

พฤติกรรมการอบแห้งของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ด้วยเตียงลมร้อนแบบพวยพุ่ง เสริมด้วยไมโครเวฟ

Drying Behavior of Khao Dawk Mali 105 Jasmine Paddy in a Spouted Bed Dryer Assisted by Microwave

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน¹ กระวี ตรีอำรรค² เทวรัตน์ ตรีอำรรค² จิรวัดน์ กรุณา^{3*}

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง นครราชสีมา 30000

³วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

Thamarat Yabsungnoen¹ Krawee Treeamnuk² Tawarat Treeamnuk² Jirawat Garluna^{3*}

Siam Technology College 46 Wat Tha Phra Subdistrict, Bangkok Yai District, Bangkok 10600

²Suranaree University of Technology 111 Avenue Muang, Nakhon Ratchasima 30000

³ Siam Technology College 46 Wat Tha Phra Subdistrict, Bangkok Yai District, Bangkok 10600

*Corresponding author Email: jirawatg@siamtechno.ac.th

(Received: June 6, 2025; Revised: July 1, 2025 ; Accepted: August 1, 2025)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการอบแห้งของข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้ง ได้แก่ อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว หรือไมโครเวฟร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม การทดลองแบ่งออกเป็น 4 วิธี ดังนี้ 1.การอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80°C 2.การอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80°C ร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง 160 W 3.การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศปกติ 4.การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับสอง 320W ร่วมกับอากาศปกติ จากการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง ให้ค่าความชื้นสมมูลต่ำที่สุด คือ 4.5%wb และมีอัตราการอบแห้งสูงสุด คือ 1.25 กรัม/น้ำต่อนาที ขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมให้ค่าความชื้นสมมูลสูงที่สุดเท่ากับ 12.5%wb และมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดคือ 0.525 กรัม/น้ำต่อนาที นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า SEC ของวิธีที่ใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงความชื้นต่ำ และให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันต่ำที่สุดที่ 2% ในขณะที่การใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งเพียงอย่างเดียวให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันสูงสุดที่ 38% และใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ความแตกต่างที่ปรากฏนี้สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มพลังงานที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดแรงตึงในเมล็ดและทำให้เมล็ดข้าวเสียหายมากขึ้น จากผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่า วิธีการอบแห้งที่ใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ดี แต่ต้องควบคุมระดับพลังงานอย่างเหมาะสมเพื่อไม่ให้คุณภาพของเมล็ดข้าวลดลง โดยเฉพาะเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าความขาวของข้าวสารที่อาจลดลงจากความรุนแรงของกระบวนการอบแห้ง

คำสำคัญ: การอบแห้งข้าวเปลือก, ไมโครเวฟ, อากาศร้อน, ความชื้นสมมูล, เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน, พลังงานจำเพาะ

ABSTRACT

This study aimed to compare the drying behavior of paddy rice using two main drying approaches: hot air drying alone and microwave-assisted drying combined with ambient air. The experiments were conducted under four drying conditions: (1) hot air drying at 80°C, (2) hot air drying at 80°C combined with microwave energy at 160 W, (3) microwave drying at 160 W combined with ambient air, and (4) microwave drying at 320 W combined with ambient air. The results showed that drying with hot air combined with microwave energy at 160 W yielded the lowest equilibrium moisture content, at 4.5% wet basis, and the highest drying rate, at approximately 1.25 g_{H₂O}/min. In contrast, drying with microwave energy at 160 W combined with ambient air resulted in the highest equilibrium moisture content, at 12.5% wet basis, and the lowest drying rate, approximately 0.525 g_{H₂O}/min. Furthermore, it was found that the specific energy consumption (SEC) of the hot air-microwave method tended to increase significantly in the low-moisture content region. This method also resulted in the lowest head rice yield, at 2%. On the other hand, microwave drying at 160 W alone yielded the highest head rice percentage, at 38%, and the lowest SEC. These differences indicate that excessive energy input may generate internal stresses within the kernels, leading to greater damage. Overall, the combination of hot air and microwave drying effectively reduces drying time; however, energy input must be carefully controlled to preserve the quality of the rice, particularly the head rice yield and whiteness, which may deteriorate under overly intense drying conditions.

Keywords: Paddy drying, Microwave, Hot air, Equilibrium moisture content, Head rice yield, Specific energy consumption.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการเกษตรถือเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทยที่มีสัดส่วน 8-10% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) ซึ่งประเทศไทยยังติดอันดับต้น ๆ ของโลกในด้านการส่งออกสินค้าเกษตรอื่นได้แก่ ยางพาราและมันสำปะหลังที่มีส่วนแบ่งการตลาดโลกสูงกว่า 20% นอกจากนี้ยังมีสินค้าเกษตรอย่างอื่นที่ส่งออกที่สำคัญเช่นกันโดยเฉพาะข้าว ซึ่งไทยเป็นผู้ทรงออกรายใหญ่เป็นอันดับสองของประเทศไทยและอันดับสองของโลกคิดเป็น 19.2% ของมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรของไทย

กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพและมูลค่าของผลผลิตทางเกษตรอย่างมากเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ต้องรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้คงคุณภาพจนกว่าจะถึงมือผู้บริโภค กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวยังมีหลายกระบวนการเช่น การคัดแยก กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการแปรรูปและการลดความชื้นหรือการอบแห้ง(Drying) โดยเฉพาะกระบวนการลดความชื้นมีความสำคัญอย่างยิ่งในแง่ของการถนอมอาหารให้สามารถเก็บรักษาได้อย่างยาวนานกว่าปกติ

ตามปกติแล้วหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกจะต้องมีการลดความชื้นในข้าวเปลือกซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 22-24% wet

basis (wb) ให้เหลือความชื้น 14%wb จึงจะสามารถนำมาเก็บรักษาได้อย่างปลอดภัยและจำหน่ายให้ได้ราคาที่เหมาะสมแก่โรงสีหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยวิธีลดความชื้นที่นิยมในประเทศไทยคือการตากลานซึ่งเป็นวิธีนำข้าวเปลือกมาเทลงผ้ามุ้งและเกลี่ยให้กระจายเท่ากันโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการลดความชื้น ซึ่งใช้เวลาในการตาก 2-3 วัน หากมีแดดต่อเนื่อง การตากลานจึงเป็นวิธีที่เรียบง่ายต้นทุนต่ำสุดใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวและไม่พึ่งพาเครื่องจักร อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการตากลานจะเป็นวิธีที่นิยมและต้นทุนต่ำสุดแต่เนื่องจากการขยายกำลังผลิตเพื่อการส่งออกนั้นกลับก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการตากข้าวและส่งผลต่อการกีดขวางจราจรสัญจรของยานพาหนะ อีกทั้งยังมีปัญหาเรื่องของการควบคุมคุณภาพของข้าวเปลือกที่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างสม่ำเสมอรวมถึงการควบคุมเวลาการลดความชื้นไม่สามารถกำหนดได้ซึ่งขึ้นกับสภาพภูมิอากาศในช่วงเวลานั้นด้วย เพราะฉะนั้นการนำวิธีการอื่นในการลดความชื้นข้าวเปลือกจึงถูกนำมาคิดค้นและวิจัยในปัจจุบันอย่างแพร่หลายและวิธีลดความชื้นที่นิยมมากที่สุดคือการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งคือการลดความชื้นในข้าวเปลือกโดยใช้พลังงานความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่สัมผัสกับเมล็ดข้าว อากาศร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะสามารถรับไอน้ำได้มากขึ้น เมื่ออากาศร้อนสัมผัสกับข้าวเปลือกพลังงานความร้อนจะถ่ายเทเข้าสู่เมล็ดข้าว ทำให้อุณหภูมิของเมล็ดเพิ่มขึ้น และเร่งการระเหยของน้ำออกจากผิวและภายในเมล็ด ส่งผลให้ความชื้นในข้าวเปลือกลดลงอย่างต่อเนื่อง กระบวนการนี้จึงขึ้นอยู่กับทั้ง อุณหภูมิของอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์, ความเร็วลม, และระยะเวลาในการอบ [1]–[3]

