



อิทธิพลของครีบน้ำองการไหลและอุณหภูมิอากาศที่มีต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก

พรสวรรค์ ทองใบ¹ ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์¹ กรณ์ทกมล ภูครองหิน² ปรีชา สมหวัง²
ณัฐพงษ์ ปรภาการ² และ ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา^{2*}

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

* ผู้ประสานงานเผยแพร่, E-mail: nuttapong.wn@rmuti.ac.th

วันที่รับบทความ: 24 มิถุนายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 29 กันยายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 30 กันยายน 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลในบริเวณท่ออบแห้งข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศที่ส่งผลต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ศึกษาการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมมะลิ 105 น้ำหนัก 3 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 21-25 มาตรฐานเปียก อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 60°C และ 80°C ลดความชื้นลงให้เหลือร้อยละ 14 ทดสอบโดยสร้างเครื่องต้นแบบขนาดเล็กที่มีความสูงโดยรวม 2.5 เมตร ออกแบบให้บริเวณห้องแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกเป็นท่อตรงทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว ยาว 1.5 เมตร ทดสอบเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยท่อ 2 รูปแบบ คือ ท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบกี้วยภายใน และท่อตรงที่ติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อ ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ โดยพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเมล็ดข้าวเปลือก การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกกับเวลา อัตราการอบแห้ง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลการทดสอบพบว่าการอบแห้งด้วยท่อตรงที่ติดตั้งครีบกี้วยภายในสามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีกว่าท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบกี้วย พิจารณาที่อุณหภูมิทดสอบ 60°C และเวลาเดียวกันเมื่อยุติการทดสอบ ซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้มากกว่า 4.47 องศาเซลเซียส อิทธิพลนี้ยังมีผลทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าที่มากขึ้นถึง 56.67 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลง 21.42 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิทดสอบ 80°C ให้ผลในทางที่สอดคล้องกัน ซึ่งเป็นทิศทางที่ดีที่แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลภายในท่อสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและส่งผลดีต่อระบบอบแห้งได้

คำสำคัญ: ครีบกี้วยขวางการไหล; เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก; อัตราการอบแห้ง; อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Influence of Flow-Obstructing Fins and Air Temperature on the Paddy Drying Process

Pornsawan Tongbai¹, Taveesin Lekpradit¹, Krankamon Phukhronghin², Preecha Somwang², Natthapong Prapakarn² and Nuttapong Wongbubpa^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Thailand

² Department of Mechatronics Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Thailand

* Corresponding author, E-mail: nuttapong.wn@rmuti.ac.th

Received: 24 June 2025; Revised 29 September 2025; Accepted: 30 September 2025

Online Published: 9 December 2025

Abstract: This research aims to investigate the influence of installing flow obstructing devices within the paddy drying duct and the drying air temperature on the paddy drying process. Experiments were conducted using 3 kilograms of Thai jasmine paddy rice 105 with initial moisture contents ranging from 21-25% wet basis. The drying air temperatures were set at 60°C and 80°C, with the target final moisture content reduced to 14% wet basis. A small-scale prototype dryer, 2.5 meters in overall height, was developed for this study. The heat and mass exchange zone was designed as a straight cylindrical vertical tube, 4.5 inches in diameter and 1.5 meters in length. Two configurations of the drying tube were examined: (1) a straight tube without an internal helical fin, and (2) a straight tube fitted with an internal helical fin. Each configuration was tested in triplicate, focusing on the increase in grain temperature, the reduction of moisture content over time, drying rate, and the specific energy consumption. The results showed that the use of the helical fin significantly enhanced heat transfer to the grains compared to the plain tube. At a drying air temperature of 60°C, the grain temperature increased by more than 4.47% under identical testing durations. This enhancement contributed to a 56.67% improvement in the drying rate, while the specific energy consumption decreased by 21.42%. A similar trend was observed at the higher air temperature of 80°C, confirming the beneficial effects of installing internal flow obstruction devices in enhancing heat transfer and improving overall drying performance.

Keywords: Flow-Obstructing Helical Fins; Paddy Dryer; Drying Rate; Specific Energy Consumption

1. บทนำ

ในกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว การอบแห้งถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง การอบแห้งข้าวเปลือกมักใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำ ระบบไหลของอากาศร้อนในหอบแห้งไม่สามารถถ่ายเทความร้อนไปยังเมล็ดข้าวได้อย่างทั่วถึง ทำให้การอบแห้งใช้เวลานานและสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น อีกทั้งยังส่งผลให้ความชื้นในเมล็ดข้าวลดลงไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของหอบแห้งให้สามารถถ่ายเทความร้อนและความชื้นได้ดียิ่งขึ้นจึงเป็นแนวทางที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะการติดตั้งอุปกรณ์ขบวนการไหล เช่น ครีบบนในหอบแห้ง ซึ่งเป็นแนวคิดเชิงวิศวกรรมที่ใช้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและรบกวนการไหลของอากาศ เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

งานวิจัยจำนวนมากได้ทำการคิดค้นเทคนิคทางวิศวกรรมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในห้องดังนี้ ปี 2012 ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และคณะ [1] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในห้องสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ครีบบนเยื้อง ทำการทดสอบโดยใช้ครีบบนเยื้องติดตั้งในห้องสี่เหลี่ยมจัตุรัส จากการทดสอบพบว่าติดตั้งครีบบนเยื้องภายในห้องให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยห้องที่ไม่ได้ติดตั้งครีบบนเยื้อง การทดสอบยังพบอีกว่าสัดส่วนของความสูงครีบบนต่อความสูงห้อง (e/H) และสัดส่วนของระยะพิชิตต่อความสูงห้อง (PR) ก็มีผลต่อสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเช่นกัน โดยการทดสอบที่ให้ผลของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุดคือ

$e/H=0.3$ และ $PR=1$ เนื่องจากเกิดความปั่นป่วนของการไหลที่มาก อีกทั้งมีผลต่อเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number) ที่สูงมากกว่าการทดสอบอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

