

การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา

The Study of Paddy Drying in Zig Zag Pipe Spouted Bed Dryer

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา* ทวิช จิตรสมบุญ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

Nuttapong Wongbubpa* Tawit Chitsomboon

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author Email: Nuttapong1441.W@gmail.com

(Received: March 5, 2021; Revised: April 19, 2022; Accepted: April 25, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสามารถขั้นต้นในการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา เครื่องอบแห้งต้นแบบนี้ใช้แนวคิดใหม่ที่สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว โดยการบังคับให้ข้าวเปลือกไหลในท่ออบแห้งแบบเป็นช่องสลับไปมา เทคนิคนี้ช่วยย่นเวลาการเป่าพ่นให้ยาวนานขึ้นกว่าปกติและยังทำให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศร้อนที่มากขึ้น ซึ่งจะเกิดการอบแห้งที่รวดเร็วและใช้พลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการทำงานขั้นต้นด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 น้ำหนัก 4 kg ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C ความเร็วลมในการอบแห้ง 16 m·s⁻¹ อบแห้งในท่ออบแห้งที่ทำจากช่องมุม 90 องศา แบบ 8 ช่อง และแบบ 16 ช่อง ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบ 8 ช่อง การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (Primary Specific Energy Consumption, SEC_{Heater}) ในการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง ในขณะที่พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (Secondary Specific Energy Consumption, SEC_{Blower}) สำหรับการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง มีค่าต่ำกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือกมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง จะให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่มากกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ค่าพลังงานกระตุ้นของการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 43.78 – 170.74 kJ·mol⁻¹

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา อัตราการอบแห้ง การใช้พลังงาน พลังงานกระตุ้น

ABSTRACT

The objective of this research was studied on the drying potentiality of paddy in Zig - zag piped spouted bed dryer. The prototype of the dryer was designed and fabricated in the modern concept which can rapidly dry according to the enforcement of paddy flow in the test section. This technique is used to provide the extended drying period and well mixing of paddy and hot air in the dryer which affected in reducing the drying time and increasing in energy consumption efficiency in the dryer. The

4 kg Khao Dawk Mali 105 rice specie paddy is testing material mixing. Using the 80°C, 100°C and 120°C hot air as the working fluid at the air velocity of 16 m·s⁻¹. Two type of the 90° elbow test section (8 and 16 turning elbow) are used in this experiment. The experimental results show that at high air temperature 16 turning elbow pipe performs higher drying rate and consumes lower primary specific energy (SEC_{Heater}) than 8 turning elbow pipe. While 8 turning elbow pipe gives lower secondary specific energy (SEC_{Blower}) than 16 turning elbow pipe. The lower hot air temperature required the more activated energy in evaporating the moisture of paddy grain than higher hot air temperature. Likewise, 8 turning elbow test section yields more activated energy than 16 turning elbow test section. As the activated energy of 43.78 to 170.74 kJ·mol⁻¹ were used in this experiment.

Keyword: Zig Zag Pipe Spouted Bed Dryer, Drying Rate, Energy Consumption, Activation Energy.

1. บทนำ

เครื่องอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรถือเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญต่อผู้ประกอบการด้านการแปรรูปผลผลิตเกษตรและอาหารเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่ายคือผลผลิตทางการเกษตรยังมีความชื้นสูง กระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องมีการลดความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวเปลือกซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมากในฤดูการเก็บเกี่ยว และมีความชื้นค่อนข้างสูงถึงประมาณ 22 – 25 %wb. [1] จึงจำเป็นต้องลดความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานช่วง 12 – 14 %wb [1] ก่อนการเก็บรักษาเพื่อรอการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายอันเกิดจากเชื้อราและเพื่อให้สามารถยืดอายุการเก็บให้ยาวนานยิ่งขึ้น นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ดังเช่น แก้ไขปัญหาข้อจำกัดในเรื่องแรงงานและพื้นที่สำหรับการตากแบบลาน และแก้ไขปัญหาการเสื่อมสภาพจากการจัดเก็บในขณะที่ข้าวเปลือกยังมีความชื้นสูงอยู่ เทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยแบบต่าง ๆ ที่คิดค้นและพัฒนาขึ้นจะช่วยทำให้สามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และได้คุณภาพข้าวที่ดีหลังจากการอบแห้ง ซึ่งมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน

