

**การอบแห้งขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ-สุญญากาศ:
ผลของกำลังไมโครเวฟและความดันที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง
MICROWAVE-VACUUM DRYING OF TURMERIC (*Curcuma longa* L.):
EFFECTS OF MICROWAVE POWER AND PRESSURE ON DRYING
KINETICS**

ณัฐภัก อิมเอิบ¹ จิรวัดน์ สิตรานนท์² และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์^{3*}

¹นักศึกษา, หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (การจัดการเทคโนโลยีพลังงาน)

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

43 ม. 6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, natthapak_im@rmutto.ac.th

^{2,3*}อาจารย์, สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีพลังงาน, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม. 6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,

²jirawat_si@rmutto.ac.th, ^{3*}kittisak_wi@rmutto.ac.th

Natthapak Im-Erb¹, Jirawat Sitranon² and Kittisak Witinantakit^{3*}

¹Student, Doctor of Philosophy (Energy Technology Management)

School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand,

natthapak_im@rmutto.ac.th

^{2,3*}Lecturer, Department of Energy Technology Management, School of Engineering and
Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand,

²jirawat_si@rmutto.ac.th, ^{3*}kittisak_wi@rmutto.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ ประเด็นสำคัญที่ศึกษาได้แก่ จลนพลศาสตร์การอบแห้ง อัตราการอบแห้ง สมบัติการแพร่ความชื้นประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ การเปลี่ยนสี และแบบจำลองเอมพิริคัล กระบวนการอบแห้งใช้กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ และอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์

โดยรักษาความดันสัมบูรณ์ไว้ที่ 20 และ 30 กิโลปาสกาล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟและลดความดันสัมบูรณ์ มีผลทำให้อัตราการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ การลดความดันสัมบูรณ์ยังมีผลทำให้ความแตกต่างโดยรวมของสีมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งภายใต้ความดันบรรยากาศ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลของ Mildilli สามารถทำนายการอบแห้งขมิ้นชันได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด (0.99995) และค่า RMSE ต่ำที่สุด (0.00323)

คำสำคัญ: การอบแห้ง, ขมิ้นชัน, เทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ, แบบจำลองเอมพิริคัล

ABSTRACT

This research studies the drying of turmeric (*Curcuma longa* L.) using microwave-vacuum drying techniques. Key aspects investigated include drying kinetics, drying rate, effective moisture diffusion coefficient, specific energy consumption, color change, and empirical modeling. Drying processes were performed using 800 W microwave power at atmospheric pressure, and at microwave power of 600, 700, and 800 W at absolute pressures is 20 and 30 kPa. Experimental results showed that increasing microwave power and decreasing absolute pressure resulted in higher drying rates and effective moisture diffusion coefficients with reduced specific energy consumption. Decreasing absolute pressure also resulted in lower overall color difference compared to drying under atmospheric pressure. Furthermore, the Mildilli empirical model provided the best prediction for turmeric drying, exhibiting the highest R^2 value (0.99995) and the lowest RMSE value (0.00323).

KEYWORDS: drying, turmeric, microwave vacuum technique, empirical model

1. บทนำ

ขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) เป็นพืชในตระกูลขิง (Zingiberaceae) ที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องเทศโดยเฉพาะในอาหารเอเชีย สำหรับแหล่งเพาะปลูกขมิ้นชันพบมากในเปรู ออสเตรเลีย รวมถึงประเทศในเขตกึ่งร้อนชื้น เช่น จีน ไต้หวัน อินเดีย ศรีลังกา รวมทั้งประเทศไทย [1] จากคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ทำให้ขมิ้นชันมีบทบาทในการช่วยลดความเสี่ยงของโรคต่าง ๆ เช่น โรคหัวใจ และโรคหัวใจและหลอดเลือด ซึ่งคุณสมบัติทางยาของขมิ้นชันส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากการออกฤทธิ์ทางชีวภาพสีเหลืองส้มที่เรียกว่าเคอร์คูมินอยด์ ที่พบในเหง้าของขมิ้นชัน [2] โดยขมิ้นชันสามารถนำมาบริโภคได้ทั้งรูปแบบเหง้าสดและนำไปแปรรูปด้วยกระบวนการต่าง ๆ เช่น

นำไปสกัดสารออกฤทธิ์ สกัดน้ำมันหอมระเหย และนำไปอบแห้งซึ่งเป็นวิธีการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ [3] ช่วยให้สามารถเก็บไว้บริโภคได้นาน

การอบแห้งในปัจจุบันมีหลายวิธีการ เช่น การตากแดด การอบแห้งด้วยลมร้อน [4] การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน [5] การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด [6] เป็นต้น สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นวิธีการอบแห้งที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและช่วยประหยัดพลังงาน [7] โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความร้อนจากภายในวัสดุ เนื่องจากวัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟตามคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ สนามไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟทำให้อนุภาคไอออนและโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเกิดการหมุนและการสั่น ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายในตัววัสดุ [8] สำหรับการอบแห้งด้วยสุญญากาศสามารถดำเนินการได้ภายใต้อุณหภูมิต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีคุณภาพที่ดี จึงเหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อน [9] เมื่อนำข้อดีของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยสุญญากาศมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน การอบแห้งแบบผสมผสานนี้จึงเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน พร้อมทั้งคงไว้ซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [10] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hirun et al [2] ที่ได้ศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศพบว่า มีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพของขมิ้นชันอบแห้ง และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมยาและอาหาร และ Nathakaranakule et al [11] ได้ศึกษาเทคนิคการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศในการอบแห้งทุเรียนพบว่า ไมโครเวฟและความดันสุญญากาศส่งผลต่อการอบแห้ง โดยเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟและลดความดันสุญญากาศ ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นของทุเรียนแผ่นอบลดลง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) มีค่าลดลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีคุณภาพที่ดี อีกทั้งยังช่วยประหยัดพลังงาน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นการศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ โดยเน้นการศึกษาการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพควบคู่ไปกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ได้แก่ จลนพลศาสตร์การอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพของขมิ้นชันหลังการอบแห้ง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในวิจัย

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบผสมผสานระดับห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยติดตั้งระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ รุ่น LG MS2448BKW ที่มีกำลังไฟฟ้าในช่วง

