

การอบแห้งใบมะกรูดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล Kaffir Lime Leaves Drying Using Far Infrared-Vacuum Technique

ศรีมา แจ้คำ^{1*} กิตติศักดิ์ วิธินันทิตต์¹ เอกภูมิ บุญธรรม²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 156 ม.5 ต.พลาญชุมพล อ.เมือง จ.ปทุมธานี 65000

Srima Jaekhom^{1*} Kittisak Witinantakit¹ Eakpoom Boonthum²

¹Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Choburi 20110

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology,

Pibulsongkram Rajabhat University

156 Moo 5 Plai Chumpon Subdistrict, Muang District, Phitsanulok 65000

*Corresponding author Email: srima_j@hotmail.com

(Received: November 22, 2020; Accepted: March, 15, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพด้านสี สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และหาสมการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยทดลองอบแห้งใบมะกรูดจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 170 มาตรฐานแห้ง ภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 5 มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง และการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้ความแตกต่างด้านสีน้อยลง ดังนั้นที่ความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูด นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 1.4221×10^{-12} ถึง 6.1840×10^{-12} ตารางเมตรต่อวินาที โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และสมการอบแห้งเอมพิริคัลของเดเมอร์และคณะสามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูดได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (0.99973) สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (0.00425) และค่าการลดลงไคกำลังสอง (0.03964×10^{-3}) ต่ำที่สุด

คำสำคัญ: ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ใบมะกรูด สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น สุญญากาศ อินฟราเรดไกล

ABSTRACT

Objectives of this research were to study drying kinetic, specific energy consumption, color quality, effective moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling for predicting drying kinetic of kaffir lime leaves by combined vacuum and far-infrared. Conditions of this research were conducted by initial moisture content of kaffir lime leaves was 170%d.b., drying at absolute pressure of 5 kPa and 15 kPa and temperature of 45°C and 55°C, final moisture content of kaffir lime leaves was 5%d.b. Results shown that drying time and specific energy consumption were decreased whereas drying rate was increased by decreasing of absolute pressure and increasing of drying temperature. Anyway, color difference was decreased by drying at low temperature. Therefore, drying condition at absolute pressure of 5 kPa and temperature of 45°C was the optimum condition for drying of kaffir lime leaves. Moreover, effective moisture diffusivity coefficient was 1.4221×10^{-12} to 6.1840×10^{-12} m²/s. Effective moisture diffusivity coefficient was increased by decreasing of absolute pressure and increasing of drying temperature. Demir et al.'s empirical modelling was the best modelling for predicting of drying kinetic of kaffir lime leaves at decision coefficient was the highest at 0.99973, the lowest root mean square error was 0.00425 and the lowest chi-squared reduction was 0.03964×10^{-3} .

Keyword: Specific energy consumption, kaffir lime leaves, effective moisture diffusivity coefficient, vacuum, far-infrared.

1. บทนำ

กระบวนการทำแห้งเป็นการแปรรูปและถนอมอาหารที่สำคัญมากในปัจจุบัน นอกจากจะเป็นการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์แล้ว ที่สำคัญก็เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้อาหารเสื่อมคุณภาพ แต่การทำแห้งอาหารในปัจจุบันมีบทบาทที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ที่ผ่านการแปรรูปต้องมีคุณภาพทางโภชนาการสูง ปลอดภัย และมีอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น กระบวนการทำแห้งจึงเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อาหารสด หรือแปรรูปอาหารเหลวให้เป็นอาหารผง เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา สะดวกในการจัดเก็บ ขนส่ง เพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร รวมถึงต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ปลอดภัยและมีลักษณะเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

สมุนไพรไทย เช่น ใบมะกรูด ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อนและจำเป็นต้องรักษาคุณค่าทางโภชนาการไว้ให้ได้ที่สุดภายหลังกระบวนการทำแห้ง [1] ในประเทศไทยสมุนไพรมีศักยภาพทางเศรษฐกิจสูง ข้อมูลจากศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศมหาวิทยาลัยหอการค้าไทยระบุว่าประเทศไทยส่งออกสมุนไพรและสารสกัดปีละประมาณ 1,000 ล้านบาท เมื่อปี 2559 ตลาดสมุนไพรทั้งเวชสำอาง อาหารเสริม เครื่องดื่มและสมุนไพรแห้ง สมุนไพรสด ในประเทศมีมูลค่าประมาณ 3.92 หมื่นล้านบาท และคาดว่าจะขยายตัวเป็น 5.69 หมื่นล้านบาท ในปี 2564 ซึ่งถือว่าการขยายตัวมีแนวโน้มที่ดีในเชิงเศรษฐกิจ [2]