ไป ดังเช่น การสร้างเครื่องอบแห้งโดยให้เมล็ดข้าวอยู่กับที่ (Fixed – bed dryer) การสร้างเครื่องอบแห้งโดยให้เมล็ดข้าวไหล (Moving – bed dryer) เป็นต้น ในปี 2006 T. Chitsomboon et al. [2] ได้ศึกษาอัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ (เป็นลักษณะที่เมล็ดข้าวตกลงอย่างอิสระจากที่สูงสวนทางกับการไหลของอากาศร้อนที่เป่าขึ้นในท่ออบแห้ง) โดยพบว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจำนวน 1.5 kg จาก 23.75 %db ให้เหลือ 15.5 %db ในเวลาประมาณ 30 s และพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 1.43 – 3.14 MJ·kg_{water}⁻¹ ในปี 2008 K. Pechnumkheaw et al. [3] รายงานว่าความเร็วมีผลอย่างมากต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวแบบหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าเวลาของการอบแห้งลดลงจาก 150 min เหลือ 82 min และ 130 min เหลือ 60 min เมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศอบแห้งจาก 1 m·s⁻¹ เป็น 4 m·s⁻¹ ในปี 2012 C. Nimmol [4] ทำการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งชนิดท่อเกลียว กระบวนการลดความชื้นของวัสดุของเครื่องอบแห้งแบบนี้จะเกิดขึ้นภายในท่อแนวดิ่งที่ใช้เป็นท่ออบแห้ง (Drying

column) ซึ่งอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในการลดความชื้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปพร้อมกับวัสดุที่ต้องการลดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยไปพร้อมกับกระแสอากาศ จากการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาโดยใช้หอบแห้งชนิดเกลียวนั้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึงมากถึง 4.4 - 10.3 %db ภายในระยะเวลาอันสั้น (ต่ำกว่า 5 s) และความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นมีค่าเท่ากับ 17.7 %db และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดของงานวิจัยมีค่าเท่ากับ $1.78 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ ในปี 2018 K. Jaito et al. [5] ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน ทำการทดสอบ 2 รูปแบบคือ การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน และติดตั้งไซโคลน ทำการประเมินคุณภาพข้าวจากค่าความชื้นและค่าร้อยละต้นข้าว รวมทั้งประเมินสมรรถนะในการอบแห้งจากค่าอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อน $6.35 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ให้คุณภาพข้าวเปลือกหลังอบแห้งดีที่สุดและอัตราการอบแห้งสูงสุด โดยมีค่า SEC ต่ำสุด เท่ากับ $5.44 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ ขณะที่การอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนนั้นสามารถนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่จะให้อัตราการอบแห้งที่ลดลงและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่สูงขึ้น เนื่องจากอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความชื้นสูง ทำให้ความสามารถในการระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกในคอลัมน์ต่ำลง เป็นผลให้จำนวนรอบในการอบแห้งเพิ่มขึ้นการใช้พลังงานจึงมากขึ้นตามไปด้วย ในปี 2020 S. Sritunyakorn et al. [6] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ โดยพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนความชื้น รวมถึงวิเคราะห์ค่าของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสีด้วย ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้

อัตราส่วนความชื้นลดลง ใช้เวลาการอบแห้งน้อยลง และ การใช้พลังงานรวมจำเพาะในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น เช่นเดียวกับค่าดัชนีความขาวพบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อย (0.7 %) เช่นกันเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง ในปี 2020 N. Wongbubpa et al. [7] ได้คิดค้นเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกรูปแบบใหม่ โดยนำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวดิ่งแบบเป็นช่วงขึ้น โดยหวังว่าการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลของอากาศให้มีลักษณะเป็นแบบช่วง (Pulse flow) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้ดียิ่งขึ้น หลักการทำงานของระบบดังกล่าวจะเป็นการป้อนอากาศอบแห้งจากด้านล่างของหอบแห้ง เมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ในหอบแห้งภายใต้การไหลของลมร้อนแบบเป็นช่วงจะเกิดการเคลื่อนที่แบบ ขึ้น - ลง ตลอดความสูงของหอบแห้งซึ่งเชื่อว่าจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และในปี 2021 N. Wongbubpa et al [8] ได้รายงานผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้ง ผลการจำลองพบว่าการสร้างการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) สามารถเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งได้มากกว่าความยาวของหอบแห้ง ความเร็วของการไหลในหอบแห้งมีสภาวะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของช่วงอากาศที่กำหนด ซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วนสำหรับการไหลได้เป็นอย่างดีและส่งผลกระทบต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้วยเช่นกัน