0 ถึง 1000 วัตต์ ควบคุมด้วยชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง รุ่น LCEL01D สัญญากาศภายในห้องอบแห้งถูกสร้างขึ้นด้วยปั๊มสุญญากาศขนาด 0.746 กิโลวัตต์ (1 แรงม้า) ซึ่งสามารถทำความดันสัมบูรณ์ได้ต่ำสุด 2 กิโลปาสคาล ความดันภายในห้องอบถูกตรวจวัดด้วยเครื่องส่งสัญญาณความดันรุ่น Zega PT9200W ซึ่งมีช่วงการวัด -100 ถึง 100 กิโลปาสคาล และมีความแม่นยำ $\pm 0.5\%$ เครื่องส่งสัญญาณดังกล่าวทำงานร่วมกับชุดควบคุมความดันรุ่น Delta DT320 ซึ่งควบคุมการเปิด-ปิดปั๊มสุญญากาศด้วยความละเอียด 0.1 กิโลปาสคาล ทั้งนี้มีการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิด PID เพื่อรักษาระดับความดันให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ โดยมีความแม่นยำในการควบคุมไม่เกิน ± 0.2 กิโลปาสคาล น้ำหนักของวัสดุขณะอบแห้งถูกวัดด้วยโหลดเซลล์รุ่น Tedea Huntleigh 1022 ซึ่งมีพิสัยรับน้ำหนัก 2 กิโลกรัม และมีสัญญาณเอาต์พุต 2 มิลลิโวลต์/โวลต์ โหลดเซลล์เชื่อมต่อกับเครื่องแสดงผลน้ำหนักรุ่น Eyecon EICMC-1AB ซึ่งมีความละเอียดในการอ่านค่า 0.1 กรัม และมีความแม่นยำ $\pm 0.01\%$ สัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-10 โวลต์กระแสตรง เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec Midi Logger รุ่น GL840 เพื่อบันทึกค่าน้ำหนัก ภาดสำหรับวางตัวอย่างถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของโหลดเซลล์ และขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ระหว่างกระบวนการอบแห้ง สำหรับการวัดกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า ใช้มิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้าดิจิทัลรุ่น Schneider PM2200 โดยกระแสไฟฟ้าวัดด้วยหม้อแปลงกระแสรุ่น Qubix MSQ-30 พิภัก 30/5A Class 1.0 ระบบทั้งหมดถูกควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) รุ่น Siemens LOGO!



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง

2.2 วิธีการอบแห้ง

นำมันชันกลุ่มขมมันทองที่ซื้อจากตลาดในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี มาล้างทำความสะอาด จากนั้นซับด้วยกระดาษอเนกประสงค์ ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2(ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) ขมิ้นชันที่ล้างทำความสะอาดและตัดแต่งก่อนอบแห้ง (ข) ขมิ้นชันในหีบอบแห้ง

จากนั้นตัดแต่งและหั่นขมิ้นชันตามแนวขวางให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร ทำการชั่งน้ำหนักของขมิ้นชันก่อนอบแห้งประมาณ 150 กรัม จากนั้นนำขมิ้นชันที่เข้าเครื่องอบแห้งดังรูปที่ 2(ข) เพื่ออบแห้งตามเงื่อนไขการทดลองดังนี้

(1) ระดับกำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ (ปิด:เปิด = 10:10 วินาที) ที่ความดันบรรยากาศตลอดระยะเวลาอบแห้ง

(2) ระดับกำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ (ปิด:เปิด = 10:10 วินาที) ที่ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสกาล

สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การสลับเปิด-ปิดไมโครเวฟเป็นระยะช่วยลดการไหม้เกรียมของวัสดุ [12] เมื่อตั้งค่าอุปกรณ์การทดลองเรียบร้อยแล้ว ทำการอบแห้งขมิ้นชันจนกระทั่งมีความชื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ขมิ้นชันอบแห้งประมาณร้อยละ 13.6 มาตรฐานแห้ง [13] ในระหว่างอบแห้งทำการบันทึกค่าน้ำหนักของขมิ้นชันภายในห้องอบแห้งทุก ๆ 5 นาที ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec Midi Logger รุ่น GL840 จนสิ้นสุดการอบแห้ง หลังจากสิ้นสุดการอบแห้งทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้า เพื่อคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ นำขมิ้นชันบางส่วนไปหาปริมาณความชื้นหลังการอบแห้งตามมาตรฐาน AOAC และนำขมิ้นชันส่วนที่เหลือวิเคราะห์คุณภาพของขมิ้นชันหลังอบแห้ง ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) สี วิเคราะห์จุลชีวพลศาสตร์การอบแห้ง และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ทำนายกระบวนการอบแห้ง ทำการทดลองอบแห้งทั้งหมด 3 ซ้ำ การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน 7 เงื่อนไขการทดลอง ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี The Scheffe's Post Hoc Comparison ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ

2.3 การหาความชื้นขมิ้นชัน

หาความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content, M_d) ของขมิ้นชันก่อนและหลังอบแห้งตามมาตรฐาน AOAC [14] โดยการชั่งน้ำหนักขมิ้นชันที่ต้องการหาความชื้น จากนั้นนำขมิ้นชันไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อทราบน้ำหนักแห้งของขมิ้นชัน นำค่าน้ำหนักมาคำนวณ ตามสมการที่ (1)

$$M_d = \frac{w - d}{d} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ร้อยละความชื้นมาตรฐานแห้ง , w คือ น้ำหนักของขมิ้นชันเริ่มต้น (กรัม) และ d คือน้ำหนักของขมิ้นชันแห้ง (กรัม)

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน หาได้จากการนำค่าน้ำหนักขมิ้นชันก่อนและหลังอบแห้งและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม มาคำนวณดังสมการที่ 2 [15]

$$SEC = \frac{3.6E_p}{m_i - m_f} \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกกะจูล/กรัมน้ำระเหย) E_p คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) และ m_i และ m_f คือ น้ำหนักของขมิ้นชันก่อนและหลังอบแห้ง (กรัม) ตามลำดับ

2.5 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying rate) แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของขมิ้นชันในห้องอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยเวลา วิเคราะห์อัตราการอบแห้งได้จากการคำนวณได้ดังสมการที่ 3 [16]

$$DR = \frac{M_o - M_t}{t} \quad (3)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (กรัม_{น้ำ}/กรัม_{ของแข็ง} นาที่), M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น (กรัม_{น้ำ}/กรัม_{ของแข็ง}), M_t คือ ความชื้นเวลาใดๆ (กรัม_{น้ำ}/กรัม_{ของแข็ง}), t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที่)