ชนิดของพลังงานที่ใช้ (เช่น ไฟฟ้า, ไอน้ำ, แก๊สชีวมวล) รวมถึงวิธีการอบแห้ง (เช่น การอบแบบต่อเนื่องหรือแบบเป็นชุด) ล้วนมีผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการอบแห้ง, ปริมาณพลังงานที่ใช้ และคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการ

อบ เช่น สี เปอร์เซ็นต์การแตกหัก ดังรายงานของ Chaiworapuek และคณะ พบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนที่มีการควบคุมทิศทางการไหลของอากาศสามารถลดความชื้นได้รวดเร็วและใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การจำลอง CFD เพื่อวิเคราะห์การไหลในหอบแบบดิ่งแบบเป็นช่วง [4] ขณะที่งานวิจัยของ Talib และคณะ ได้ศึกษาผลของวิธีการอบแห้งเชิงอุตสาหกรรม ได้แก่ การอบแบบเตียงเอียง (Inclined Bed Dryer) และฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized Bed Dryer) โดยพบว่าการอบแห้งแบบสองขั้นตอน (FBD ตามด้วย IBD) ให้ผลดีที่สุดทั้งในแง่ความแข็งแรงของเมล็ดและการลดการแตกร้าวของข้าวเปลือก [5]

งานวิจัยของ Duygu Evim ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ Spouted Bed โดยออกแบบฐานเครื่องให้เป็นทรงพาราโบลอยด์ พร้อมติดตั้งท่อลมร้อนแบบมีรูพรุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของอากาศภายในเตียงอบ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศเข้าเตียงที่ 110°C สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 35% เหลือต่ำกว่า 15% ภายในเวลาเพียง 30 นาที ซึ่งเร็วกว่าการใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าถึง 50–60% และยังช่วยลดการใช้พลังงานโดยรวมได้อีกด้วย [6]

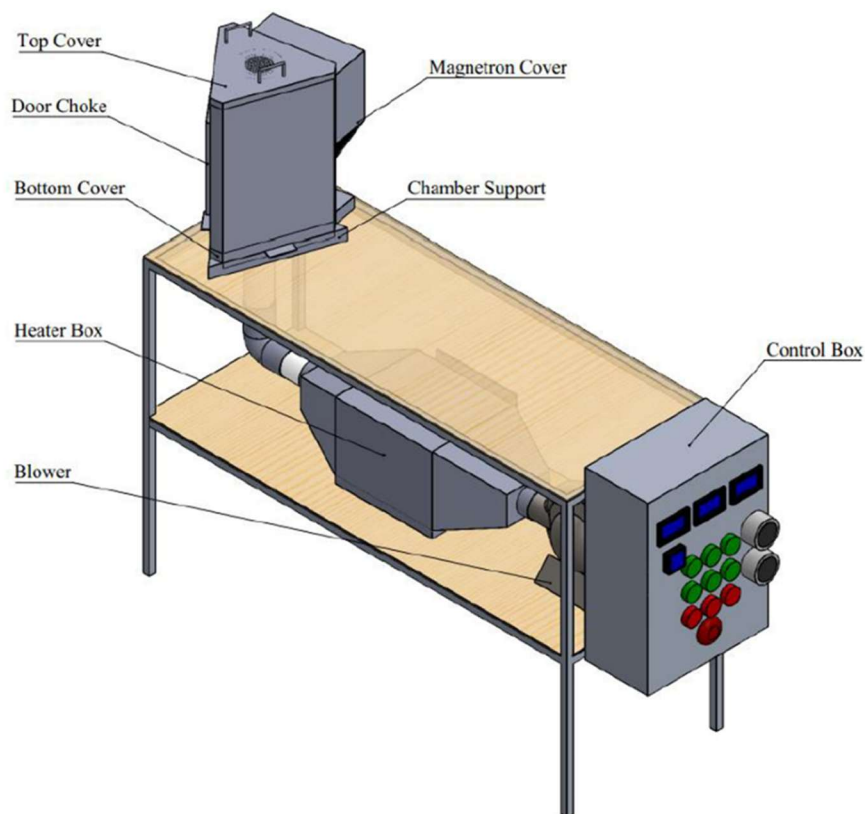
งานวิจัยและแนวทางปฏิบัติทั่วไปในระดับประเทศระบุว่า อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ไม่ควรเกิน 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นขีดจำกัดที่ยังสามารถรักษาคุณภาพของเมล็ดข้าวไว้ได้อย่างเหมาะสม โดยหากใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้จะเพิ่มความเสี่ยงต่อการแตกร้าวภายในเมล็ดและการสูญเสียกลิ่นหอม เช่น สาร 2-acetyl-1-pyrroline ซึ่งเป็นสารสำคัญในข้าวหอมมะลิและข้าวหอมปทุม งานวิจัยโดย สัจจาและคณะยังพบว่า แม้อุณหภูมิ 80 °C จะช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การควบคุมเวลาและการพักเมล็ดระหว่างการอบ (tempering) ก็จำเป็นอย่างยิ่งในการลดผลกระทบต่อคุณภาพโดยรวมของข้าว แม้ว่าในระดับมาตรฐานสากลจะยัง

ไม่มีเอกสารที่ระบุขีดจำกัดอุณหภูมิอย่างเป็นทางการ แต่ในเชิงปฏิบัติ อุณหภูมิ 60–80 °C จึงถือเป็นช่วงที่ปลอดภัยและนิยมใช้มากที่สุด [7], [8]

นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการอบแห้งแบบพิเศษ ในบรรดาเทคโนโลยีการอบแห้งแบบพิเศษ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave Drying) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying) ซึ่งให้คุณภาพสูงแต่ใช้เวลานานและมีต้นทุนสูง หรือการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Drying) ที่แม้จะประหยัดพลังงานและรวดเร็ว แต่ความร้อนยังถ่ายเทจากภายนอกสู่ภายใน ในทางตรงกันข้าม ไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนจากภายในออกสู่ภายนอกของผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยเร่งการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอย่างสม่ำเสมอและรวดเร็ว โดยเฉพาะในวัสดุที่มีความชื้นสูง เช่น ข้าวเปลือกหรือผลไม้ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟยังช่วยลดการสูญเสียกลิ่น และสารอาหารบางชนิดที่ไวต่ออุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ความท้าทายของเทคโนโลยีนี้คือการควบคุมความร้อนที่กระจายไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจทำให้บางส่วนไหม้หรือเสียคุณภาพได้ง่าย หากไม่มีการควบคุมที่แม่นยำ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวโน้มที่จะใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อนหรืออินฟราเรดในลักษณะ hybrid drying เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอและลดความเสี่ยงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การพัฒนาเทคโนโลยีไมโครเวฟในภาคการเกษตรจึงเป็นแนวทางที่สำคัญในการผลิตอาหารแปรรูปคุณภาพสูงที่มีต้นทุนและเวลาในการผลิตลดลงอย่างชัดเจน [9],[10] รักษาคุณภาพของเมล็ดข้าว [11] งานวิจัยโดย Dalbhagat และคณะ ศึกษาการอบแห้งข้าวเสริมธาตุเหล็ก (Fortified Rice Kernels) ด้วยไมโครเวฟที่พลังงาน 180, 360 และ 540 W พบว่า การใช้พลังงาน 180 W ร่วมกับการพักเมล็ดข้าว (tempering) สามารถลดความชื้น

ของข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีหรือการแตกร้าวของเมล็ดข้าว ในขณะที่การใช้พลังงานสูงกว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนสีและการแตกร้าวของเมล็ดข้าวมากขึ้น [12]

งานวิจัยนี้ได้จึงได้สร้างชุดทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟขนาดครัวเรือน 800 W โดยขนาดชุดทดสอบนี้เป็นขนาดทดลอง (laboratory scale) ซึ่งทำงานแบบ Spouted Dry bed สามารถจุดข้าวได้มากที่สุด 100 g โดยที่พฤติกรรมกลายของข้าวเปลือกยังเป็นแบบ Spouted Dry Bed โดยชุดทดสอบตามรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยชุดควบคุม (Control Box) ที่มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของอากาศ ควบคุมเครื่องเป่าอากาศ (Blower) ระดับพลังงานไมโครเวฟและตั้งเวลาการทำงานของไมโครเวฟ (Timer) เครื่องทำความร้อน (Heater) 2000 W 220V AC ซึ่ง เครื่องทำความร้อนควบคุมด้วย PID controller Rex c700 ซึ่งวัดอุณหภูมิด้วย Thermocouple Type K วัดที่ท่ออากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง (Chamber) ห้องอบแห้งทำมาจากเหล็กพับ SS-400 โดยท่อด้านในเป็นท่ออะลูมิเนียมเพื่อให้ไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ โดยผาด้านบน(top cover) ทำช่องระบายอากาศ 2 mm ซึ่งมีที่มาจากความปลอดภัยในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับไมโครเวฟ ในส่วนของหน้าต่างสังเกตการณ์ถูกติดตั้งอุปกรณ์ประตูกันคลื่น (Door Choke) ที่ถูกถอดออกมาจากตู้ไมโครเวฟขนาดครัวเรือน 800 W โดยอุปกรณ์ปล่อยคลื่นคือหัวแม็กนิตรอนขนาด 800 W ความถี่ 2.45 GHz โดยมีอุปกรณ์ป้องกันไมโครเวฟ (magnetron cover) ครอบวงจรไฟฟ้าของไมโครเวฟเพราะฉะนั้นการทดสอบในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการการศึกษาผลของการใช้อากาศอุณหภูมิ 80°C อากาศอุณหภูมิ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟ 160W อากาศอุณหภูมิห้องร่วมกับไมโครเวฟ 160W อากาศอุณหภูมิห้องร่วมกับไมโครเวฟ 320W



รูปที่ 1 ชุดทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ

โดยการวิเคราะห์ผลจากอบแห้งมีได้แก่ ความชื้นสมมูล ข้าวเปลือก อัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือก อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือก ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าความขาวข้าวสารโดยทั้งหมดมีชุดควบคุมการทดสอบเป็นตัวเปรียบเทียบ

2. ระเบียบวิธีและการทดลอง

โดยเริ่มแรกของกระบวนการทดสอบจะต้องมีการเตรียมตัวอย่างการทดสอบโดยการหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกโดยข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบเป็นข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 จากจังหวัดบุรีรัมย์ โดยรายละเอียดของการ

ทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 1 โดย MW1 หมายถึงไมโครเวฟพลังงาน 160W และ MW2 หมายถึงไมโครเวฟพลังงาน 320W

2.1 การหามวลแห้งข้าวเปลือก

โดยกระบวนการหามวลแห้งของข้าวเปลือกต้องเริ่มต้นด้วยชั่งน้ำหนักของข้าวเปลือกซึ่งเป็นน้ำหนักของข้าวเปลือกที่มีความชื้นอยู่ให้บันทึกเป็นน้ำหนักเริ่มต้น (W) จากนั้นอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนด้วยกระบวนการ AOAC 925.10 ด้วยอุณหภูมิ 105 °C เป็นระยะเวลา 24 hr ซึ่งจะทำให้ได้ข้าวเปลือกที่ถูกกำจัดความชื้นจนหมดและนำมาชั่งน้ำหนักจะได้เป็นมวลแห้งออกมา (d) และสามารถนำมาหา

ที่ 21 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน พ.ศ. 2568

ความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐานเปียก (M_w) ตามสมการที่ 1

[14]

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบการอบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ

เงื่อนไขการทดสอบ	อุณหภูมิของอากาศ	ระดับพลังงานของไมโครเวฟ	ปริมาณข้าวที่ใช้ทดสอบ
อากาศอุณหภูมิ 80 °C	80 °C	0 W	100 g
อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1	80 °C	160 W	
อากาศอุณหภูมิห้อง MW1	32.5°C	160 W	
อากาศอุณหภูมิห้อง MW2	32.5°C	320 W	

$$M_w = \frac{(W - d)}{W} \quad (1)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

 M_w = ความชื้นข้าวเปลือกตามมาตรฐานเปียก (Wet Basis) (%wb) W = มวลเริ่มต้นของข้าวเปลือก (g) d = มวลแห้งข้าวเปลือก (g)

2.2 การกำหนดความชื้น

หลังจากที่ทราบปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกจะสามารถกำหนดความชื้นของข้าวเปลือกได้โดยปกติแล้วความชื้นในข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นอยู่ที่ 22 %wb เพราะฉะนั้นความชื้นเป้าหมาย (M_1) คือ 22 %wb จากนั้นทำการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปในข้าวเปลือก (W_2) เพื่อให้ข้าวเปลือกมีความชื้นเป้าหมายตามที่กำหนดซึ่งปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพื่อให้ถึงความชื้นเป้าหมาย (M_1) นั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 [13]

$$W_2 = W_1 \times \left[\frac{M_1 - M_2}{100 - M_1} \right] W_2 \quad (2)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

