อนที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกส่วนด้วยปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ แสดงดังสมการ (5) (6) (7) และ (8) [14]

$$\eta_{dry} = \left(\frac{Q_{evap} + Q_s}{Q_a} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$Q_{evap} = W_d (M_i - M_f) h_{fg} \quad (6)$$

$$Q_s = W_d C_{pd} (T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw} (T_{p2} - T_{p1}) M_i \quad (7)$$

$$Q_a = \dot{m}_a (C_a + C_v H_1) \cdot (T_2 - T_1) \quad (8)$$

โดยที่

Q_{evap} = ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (กิโลจูล)

W_d = มวลแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)

M_i = ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

M_f = ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

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

Q_s = ปริมาณความร้อนที่ใช้ในเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (กิโลจูล)

C_{pd} = ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

C_{pw} = ความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

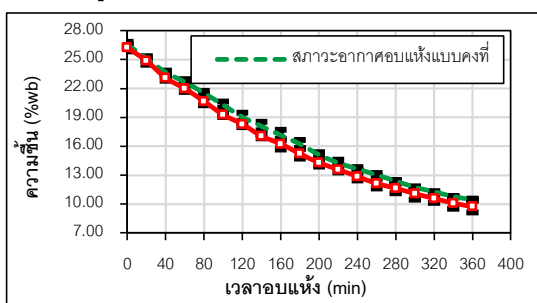
T_{p1} = อุณหภูมิวัสดุก่อนอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

- T_{p2} = อุณหภูมิวัสดุหลังอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
 Q_a = ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (กิโลจูล)
 $\dot{m}_a$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง)
 C_a = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง-องศาเซลเซียส)
 C_v = ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง-องศาเซลเซียส)
 H_1 = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)
 T_1 = อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)
 T_2 = อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

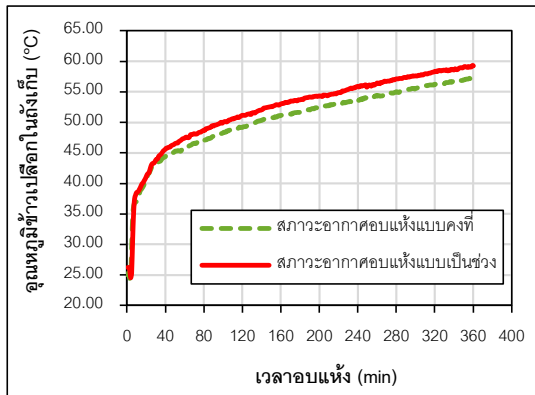
ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เปรียบเทียบพฤติกรรมการลดลงของความชื้นระหว่างสภาวะอากาศอบแห้งสองรูปแบบ คือ ที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ และที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง ทดสอบที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา

เมื่อพิจารณาการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลาในการอบแห้ง (รูปที่ 3) พบว่ามีลักษณะลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปตลอดช่วงที่ทำการศึกษา จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงช่วยให้ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงต่ำกว่าการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ เมื่อเวลาอบแห้งผ่านไปได้ประมาณ 20 นาที เส้นแนวโน้มการลดลงของความชื้นจะแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่าเมื่อทำการทดสอบด้วยการเปิดวาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด (เปิด 3 ปิด 3) จะทำให้ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงตาม เนื่องจากการเปิดวาล์วเป็นการระบายอากาศอบแห้งออกก่อนเข้าเข้าสู่หอบแห้ง ซึ่งจะช่วยลดอัตราการไหลและลดความดันอากาศอบแห้งภายในหอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการหน่วงเวลาการเคลื่อนตัวของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้งให้นานขึ้น สอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Wongbubpa, N. et al. [15] และ ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และคณะ [16] ที่มีการรายงานว่าการสร้างการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงสามารถช่วยหน่วงเวลาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งได้นานขึ้น ซึ่งการที่เมล็ดข้าวเปลือกสามารถใช้เวลานานในหอบแห้งจะเป็นผลดีที่ช่วยให้สามารถรับพลังงานความร้อนจากอากาศอบแห้งได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องอากาศอบแห้งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้งที่ทำหน้าที่ช่วยในการระเหยความชื้นออกจากเมล็ดข้าว [17-19] หากเมล็ดข้าวได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนได้มาก ความร้อนนี้จะช่วยในการขับความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีตามไปด้วยเช่นกัน การรับพลังงานความร้อนได้มากขึ้นแสดงได้ด้วยระดับอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่จะต้องเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลของ

พฤติกรรมการอบแห้งนี้สอดคล้องกันกับผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4

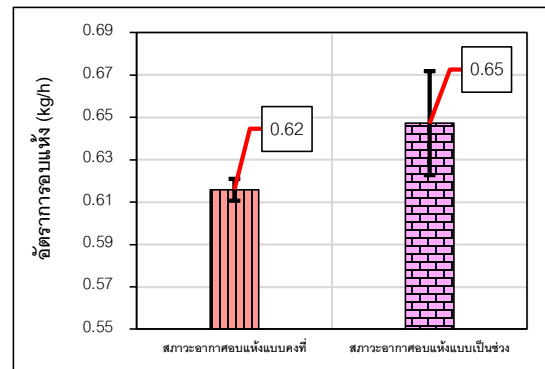


รูปที่ 4 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บในกรณีการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงจะมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ ค่าความแตกต่างนี้เริ่มสังเกตเห็นได้ อย่างชัดเจนที่เวลาประมาณ 40 นาที เป็นต้นไป ความแตกต่างอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บระหว่างสภาวะอากาศอบแห้งทั้งสองมีค่าประมาณ 2 องศาเซลเซียส ตลอดการทดสอบ

3.2 อัตราการอบแห้ง

ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เปรียบเทียบระหว่างอัตราการอบแห้งกับสภาวะอากาศที่ใช้สำหรับการทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 80°C วิเคราะห์อัตราการอบแห้งพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกในช่วงความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งความชื้นลดลงถึงร้อยละ 14 มาตรฐานเปียกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง มีลักษณะดังรูปที่ 5

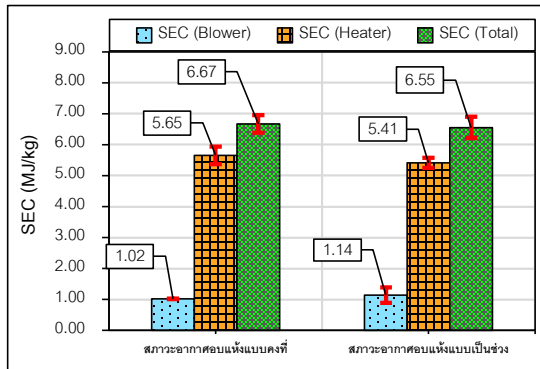


รูปที่ 5 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกที่สภาวะอากาศสำหรับการทดสอบอบแห้งที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบอบแห้ง (รูปที่ 5) พบว่าการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นตาม เนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวเปลือกได้รับ หากเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้สามารถถ่ายเทมวลความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีขึ้นตาม ทั้งนี้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่สูงขึ้นนั้นเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากอิทธิพลรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงที่สามารถหมุนเวียนเวลาการเคลื่อนที่ให้เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนตัวออกจากท่ออบแห้งได้ช้าลง ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาในการสัมผัสและรับพลังงานความร้อนที่นานขึ้น เมล็ดข้าวเปลือกจึงสามารถเก็บและสะสมความร้อนได้มาก (สอดคล้องกับคำอธิบายในหัวข้อที่ 3.1) จึงทำอัตราการอบแห้งสูงขึ้นตาม อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่สูงขึ้นนี้สอดคล้องกันกับผลในรูปที่ 4 อัตราการอบแห้งสำหรับการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 0.62-0.65 kg_{water}/h

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้น ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งลดความชื้นได้ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก แสดงดังรูปที่ 6