2.6 การวัดค่าสีไขมันชั้น

ทำการทดสอบคุณภาพด้านสีของไขมันชั้นที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี 3HN รุ่น Portable colorimeter NH310 ระบบสี CIE $L^*a^*b^*$ ใช้แสงสว่างที่ 6500 K ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดสีน้อยกว่า 0.04 (ΔE^*_{ab}) โดยค่า L^* คือ ค่าความสว่างมีค่าระหว่าง 0-100 หรือสีดำถึงสีขาว ค่า a^* แสดงค่า (+) สีแดง หรือ (-) สีเขียว และค่า b^* แสดงค่า (+) สีเหลือง หรือ (-) สีนํ้าเงิน ทำการวัดค่าสีของไขมันชั้นของแต่ละเงื่อนไข 15 ซ้ำ นำค่าสีที่วัดได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างของไขมันชั้นก่อนและหลังอบแห้ง ดังสมการที่ 4 [4]

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

เมื่อ ΔE^* คือ ความแตกต่างโดยรวมของสีระหว่างไขมันชั้นสดและไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

ΔL^* คือ ความแตกต่างของความสว่างระหว่างไขมันชั้นสดและไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

Δa^* คือ ความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงสีเขียวระหว่างไขมันชั้นสดและไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

Δb^* คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงสีนํ้าเงินระหว่างไขมันชั้นสดและไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

2.7 ค่าปริมาณน้ำอิสระ

นำตัวอย่างไขมันชั้นที่ได้จากการอบแห้งมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระยี่ห้อ AquaLab 3TE ช่วงการอ่านค่า 0.03 ถึง 1.00 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล เป็นสมการที่นิยมใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้ง เนื่องจากเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งสมการเอมพิริคัลจะแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) [17] โดยที่อัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (5)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (มาตรฐานแห้ง), M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (มาตรฐานแห้ง) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (มาตรฐานแห้ง) แต่ในการทดลองนี้ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ค่อนข้างมาก จึงสามารถจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ 6

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (6)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีค่าดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายสมการทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root meansquare error, RMSE) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด และให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งค่า R^2 และ RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ [18]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{exp,ave})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (8)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$, $MR_{exp,ave}$ และ $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทดลอง และอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล ตามลำดับ และ N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 6 สมการ ได้แก่ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic และ Midilli ดังตารางที่ 1 [19]

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

ลำดับที่	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n)+bt$

หมายเหตุ: a b c k และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาท)

2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) เป็นสมบัติของวัตถุที่อธิบายอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งแสดงถึงปรากฏการณ์การแพร่ตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law of diffusion) ซึ่งการทดลองอบแห้งในครั้งนี้ตั้งสมมติฐานว่า ขมิ้นชันขณะอบแห้งเกิดการหดตัวน้อยมาก มีลักษณะเป็นแผ่นบาง และมีการเคลื่อนที่ของความชื้นไปในทิศทางเดียว ซึ่งจะได้คำตอบดังสมการที่ 9 [20]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2n+1)^2} \right] \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (9)$$

สำหรับการอบแห้งที่ใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนานและเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สามารถแทนค่า $n=0$ ในสมการที่ (9) เพียงเทอมเดียว ซึ่งจะได้ผลเฉลยดังสมการที่ (10)

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (10)$$

โดยที่ D_{eff} คือ ค่าการแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที), L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นวัสดุ (เมตร), t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (วินาที) และเมื่อพล็อตกราฟของ $\ln MR$ เทียบกับเวลา t จะได้ค่า Slope จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า D_{eff} โดยใช้สมการที่ (11) [4]

$$D_{\text{eff}} = (\text{Slop}) \left(\frac{-4(L)^2}{\pi^2} \right) \quad (11)$$

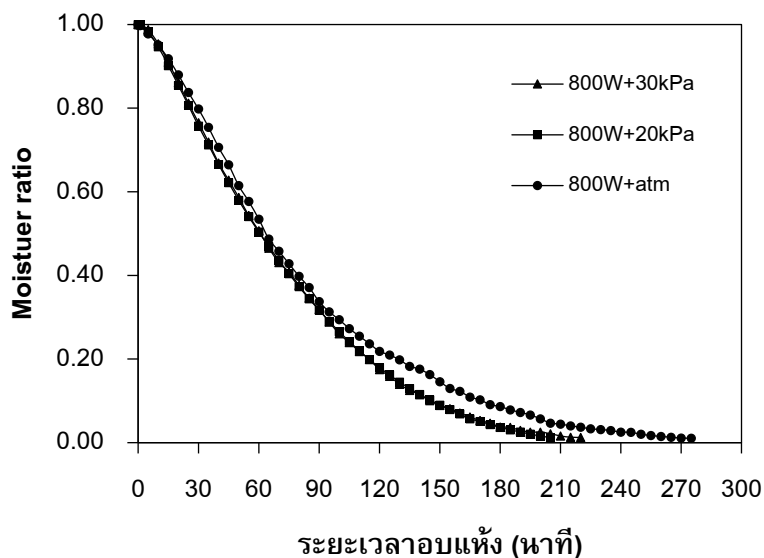
3. ผลการวิจัย

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชัน

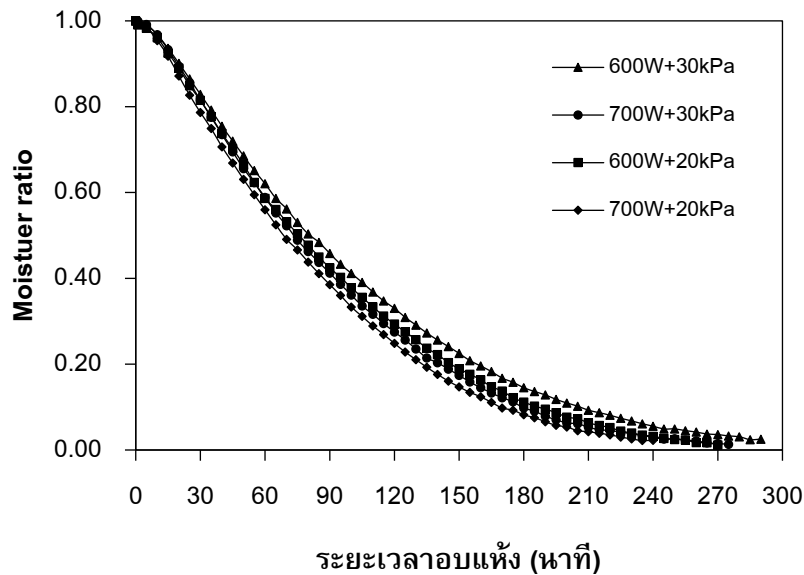
ขมิ้นชันมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 898.00 มาตรฐานแห้ง ทำการอบแห้งจนกระทั่งขมิ้นชันมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13.63 มาตรฐานแห้ง (ร้อยละ 12 มาตรฐานเปียก) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ขมิ้นชันอบแห้ง โดยอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ (ปิด:เปิด = 10:10 วินาที) ที่ความดันบรรยากาศ และระดับกำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ (ปิด:เปิด = 10:10 วินาที) ที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ 20 และ 30 กิโลปาสคาล

ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศพบว่า การลดความดันสัมบูรณ์ให้ต่ำลงและการเพิ่มกำลังไมโครเวฟให้สูงขึ้น ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันจากผลการทดลองในรูปที่ 3 พบว่าระยะเวลาการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ (275 นาที) ใช้ระยะเวลานานกว่าการอบแห้งภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสคาล (205 และ 220 นาที ตามลำดับ) จากรูปที่ 4 พบว่าที่ระดับความดันสุญญากาศเดียวกัน การเพิ่มกำลังไมโครเวฟส่งผลให้ความชื้นลดลงได้เร็วขึ้นและระยะเวลาอบแห้งสั้นลง โดยที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ 30 กิโลปาสคาล กำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 290 และ 275 นาที ตามลำดับ และที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ 20 กิโลปาสคาล กำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์ ใช้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 270 และ 240 นาที ตามลำดับ อิทธิพลของความดันสุญญากาศมีผลทำให้อัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งลดลงเร็วกว่าการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ เนื่องจากภายใต้สภาวะสุญญากาศจุดเดือดของน้ำมีค่าลงต่ำลง (จุดเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ 30 และ 20 กิโลปาสคาล ประมาณ 100.69 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) [21] ในขณะที่การเพิ่มกำลังไมโครเวฟมีผลทำให้โมเลกุลของน้ำในขมิ้นชันถูกกระตุ้นและสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของพลังงานไมโครเวฟที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความดันไอน้ำในขมิ้นชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำที่มากขึ้นช่วยให้ความชื้นเคลื่อนที่จากภายในออกสู่ผิวของขมิ้นชันได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น [22] การเพิ่มกำลังไมโครเวฟร่วมกับการลดความดันสัมบูรณ์ ในการอบแห้งขมิ้นชันจึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น จากรูปที่ 5 อัตราการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล มีอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงที่สุดและใช้ความดันสัมบูรณ์ต่ำที่สุด ในขณะที่เดียวกันการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล มีอัตราการอบแห้งที่ต่ำที่สุด นอกจากนี้พบว่า

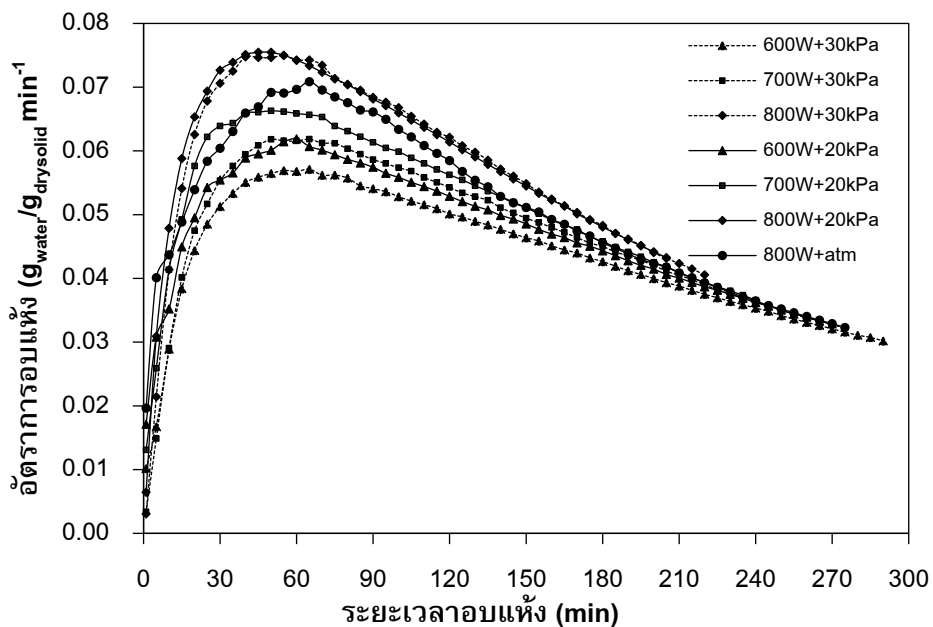
การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ มีอัตราการอบแห้งที่ต่ำกว่าความดันสัมบูรณ์ 30 และ 20 กิโลปาสกาล ซึ่งเป็นผลมาจากความดันที่ต่ำลงช่วยเร่งการอบแห้ง โดยผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการวิจัยของ Borah et al [23] ที่อบแห้งลูกพลับพบว่า เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟจาก 200 วัตต์ เป็น 500 วัตต์ สามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้ร้อยละ 42 และจากงานวิจัยของ Khatun et al [24] ในการอบแห้งแก้วมังกรด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟ จาก 400 วัตต์ เป็น 800 วัตต์ ส่งผลให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง จาก 91 นาที เหลือเพียง 63 นาที (ลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ร้อยละ 30) นอกจากนี้ในงานวิจัยการอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศของ Pakseepaeng et al [8] พบว่า เมื่อความดันสัมบูรณ์ลดลงจาก 20 กิโลปาสกาล เป็น 5 กิโลปาสกาล สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ประมาณร้อยละ 23



รูปที่ 3 การลดลงของอัตราส่วนความชื้นของขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ และความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสกาล



รูปที่ 4 การลดลงของอัตราส่วนความชื้นของไขมันชั้นที่กำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์ และความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสคาล



รูปที่ 5 อัตราการอบแห้งไขมันชั้นที่กำลังไมโครเวฟและความดันสัมบูรณ์แตกต่างกัน

3.2 คุณภาพของไขมันชั้นหลังอบแห้ง

ไขมันชั้นที่อบแห้งในทุกเงื่อนไขการทดลองมีความชื้นอยู่เกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ไขมันชั้นอบแห้ง โดยมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13.6 มาตรฐานแห้ง และมีค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งโดยมีค่าต่ำกว่า 0.6 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เวลาอบแห้ง ปริมาณความชื้น และค่าปริมาณน้ำอิสระ ของไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