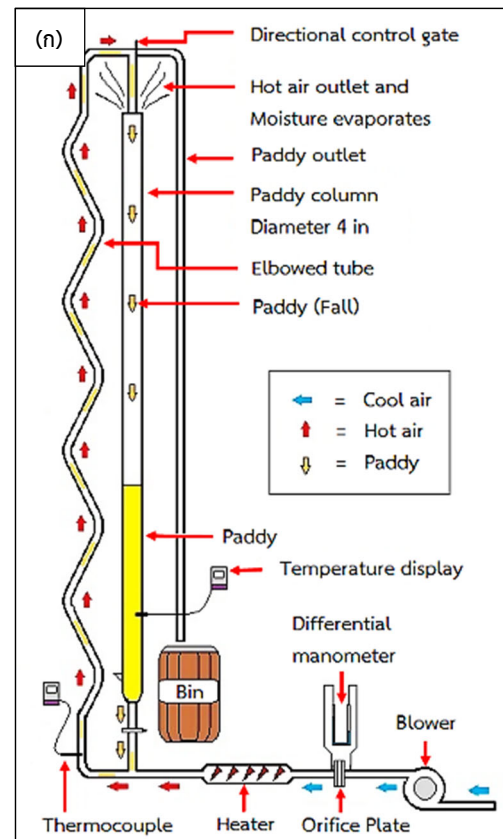
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการอบแห้งข้าวเปลือกรูปแบบใหม่ โดยใช้การเป่าพ่นลมร้อนที่ใช้เป็นอากาศ

อบแห้งให้พามาเมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กันในท่ออบแห้ง โดยได้ออกแบบให้ท่ออบแห้งมีลักษณะเป็นท่อฟันปลา (Zig - Zag) เรียงตัวยาวขึ้นไปในแนวตั้ง เพื่อช่วยหน่วงเวลาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกและทำให้เกิด การไหลปั่นป่วนคลุกเคล้าระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งยิ่งขึ้น ทำการศึกษาถึงความสามารถขึ้นต้นของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าฟันในท่อฟันปลา โดยเป็นการเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกในท่ออบแห้งที่เป็นข้องอแบบ 8 และแบบ 16 ข้องอ เมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยคาดหวังว่าวิธีการนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าฟันในท่อฟันปลา

ต้นแบบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าฟันในท่อฟันปลา แสดงดังรูปที่ 1 มีการหลักการทำงานและส่วนประกอบดังต่อไปนี้ เริ่มจากเครื่องเป่าลม (Blower) ของ Makita รุ่น UB1100 ที่ถูกควบคุมความเร็วด้วยอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac) ของ Yamabishi รุ่น S-260-10M ดูดอากาศจากสิ่งแวดล้อมผ่านชุด Orifice plate เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (Heater) ที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมแบบ PID ของ Shinko รุ่น JCS - 33A เพื่อใช้เป็นอากาศอบแห้ง อากาศอบแห้งนี้จะเคลื่อนที่เข้าสู่ท่ออบแห้งแบบข้องอ (Elbowed tube) ซึ่งเป็นท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวตั้งแบบฟันปลา (Zig - Zag) ในขณะเดียวกันข้าวเปลือกขึ้นจะถูกปล่อยจากถังพัก (Paddy column) และถูกลำเลียงไปพร้อม ๆ กับอากาศอบแห้งให้เข้าสู่ส่วนล่างของท่ออบแห้ง และถูกนำออกที่ทางปลายท่อด้านบน แล้วตกลงสู่ถังพัก (Paddy column) เพื่อรอการอบแห้งในรอบต่อไป



รูปที่ 1 (ก) ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ

(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

การทำงานลักษณะนี้ทำให้ข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในท่ออบแห้งนานยิ่งขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งเพิ่มมากขึ้น ข้าวเปลือกขึ้นและอากาศอบแห้งจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันด้วยการเป่าพ่นเมล็ดข้าวให้ไหลไปตามกระแสอากาศ อากาศอบแห้งที่ไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งที่เป็นช่องจะมีความเร็วสูง และเกิดความปั่นป่วนในการไหลเพิ่มขึ้นเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นได้เป็นอย่างดี จึงคาดว่าจะช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง อีกทั้งยังจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงมากขึ้นอีกด้วย

ต้นแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นในการทดลองนี้เป็นเครื่องอบแห้งขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้งขนาด 0.0381 m (1.5 in) ความยาวท่ออบแห้งที่เป็นช่องโดยรวม 5.26 m ทั้งแบบที่เป็น 8 ช่อง และ 16 ช่อง แสดงดังรูปที่ 2 ความยาวของถังพักข้าวเปลือก (Paddy column) 3 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1016 m (4 in) ใช้เครื่องทำความร้อน (Heater) ขนาด 4 kW มอเตอร์พัดลม (Blower) ขนาด 1.2 kW ซึ่งสามารถปรับความร้อนและความเร็วลมได้