 W_2 = ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไป (g) W_1 = มวลเดิมของข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น (g) M_1 = ความชื้นเป้าหมายเปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก (wb%) M_2 = ความชื้นเริ่มต้นเปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก (wb%)

เมื่อทราบปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปในข้าวเปลือกเพื่อกำหนดความชื้นเป้าหมาย ขั้นตอนถัดไปที่สำคัญคือการเติมน้ำเข้าไปในข้าวเปลือก ซึ่งหลังจากเติมเข้าไปแล้วจะต้องบรรจุใส่ถุงที่สามารถปิดอากาศเข้าออกได้ และเก็บในที่ที่มีอุณหภูมิ 1- 5 °C เป็นระยะเวลา 7 วัน [14]

2.3 การหาความชื้นสมดุลข้าวเปลือก

ในกระบวนการอบแห้งสิ่งต้องหาก่อนเป็นอันดับแรกคือความชื้นสมดุลข้าวเปลือกซึ่งแต่ละวิธีการอบแห้งนั้นมีค่าสมดุลความชื้นที่ไม่เท่ากัน โดยวิธีการหาความชื้นสมดุลข้าวเปลือกนั้นคือการอบแห้งจนมวลของข้าวเปลือกนั้นเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลง [15]

โดยความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้มีทั้งหมดสองค่าซึ่งค่าแรกเป็นของการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80 °C และค่าที่สองเป็นของการอบแห้งด้วยอากาศปกติรวมกับการใช้ไมโครเวฟระดับที่หนึ่ง โดยวิธีการสร้างกราฟความชื้นสมดุลนั้นสามารถทำได้โดยนำข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ ออกมาชั่งน้ำหนักทุก

5 นาทีจนกว่าค่ามวลข้าวเปลือกเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยทดสอบหาความสมดุลของข้าวเปลือกแต่ละวิธีการอบแห้งนั้นทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

2.4 อัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือก

การเปรียบเทียบมวลข้าวเปลือกก่อนอบแห้งและหลังอบแห้งนั้นคือการประเมินว่าความชื้นของข้าวเปลือก ณ ขณะนั้นเริ่มเข้าใกล้ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกมากแค่ไหนซึ่งสามารถประเมินได้ด้วยการหาอัตราส่วนความชื้น [16] ตามสมการที่ 3

$$MR = \frac{M_n - M_{n+1}}{M_i - M_{eq}} \quad (3)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

MR = อัตราส่วนความชื้น

M_n = ความชื้นของข้าวเปลือก (%wb)

M_i = ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (%wb)

M_{eq} = ความชื้นสมดุลข้าวเปลือกของวิธีการอบแห้งนั้น ๆ (%wb)

n = ครั้งที่

อัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกเป็นตัวบ่งชี้ที่ทำให้ผู้ทดสอบรู้ว่าความชื้นขณะนั้นของข้าวเปลือกใกล้ความชื้นเป้าหมายมากเท่าไร

2.5 อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือก

วิธีการอบแห้งต่าง ๆ สามารถหาค่าอัตราการอบแห้ง (DR) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่ประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งซึ่งสามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยเทียบกับเวลาที่ใช้ในการระเหยน้ำปริมาณนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 4 [16]

$$DR = \frac{m_n - m_{n+1}}{t_{n+1} - t_n} \quad (4)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

DR = อัตราการอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{min}$)

m = มวลของข้าวเปลือก (kg)

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

n = ครั้งที่

โดยวิธีการคือการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกก่อนและหลังอบแห้งทุก 5 นาที โดยมวลที่หายไปนั้นคือปริมาณน้ำที่หายไป

2.6 อุณหภูมิของข้าวเปลือก

อุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกเป็นตัวชี้พฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกอย่างชัดเจนซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการรับพลังงานจากวิธีการอบแห้งนั้น ๆ โดยการเก็บผลอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกจะใช้ Thermocouple Type K ในการเก็บค่าซึ่งทำพร้อมกันในการทดลองชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าอัตราการอบแห้งของข้าวเปลือก

2.7 ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุนั้นสามารถหาได้ด้วยการหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ที่ได้จากการคำนวณพลังงานรวมอันได้แก่ พลังงานที่ใช้ในไมโครเวฟ เครื่องกำเนิดความร้อนและเครื่องเป่าอากาศ ต่อด้วยปริมาณน้ำที่ระเหยไปจากตัววัสดุ ดังแสดงในสมการที่ 5 [17]

$$SEC = \frac{E_{n+1} - E_n}{m_n - m_{n+1}} \quad (5)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

SEC = ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$)

E = พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ (MJ)

m = มวลของข้าวเปลือก (g)

n = ครั้งที่

2.8 เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน

เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นคือข้าวที่มีสภาพสมบูรณ์ 70% ขึ้นไปหลังจากทำการตัดข้าวและผ่านกระบวนการแยกเมล็ดข้าวจากแล้วซึ่งสามารถคำนวณปริมาณข้าวต้นได้จากสมการที่ 6 [18]

$$\%HRY = \frac{\text{Full Grain}}{\text{Paddy Mass}} \times 100\% \quad (6)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ มีดังนี้

$\%HRY$ = Head Rice Yield

Full Grain = ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (g)

Paddy Mass = ปริมาณข้าวเปลือก (g)

โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งตัวชี้วัดว่าวิธีการอบแห้งนั้นมีคุณภาพเพียงพอหรือไม่

2.9 ค่าความขาวของข้าวสาร

ค่าความขาวของข้าวสารเป็นตัวชี้คุณภาพในกระบวนการอบแห้งวิธีนั้นๆ ว่าสามารถรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้หรือไม่ ซึ่งหากกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีนั้นๆ ทำให้ข้าวสารมีสีน้ำตาลหรือรอยไหม้ นั่นอาจจะเป็นกระบวนการอบแห้งที่ไม่เหมาะสม โดยเครื่องวัดความขาวของข้าวสารใช้เครื่อง KETT C-600 Rice Whiteness Meter [19]

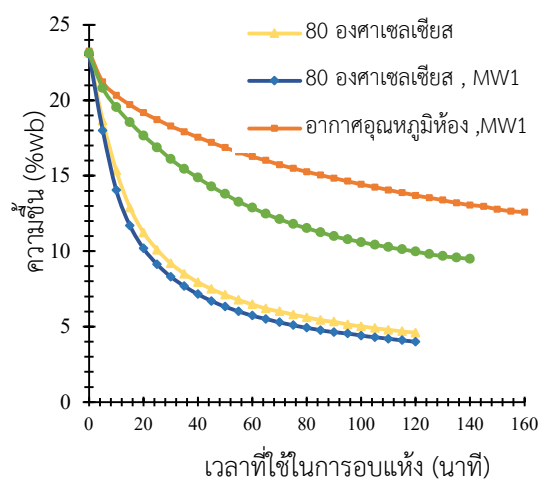
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากรูปที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของข้าวเปลือกกับระยะเวลาในการอบแห้ง พบว่า ค่าความชื้นสมดุลต่ำที่สุด อยู่ที่ 4.5%wb ได้จากกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่สูงในการลดความชื้น ในทางกลับกัน กระบวนการที่ให้ค่าความชื้นสมดุลสูงที่สุดคือ การใช้อากาศอุณหภูมิห้อง MW1 ซึ่งให้ค่าความชื้นสมดุลเท่ากับ 12.5%wb ขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว และอากาศอุณหภูมิห้อง MW2 ให้ค่าความชื้นสมดุลที่ 4.8%wb และ 9.8%wb ตามลำดับ