ปี 2013 ธีรพัฒน์ ชมพุดำ [2] ศึกษาเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในหอบแห้งด้วยแผ่นใบบิด โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทบทวนเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นใบบิด (Twisted Tape) ในหอบแห้งซึ่งจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบบังคับภายในหอบแห้ง จากการทบทวนงานวิจัยของผู้ที่เกี่ยวข้องพบว่า การติดตั้งแผ่นใบบิดในหอบแห้งช่วยเสริมสร้างการไหลแบบปั่นป่วนที่สูงขึ้นในห้องได้และส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง แต่ต้องสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน การสร้างสภาวะการไหลแบบหมุนวนในหอบแห้งจะช่วยลดความหนาของชั้นขอบเขตทางความร้อนและช่วยเพิ่มระยะเวลาการอยู่ในห้องที่นานยิ่งขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังมีการทบทวนงานวิจัยไปถึงการติดตั้งใบบิดภายในห้องในลักษณะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนอีกด้วย เช่น สมรรถนะทางความร้อนสำหรับการติดตั้งแผ่นใบบิดแบบสลับแกนและมีปีกจะให้ค่าที่สูงกว่าแบบสลับแกนที่ไม่มีปีกหรือแบบมีเฉพาะปีกอย่างเดียว หรือแม้กระทั่งการทบทวนงานวิจัยซึ่งพบว่าการใช้แผ่นใบบิดแบบติดครีบบนจะช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานได้ อีกทั้งการทบทวนงานวิจัยยังพบด้วยอีกว่าการติดตั้งแผ่นใบบิดแบบเกลียวพร้อมทั้งสลับซ้ายขวาจะให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่าหอบแห้งผิวเรียบ การทบทวนงานวิจัยดังกล่าวช่วยยืนยันให้เห็นได้ว่าการสร้างอุปสรรคขบวนการไหลภายในหอบแห้งช่วยเสริมสร้างสมรรถนะทางความร้อนของอากาศได้จริง



ในปี 2013 ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และคณะ [3] ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยทำการติดตั้งครีปรูปตัว W ที่ผิวบนและผิวล่างภายในท่อเพื่อสร้างสภาวะขวางการไหลของอากาศ เปรียบเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีผนังเรียบ ในการทดสอบจะศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลท์ และการสูญเสียความดันในรูปตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor) จากการทดสอบพบว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งครีปรูปตัว W ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานมากกว่าท่อสี่เหลี่ยมผนังเรียบ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงมุมปะทะของการติดตั้งครีปรูปตัว W โดยการทดสอบพบว่าครีปรูปตัว W ที่มุม 45° ให้ค่าการสูญเสียความดันที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่การทดสอบสำหรับการติดตั้งครีปรูปตัว W ที่มุม 20° ให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าการทดสอบอื่น อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยแสดงให้เห็นว่าการสร้างสภาวะขวางการไหลของอากาศในท่อด้วยการติดตั้งครีปรูปตัว W สามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นได้ และเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ต่อยอดในงานทางวิศวกรรมอื่น ๆ ได้ด้วยเช่นกัน

ในปี 2020 อนุชา สายสร้อย และคณะ [4] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมด้วยการสอดใส่แผ่นบิตผิวคลื่นและแกนสลับเข้าไปในท่อ ทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อน (Nu) ตัวประกอบความเสียดทาน (f) ตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (TEF) โดยเปรียบเทียบกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นบิต 6 ชนิดด้วยกันประกอบด้วย แผ่นบิตผิวเรียบ แผ่นบิตผิวคลื่น แผ่นบิตผิวเรียบสลับแกน แผ่นบิตผิวคลื่นสลับ

แกน แผ่นบิตผิวเรียบช่วงกลางสลับแกนด้วยแผ่นบิตผิวคลื่น และสุดท้ายแผ่นบิตผิวคลื่นช่วงกลางสลับแกนด้วยแผ่นบิตผิวเรียบ นอกจากนั้นมีการกำหนดอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีปรูปตัว W ของแผ่นบิตเกลียว (y/W) คงที่ 3.0 เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds Number) อยู่ในช่วง 4,000-8,000 ผลการทดสอบพบว่าแผ่นบิตผิวคลื่นสลับแกนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าท่อที่สอดใส่แผ่นบิตชนิดอื่น ๆ รวมถึงท่อเปล่า (ท่อที่ไม่มีแผ่นบิต) เนื่องจากการสอดใส่แผ่นบิตทำให้เกิดการขวางการไหลของอากาศอันจะทำให้ไหลได้ช้าลง อีกทั้งจะทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างอากาศกับผิวของแผ่นบิตได้ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานสูง และเมื่อพิจารณาถึงแผ่นบิตผิวคลื่นแล้วยังสร้างความเสียดทานระหว่างผิวกับอากาศได้มากขึ้นไปอีก เนื่องจากเกิดพื้นที่สัมผัสที่มากขึ้นของผิวคลื่น จากการทดสอบพบค่าตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดที่ 1.12 ที่เลขเรย์โนลด์ส 4,000

ในปี 2021 เก่งเกล้า ภูณรัช และคณะ [5] ศึกษาผลของการใช้ท่อผิวครีปรูปตัว W ร่วมกับแผ่นบิตเกลียวต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเพิ่มเติมจากการศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งได้ทดลองติดตั้งแผ่นบิตเกลียวภายในท่อผิวเรียบสำหรับการศึกษาค้นคว้าผู้วิจัยได้ติดตั้งแผ่นบิตเกลียวภายในท่อที่มีผิวครีปรูปตัว W เพื่อเสริมสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น ผลการทดลองพบว่าท่อผิวครีปรูปตัว W ที่ติดตั้งแผ่นบิตสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าท่อผิวเรียบอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อตรวจสอบอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีปรูปตัว W