รูปที่ 2 ท่ออบแห้งแบบ 8 และ 16 ช่อง

2.2 การศึกษาความสามารถของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

ศึกษาความสามารถในการทำงานขั้นต้นของเครื่องอบแห้งต้นแบบโดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 80 100 และ 120°C โดยวัดอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้งด้วย Thermocouple type K และควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมแบบ PID ในการทดสอบใช้ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ย $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ซึ่งได้จากการตรวจวัดด้วยชุด Differential manometer และ Orifice plate ทำการทดลองโดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จำนวน 4 kg ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก $1.44 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 21.4 %wb ทดสอบอบแห้งด้วยท่ออบแห้งแบบ 8 และ 16 ช่อง

ในขณะทำการอบแห้งข้าวเปลือก ข้าวเปลือกจะไหลเวียนอย่างช้า ๆ และเป็นขั้น ๆ ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ตกลงสู่ถังพัก (Paddy column) ตามระยะเวลาที่กำหนดในนาที่ที่ 0 1 2 4 8 12 16 20 และตัวอย่างถัดไปจะเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที จนกระทั่งถึงค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (ประมาณ 14 %wb) จึงยุติการทดลอง ตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บไว้จะนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้น ด้วยวิธีอบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 h [9] เมื่อครบเวลาแล้วจะนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วจึงคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่อไป

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะในการอบแห้งจะพิจารณาจากเวลาในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือก

2.3.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

นำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ในรูปของอัตราการอบแห้ง การคำนวณแสดงดังสมการ (1) [10]

$$D.R. = \frac{M_{w,i} - M_{w,f}}{t_{total}} \quad (1)$$

โดย D.R. คือ อัตราการอบแห้ง หน่วย $\%wb \cdot s^{-1}$, $M_{w,i}$ คือ ร้อยละความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น หน่วย $\%wb$, $M_{w,f}$ คือ ร้อยละความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย หน่วย $\%wb$ และ t_{total} คือ ระยะเวลารวมในการอบแห้ง หน่วย s

2.3.2 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้น (Specific Energy Consumption, SEC)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐภูมิ จำเพาะหรือพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออก จะคำนวณ ในรูปของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับ อากาศที่ผ่านเครื่องทำความร้อน การคำนวณแสดงดัง สมการ (2) [10]

$$Q = \dot{m}_a [(1 - W_a) C_a + W_a C_v] (T_{out} - T_{in}) \Delta t \quad (2)$$

โดย Q คือ พลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ หน่วย MJ, $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง หน่วย $kg \cdot s^{-1}$, W_a คือ ความชื้นสัมบูรณ์อากาศที่ทางเข้าเครื่องทำความร้อน หน่วย $kg \cdot kg_{dry \ air}^{-1}$, C_a คือ ความร้อนจำเพาะอากาศแห้งเฉลี่ย หน่วย $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศเฉลี่ย หน่วย $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน หน่วย $^{\circ}C$, T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน หน่วย $^{\circ}C$ และ Δt คือ ระยะเวลาอบแห้งรวมเฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง หน่วย s

อัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}_a$) การคำนวณแสดงดัง สมการ (3) [10]

$$\dot{m}_a = \rho A \bar{V} \quad (3)$$

โดย $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง หน่วย $kg \cdot s^{-1}$, ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศอบแห้งเฉลี่ย หน่วย $kg \cdot m^{-3}$, A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่ออบแห้ง หน่วย m^2 และ $\bar{V}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดเครื่องอบแห้ง หน่วย $m \cdot s^{-1}$

น้ำหนักแห้งของข้าวเปลือกเริ่มต้นเฉลี่ย (w_d) การคำนวณแสดงดังสมการ (4) [10]

$$W_d = W_i (1 - m_{w,i}) \quad (4)$$

โดย W_d คือ น้ำหนักแห้งของข้าวเปลือก หน่วย kg, W_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกชื้นเริ่มต้น หน่วย kg และ $m_{w,i}$ คือ เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้นของข้าวเปลือก (0.214 wb)

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากการอบแห้ง (Δw_w) การคำนวณแสดงดังสมการ (5) [10]

$$\Delta W_w = W_d (M_{d,i} - M_{d,f}) \quad (5)$$

โดย ΔW_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากการอบแห้ง หน่วย kg, $M_{d,i}$ คือ ร้อยละความชื้นเริ่มต้น หน่วย $\%db$ และ $M_{d,f}$ คือ ร้อยละความชื้นสุดท้าย หน่วย $\%db$