จากรูปที่ 3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง โดยพิจารณาที่ความชื้นสุดท้าย 14%wb พบว่า วิธีการอบแห้งที่ใช้ อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 ใช้เวลาเพียง 10 นาที ที่อัตราส่วนความชื้น 0.40 ในการลดความชื้นลงจนถึงค่าดังกล่าว ขณะที่การใช้ อากาศร้อนเพียงอย่างเดียวต้องใช้เวลานานขึ้นคือ 15 นาที ที่อัตราส่วนความชื้น 0.48 สำหรับอากาศอุณหภูมิห้อง MW2 ใช้เวลา 45 นาที ที่อัตราส่วนความชื้น 0.32 ส่วนกระบวนการที่ใช้เวลานานที่สุดคือ อากาศอุณหภูมิห้อง MW1 ซึ่งต้องใช้เวลาราว 110 นาที ที่อัตราส่วนความชื้น 0.125 อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการอบแห้งข้าวเปลือก โดยสามารถลดความชื้นได้รวดเร็ว และให้ค่าความชื้นสมดุลต่ำซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jafari และคณะ [11] ที่พบว่าการใช้ไมโครเวฟระดับต่ำร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ทำลายโครงสร้างของเมล็ดข้าว และยังให้พลังงานการดูดซับสูง อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานของ Abas และคณะ [10] ที่แสดงให้เห็นว่า hot air ร่วม microwave ช่วยย่นระยะเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าการใช้ไมโครเวฟหรืออากาศร้อนเพียงอย่างเดียวถึง 40–60%

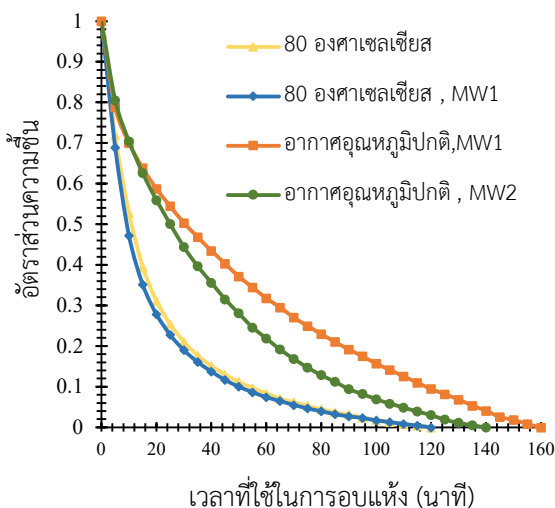
นอกจากนี้ภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะมีอัตราการลดความชื้นที่รวดเร็วในช่วงต้นของการอบแห้ง แต่เวลาเริ่มผ่านไปอัตราการลดความชื้น เริ่มชะลอตัวลงจนกระทั่งเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งขยายความได้ดังรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์อัตราอบแห้งกับความชื้นของข้าวเปลือก พบว่า การอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 มีอัตราการอบแห้งสูงสุดที่ 1.25 กรัม/น้ำต่ออนาที การอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 1.11 กรัม/น้ำต่ออนาที การอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิห้อง MW2 มีค่าเท่ากับ 0.575 กรัม/น้ำต่ออนาที และการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิห้อง MW1 มีค่าเท่ากับ 0.525 กรัม/น้ำต่ออนาที เมื่อผ่านจุดสูงสุดอัตราการอบแห้งเริ่มลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ 0 ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของความชื้นในรูปที่ 2 และ 3.2

การลดลงความชื้นของข้าวเปลือกยังสามารถถูกเสริมการอธิบายด้วยรูปที่ 5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกกับความชื้นในข้าวเปลือกพบว่า การอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 78°C รองลงมาคือการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 °C มีอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกเท่ากับ 74°C การอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิห้อง MW2 มีอุณหภูมิผิวเท่ากับ 51°C และการอบแห้งด้วย และอากาศอุณหภูมิห้อง MW1 มีอุณหภูมิผิวเท่ากับ 41°C ซึ่งอุณหภูมิผิวของแต่ละวิธีการทดสอบสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งกล่าวคือเงื่อนไขของการอบแห้งใดมีอุณหภูมิผิวที่สูงจะส่งผลให้เกิดการระเหยที่ผิวอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการระเหยที่ผิวอย่างรวดเร็วนั้นไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะกรณีอุณหภูมิสูงเท่านั้นแต่ยังสามารถเกิดขึ้นในอุณหภูมิต่ำโดยมีสภาพแวดล้อมในสถานะสุญญากาศซึ่งจะทำให้จุดเดือดของน้ำในวัสดุมีค่าต่ำกว่าจุดเดือด ความดันบรรยากาศ

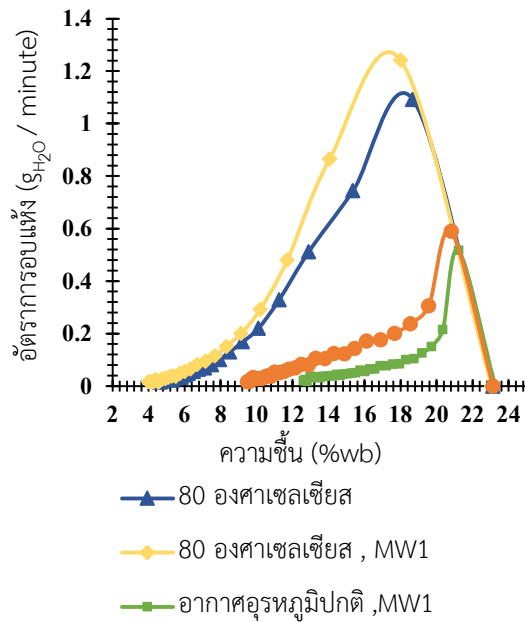


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ความชื้นของข้าวเปลือกเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