เงื่อนไขการอบแห้ง	เวลาอบแห้ง (นาที)	ความชื้น (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	a_w
ไขมันชั้นสด	-	899.39	-
800 W+atm	275	12.37±1.48 ^a	0.59±0.01 ^b
600 W+20 kPa	270	11.71±2.17 ^a	0.58±0.03 ^b
700 W+20 kPa	240	10.16±1.06 ^a	0.43±0.03 ^a
800 W+20 kPa	205	10.44±0.57 ^a	0.55±0.06 ^b
600 W+30 kPa	290	12.95±0.82 ^a	0.58±0.02 ^b
700 W+30 kPa	275	10.74±2.46 ^a	0.59±0.00 ^b
800 W+30 kPa	220	12.37±1.48 ^a	0.57±0.01 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

สำหรับค่าสีของไขมันชั้นหลังอบแห้ง ดังตารางที่ 3 พบว่าค่า L^* a^* และ b^* มีค่าอยู่ระหว่าง 19.24-32.53, 14.81-27.14 และ 17.01-26.16 ตามลำดับ การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล ให้ค่าความสว่าง L^* สูงกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสกาล และความดันบรรยากาศอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าการอบแห้งที่ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศมีค่าความสว่างต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญกับเงื่อนไขอื่น ๆ ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกับงานวิจัยของ Junlakan [25] ที่ศึกษาการอบแห้งมะม่วงเบาด้วยลมร้อนเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยสุญญากาศพบว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศมีค่า L^* ที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากในระหว่างการอบแห้งภายใต้ความดันบรรยากาศ มีออกซิเจนในอากาศทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ นอกจากนี้การอบแห้งภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสกาล ที่จุดเดือดของน้ำลดต่ำลง [21] ความร้อนที่ไขมันชั้นได้รับจากไมโครเวฟจะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิของเนื้อวัสดุ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ 3 คุณภาพด้านสีของขมิ้นชันก่อนและหลังการอบแห้ง

เงื่อนไขการอบแห้ง	ค่าสี			
	L*	a*	b*	ΔE^*
ขมิ้นชันสด	28.84±0.99 ^d	16.15±1.30 ^a	14.84±1.57 ^a	-
800 W+atm	19.24±1.90 ^a	27.14±1.38 ^b	19.78±3.39 ^b	15.07±3.71 ^c
600 W+20 kPa	32.53±1.61 ^e	16.48±1.18 ^a	21.18±1.78 ^c	7.49±3.04 ^b
700 W+20 kPa	30.83±1.25 ^{de}	15.55±1.42 ^a	17.01±1.09 ^a	3.59±1.50 ^a
800 W+20 kPa	31.73±2.08 ^e	14.81±1.32 ^a	17.42±2.27 ^{ab}	5.11±2.51 ^{ab}
600 W+30 kPa	21.42±1.41 ^{ab}	25.26±1.53 ^b	23.34±1.92 ^{de}	14.86±1.81 ^c
700 W+30 kPa	23.88±1.88 ^c	25.46±1.82 ^b	26.16±2.81 ^e	15.80±2.60 ^c
800 W+30 kPa	21.96±1.87 ^{bc}	25.17±1.23 ^b	23.68±1.28 ^{de}	14.69±1.68 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

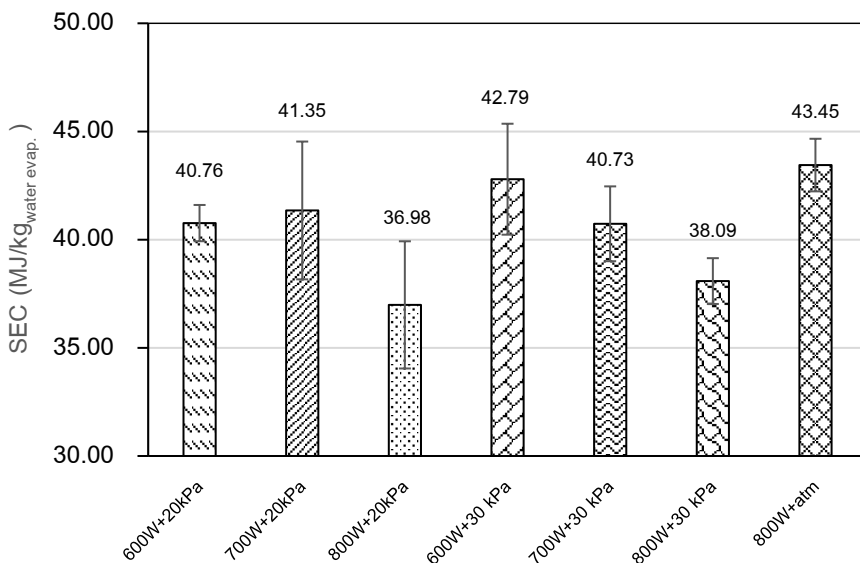
ผลของกำลังไมโครเวฟพบว่า การเพิ่มกำลังไมโครเวฟมีผลต่อค่าความสว่าง (L*) น้อยกว่า การลดลงของความดันสัมบูรณ์ โดยที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล สามารถทำให้ค่าความสว่างให้สูงกว่าขมิ้นสด และการเพิ่มกำลังไมโครเวฟไม่มีผลต่อค่าความสว่าง ในขณะที่การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล และที่ความดันบรรยากาศ มีค่าความสว่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล แสดงให้เห็นว่า สภาวะสุญญากาศที่เหมาะสมช่วยลดผลกระทบจากความร้อนของไมโครเวฟที่มีต่อค่าสีได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ Hirun et al [2] พบว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ใช้กำลังไมโครเวฟสูงและระยะเวลาอบแห้งนาน (ในช่วง 3,500-4,000 วัตต์ และ 27-30 นาที) สามารถช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากเอนไซม์ polyphenol oxidase ซึ่งช่วยในการรักษาค่าความสว่างของขมิ้นชันได้ดีขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ค่า a* และ b* พบว่ามีค่าเป็นบวก แสดงถึงค่าสีแดงและสีเหลืองตามลำดับ การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล และที่ความดันบรรยากาศ มีค่า a* และ b* สูงกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล เนื่องจากการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล ซึ่งมีจุดเดือดของน้ำประมาณ 60 องศาเซลเซียส [21] อุณหภูมิที่ผิวหน้าวัสดุในขณะนี้น้ำระเหยออกยังไม่สูงมากจนเกินไป ในขณะที่การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล และความดันบรรยากาศมีจุดเดือดของน้ำที่สูงกว่า อาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาดด้วยความร้อนสูงเฉพาะจุด (Hot spots) ซึ่งนำไปสู่การไหม้ของขมิ้นชัน [26] ซึ่งสีของการไหม้ส่งผลต่อค่าสีแดงและสีเหลืองของขมิ้นชันหลังการอบแห้ง