ดังนั้นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐภูมิจำเพาะ (Primary Specific Energy Consumption, SEC_{Heater}) ของเครื่องอบแห้งจึงคำนวณได้ดังสมการ (6) [10]

$$SEC_{Heater} = \frac{Q}{\Delta W_w} \quad (6)$$

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (Secondary Specific Energy Consumption, SEC_{Blower}) หรือพลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าลมของเครื่องอบแห้ง คำนวณได้ดังสมการ [10]

$$SEC_{Blower} = \left(\frac{V \cdot I}{w_i - w_f} \right) \Delta t \quad (7)$$

โดย V และ I คือ แรงดันไฟฟ้า หน่วย volt และ กระแสไฟฟ้า หน่วย amp ที่จ่ายให้กับเครื่องเป่าลม ตามลำดับ w_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกชื้นเริ่มต้น หน่วย

kg, w_f คือ น้ำหนักข้าวเปลือกขึ้นสุดท้าย หน่วย kg และ Δt คือ ระยะเวลาอบแห้งรวมเฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง หน่วย s

2.3.3 พลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยนํ้าออกจากเมล็ดข้าวเปลือก (Activation energy)

พลังงานกระตุ้นหรือพลังงานต่ำสุดที่กระตุ้นให้เกิดการระเหยนํ้าออกจากเมล็ดข้าวเปลือก การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นประเมินตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) แสดงดังสมการที่ (8) [11]

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

โดย D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล หน่วย $m^2 \cdot s^{-1}$, D_0 คือ ค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียส หน่วย $m^2 \cdot s^{-1}$, E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น หน่วย $J \cdot mol^{-1}$, R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ ($8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) และ T คือ อุณหภูมิข้าวเปลือก หน่วย K

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) สำหรับการอบแห้งที่ใช้เวลานาน การคำนวณแสดงดังสมการ (9) [12]

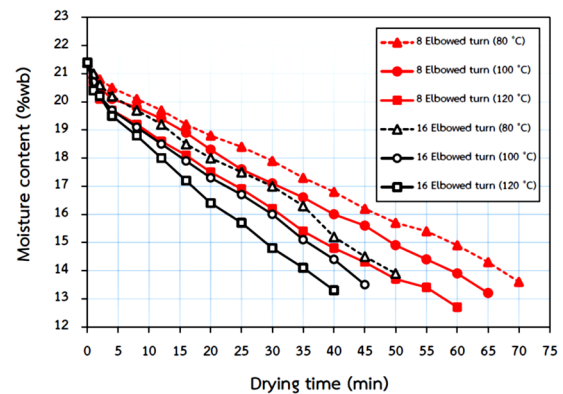
$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (9)$$

โดย MR_t คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ ไม่มีหน่วย, t คือ เวลาในการอบแห้ง หน่วย s และ L คือ ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก หน่วย m

3. ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการอบแห้ง

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าฟันในท่อฟันปลา พบว่าพฤติกรรมการลดลงของความชื้นมีลักษณะดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การลดลงของความชื้นกับเวลา

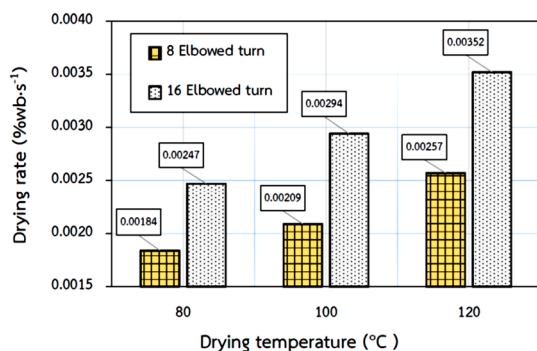
เมื่อพิจารณาความชื้นข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้งพบว่า ความชื้นข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็วและคงที่ตลอดช่วงที่ทำการศึกษา (21.4 - 14 %wb) โดยเฉพาะเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ช่อง เนื่องจากการอบแห้งในท่ออบแห้งนี้เมล็ดข้าวมีเวลาอยู่ในท่ออบแห้งได้นานกว่าแบบ 8 ช่อง อีกทั้งการอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง คาดว่าอากาศอบแห้งที่ไหลภายในท่อ จะเกิดการหมุนวนที่มากกว่าท่ออบแห้งแบบ 8 ช่อง เนื่องจากมีช่วงหักงอของท่ออบแห้งที่มากกว่า (ในตำแหน่งที่มีการหักงอของท่อจะถือเป็นอุปสรรคที่ช่วยขัดขวาง และช่วยหมุนวนการไหลของอากาศและเมล็ดข้าวให้เคลื่อนที่ช้าลง) ซึ่งจะส่งผลดีต่อการอบแห้งที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างเมล็ดข้าวกับอากาศได้มากขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งพบว่าทำให้ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าลดลงอีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ข้าวเปลือกได้รับความร้อนในการระเหยนํ้ามากขึ้น อีกทั้งอากาศที่ร้อนนั้นมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้สามารถรับความชื้นในรูปไอนํ้าที่ระเหยออกจากเมล็ดข้าวได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้เมล็ดข้าวสามารถคายความชื้นออกจากเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เวลารวมสำหรับการอบแห้งลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ [2] [3] เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งชนิดท่อเกลียว [4] และเครื่องอบแห้งแบบเป่าฟันหล่นอิสระ [6] ที่แสดง