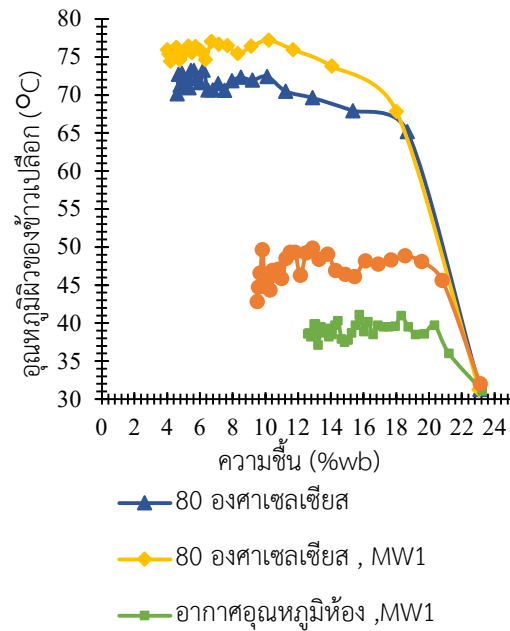
จากรูปที่ 6 และ 7 ค่า SEC ในช่วงต้นของการอบแห้งยังมีค่าต่ำเมื่อการอบแห้งดำเนินต่อไปจนผ่านจุดความชื้นวิกฤตค่า SEC เริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทวีคูณทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากปริมาณการระเหยน้ำรวมกับสมการที่ 5 พบว่าในต้นของการอบแห้งการระเหยน้ำยังมีปริมาณสูงในขณะที่ยังอัตราการป้อนพลังงานคงที่จึงทำให้ค่า SEC ยังมีปริมาณต่ำจนเมื่อผ่านจุดความชื้นวิกฤตปริมาณน้ำที่ระเหยเริ่มลดลงในขณะที่ยังการป้อนพลังงานเท่าเดิมจึงทำให้ค่า SEC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบเส้นการระเหยน้ำของวิธีการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 เทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอย่างเดียวเส้นเมื่อผ่านจุดความชื้นวิกฤตปริมาณระเหยน้ำมีความใกล้เคียงกันในขณะที่เส้นปริมาณการระเหยน้ำของการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิห้อง MW2 และอากาศอุณหภูมิห้อง MW1 มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด



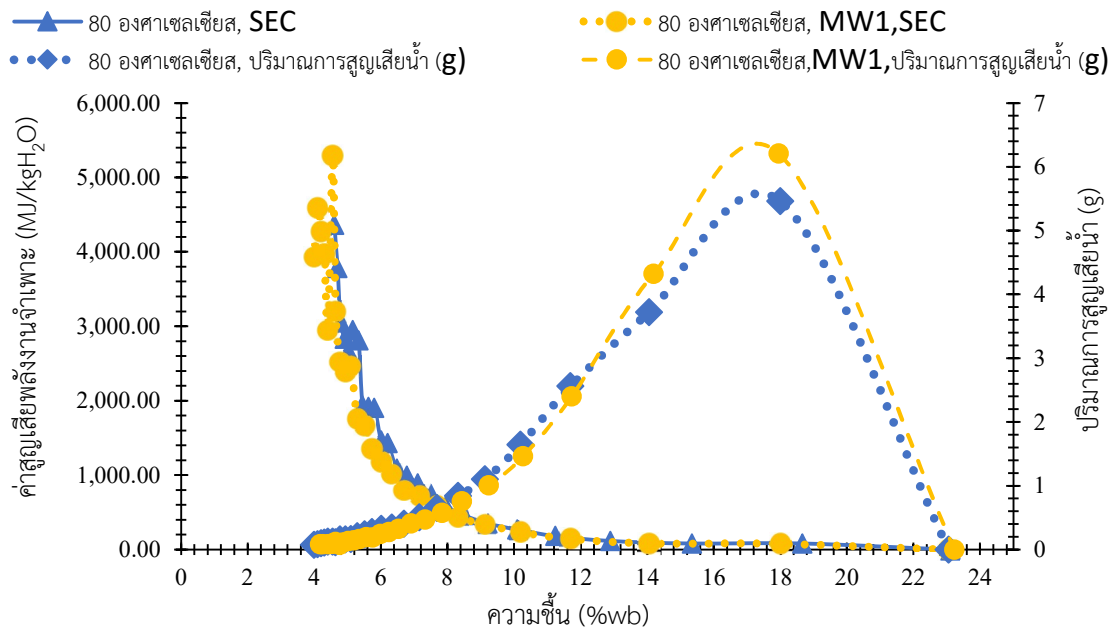
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นของ ข้าวเปลือกเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง



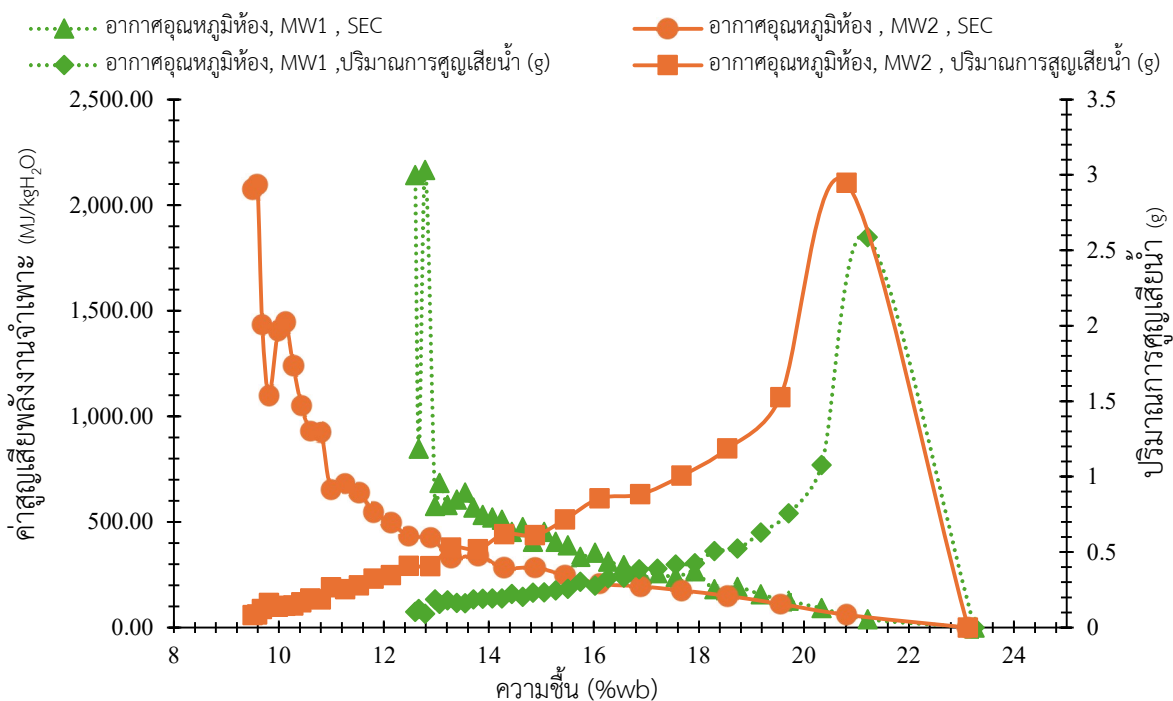
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์อัตราการอับน้ำของ ข้าวเปลือกกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์อุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าว



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณสูญเสีย น้ำเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณสูญเสียน้ำเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก

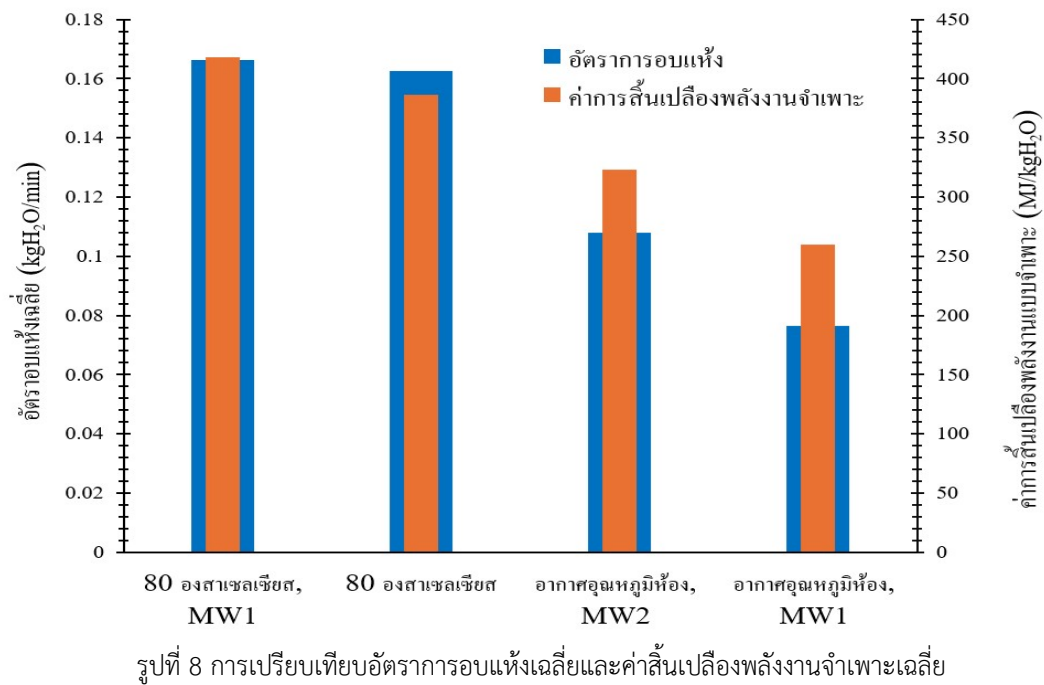
ผลการทดลองเหล่านี้ สอดคล้องกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งตามทฤษฎี ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระยะหลัก ได้แก่ ระยะอัตราคงที่ (และระยะอัตราลดลง ดังที่กล่าวในงานของ Mujumdar และคณะ [16] ว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง ปริมาณน้ำส่วนใหญ่ระเหยจากผิววัสดุที่เปียก ทำให้อัตราการอบแห้งสูงและคงที่ แต่เมื่อเข้าสู่ระยะหลัง น้ำต้องแพร่จากภายในออกมาสู่ผิวก่อนจะระเหย ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ขณะเดียวกัน ข้อมูลเรื่องอุณหภูมิผิวที่สัมพันธ์กับอัตราการระเหยก็ได้รับการสนับสนุนโดยผลการทดลองของ Jafari และคณะ [11] ซึ่งระบุว่าความร้อนจากไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดอุณหภูมิผิวสูง ส่งผลให้มีการระเหยนํ้ารวดเร็ว แต่หากไม่มีการควบคุมอาจทำให้เกิดการไหม้ที่ผิวได้ในที่สุดไวกความร้อน จากรูปที่ 8 แสดงค่า SEC และอัตราการอบแห้งแบบเฉลี่ย พบว่า การอบแห้งโดยใช้อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 มีค่า SEC และอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อากาศอุณหภูมิ 80 °C

เพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้น้อย ซึ่งการระเหยนํ้าส่วนใหญ่เกิดเพราะได้รับพลังงานจากอากาศร้อนมากกว่าไมโครเวฟระดับหนึ่ง เมื่อเปรียบกับการใช้อากาศอุณหภูมิห้อง MW2 และอากาศอุณหภูมิห้อง MW1 ค่า SEC และอัตราการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าสองวิธีข้างต้นแนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yongsawatdigul และ Gunasekaran ที่ระบุว่า ไมโครเวฟระดับต่ำร่วมกับอากาศร้อนในระดับหนึ่งจะเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเพียงเล็กน้อย หากพลังงานจากไมโครเวฟไม่เพียงพอ ความร้อนส่วนใหญ่ยังมาจากแหล่งลมร้อน ซึ่งทำให้การกระจายพลังงานไม่สมดุล [20]

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า วิธีการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิห้อง MW1 อย่างเดียว ให้ผลผลิตเป็นเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงที่สุด คือ 38% ในทางตรงกันข้าม วิธีที่ให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำที่สุดคือ การอบแห้งอากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 ซึ่งให้ค่าเพียง 2% เท่านั้น โดยสามารถจัดเรียงลำดับของ

เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นจากน้อยไปหามากได้อย่างชัดเจนจากกราฟในรูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 8 ซึ่งแสดงค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) จะพบว่าแนวโน้มของทั้งสองกราฟแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะสวนทางกัน กล่าวคือ วิธีการอบแห้ง

ที่ให้ค่าพลังงานจำเพาะสูงที่สุด (อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1) กลับให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำที่สุด ในขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิห้อง MW1 ซึ่งใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุด กลับให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงที่สุดใกล้เคียงกับชุดควบคุม

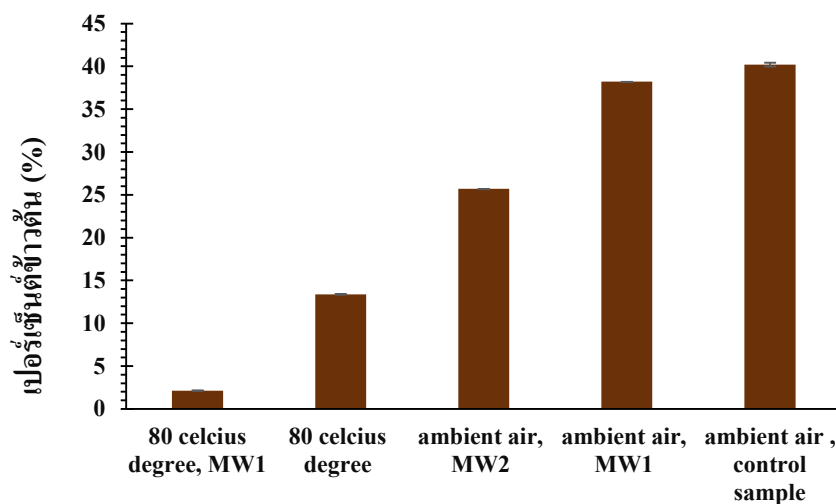


จากแนวโน้มดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะเพิ่มสูงขึ้น มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลง ซึ่งอาจเกิดจากความรุนแรงของกระบวนการอบแห้งที่ส่งผลต่อโครงสร้างของเมล็ดข้าว การศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานของ Khampan และคณะ ที่แสดงให้เห็นว่า การใช้พลังงานไมโครเวฟที่สูงในกระบวนการอบแห้งสามารถทำให้เกิดแรงดึงภายในเมล็ดข้าวจากอัตราการระเหยที่เร็วเกินไป ส่งผลให้เมล็ดแตกหรือเกิดรอยร้าว ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [21]