ในด้านของค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) ของขมิ้นชันที่อบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับขมิ้นชันก่อนอบแห้งที่มีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 28.84 16.15 และ 14.84 ตามลำดับ พบว่าค่า ΔE^* มีค่าอยู่ระหว่าง 3.59-15.80 การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ และ 800 วัตต์ ที่ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล มีค่า ΔE^* ต่ำที่สุด โดยมีค่า 3.59 และ 5.11 ตามลำดับ ทั้งสองเงื่อนไขไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสกาลในทุกกำลังไมโครเวฟ และการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศพบว่าค่า ΔE^* มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ แต่โดยทั่วไปแล้วสามารถรับรู้ความแตกต่างของสีได้อย่างชัดเจนเมื่อค่า ΔE^* มีค่ามากกว่า 5 [27] โดยสรุปแล้วการอบแห้งขมิ้นชันภายใต้เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ ที่ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล จึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการรักษาคุณภาพด้านสีของขมิ้นชันหลังการอบแห้ง

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่เงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน จากนั้นนำน้ำหนักขมิ้นชันก่อนและหลังการอบแห้ง และปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้ง มาทำการคำนวณหา ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ดังในรูปที่ 6 พบว่าในทุกเงื่อนไขการทดลอง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 800 วัตต์ ร่วมกับ ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด โดยมีค่า 36.98 เมกกะจูล/กรัม_{น้ำระเหย} รองลงมาได้แก่ที่ 800 วัตต์ ร่วมกับ ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสกาล มีค่า 38.09 เมกกะจูล/กรัม_{น้ำระเหย} ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานสูงที่สุด 43.45 เมกกะจูล/กรัม_{น้ำระเหย} การอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล เป็นเงื่อนไขที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด จึงส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไมโครเวฟและสูญญากาศน้อยลงไปด้วย ในขณะที่เดียวกันที่กำลังไมโครเวฟที่เท่ากันเมื่อลดความดันสัมบูรณ์พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดต่ำลง ผลที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับงานวิจัยของ Manangan and Witinantakit [15] ที่อบแห้งดอกบัวภายใต้ความดันสัมบูรณ์ที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์ลงมีผลทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง และ Zhang et al [28] ที่อบแห้งเมล็ดชาพบว่าเมื่อลดความดันภายในห้องอบแห้งให้ต่ำลงส่งผลให้ระยะเวลาอบแห้งและการใช้พลังงานในการอบแห้งลดลง แต่ที่กำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ พบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 20 กิโลปาสกาล สูงกว่าที่ 30 กิโลปาสกาล อาจเกิดจากการใช้พลังงานในการสร้างความดัน

สูญญากาศมากกว่าเพื่อให้ได้ความดันที่กำหนด แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยไม่มีระบบสูญญากาศร่วม ส่งผลให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง



รูปที่ 6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขมิ้นชัน

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจะทำการวิเคราะห์หาสมการแทนความสัมพันธ์ของเส้นโค้งการอบแห้ง [19] จากอัตราส่วนความชื้นของการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 20 และ 30 กิโลปาสกาล และกำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ และที่ความดันบรรยากาศ กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการเอมพิริคัล ผลการวิเคราะห์ได้ค่าพารามิเตอร์ของสมการดังตารางที่ 4 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเฉลี่ย (R^2) อยู่ในช่วง 0.98685-0.99995 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) อยู่ในช่วง 0.00323-0.05230 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลของ Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ($R^2 = 0.99995$) และค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด (RMSE = 0.00323) สอดคล้องกับกราฟเปรียบเทียบของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากสมการของ Midilli ที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ดังรูปที่ 7 และกำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์ดังรูปที่ 8

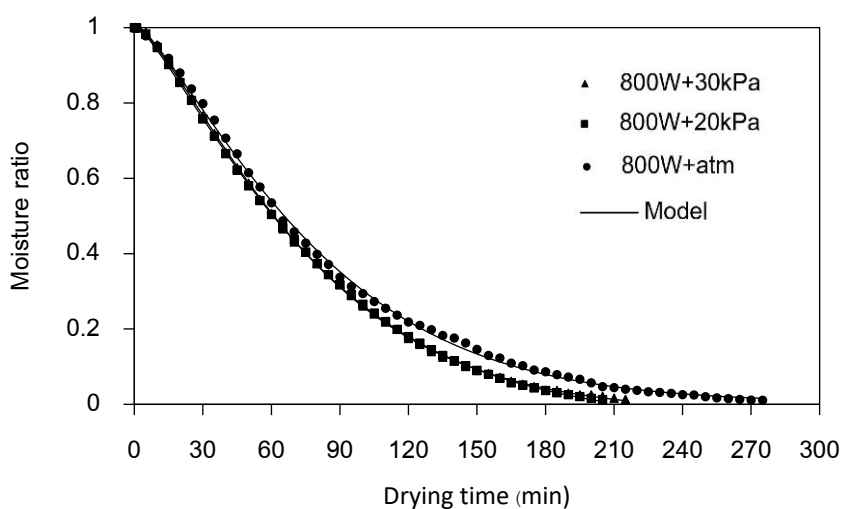
ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัล

Model	MV (W)	P (kPa)	Constant	R ²	RMSE
Newton	800	atm	k=0.01184	0.99080	0.04227
	800	20	k=0.01031	0.98895	0.04654
	800	30	k=0.01128	0.98922	0.04604
	700	20	k=0.01302	0.98721	0.05115
	700	30	k=0.00949	0.99046	0.04269
	600	20	k=0.01066	0.98801	0.04910
	600	30	k=0.01304	0.98685	0.05230
			Average	0.98879	0.04716
Page	800	atm	k=0.00305 n=1.29504	0.99954	0.00944
	800	20	k=0.00227 n=1.32009	0.99968	0.00796
	800	30	k=0.00263 n=1.31477	0.99978	0.00656
	700	20	k=0.00267 n=1.35312	0.99968	0.00809
	700	30	k=0.00235 n=1.29109	0.99984	0.00556
	600	20	k=0.00209 n=1.34716	0.99983	0.00591
	600	30	k=0.00246 n=1.37154	0.99982	0.00610
			Average	0.99974	0.00709
Henderson & Pabis	800	atm	k=0.01289 a=1.09272	0.99525	0.03054
	800	20	k=0.01120 a=1.08974	0.99354	0.03562
	800	30	k=0.01225 a=1.08830	0.99384	0.03485
	700	20	k=0.01419 a=1.09290	0.99237	0.03957
	700	30	k=0.01031 a=1.08910	0.99504	0.03082
	600	20	k=0.01169 a=1.10135	0.99351	0.03619
	600	30	k=0.01426 a=1.09981	0.99237	0.03985
			Average	0.99370	0.03535
Logarithmic	800	atm	k=0.01094 a= 1.13330 c=-0.06572	0.99757	0.02184
	800	20	k=0.00864 a=1.17848 c=-0.121432	0.99861	0.01654
	800	30	k=0.00947 a=1.17913 c=-0.121969	0.99862	0.01654

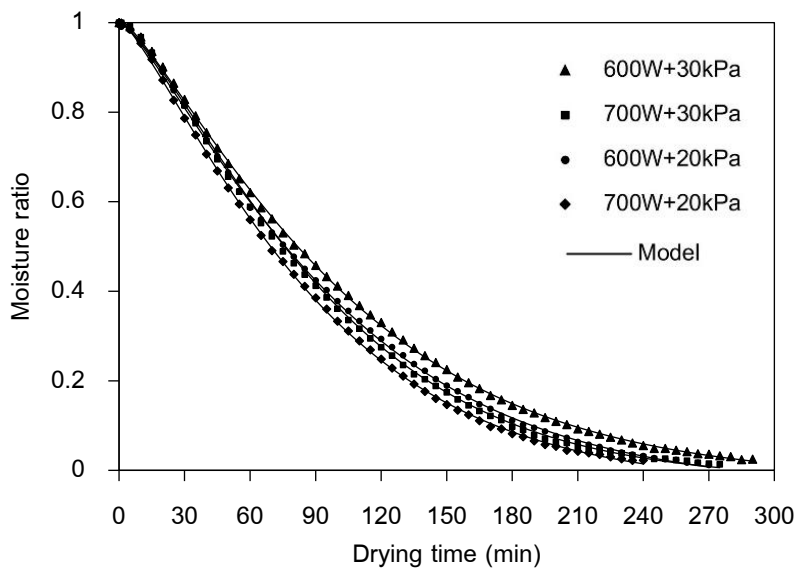
ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอ็มพริคัล (ต่อ)

Model	MV (W)	P (kPa)	Constant	R ²	RMSE
Logarithmic (cont.)	700	20	k=0.01051 a=1.20690 c=-0.148411	0.99851	0.01751
	700	30	k=0.00832 a=1.15990 c=-0.098608	0.99867	0.01596
	600	20	k=0.00931 a=1.17363 c=-0.102577	0.99799	0.02016
	600	30	k=0.01088 a=1.19523 c=-0.128321	0.99786	0.02111
			Average	0.99826	0.01852
Midilli	800	atm	k=0.00329 n=1.28298 a=1.01173 b=0.00001	0.99955	0.00855
	800	20	k=0.00309 n=1.24580 a=1.00659 b=-0.00011	0.99989	0.00436
	800	30	k=0.00337 n=1.25361 a=1.00740 b=-0.00010	0.99992	0.00368
	700	20	k=0.00367 n=1.27189 a=1.00835 b=-0.00016	0.99995	0.00323
	700	30	k=0.00290 n=1.24434 a=1.00959 b=-0.00005	0.99991	0.00397
	600	20	k=0.00217 n=1.33002 a=1.00079 b=-0.00006	0.99974	0.00684
	600	30	k=0.00299 n=1.32388 a=1.00744 b=-0.00008	0.99991	0.00422
			Average	0.99984	0.00498

หมายเหตุ: MV คือ กำลังไมโครเวฟ (วัตต์), P คือความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสกาล)



รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลอง Midilli ในการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์



รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลอง Midilli ในการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์

3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ของการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ และกำลังไมโครเวฟที่ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสคาล ดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งขมิ้นชัน

เงื่อนไขการอบแห้ง		D_{eff} (ตารางเมตรต่อวินาที)
กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	ความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสคาล)	
800	atm	9.747×10^{-11}
600	20	6.626×10^{-11}
700	20	7.762×10^{-11}
800	20	10.111×10^{-11}
600	30	6.457×10^{-11}
700	30	6.962×10^{-11}
800	30	9.938×10^{-11}

จากตารางที่ 5 พบว่า การใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงและการลดความดันสัมบูรณ์ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยที่เงื่อนไขการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงที่สุด (10.111×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที) และกำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลต่ำที่สุด (6.457×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที) สอดคล้องกับอัตราการอบแห้งที่พบว่าการใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้นและการลดความดันสัมบูรณ์ลงมีผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

4. สรุป

การอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ และการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสคาล ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มกำลังไมโครเวฟและการลดความดันสัมบูรณ์ ส่งผลให้การลดลงของอัตราส่วนความชื้นเร็วขึ้น โดยที่ กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล มีประสิทธิภาพในการลดความชื้นได้ดีที่สุด มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ใช้ระยะเวลา น้อยที่สุด มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงที่สุด สำหรับคุณภาพขมิ้นชันหลังอบแห้งพบว่า ในทุกเงื่อนไขการอบแห้งสามารถอบแห้งขมิ้นชันให้มีความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนคุณภาพด้านสี พบว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE^*) ต่ำที่สุด (3.59 ± 1.50) นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ทำนายการอบแห้งขมิ้นชัน คือแบบจำลองของ Midilli โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ($R^2 = 0.99995$) และค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด ($RMSE = 0.00323$)

5. ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรศึกษาผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระ เพื่อให้ได้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมทั้งคุณภาพด้านกายภาพและคุณภาพด้านเคมี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