ให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งส่งผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเป็นอย่างมาก

ส่วนลักษณะความชื้นที่ลดลงอย่างคงที่อาจเป็นผลเนื่องจากการใช้ความเร็วลมและอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูง จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นผลให้สามารถลดความชื้นได้เร็วและคงที่ตลอดการอบแห้ง

3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

จากการทดสอบพบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้งอย่างชัดเจน โดยเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เช่นเดียวกันกับเมื่อพิจารณาชนิดของท่ออบแห้งจะเห็นได้ว่าท่ออบแห้งแบบ 16 ช่องอ สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้มากกว่าแบบ 8 ช่องอ ที่ทุก ๆ อุณหภูมิ ผลของอัตราการอบแห้งในช่วงความชื้น 21.4 - 14 %wb แสดงดังรูปที่ 4



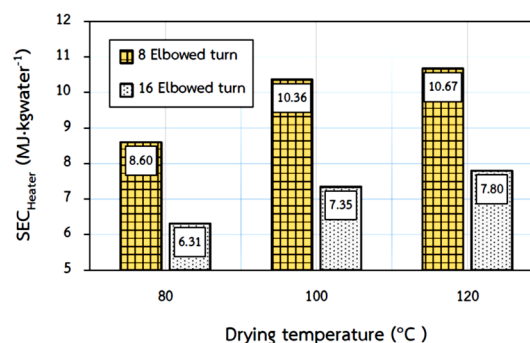
รูปที่ 4 อัตราการอบแห้งกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

จากรูปที่ 4 อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศอบแห้งนั้น สามารถอธิบายได้ตามสมการของ Fick's Law Diffusion [13] ซึ่งปริมาณมวลสารที่ออกจากเมล็ดข้าวเปลือกขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการดังกล่าว และสัมประสิทธิ์การแพร่ของสมการนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกด้วย เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวสูงขึ้นตามเนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนไปแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ

ของเมล็ด และทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้มากขึ้น จึงทำให้อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงมีค่ามากตาม

3.3 พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะในการอบแห้ง (Primary Specific Energy Consumption, SEC_{Heater})

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ (SEC_{Heater}) ที่คำนวณได้ มีค่าอยู่ระหว่าง 6.31 - 10.67 $MJ \cdot kg_{water}^{-1}$ กรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ท่ออบแห้งแบบ 8 ช่องอ พบว่ามีการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะมากที่สุด ส่วนกรณีที่ใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะที่น้อยที่สุดพบในการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ช่องอ ซึ่งมีค่าประมาณ 6.31 $MJ \cdot kg_{water}^{-1}$ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 5



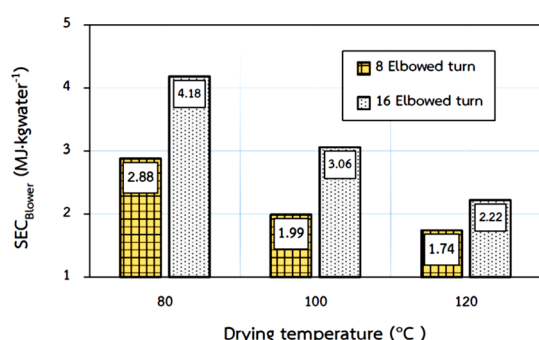
รูปที่ 5 พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นแนวโน้มการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะของเครื่องอบแห้งมีค่าสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากถึงแม้ว่าการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงจะสามารถทำให้ความชื้นถ่ายเทออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้รวดเร็วขึ้น แต่ข้อจำกัดเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ (ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่) ความร้อนส่วนหนึ่งจึงสูญเสียไปกับอากาศขาออกโดยไม่สามารถถ่ายเทให้กับข้าวเปลือกได้ทัน จึงทำให้อัตราการใช้พลังงานต่อมวลน้ำเพิ่มขึ้นแนวโน้มนี้คล้ายกันทั้งท่ออบแห้งแบบ 8 ช่องอ และแบบ 16 ช่องอ โดยท่ออบแห้งแบบ 16 ช่องอ มีแนวโน้มการ