ความกว้างของแผ่นบิตเกลียว (y/W) พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ 3.0 ซึ่งให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์ส ยังส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตาม โดยมีสาเหตุมาจากการไหลของอากาศภายในท่อที่ถูกขัดขวางและก่อให้เกิดการปั่นป่วนของการไหล ซึ่งช่วยส่งเสริมกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างของไหลกับผิวท่อและแผ่นบิตเกลียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในปี 2022 นุรัตน์ ดอกไม้ และคณะ [6] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการใช้แผ่นบิตพื้นผิวคลื่นรูปตัววีสอดใส่เข้าเพื่อทำหน้าที่ขวางการไหลของอากาศ ในการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบมุมของแผ่นบิตที่ 30° และ 60° พร้อมทั้งอากาศที่ใช้ในการทดสอบจะควบคุมด้วยการปรับค่าความเร็วรอบของ Blower ด้วย Inverter ซึ่งจะต้องให้ค่าของเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds Number) อยู่ในช่วง 4,000 ถึง 8,000 ผลการทดสอบพบว่าแผ่นบิตพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่ทำมุม 30° และค่าเลขเรย์โนลด์ส 4,000 ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 1.24

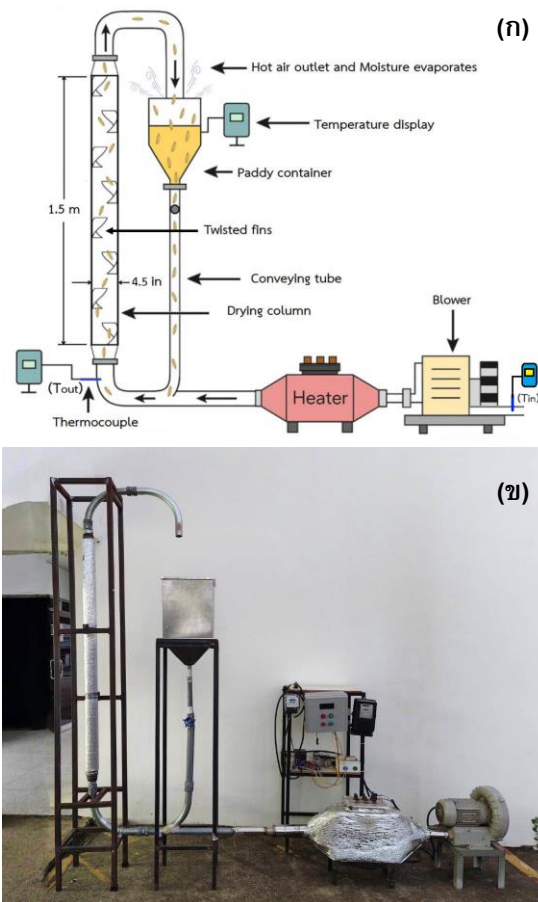
จากการค้นคว้างานวิจัยทางด้านการเพิ่มสมรรถนะและประสิทธิภาพทางความร้อนในท่อ จะเห็นได้ว่านักวิจัยจำนวนมากใช้เทคนิคการสร้างสภาวะการขวางการไหลของอากาศภายในท่อด้วยการเสริมหรือติดตั้งอุปกรณ์ภายในท่อ และถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับการติดตั้งครีบริบหรือไบบิตเกลียวแล้วก็ตาม แต่ยังไม่พบการนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบห้องข้าวเปลือกในรูปแบบแนวตั้ง ดังนั้นเพื่อนำเอาหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบห้องข้าวเปลือกโดยเทคนิคการออกแบบห้องด้วยการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการลำเลียงเมล็ดข้าวในท่อ

การพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างภายในห้องอบแห้งจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญ อันจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลภายในห้องอบแห้ง และอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก พฤติกรรมการอบแห้ง และประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ ซึ่งนับเป็นครั้งแรกที่มีการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ท่อแนวตั้งติดตั้งครีบริบเกลียวแบบภายใน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบและปรับปรุงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งต้นแบบ

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบขนาดเล็กที่มีความสูงของโครงสร้างโดยรวม 2.5 เมตร ความยาวของห้องอบแห้ง 1.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว ภายในห้องอบแห้งติดตั้งครีบริบเกลียวขวางการไหลของอากาศอบแห้งและเมล็ดข้าวเปลือกจำนวน 8 ครีบริบ ครีบริบเกลียวดังกล่าวมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 3.8 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ถูกทำให้บิดตัวในลักษณะคล้ายรีวิบบิ้นและเชื่อมติดกับผนังของห้องอบแห้งแบบวนตามแนววงกลมของผนังห้องจากล่างขึ้นบน จัดให้มีระยะห่างอย่างสม่ำเสมอ (ห้องอบแห้งและครีบริบเกลียวทำจากวัสดุโลหะเหล็ก) แสดงดังรูปที่ 1 เครื่องอบแห้งต้นแบบใช้เครื่องเป่าลม (Blower) ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ (ยี่ห้อ Vortex Blower รุ่น VB-020-DN) เป็นต้นกำลังในการนำพาเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 1 (ก) ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ
(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

ที่ถูกปล่อยจากถังพัก (Paddy Container) ให้ไหลเข้าไปสู่ในส่วนล่างของบริเวณท่ออบแห้ง (Drying Column) เครื่องเป่าลมสามารถปรับความเร็วลมได้ด้วยการปรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ (ยี่ห้อ SAKO รุ่น SKI780) โดยใช้ความเร็วลม 26.3 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะถูกวัดที่ตำแหน่งต้นทางบริเวณก่อนทางเข้าท่ออบแห้งด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (ยี่ห้อ Testo รุ่น 416)