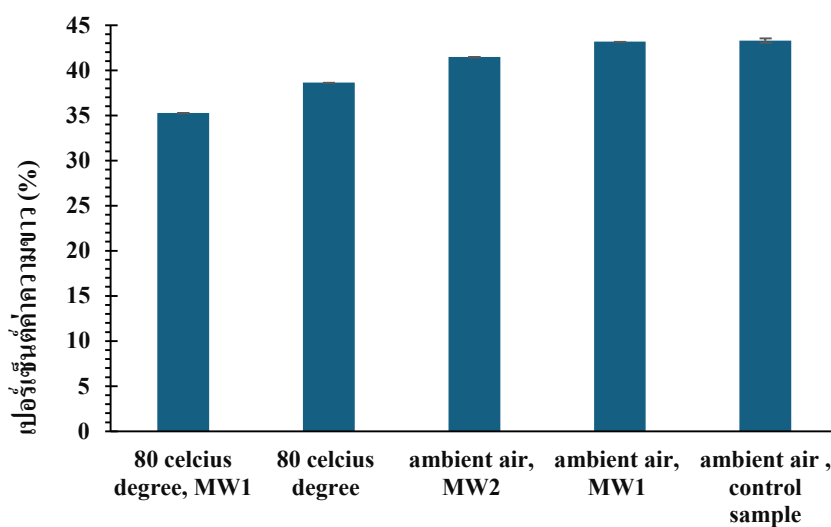
นอกจากนี้ หากพิจารณาร่วมกับรูปที่ 10 ซึ่งแสดงค่าความขาวของข้าวสาร พบแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน

กล่าวคือ อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 ให้ค่าความขาวของข้าวสารต่ำที่สุด ในขณะที่การใช้อากาศอุณหภูมิห้อง MW1 ให้ค่าความขาวสูงที่สุดซึ่งใกล้เคียงกับชุดควบคุมเช่นเดียวกัน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสามารถสะท้อนถึงระดับความเสียหายของเมล็ดข้าวสาร ที่อาจเกิดจากแรงดึงในกระบวนการอบแห้ง โดยเฉพาะเมื่อใช้พลังงานสูงหรือความร้อนสูงเกินไป ซึ่งจะต้องมีการควบคุมอย่างแม่นยำเพื่อรักษาคุณภาพของผลผลิต



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์รากเน่าของข้าวสารแต่ละวิธีการอบแห้ง



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวสารแต่ละวิธีการอบแห้ง

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟซึ่งการอบแห้งมี 4 เงื่อนไข ได้แก่ การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับสอง การใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม และการใช้

ไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมพบว่า การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งมีอัตราการอบแห้งมากที่สุดแต่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากเช่นกัน ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งมีค่าอัตราการอบแห้งน้อยที่สุดแต่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Namsaeng, T. Pumsaad and K. Tangtragul, "Effect of drying temperature on the quality of paddy rice using a hot-air dryer," *J. Agric. Res.*, vol. 55, no. 3, pp. 87–95, 2022.
- [2] P. Jirajindalert, "Comparison between sun drying and mechanical drying for paddy rice," *Thai J. Agric. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 102–110, 2020.
- [3] S. Vetchama and J. Sirisomboon, "Development of a low-cost batch-type paddy dryer," *Int. J. Food Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 241–247, 2021.
- [4] W. Chaiworapuek et al., "Numerical investigation of air flow in a vertically paddy bed dryer using computational fluid dynamics," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1137, Art. no. 012066, 2021.
- [5] M. Talib, N. Yusof and A. S. Zainudin, "Performance of fluidized bed and inclined bed drying of paddy in two-stage operation," *J. Food Eng.*, vol. 190, pp. 90–96, 2016.
- [6] D. Evin, "Paraboloid-based spouted bed drying of paddy: Aerodynamics, temperature distribution, and moisture degradation," *AgriEngineering*, vol. 1, no. 2, pp. 257–264, 2019.
- [7] W. Wongpornchai, S. Dumri, N. Jongkaewwattana and S. Siriamornpun, "Effect of drying methods and storage time on the aroma and milling quality of Thai aromatic rice," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 46, pp. 443–447, 2009.
- [8] H. C. Siebenmorgen, "Quality of rice dried with high-temperature methods," *Cereal Chem.*, vol. 44, no. 6, pp. 592–600, 1967.
- [9] B. Liu, L. Zhang, M. Zhang and S. Mujumdar, "Microwave-assisted drying of food and agricultural materials: Basics, advances, and applications," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 142, pp. 260–272, 2024.
- [10] S. Z. Abas, M. N. Islam and S. S. Hossain, "Microwave drying of agricultural products: An overview," *Agriculture*, vol. 11, no. 1, p. 8, 2021.
- [11] M. Jafari, M. Kianmehr and M. Khazaei, "Experimental evaluation and modeling of paddy drying using a microwave-assisted conveyor dryer," *Energy*, vol. 142, pp. 647–654, 2018.
- [12] R. M. Dalbhat et al., "Effect of microwave drying and tempering conditions on physical quality attributes of fortified rice kernels," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 48, no. 2, 2024.
- [13] AOAC International, *Official Methods of Analysis*, 18th ed., Method 925.10: Solids (Total) and Moisture in Flour. Gaithersburg, MD: AOAC Int., 2025.
- [14] B. B. Nkoi and R. J. Fuller, "Moisture equilibration of paddy rice: Influence of temperature and storage time on moisture distribution," *Drying Technol.*, vol. 25, no. 12, pp. 2053–2059, 2007.

- [15] M. K. S. Nair and B. C. Mehta, "Equilibrium moisture content of paddy at different temperatures and relative humidities," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 107–110, 1989.
- [16] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed., Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [17] M. Goyal, A. Kingsly and D. Manikantan, "Comparative study on drying kinetics and energy consumption in forced convection drying of paddy," *J. Food Process Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 183–200, 2008.
- [18] J. Cnossen and T. J. Siebenmorgen, "The effects of tempering and cooling conditions on rice fissuring and head rice yield," *Trans. ASAE*, vol. 43, no. 3, pp. 879–886, 2000.
- [19] Kett Electric Laboratory Co., Ltd., Operating Manual: C-600 Rice Whiteness Tester, Tokyo, Japan.
- [20] J. Yongsawatdigul and S. Gunasekaran, "Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 20, no. 2, pp. 145–156, 1996.
- [21] C. Khampan, T. Sriburi and S. Lekawatana, "Effect of drying methods on physicochemical properties of rice," *Agric. Sci. J.*, vol. 52, no. 1, pp. 15–22, 2021.