เพิ่มขึ้นของพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะต่ำกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถหน่วงเวลาการอบแห้งได้นานกว่าท่ออบแห้งแบบ 8 ข้องอ

3.4 พลังงานทุติยภูมิจำเพาะในการอบแห้ง (Secondary Specific Energy Consumption, SEC_{Blower})

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (SEC_{Blower}) ที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าลม มีค่าอยู่ระหว่าง $1.74 - 4.18 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ กรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ข้องอ พบว่ามีการใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะมากที่สุด ส่วนกรณีที่ใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะน้อยที่สุดพบในการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ท่ออบแห้งแบบ 8 ข้องอ ซึ่งมีค่าประมาณ $1.74 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานพลังงานทุติยภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 6



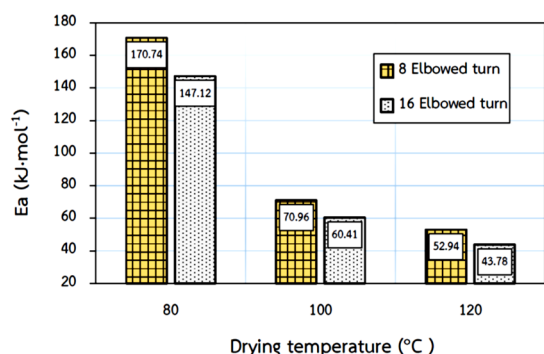
รูปที่ 6 พลังงานทุติยภูมิจำเพาะกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

ชนิดของข้องอที่ใช้เป็นท่ออบแห้งข้าวเปลือกมีผลต่อพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะและทุติยภูมิจำเพาะ กล่าวคือเมื่อใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ข้องอ พบว่ามีการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะต่ำแต่ใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะสูงกว่าท่ออบแห้งแบบ 8 ข้องอ เนื่องจากการเพิ่มข้องอให้กับท่ออบแห้งเสมือนเป็นการสร้างอุปสรรคต่อการไหลอากาศ ซึ่งจะส่งผลทำให้อากาศอบแห้งเกิดการไหลปั่นป่วนและทำให้ต้องสูญเสียความดันในท่ออบแห้งเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าการเพิ่มข้องอจะทำให้ต้องใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องเอาชนะความดันที่สูงตามการเพิ่มขึ้นของ

ข้องอเพื่อให้อากาศมีอัตราการไหลเท่าเดิม แต่ผลกระทบจากการการไหลของอากาศที่ปั่นป่วนมีอิทธิพลที่ดีกว่าในแง่ของการใช้พลังงานน้อย เนื่องจากเมล็ดข้าวเกิดการคลุกเคล้ากับอากาศร้อนในท่ออบแห้งได้ดี ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวจะสามารถอุ่นให้เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิที่สูงและพาความชื้นไปกับอากาศได้มาก จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้ส่งผลให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูง ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งสามารถขจัดน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้มากและส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวม (SEC_{Heater} และ SEC_{Blower}) สำหรับการอบแห้งในท่ออบแห้งแบบ 16 ข้องอ ต่ำกว่าแบบ 8 ข้องอ กล่าวคือถึงแม้จะต้องใช้พลังงานให้กับเครื่องเป่าลมสูงขึ้นแต่ก็ยังคงมีความคุ้มค่าในการเลือกใช้งาน เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (รูปที่ 6) พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นแนวโน้มการใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิอากาศที่สูงส่งผลให้ความหนาแน่น (Density) ของอากาศลดลง ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศลดลงตาม (ดังแสดงในสมการที่ 3) ทั้งนี้อุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นยังส่งผลต่อค่าความหนืด (Viscosity) ของอากาศทำให้ความดันที่เกิดขึ้นในท่ออบแห้งลดลง อากาศสามารถเคลื่อนตัวได้ง่าย จึงทำให้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะมีค่าลดลงตามไปด้วย

3.5 พลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยนํ้าออกจากเมล็ดข้าวเปลือก (Activation energy)