หลักการทำงานจะเริ่มจากลมแรงดันสูงที่ถูกขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเคลื่อนตัวผ่านเครื่องทำความร้อน (Heater) ขนาด 4 กิโลวัตต์ หลังจากที่ถูกเคลื่อนตัวผ่านเครื่องทำความร้อนแล้วจะได้อากาศร้อนในอุณหภูมิตามต้องการซึ่งจะใช้อากาศนี้เป็นตัวกลางในการอบแห้งพร้อมทั้งใช้สำหรับเป็นตัวนำพาเมล็ดข้าวเปลือกให้ไหลเข้าสู่บริเวณท่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิของอากาศดังกล่าวจะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบ PID (ยี่ห้อ Shinko รุ่น JCS-33A) อากาศร้อนที่มีแรงดันสูงจะพัดพาเมล็ดข้าวเปลือกที่ถูกปล่อยให้ไหลตามท่อทางเดินจากถังพักให้ไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งจากด้านล่างขึ้นสู่ส่วนบน ในระหว่างที่เมล็ดข้าวเปลือกถูกลำเลียงเข้าสู่ท่ออบแห้งนั้นเมล็ดข้าวเปลือกจะเคลื่อนตัวผ่านครีบกวนภายในท่ออบแห้งแล้วหลุดผ่านไปสู่ปลายท่อด้านบน จากนั้นเมล็ดข้าวจะถูกลำเลียงต่อไปยังถังพักและรอการอบแห้งในรอบต่อไป

2.2 การทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมมะลิ 105 โดยจำลองความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับเมล็ดข้าวที่เก็บจากฤดูกาลเก็บเกี่ยวใหม่ ซึ่งจะมีค่าความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 20-25 มาตรฐานเปียก [7] ทำโดยพ่นละอองน้ำลงไปบนเมล็ดข้าวและคลุกเคล้าให้ทั่วกันจากนั้นเก็บในภาชนะที่บดแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [8] เพื่อรอสำหรับการทดสอบ งานวิจัยนี้เลือกความชื้นเริ่มต้นสำหรับการทดสอบที่ร้อยละ 25 มาตรฐานเปียก พิจารณาความชื้นสุดท้ายของการทดสอบที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก โดยค่าความชื้นสุดท้ายนี้เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา [7] ปริมาณข้าวเปลือกใน



การทดสอบครั้งละ 3 กิโลกรัม อากาศอบแห้ง 60°C และ 80°C ควบคุมด้วย Temperature Control โดยการติดตั้ง Thermocouple Type K ที่บริเวณทางเข้าของท่ออบแห้ง การทดสอบจะเปรียบเทียบกันระหว่างท่ออบแห้งสองแบบคือ ท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบกเกลียวภายใน และท่อตรงที่ติดตั้งครีบกเกลียวภายในท่อ โดยเงื่อนไขการทดสอบสรุปได้ดังตารางที่ 1

ในขณะที่ระบบอบแห้งกำลังทำงาน เมล็ดข้าวเปลือกที่อยู่ในกระบวนการจะถูกขับเคลื่อนด้วยแรงดันของลมและจะวนซ้ำอย่างช้า ๆ เป็นรอบ ๆ ในระหว่างนั้นจะทำการเก็บตัวอย่างของเมล็ดข้าวเปลือกจากถังพัก ที่รองรับมาจากท่ออบแห้งทุก ๆ 5 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น โดยตัวอย่างที่เก็บมาจะนำมาวิเคราะห์หาความชื้นตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [9] ด้วยการนำเมล็ดข้าวเปลือกไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105±2°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงจะนำมาคำนวณหาค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่อไป การวิเคราะห์ค่าความชื้นแสดงดังสมการที่ 1

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

โดยที่

M_w คือ เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

$W_{i,oven}$ คือ มวลข้าวเปลือกก่อนนำเข้าตู้อบลมร้อน (กรัม)

$W_{f,oven}$ คือ มวลข้าวเปลือกหลังนำออกจากตู้อบลมร้อน (กรัม)

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบ

รูปแบบท่ออบแห้ง	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง
ไม่ติดตั้งครีบกเกลียว	60°C
	80°C
ติดตั้งครีบกเกลียว	60°C
	80°C

การทดสอบจะดำเนินการไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ค่าความชื้นตามที่ต้องการ (ประมาณร้อยละ 14) จึงจะยุติการทดสอบ ในการยุติการทดสอบจะใช้เครื่องวัดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกแบบวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (ยี่ห้อ Kett รุ่น Riceter-fv999) และทำการทดสอบรูปแบบละ 3 ซ้ำ เพื่อยืนยันผล แสดงการคำนวณค่าเบี่ยงเบน (Error Bars) จากการทดสอบซ้ำดังสมการที่ 2 [10]

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

โดยที่

S คือ ค่าเบี่ยงเบน

x คือ ค่าความชื้นข้าวเปลือก ณ เวลานั้น ๆ

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นข้าวเปลือกในข้อมูลชุดนั้น

n คือ จำนวนข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง

2.3 วิเคราะห์การทำงานของกระบวนการอบแห้ง

เพื่อที่จะศึกษาถึงสมรรถนะของกระบวนการสำหรับระบบอบแห้งเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบนี้ จะทำการพิจารณาถึงความสามารถของการเพิ่มอุณหภูมิในเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับท่อที่ติดตั้งครีบกเกลียว ความรวดเร็วในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง



2.3.1 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือก แสดงการคำนวณดังสมการที่ 3 [11]

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (3)$$

โดยที่

DR คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง)

W_i คือ มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)

W_f คือ มวลข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

2.3.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะคำนวณในรูปของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ผ่านเครื่องทำความร้อน แสดงการคำนวณดังสมการที่ 4 [12]

$$Q = \dot{m}_a [(1 - W_a) C_a + W_a C_v] (T_{out} - T_{in}) \Delta t \quad (4)$$

โดยที่

Q คือ พลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ (เมกะจูล)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัมต่อวินาที)

W_a คือ ความชื้นสัมบูรณ์อากาศที่ทางเข้าเครื่องทำความร้อน (กิโลกรัมต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย)

C_a คือ ความร้อนจำเพาะอากาศแห้งเฉลี่ย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)

C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศเฉลี่ย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)

T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

Δt คือ ระยะเวลาอบแห้งรวมเฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง (วินาที)

อัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}_a$) แสดงการคำนวณดังสมการ (5) [12]

$$\dot{m}_a = \rho A \bar{V} \quad (5)$$

โดย

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัมต่อวินาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศอบแห้งเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่ออบแห้ง (ตารางเมตร)

$\bar{V}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดเครื่องอบแห้ง (เมตรต่อวินาที)

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากการอบแห้ง (ΔW_w) แสดงการคำนวณดังสมการ (6) [12]

$$\Delta W_w = W_d (M_{d,i} - M_{d,f}) \quad (6)$$

โดย

ΔW_w คือ น้ำที่ระเหยออกจากการอบแห้ง (กิโลกรัม)

$M_{d,i}$ คือ ร้อยละความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งความชื้นเริ่มต้น)

$M_{d,f}$ คือ ร้อยละความชื้นสุดท้าย (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งความชื้นสุดท้าย)



มวลแห้งของข้าวเปลือกเริ่มต้นเฉลี่ย (W_d) แสดงการคำนวณดังสมการ (7) [12]

$$W_d = W_i(1 - m_{w,i}) \quad (7)$$

โดย

W_d คือ น้ำหนักแห้งของข้าวเปลือก (กิโลกรัม)

W_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)

$m_{w,i}$ คือ เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (0.25)

ดังนั้นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ของเครื่องอบแห้งจึงคำนวณได้ดังสมการ (8) [12]

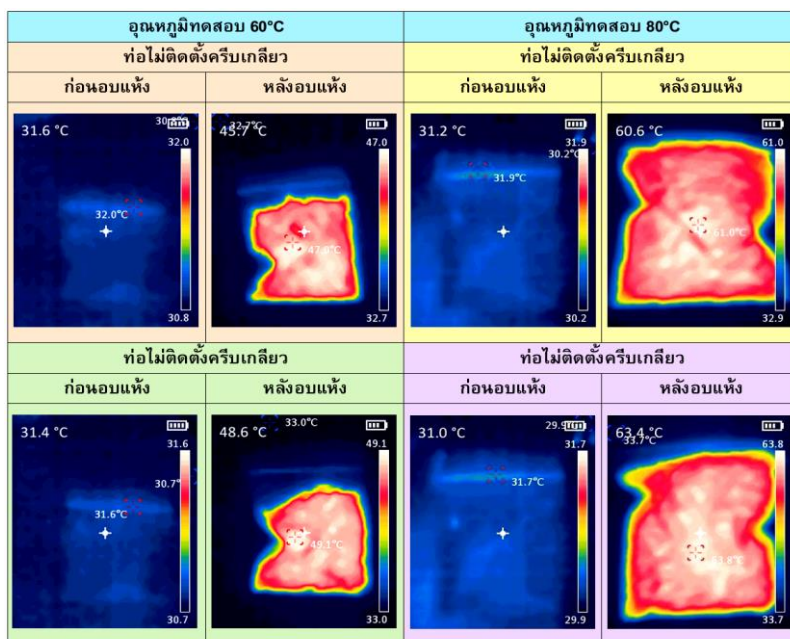
$$SEC = \frac{Q}{\Delta W_w} \quad (8)$$

3. ผลการทดสอบและอภิปราย

จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างท่ออบแห้งแบบท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบกเกลียวภายในกับท่อตรงที่ติดตั้งครีบกเกลียวภายในท่อ พบว่าการติดตั้งครีบกเกลียวมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการอบแห้งของเมล็ดข้าวเปลือก โดยสามารถสรุปผลการทดสอบในแต่ละด้านได้ดังนี้

3.1 ผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก

การถ่ายภาพอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกทำโดยนำกลุ่มตัวอย่างของเมล็ดข้าวเปลือกก่อนกระบวนการอบแห้ง และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง (ทันที) บรรจุใส่ถุงใสแบบบางปิดสนิทปริมาณ 100 กรัม วางบนภาชนะที่ไม่นำความร้อน แล้วถ่ายภาพด้วยกล้องอินฟราเรด (ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UH260B) ผลจากการถ่ายภาพความร้อนเมล็ดข้าวเปลือก แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือก



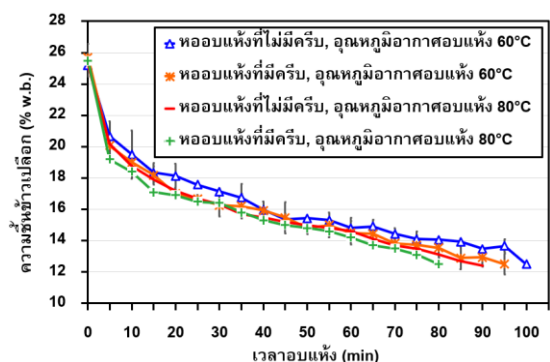
พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าก่อนการอบแห้งในทุกกรณี โดยมีความแตกต่างตามอุณหภูมิของอากาศอบแห้งและลักษณะของท่ออบแห้งที่ใช้ในการทดสอบ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ท่อที่ไม่ติดตั้งครีบกี้วยอุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มจาก 32.0°C เป็น 47.0°C ท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยอุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มจาก 31.6°C เป็น 49.1°C เพิ่มขึ้นมากถึง 2.1°C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ท่อที่ไม่ติดตั้งครีบกี้วยอุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเพิ่มจาก 31.9°C เป็น 61.0°C ท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยอุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มจาก 31.7°C เป็น 63.8°C เพิ่มขึ้นมากถึง 2.8°C ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า การติดตั้งครีบกี้วยาวภายในท่ออบแห้งช่วยเพิ่มการปั่นป่วนของการไหล (Turbulence) ของอากาศร้อนในแนวแกนท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบพา (Convective Heat Transfer) ระหว่างอากาศอบแห้งกับผิวเมล็ดข้าวเปลือก ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกดูดซับพลังงานความร้อนได้รวดเร็วและทั่วถึงมากกว่าท่อแบบเรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิต่ำสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกในท่อที่ติดตั้งครีบกี้ยมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าท่อเปล่า (ท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบกี้ยภายใน) ในทุกกรณี แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงโครงสร้างของท่อ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการอบแห้งโดยเฉพาะในด้านของแรงการระเหยความชื้นภายในเมล็ด ผลลัพธ์นี้ยังสอดคล้องกับพฤติกรรมของการอบแห้ง (การลดลง