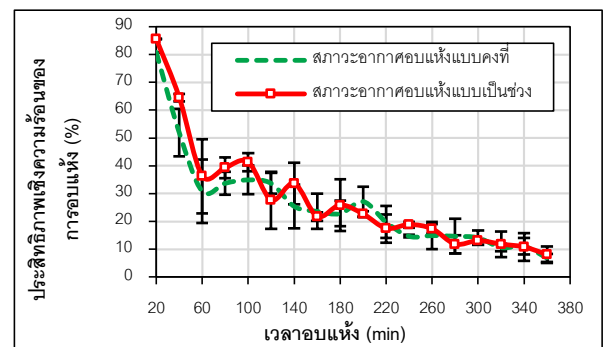
รูปที่ 6 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สภาวะอากาศ สำหรับการทดสอบอบแห้งที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 6 แสดงการพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นสามส่วนคือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานป้อนรวมจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) ที่คำนวณได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 5.41-5.65 MJ/kg_{water} อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานพัดลมจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ไปสำหรับเครื่องเป่าลม, SEC_{Blower}) ที่คำนวณได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 1.02-1.14 MJ/kg_{water} และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวม ($SEC_{Total} = SEC_{Heater} + SEC_{Blower}$) มีค่าอยู่ในช่วง 6.55-6.67 MJ/kg_{water} ผลการทดสอบอบแห้งแสดงให้เห็นว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานป้อนรวมจำเพาะ (SEC_{Heater}) มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง การวิเคราะห์ถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในส่วนนี้เป็นไปตามสมการที่ (3) มีเทอมของค่าพลังงานไฟฟ้าที่วัดและถูกใช้ไปตามเวลา ในระหว่างการทดสอบซึ่งถูกติดตั้งไปในชุดอุปกรณ์การทดสอบ และเนื่องด้วยผลการทดสอบที่สภาวะ

อากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อย (พิจารณาที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก) ซึ่งเป็นเหตุและผลดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ดังจะเห็นได้จากข้อมูลผลการทดสอบดังรูปที่ 3 เมื่อการทดสอบอบแห้งใช้เวลาน้อยจึงทำให้อัตราการบริโภคไฟฟ้าน้อยลงตาม ส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานป้อนรวมจำเพาะลดลงตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานพัดลมจำเพาะ (SEC_{Blower}) จะเห็นได้ว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าที่มากขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะ (SEC_{Total}) แล้ว การทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงก็ยังคงมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะที่ต่ำกว่าการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่อยู่มาก เนื่องจากค่าพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้งมีอิทธิพลที่สำคัญต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าค่าพลังงานที่ใช้ไปสำหรับเครื่องเป่าลม

3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

เมื่อนำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง โดยพิจารณาค่าทุก ๆ 20 นาที ที่ตลอดการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งตามเวลา

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (รูปที่ 7) พบว่าในช่วงต้นของการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งในกรณีที่ทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง ระบบจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่ากรณีที่ทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาของการอบแห้งนานขึ้น (มีลักษณะที่สอดคล้องกันทั้งสองกรณีการทดสอบ) เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นอุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าสูงและเริ่มจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงท้ายการทดลอง (มีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยลง ดังรูปที่ 4) ทำให้ปริมาณความร้อนที่ข้าวเปลือกรับไว้และใช้ในการระเหยน้ำในแต่ละรอบเวลาลดน้อยลงเป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาที่มากขึ้น

4. สรุปผล

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุมด้วยการอบแห้งที่แตกต่างกันสองสภาวะอากาศคือ สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ และสภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง พบว่าการสร้างสภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงสามารถสร้างการหน่วงเวลาสำหรับการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกให้เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้งได้นานขึ้นก่อนถูกเป่าพ่นออกนอกท่ออบแห้งได้ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวช่วยส่งเสริมการสะสมอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิที่สูงเพิ่มขึ้นได้ และเป็นผลดีต่อการอบแห้งที่จะช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทความร้อนในระหว่างที่เมล็ดข้าวเปลือกกลอยอยู่ในท่ออบแห้งได้ การทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงจะ

ให้ค่าความชื้นข้าวเปลือกจะลดลงได้เร็ว อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นประมาณ 4.8 เปอร์เซ็นต์ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะลดลงประมาณ 1.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีที่ทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลของอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการอบแห้งนี้มีศักยภาพที่สามารถนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง เช่นข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ หรือวัสดุเกษตรที่มีลักษณะเป็นเมล็ดได้ด้วยเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่สนับสนุนการทำวิจัยมาด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Liu S and Sakr M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013; 19: 64-81.
- [2] Chuwattanakul V and Eiamsa-ard S. Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. Case Studies in Thermal Engineering. 2019; 13: 100389.

- [3] Eiamsa-ard P, Piriyaungroj N, Thainpong C and Eiamsa-ard S. A case study on thermal performance assessment of a heat exchanger tube equipped with regularly twisted tapes as swirl generators. *Case studies in Thermal Engineering*. 2014; 3: 86-102.
- [4] Akyurek EF, Gelis K, Sahin B and Manay E. Experimental analysis for heat transfer of nanofluid with wire coil turbulators in a concentric tube heat exchanger. *Results in Physics*. 2018; 9: 376-89.
- [5] Nanan K, Thianpong C, Pimsarn M, Chuwattanakul V and Eiamsa-ard S. Flow and thermal mechanisms in a heat exchanger tube inserted with twisted cross-baffle turbulators. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 114: 130-47.
- [6] Skullong S, Promvonge P, Thianpong C and Jayranaiwachira N. Thermal behaviors in a round tube equipped with quadruple perforated-delta-winglet pairs. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 115: 229-43.
- [7] Bhuiya MMK, Chowdhury MSU, Saha M and Islam MT. Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013; 46: 49-57.
- [8] Bhuiya MMK, Sayem ASM, Islam M, Chowdhury MSU and Shahabuddin M. Performance assessment in a heat exchanger tube fitted with double counter twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014; 50: 25-33.
- [9] Skullong S, Promvonge P, Jayranaiwachira N and Thianpong C. Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts. *Chemical Engineering and Processing*. 2016; 109: 164-77.
- [10] Department of Agriculture. Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice. Jirawat express co., ltd. Bangkok Thailand; 2004.
- [11] Limpiti S and Changrue V. Effects of Rewetting on Milling Quality of Wet Season Japanese Rice. *Journal of Agricultural*. 1996; 12(2): 134-139.
- [12] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. 17th ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland; 2000.

- [13] Saelim N, Treeamnuk T and Treeamnuk K. Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique. RMUTP Research Journal. 2018; 12(2): 37-46.
- [14] Treeamnuk T. Drying and Storage of Agricultural Products. School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology; 2011.
- [15] Wongbubpa N, Treeamnuk K and Treeamnuk T. (2020). Kinematics motion of paddy in hot air pulse flow, The 13th TSAE International Conferences 187, Suranaree University of Technology, Thailand.
- [16] Wongbubpa N, Treeamnuk K and Treeamnuk T. Computer Simulation Study of Paddy Motion in Hot Air Drying Chamber, The 22nd TSAE National Conferences; 2021 March 12-14; Khon Kaen, Thailand. Khon Kaen University,. 2021.
- [17] Wongbubpa N and Chitsomboon T. Sustain Spouted Bed Paddy Dryer with Internal Grates, The 28th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2014 October 15-17; Khon Kaen, Thailand. 2014.
- [18] Wongbubpa N and Chitsomboon T. (). Effectiveness of The Elbowed Spouted Bed Paddy Dryer, The 29th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2015 July 1-3; Nakhon Ratchasima, Thailand. 2015.
- [19] Wichinthanassam T, Ritthong W and Sathapomprasath K. Paddy dehydration using Impinging stream dryer combined with Pneumatic dryer, The 25th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2011 October 19 – 21; Krabi, Thailand. 2011.