ค่าพลังงานกระตุ้นหรือพลังงานต่ำสุดที่กระตุ้นให้เกิดการระเหยนํ้าออกจากเมล็ดข้าวเปลือกของการทดสอบด้วยเครื่องอบแห้งนี้มีค่าอยู่ระหว่าง $43.78 - 170.74 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ โดยพบว่า กรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการระเหยนํ้าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกับการทดสอบอบแห้งในท่อแบบ 16 ข้องอ ก็จะทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการระเหยนํ้าน้อยกว่าการทดสอบอบแห้งในท่อแบบ 8 ข้องอ ค่าพลังงานกระตุ้นของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 พลังงานกระตุ้นกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

เนื่องจากอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง หากอุณหภูมิอากาศอบแห้งน้อยการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือกก็เกิดขึ้นได้ยากเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจึงต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เพื่อกระตุ้นให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าว เช่นเดียวกันกับกรณีการทดสอบเพิ่มช่องให้ออกท่ออบแห้ง จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมาว่าการเพิ่มช่องให้ออกท่ออบแห้งสามารถลดเวลาการอบแห้งและเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ เพื่อสนับสนุนข้อมูลที่กล่าวไว้แล้วนั้นดังจะเห็นได้จากค่าพลังงานกระตุ้น (รูปที่ 7) ของการทดสอบอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง จะให้ค่าพลังงานกระตุ้นต่ำกว่าการทดสอบอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง ในทุก ๆ อุณหภูมิ

4. สรุปผล

การศึกษาขั้นต้นถึงความสามารถของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นในท่อพ่นปลาเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่าเครื่องอบแห้งมีสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเมื่อใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ช่อง มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะต่ำสุด เท่ากับ $6.31 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ และให้อัตราการอบแห้งสูงสุดที่ $12.67 \% \text{wb} \cdot \text{h}^{-1}$ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูง สามารถนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง เช่น ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ อีกทั้งการเพิ่มช่องให้ออกท่อที่

ใช้เป็นท่ออบแห้งทำให้ช่วยลดเวลาในการอบแห้ง และทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยลดการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะให้ต่ำลงอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ด้วยความระลึกถึง รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีขจิตร์สมบุญรณ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Agriculture, *Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice*. Bangkok, Thailand: Jirawat express co., ltd., 2004.
- [2] T. Chitsomboon, S. Khaengkarn and K. Pechnumkheaw, "Free-fall-paddy rice dryer: A fast and energy efficient dryer," in *The 2nd Conference on Energy Network of Thailand*, 2006.
- [3] K. Pechnumkheaw, S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Effect of Air Velocity on Drying Rate of Paddy Using Continuous Free-fall Technique," in *The 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2008.
- [4] C. Nimmol, "Energy Efficiency of Paddy Dehydration Process using Pneumatic Dryer with Spiral- pipe Drying Column," *KKU Research Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 97-109, 2012.
- [5] K. Jaito, N. Prangpru, T. Treeamnu, J. Jokkew, K. Treeamnu and T. Chuenatsadongkot, "Paddy Drying with Circulating Pneumatic Dryer," in *The 19th TSAE National Conferences*, Kasetsart University, Thailand, 2018.

- [6] S. Sritunyakorn, K. Suluksna and T. Chitsomboon, “ Effect of Drying Air Temperature on Paddy Drying Using Spouted Free Fall Bed Dryer,” in *The 34th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2020.
- [7] N. Wongbubpa, K. Treeamnuk and T. Treeamnuk, “Kinematics motion of paddy in hot air pulse flow,” in *The 13th TSAE International Conferences*, Suranaree University of Technology, Thailand, 2020.
- [8] N. Wongbubpa, T. Yabsungnoen, K. Treeamnuk, T. Treeamnuk and P. Prakotmak, “ Computer Simulation Study of Paddy Motion in Hot Air Drying Chamber,” in *The 22nd TSAE National Conferences*, Khon Kaen University, Thailand, 2021.
- [9] S. Soponronnarit, *Drying Grains and Some Types of Foods*. 7th ed. Bangkok, Thailand: KMITT, 1997.
- [10] N. Wongbubpa, “ Operating Cures of The Elbowed Spouted Bed Paddy Dryer,” M.S. Thesis, Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, pp. 93-97, 2014.
- [11] T.M. Afzal and T. Abe, “ Diffusion in potato during far infrared radiation drying,” *Journal of food engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 353-365, 1998.
- [12] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1975, pp. 47-53.
- [13] Er. R.K. Rajput, *Heat and Mass Transfer*. India: S. Chand & Company Ltd, 2000.