ของความชื้น) อัตราการอบแห้งและพลังงานในการระเหยน้ำ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.2 ผลการอบแห้ง

จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 3 พบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงตามเวลาในทุกกรณีของการทดสอบ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของกระบวนการอบแห้งทั่วไป โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งที่ความชื้นยังสูงเมล็ดข้าวสามารถระเหยน้ำได้อย่างรวดเร็วจึงมีอัตราการลดของความชื้นที่ชัดเจน จากนั้นเมื่อใกล้เข้าสู่สภาวะสมดุลความชื้นที่ลดลงจะมีแนวโน้มชะลอตัว ซึ่งสะท้อนถึงการเข้าสู่ช่วงการอบแห้งแบบอัตราตก (Falling-rate Period) [13]

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศสูง (80°C) มีแนวโน้มลดความชื้นได้เร็วกว่าการทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศต่ำ (60°C) และการทดสอบอบแห้งด้วยการติดตั้งครีบกี้ยภายในท่อสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการทดสอบอบแห้งในกรณีที่ไม่ติดตั้งครีบกี้ยด้วยเช่นกัน ทั้งในอุณหภูมิ 60°C และ 80°C ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้จากกลไกของการแลกเปลี่ยนพลังงานในระบบ



รูปที่ 3 การลดลงของความชื้นกับเวลา

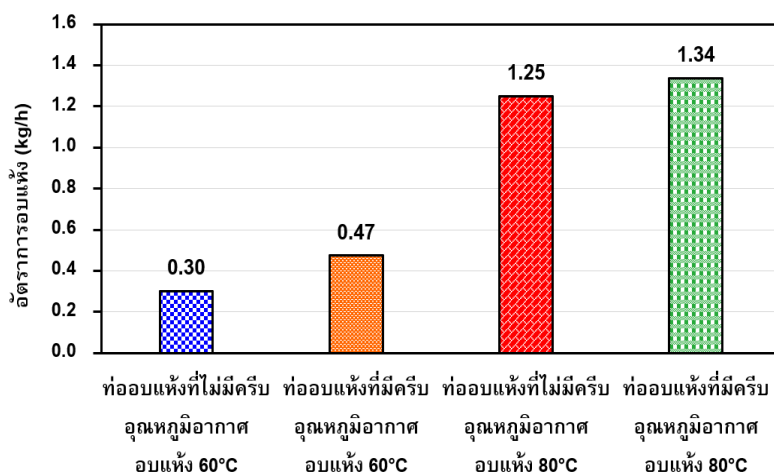


โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความดันไออิ่มตัวที่ผิวเมล็ดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแรงขับในการระเหย (Driving Force for Moisture Diffusion) มากขึ้น [14] ส่วนการติดตั้งครีบกี้วยช่วยเพิ่มความปั่นป่วนให้กับอากาศที่ไหลในท่ออบแห้ง ซึ่งเป็นการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนแบบพา และลดความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary Layer) บริเวณผิวเมล็ดข้าว ทำให้พลังงานความร้อนสามารถส่งเข้าสู่เนื้อของเมล็ดข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.3 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)

จากผลการทดสอบ (รูปที่ 4) พบว่าทั้งอุณหภูมิของอากาศอบแห้งและการติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อต่างมีอิทธิพลเชิงบวกต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวเปลือก การติดตั้งครีบกี้วยภายในท่ออบแห้งจะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบเชิง

ปริมาณจากทั้งสองปัจจัยพบว่าการติดตั้งครีบกี้วยส่งผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าเพียงการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ ดังจะเห็นได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C ท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ถึง 56.67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการทดสอบจาก 60°C เป็น 80°C แล้วพิจารณาผลการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งพบว่าท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้เพียง 7.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับท่อเปล่าดังจะเห็นได้จากข้อมูลตัวเลขในรูปที่ 4 และการวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวมาซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งครีบกี้วยภายในโครงสร้างท่ออบแห้งมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้งที่มากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิสาเหตุสำคัญนี้มาจากลักษณะของการไหลและการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในท่ออบแห้ง โดยการติดตั้งครีบกี้วยจะช่วยสร้างสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพา [15]



รูปที่ 4 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก



ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกได้รับพลังงานความร้อนที่รวดเร็วและสม่ำเสมอมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเพียงอย่างเดียว ซึ่งพฤติกรรมนี้จะช่วยเพิ่มแรงขับสำหรับการระเหยความชื้น (Vapor pressure difference) แต่หากการไหลของอากาศยังอยู่ในสภาวะที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนพลังงานได้เต็มประสิทธิภาพ เช่น การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ก็ยังไม่อาจเร่งอัตราการอบแห้งได้เท่ากับการปรับโครงสร้างท่อให้มีการขัดขวางการไหลได้

ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการติดตั้งครีบกเกี๋ยวและอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวเปลือกอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบ Tukey's Honestly Significant Difference (Tukey's HSD) [10] ในกรณี ที่พบ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อยืนยันว่าการติดตั้งครีบกเกี๋ยวภายในท่ออบแห้งส่งผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเพียงอย่างเดียว แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

ผลจากการวิเคราะห์ความแตกต่างของอัตราการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งของทุกกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยเฉพาะระหว่างกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิ 60°C ที่มีและไม่มีครีบกเกี๋ยว ซึ่งมีค่าความต่างเฉลี่ย (Mean difference) เท่ากับ 0.17 และระหว่างกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิ 80°C กับ 60°C ของกลุ่มที่ไม่มีครีบกเกี๋ยว ซึ่งมีความต่างเฉลี่ยสูงกว่า 0.9 จากข้อมูลยังพบอีกว่าที่อุณหภูมิสูง (80°C) และการติดตั้งครีบกเกี๋ยวยังคงทำให้ค่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ($p=0.0031$) ซึ่งข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าการติดตั้ง