References

- [1] Chumroenphat T, Somboonwatthanakul I, Saensouk S, Siriamornpun S. Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric (*Curcuma longa* L.) under freeze-drying and low-temperature drying methods. Food Chemistry 2021;339:128121. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128121.
- [2] Hirun S, Utama-ang N, Roach PD. Turmeric (*Curcuma longa* L.) drying: an optimization approach using microwave-vacuum drying. Journal of Food Science and Technology 2014;51:2127-33. doi: 10.1007/s13197-012-0709-9.
- [3] Ratmanee P, Phitakwinai S, Nilhont W, Buakaew W. Thin layer drying kinetics of turmeric using hot air dryer. The Journal of Industrial Technology 2021;17(2):32-45. doi: 10.14416/j.ind.tech.2021.06.001. (In Thai)
- [4] Komonsing N, Khuwijitjaru P, Nagle M, Müller J, Mahayothee B. Effect of drying temperature together with light on drying characteristics and bioactive compounds in turmeric slice. Journal of Food Engineering 2022;317:110695. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110695.
- [5] Monton C, Luprasong C, Charoenchai L. Convection combined microwave drying affect quality of volatile oil compositions and quantity of curcuminoids of turmeric raw material. Revista Brasileira de Farmacognosia 2019;29(4):434-40.
- [6] Krachang N, Uengkimbuan N. Kinetics and modeling of turmeric using hot air and infrared drying. Burapha Science Journal 2016;21(3):239-48. (In Thai)
- [7] Wang D, Wang Y, Pandiselvam R, Su D, Xu H. Comparative analysis of drying methods on *Pleurotus eryngii*: impact on drying efficiency, nutritional quality, and flavor profile. Food and Bioprocess Technology 2024;17:4598-616.
- [8] Pakseepaeng J, Sayompark D, Witinantakit K. Drying kinetic and quality of black kaempferia drying using microwave-vacuum technique. Kasem Bundit Engineering Journal 2023;13(2):21-41. (In Thai)
- [9] Gong B, Moraru CI. A mechanistic, state diagram approach to understanding microwave vacuum drying and expansion of natural cheese. LWT 2025;233:118515. doi: 10.1016/j.lwt.2025.118515.
- [10] Wardhani NSK, Amanda N, Sari AR. Microwave vacuum drying on fruit: a review. Advances in Biological Sciences Research 2022;19:309-16. doi: 10.2991/absr.k.220305.047.

- [11] Nathakaranakule A, Paengkanya S, Soponronnarit S. Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input. Food and Bioproducts Processing 2019;116:105-17. doi: 10.1016/j.fbp.2019.04.010.
- [12] Jia Y, Khalifa I, Hu L, Zhu W, Li J, Li K, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: a comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. Food and Bioproducts Processing 2019;118:67-76. doi: 10.1016/j.fbp.2019.08.018.
- [13] Thai Industrial Standards Institute. Turmeric (*Curcuma longa* Linn.)-Dried form (TIS 890-1989). Bangkok: Ministry of Industry; 1989.
- [14] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official methods of analysis. 17th ed. Gaithersburg, Maryland: AOAC international; 2000.
- [15] Manangan W, Witinantakit K. Water lily drying using pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(3):84-98. (In Thai)
- [16] An J, Du Y, Yan J, Xie H, Liao X, Wei H. Study on the characteristics and kinetics of microwave hot air combined drying of peanut pods. Case Studies in Thermal Engineering 2024;60:104640. doi: 10.1016/j.csite.2024.104640.
- [17] Jaekhom S, Witinantakit K, Boonthum E. Kaffir lime leaves drying using far infrared-vacuum technique. Srinakharinwirot Engineering Journal 2021;16(1):59-70. (In Thai)
- [18] Karthikeyan AK, Murugavelh S. Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. Renewable Energy 2018;128(Pt A):305-12. doi: 10.1016/j.renene.2018.05.061.
- [19] Witinantakit K, Jaekhom S. Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):29-44. (In Thai)
- [20] Witinantakit K, Uengkimbuan N, Rungsawang S. Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique. Srinakharinwirot Engineering Journal 2019;14(3):1-13.
- [21] Cengel YA, Boles MA. Thermodynamics: an engineering approach. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2006.
- [22] Belonio LH, Varith J, Jaturonglumlert S, Narkprasom K, Narkprasom N, Arkanit K, et al. Performance of microwave-vacuum drying on flavonoids and saponins

- availability in *Carica papaya* leaves. Results in Engineering 2025;26:104909. doi: 10.1016/j.rineng.2025.104909.
- [23] Borah MS, Raj GB, Tiwari A, Dash KK. Effect of intermittent microwave convective drying on quality characteristics of persimmon fruit. Journal of Agriculture and Food Research 2023;14:100816. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100816.
- [24] Khatun P, Karmakar A, Chakraborty I. Microwave-vacuum drying: modeling validation of drying and rehydration kinetics, moisture diffusivity and physicochemical properties of dried dragon fruit slices. Food and Humanity 2024;2:100292. doi: 10.1016/j.foohum.2024.100292.
- [25] Junlakan W. Vacuum drying kinetics of mango (*Mangifera indica* L. Var.) slices. Burapha Science Journal 2017;22(3):358-73. (in Thai)
- [26] Çelen S. Effect of microwave drying on the drying characteristics, color, microstructure, and thermal properties of trabzon persimmon. Foods 2019;8(2):84. doi: 10.3390/foods8020084.
- [27] Bai J, Wang Y, Cai J, Zhang L, Dai Y, Tian X, et al. Three-dimensional appearance and physicochemical properties of *Pleurotus eryngii* under different drying methods. Foods 2023;12(10):1999. doi: 10.3390/foods12101999.
- [28] Zhang D, Huang D, Zhang X, Zhao H, Gong G, Tang X, et al. Drying performance and energy consumption of *Camellia oleifera* seeds under microwave-vacuum drying. Food Science and Biotechnology 2023;32:969-77. doi: 10.1007/s10068-022-01239-0.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายณัฐภักดิ์ อิ่มเอิบ นักศึกษาหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เลขที่ 43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 089-407-6986
Email: natthapak_im@rmutto.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัดน์ สิตรานนท์ อาจารย์ประจำหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก เลขที่ 43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
20110 โทรศัพท์ 081-001-0903 Email: jirawat_si@rmutto.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ อาจารย์ประจำ
หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีพลังงาน)
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลตะวันออก เลขที่ 43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัด
ชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 086-386-1885 Email: kittisak_wi@rmutto.ac.th

Article History:

Received: December 11, 2025

Revised: March 30, 2026

Accepted: April 9, 2026