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราการอบแห้ง

กลุ่มเปรียบเทียบ		ความต่าง	p-value
60°C ไม่มีครีบก	60°C มีครีบก	-0.17	0.0001
60°C ไม่มีครีบก	80°C ไม่มีครีบก	-0.95	0.0001
60°C ไม่มีครีบก	80°C มีครีบก	-1.04	0.0001
60°C มีครีบก	80°C ไม่มีครีบก	-0.78	0.0001
60°C มีครีบก	80°C มีครีบก	-0.87	0.0001
80°C ไม่มีครีบก	80°C มีครีบก	-0.09	0.0031

***แสดงนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

ครีบกเกี๋ยวสามารถส่งเสริมประสิทธิภาพของระบบอบแห้งได้ไม่ว่าจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิใดก็ตาม จากข้อมูลนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า การที่ครีบกเกี๋ยวสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องแม้ในสภาวะที่แรงขับสูงอยู่แล้ว แสดงให้เห็นถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบพาที่ได้รับการส่งเสริมจากการปั่นป่วนของอากาศภายในท่อทำให้ชั้นขอบเขตที่พื้นผิวเมล็ดข้าวเปลือกบางลง ความร้อนถูกส่งผ่านได้รวดเร็วและสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการแพร่ของความชื้นภายในเมล็ด ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าผลของการติดตั้งครีบกเกี๋ยวไม่ได้เพียงแค่ส่งเสริมประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำ แต่ยังสามารถทำงาน



ได้ดีและคงความได้เปรียบแม้อยู่ในระบบที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเชิงวิศวกรรมสำหรับการออกแบบระบบบอบแห้งที่ต้องการประสิทธิภาพสูงโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มพลังงานความร้อนที่มากจนเกินไป

3.4 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

จากรูปที่ 5 พบว่าท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าท่อเปล่าทั้งที่อุณหภูมิ 60°C และ 80°C โดยที่อุณหภูมิ 60°C พลังงานที่ใช้ลดลงเฉลี่ย 21.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าการติดตั้งครีบกี้วยช่วยให้กระบวนการอบแห้งใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งจาก 60°C เป็น 80°C ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการที่พลังงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อหน่วยน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงขับ (Driving force) ของการระเหยที่เพิ่มขึ้น เวลาอบแห้งของการอบแห้งที่น้อยลง และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นในสภาวะอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูง อย่างไรก็ตามแม้การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับการติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อจะพบว่าการออกแบบทางกายภาพ (การติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อ) ยังมีอิทธิพลที่เด่นชัดกว่าดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา

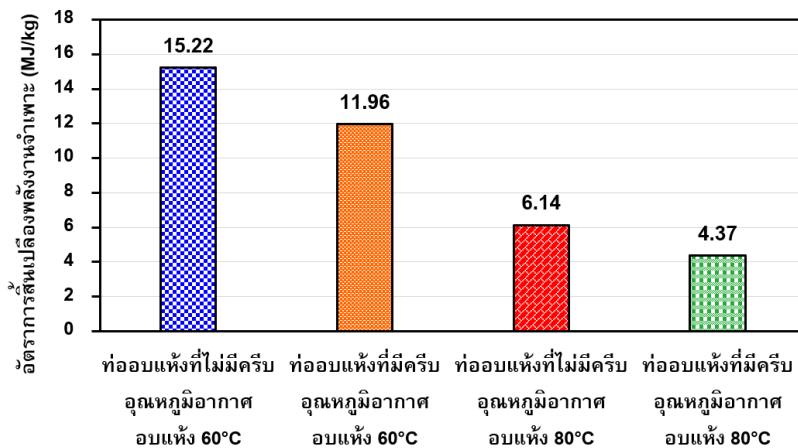
จากผลของอัตราการอบแห้งในหัวข้อที่ผ่านมาเห็นถึงความเชื่อมโยงกับการลดลงของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

จำเพาะมีแนวโน้มลดลงในกลุ่มที่มีอัตราการอบแห้งสูง กล่าวคือเมื่อระบบสามารถระเหยน้ำได้มากขึ้นภายในช่วงเวลาที่สั้นลง (อัตราการอบแห้งสูงขึ้น) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะก็ลดลงตามไปด้วย การเพิ่มอัตราการอบแห้งจึงไม่เพียงแต่ลดเวลาในการทำงานของระบบเท่านั้น แต่ยังช่วยลดพลังงานสุทธิที่ต้องใช้ในการทำให้เมล็ดข้าวแห้งถึงระดับเป้าหมาย (ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก) ทั้งนี้ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะพลังงานของระบบอบแห้งโดยรวม ดังนั้นจึงจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการอบแห้งจากการออกแบบทางกายภาพ เช่น ติดตั้งครีบกี้วยในท่อ ไม่เพียงแต่ช่วยเร่งกระบวนการอบแห้ง แต่ยังเป็นแนวทางสำคัญในการลดพลังงานที่ใช้ต่อหน่วยน้ำที่ระเหยได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ด้วยเช่นกัน

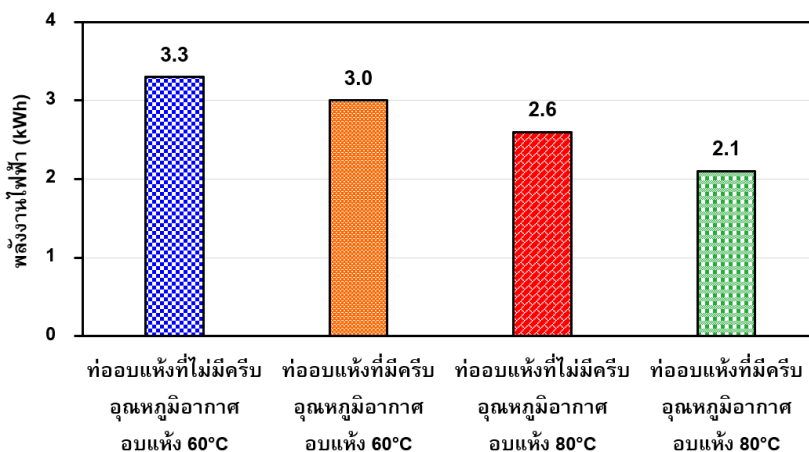
3.5 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้ง

จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการติดตั้งครีบกี้วยในท่ออบแห้ง และเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นที่ 80°C ซึ่งเป็นผลจากประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถเร่งกระบวนการถ่ายเทพลังงานให้กับเมล็ดข้าวเปลือกได้รวดเร็วและต่อเนื่อง ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ต่อหน่วยน้ำที่ระเหยออกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้ง (รูปที่ 6) พบว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งระบบมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในกลุ่มที่มีการติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อ ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้



รูปที่ 5 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ



รูปที่ 6 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้ง

เครื่องเป่าลมต้องใช้กำลังมากขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จะลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแล้วพบว่าระบบที่ติดตั้งครีบกึ่งยวยังคงมีความคุ้มค่าด้านพลังงานมากกว่า กล่าวคือการติดตั้งครีบกึ่งยวช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ แม้ว่าเครื่องเป่าลมจะทำงานหนักขึ้นเล็กน้อย แต่ผลลัพธ์โดยรวม

คือประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบดีขึ้น เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้มากขึ้นในระยะเวลาเท่ากันหรือสั้นกว่าเดิม จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งจึงสะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบทางกล (Mechanical Design) ที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ถึงแม้จะต้องแลกกับพลังงานกลที่ใช้



เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่กลับให้ผลลัพธ์ในแง่ประสิทธิภาพเชิงพลังงานรวมที่ดีกว่าอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้จำกัดอยู่เพียงการอบแห้งปริมาณน้อยในระบบต้นแบบ ซึ่งอาจแตกต่างจากการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม

4. สรุปผล

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ขวางการไหลแบบครีบกเกลียวที่ติดตั้งภายในท่ออบแห้งมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก โดยเฉพาะในแง่ของการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือก อัตราการอบแห้ง และการใช้พลังงานที่ลดลง ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ท่อที่ติดตั้งครีบกเกลียวสามารถเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกได้มากกว่า 4.47 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มอัตราการอบแห้งขึ้น 56.67 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ถึง 21.42 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกันยังพบที่อุณหภูมิ 80°C ที่สามารถยืนยันได้ว่าการติดตั้งครีบกเกลียวภายในท่อจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในระบบอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลแบบครีบกเกลียวภายในท่ออบแห้งจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาระบบอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกต้นแบบที่มีประสิทธิภาพทั้งด้านเวลาและพลังงานในการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังอยู่ในระดับต้นแบบขนาดเล็ก ซึ่งควรมีการขยายผลในระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อยืนยันผลในสภาวะใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่สนับสนุนการทำวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Hoonpong, S. Skullong and P. Promvonge, Heat transfer enhancement in a square channel using angled ribs, The 13th TSAE International Conference, Proceeding, 2012, 366-373. (in Thai)
- [2] T. Chompookham, Thermal enhancement technique in circular duct with twisted tape, UBU Engineering Journal, 2013, 6(2), 85-100. (in Thai)
- [3] P. Hoonpong, S. Eiamsa-ard, S. Juengjaroennirachon, S. Skullong, P. Promvonge and W. Jedsadatanachai, Heat transfer behavior in a square duct using W-shaped fins, The 14th TSAE International Conference, Proceeding, 2013, 591-596. (in Thai)
- [4] A. Sroysang, U. Phongrasamee, C. Choopava and J. Kuntong, Heat transfer enhancement in a circular tube inserted with wavy twisted tape and alternate axes, KKU Science Journal, 2020, 48(3), 440-449. (in Thai)

- [5] K. Kunnarak, M. Pumklom and C. Panyawatchawoong, Effect of ribbed tube with twisted tape on heat transfer, *Journal of Energy and Environmental Technology*, 2021, 8(1), 53-59. (in Thai)
- [6] N. Dokmai, S. Eiamsa-ard, P. Mukda and K. Nanan, Heat transfer augmentation in a circular tube using V-wavy twisted tape, *Agricultural Technology Journal*, 2022, 3(3), 15-26. (in Thai)
- [7] Department of Agriculture, Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice, Bangkok, Thailand, Jirawat Express Co., Ltd., Thailand, 2004.
- [8] S. Limpiti and V. Changrue, Effects of rewetting on milling quality of wet season Japanese rice, *Journal of Agriculture*, 1996, 12(2), 134-139.
- [9] AOAC, Official Methods of Analysis, 17th ed., Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists, 2000.
- [10] G.W. Snedecor and W.G. Cochran, *Statistical methods*, 8th ed., Iowa State University Press, IA, USA, 1989, 152-180.
- [11] S. Nuttaphon, T. Tawarat and T. Krawee, Development of a continuous flow paddy dryer with infrared radial radiation technique, *RMUTP Research Journal*, 2018, 12(2), 37-46. (in Thai)
- [12] N. Wongbubpa and T. Chitsomboon, The study of paddy drying in zig zag pipe spouted bed dryer, *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 2022, 17(1), 53-63. (in Thai)
- [13] M.A. Madlani and A.K. Datta, Drying kinetics of food and biological materials, In: *Handbook of food process modeling and statistical quality control*, CRC Press, FL, USA, 2005, 189-223.
- [14] W.L. McCabe, J.C. Smith and P. Harriott, *Unit operations of chemical engineering*, 7th ed., McGraw-Hill, NY, USA, 2005, 912-922.
- [15] C. Strumillo and T. Kudra, *Drying: Principles, applications and design*, Boca Raton, CRC Press, FL, USA, 2014, 39-66.