การทำแห้งมีด้วยกันหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป การทำแห้งบางอย่างอาจจะสิ้นเปลืองพลังงานมาก และทำให้อาหารสูญเสียคุณค่าทางอาหารได้ง่าย เนื่องจากใช้ความร้อนสูงในการอบแห้ง ดังนั้นวิธีการระเหยน้ำออกจากอาหารที่อุณหภูมิต่ำ โดย

การใช้สุญญากาศร่วมในการทำแห้ง โดยสมมุติฐานแล้วจะทำให้อัตราการการทำแห้งเพิ่มขึ้นและเมื่อใช้ร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นในระดับโมเลกุลภายในวัสดุสามารถแพร่ความชื้นมาสู่ผิวของวัสดุเร็วขึ้นอันจะส่งผลให้ใช้เวลาอบแห้งสั้นลง ช่วยในการรักษากลิ่นรสชาติ ลักษณะทางกายภาพ เช่น สี รูปร่าง รวมถึงคุณค่าในโภชนาการให้คงอยู่ได้ [3]

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้มีการศึกษาอบแห้งข้าวด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบสุญญากาศ [4] พบว่าเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง การใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำมากจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีมากขึ้นด้วย Y. Xie et al. [5] ได้ศึกษาการอบแห้งชิ้นเห็ดเหี่ยว ซึ่งเป็นส่วนประกอบของยาสมุนไพรจีนดั้งเดิมเพื่อปรับปรุงสุขภาพ โดยใช้อินฟราเรดร่วมกับระบบสุญญากาศแบบพัลส์ พบว่า อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนจางหะพัลส์ที่เหมาะสม ซึ่งก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ L. Xie et al. [6] ซึ่งศึกษาการอบแห้งโกจิเบอร์รี่ พบว่า การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศทำให้ลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ดี สำหรับ J. Wang et al. [7] พบว่า การอบแห้งขึ้นมะนาวด้วยระบบสุญญากาศที่ใช้รังสีอินฟราเรดในการให้ความร้อนเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการอบแห้งและได้ขึ้นมะนาวที่ยังคงรักษาคุณภาพที่ดีไว้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการผสมผสานโดยใช้ไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศในการอบแห้งทุเรียนแผ่น [8] พบว่า อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นและส่งผลให้การใช้พลังงานจำเพาะน้อยลงด้วย สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด [9] แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจากสมการของ Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอมได้ดีที่สุด

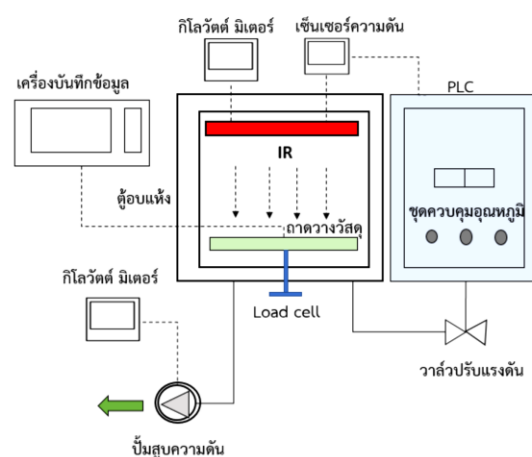
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพด้านสี น้ำมันหอมระเหย สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และหาสมการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยผู้วิจัยจะทำการทดลองกับสมุนไพรพื้นบ้าน คือ ใบมะกรูด และหวังว่าเทคโนโลยีนี้จะเป็นทางเลือกในการอบแห้งแบบผสมผสานกับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดอื่นต่อไป

2. อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับสุญญากาศ

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองมีดังนี้ (1) เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ ปัมสุญญากาศ (liquid ring) ขนาดมอเตอร์ 1/3 HP ทำความดันได้ถึง 10 Pa (วัดจากความดันศูนย์สัมบูรณ์) ซึ่งมีอัตราการทำสุญญากาศได้มากกว่าขอบเขตในการศึกษา อัตราการไหลที่ 6 m³/hr ภายในมีแหล่งความร้อนคือรังสีอินฟราเรดขนาด 250 W ยี่ห้อ infrapara รุ่น EL-2-250, 220 V, 380°C, ขนาดพื้นที่ 122x122 mm² อุปกรณ์ Load cell สำหรับเก็บข้อมูลน้ำหนักภายในตู้อบแห้ง พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและความดันดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไดอะแกรมเครื่องอบแห้งรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับระบบสุญญากาศ

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองการอบแห้งนี้ใช้ตัวอย่างสมุนไพรในการทดลอง คือ ใบมะกรูด ทดลองครั้งละ 30 กรัม จำนวน 3 ซ้ำ ในแต่ละสภาวะการทดลอง โดยทำการทดลองที่สภาวะดังนี้ (1) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa อุณหภูมิ 45°C (2) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa อุณหภูมิ 55°C (3) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45°C และ (4) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 55°C สำหรับใบมะกรูดจะเด็ดก้านออกให้เหลือแต่ใบ และนำบางส่วนไปชั่งน้ำหนักและนำไปอบแห้งในตู้อบแห้งแบบลมร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการความค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน AOAC [10] จากนั้นนำผลิตภัณฑ์เข้าในตู้อบแห้ง พร้อมเปิดเครื่องอบแห้งสุญญากาศแล้วตั้งค่าความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิ การทดลองตามสภาวะต่างๆ ที่กำหนด ทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จากโหลดเซลล์ และค่าการใช้พลังงานรวมจากมิเตอร์ ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายตามที่กำหนด (ประมาณ 5% d.b.) นำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพในลำดับต่อไป

2.3 การทดสอบคุณภาพด้านสีของใบมะกรูด

การทดสอบคุณภาพด้านสีของใบมะกรูด ทดสอบสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d เป็นการทดสอบสีแบบ L a b โดยจะนำค่าความแตกต่างของสีผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้งและหลังจากอบแห้งมาเปรียบเทียบกับ เพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งที่สภาวะใดมีค่า ΔE น้อยที่สุด ตามสมการที่ (1) ซึ่งจะถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดก่อนอบแห้งมากที่สุด โดยใช้แสง Daylight ที่ 6,500 K ในการวัดสี

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

โดยที่ ΔE คือ ความแตกต่างกันของสี ΔL คือ ความแตกต่างของความสว่าง Δa คือ ความแตกต่างของความ เป็นสีแดงถึงเขียว และ Δb คือ ความแตกต่างของความ เป็นสีเหลืองถึงน้ำเงิน

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) ที่ใช้ในการอบแห้ง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ มวลวัสดุก่อนการอบแห้ง และหลังการอบแห้ง และปริมาณการใช้พลังงานตลอดกระบวนการอบแห้ง มาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งใบมะกรูด ได้จากสมการที่ (2)

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

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

(MJ/kg_{water evap.})

m_i คือ มวลของใบมะกรูดก่อนอบแห้ง (kg)

m_f คือ มวลของใบมะกรูดหลังอบแห้ง (kg)

E_p คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

2.5 การทดสอบปริมาณน้ำมันหอมระเหย

การสกัดน้ำมันหอมระเหยใช้วิธีการกลั่นไอน้ำ (Steam distillation) [11, 12] คือ การให้น้ำผ่านใบมะกรูดที่ต้องการสกัดที่อยู่ในหม้อกลั่น น้ำมันระเหยจะถูกสกัดออกมาพร้อมกับไอน้ำซึ่งจะผ่านไปตามท่อ และถูกทำให้เย็นเก็บไว้ในขวด ซึ่งน้ำมันระเหยจะแยกตัวออกจากน้ำ ทำให้แยกออกได้ง่าย จากนั้นนำน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียดสูง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP224S พิกัด 220 g ค่าความละเอียด 0.0001 g โดยในการทดลองนี้จะเลือกใบมะกรูดหลังอบแห้งที่มีสีใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดที่สุด และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดเพียงสภาวะเดียว ไปทดสอบเทียบกับใบมะกรูดสดเท่านั้น

2.6 สมการเอมพิริคัล

การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetic) การอบแห้งใบมะกรูด จะสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้สมการเอมพิริคัล เนื่องจากเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีกระบวนการวิเคราะห์ง่ายและไม่ซับซ้อน และเป็นแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่นิยม

ใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร โดยแบบจำลองที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้จำนวน 7 สมการ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งสมการเอมพิริคัลจะแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นจำเป็นต้องทราบค่าความชื้นสมดุล แต่การอบแห้งวัสดุที่สภาวะสุญญากาศ น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าใกล้เคียงร้อยละศูนย์ ($M_{eq} \approx 0$ d.b.) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงสามารถคำนวณอัตราส่วนความชื้นโดยไม่ต้องใช้ความชื้นสมดุลได้ดังสมการที่ (3)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)

ตารางที่ 1 แบบจำลองเอมพิริคัล [4, 9, 13-16]

No.	Name	Model equation
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Weibull distribution	$MR = a - b \exp(-(kt)^n)$
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
7	Demir et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + b$

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

การหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง จะใช้ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองไปวิเคราะห์สมการโดยใช้วิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการในตารางที่ 1 ซึ่งมี

ดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของสมการเอมพิริคัล คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) การลดลงไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ดังสมการที่ (4)-(5) โดยสมการเอมพิริคัลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด และค่าการลดลงไคกำลังสองและรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด จะเป็นสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-p} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (5)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)

$MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล (decimal)

N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในสมการเอมพิริคัล

2.7 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient) เป็นสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุขณะอบแห้ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ วิธีการและอุณหภูมิการอบแห้ง ในงานวิจัยนี้จะตั้งสมมติฐานให้ใบมะกรูดมีรูพรุนเรขาคณิตเป็นแบบแผ่นแบน ความชื้นเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวตามความหนาของวัสดุ และวัสดุหดตัวน้อย ดังนั้นในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล สามารถเขียนสมการได้ตามกฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ (6)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

(m^2/s)

L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาใบมะกรูด (m)

($L=0.178 \pm 0.017$ mm)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาคำตอบของสมการที่ (6) สมมติให้การอบแห้งใช้เวลานาน และเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะพิจารณาเพียงทอมแรกเท่านั้นดังสมการที่ (7) และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง ได้ดังสมการที่ (8)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \text{Slope} \cdot t \quad (7)$$

เมื่อ

$$\text{Slope} = \frac{D_{eff} \pi^2}{4L^2} \quad (8)$$

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้ง [9, 15] และมีความสัมพันธ์ตามรูปสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) กับค่าของพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำหรือความชื้นให้เคลื่อนที่ออกจากวัสดุ โดยค่าพลังงานกระตุ้นสามารถวิเคราะห์ได้จากความลาดชันระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/T_{abs})$ ซึ่งมีเท่ากับ $(-E_a/R)$ และปัจจัยเลขชี้กำลังหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/T_{abs})$ ดังสมการที่ (9) และ (10)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (9)$$

หรือ

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT_{abs}} \quad (10)$$

เมื่อ D_0 คือ ปัจจัยเลขชี้กำลัง (m^2/s)

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

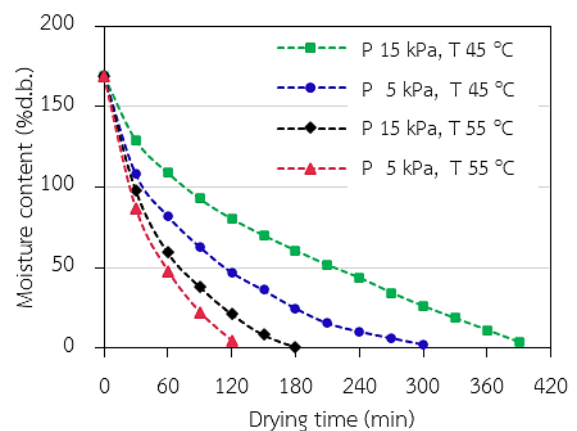
R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส (8.314 J/mol K)

T_{abs} คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

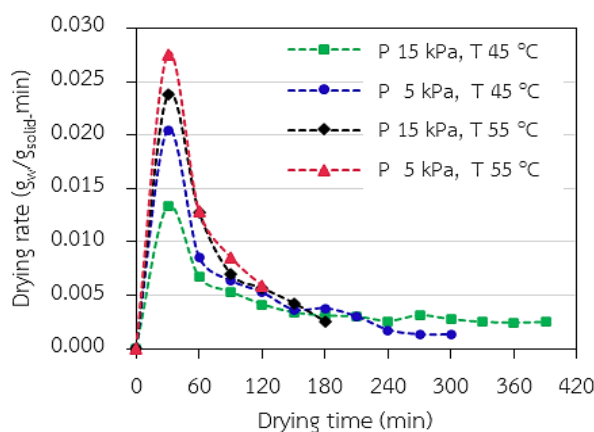
3. ผลการทดลอง

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด

จากการทดลองพบว่า ความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งดังรูปที่ 2 โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง เมื่อพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้ง พบว่า ที่ความดันสัมบูรณ์เดียวกัน อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C มีความชื้นลดลงเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 45 °C ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเร็วกว่า และสอดคล้องกับกราฟอัตราการอบแห้งตามรูปที่ 3 ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C มีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C ที่ความดันสัมบูรณ์เดียวกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งให้สูงขึ้นนั้น เป็นการเพิ่มพลังงานให้กับน้ำที่มีอยู่ใน



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นใบมะกรูดที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิ 45 และ 55 °C



รูปที่ 3 อัตราการอบแห้งใบมะกรูดที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิ 45 และ 55 °C

ผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะใช้เป็นพลังงานความร้อนในรูปของความร้อนแฝงในการระเหยน้ำออกไปจากผลิตภัณฑ์ ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด โดยที่สถานะความดันเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าและอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น

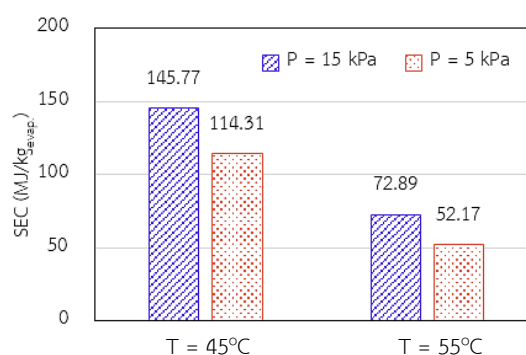
เมื่อพิจารณาที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa พบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa มีความชันของเส้นกราฟมากที่สุดนั่นคือ ความชื้นจะลดลงเร็วกว่าที่ความดัน 15 kPa ในขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa มีความชันลดลงค่อนข้างช้ากว่า ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะความดันสุญญากาศซึ่งมีอิทธิพลต่อจุดเดือดของน้ำ และสอดคล้องกับกราฟอัตราการอบแห้งตามรูปที่ 3 โดยน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa มีจุดเดือดประมาณ 33 และ 54 °C ตามลำดับ [4] เป็นผลให้การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่เร็วกว่า จึงสรุปได้ว่า ความดันสุญญากาศมีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด เมื่อความดันสัมบูรณ์ลดลง การอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกันจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น และความชื้นจะลดลงเร็วกว่า

นอกจากนี้การอบแห้งใบมะกรูดที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa (จุดเดือดน้ำ 54 °C) อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa (จุด

เดือดน้ำ 33 °C) อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C แสดงดังรูปที่ 2-3 แม้ว่าจุดเดือดของน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะต่ำกว่าก็ตาม แต่ทั้งสองสภาวะการอบแห้งนี้น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการอบแห้ง และการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa มีอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่า ทำให้ในช่วงแรกของการอบแห้งมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสภาวะแวดล้อมในห้องอบแห้งกับวัสดุมากกว่า ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและลดความชื้นได้ดีกว่า ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งข้าว [4] และซิง [16] ที่อบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดเหมือนกัน

3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่ความดัน 5 kPa มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดัน 15 kPa โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 21.58 และร้อยละ 28.43 ที่อุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากที่สถานะความดันสัมบูรณ์ต่ำ น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากจุดเดือดของน้ำต่ำลง จึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง สรุปได้ว่า การเปลี่ยนภาวะความดันสุญญากาศและอุณหภูมิอบแห้ง จะส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลง [4, 9] เมื่อสถานะความดันสัมบูรณ์ต่ำลงและอุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น



รูปที่ 4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบมะกรูด

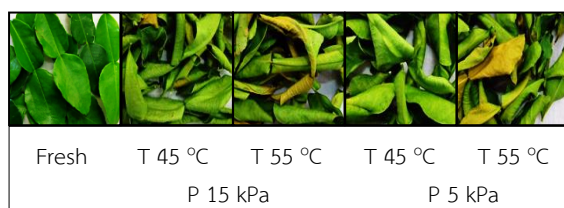
3.3 สีของใบมะกรูด

ค่าสีของผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดก่อนและหลังอบแห้ง ตามสภาวะต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 5 พบว่า ค่าความสว่าง (L) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิการอบแห้งที่ 45 °C ให้ค่าความสว่างใกล้เคียงกับสภาวะเริ่มต้นมากที่สุด และค่าความเป็นสีเขียว (-a) มีแนวโน้มสอดคล้องกัน นั่นคือสภาวะที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำจะมีความเป็นสีเขียวใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดมากกว่าการใช้อุณหภูมิสูง สำหรับค่า (b) ความเป็นสีเหลืองในทุกสภาวะการทดลองให้ผลโดยเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 สีของใบมะกรูดก่อนและหลังอบแห้ง

P (kPa)	T (°C)	L	a	b
Fresh		41.32±0.04 ^d	-9.33±0.05 ^e	24.99±0.09 ^b
15	45	43.74±0.05 ^b	-7.86±0.05 ^d	23.23±0.06 ^e
	55	46.23±0.05 ^a	-3.82±0.04 ^a	24.76±0.09 ^c
5	45	42.39±0.03 ^c	-7.56±0.03 ^c	24.47±0.01 ^d
	55	46.08±0.06 ^a	-4.57±0.05 ^b	26.01±0.06 ^a

a-e means in the same column with different superscripts are significantly different (p<0.05)



รูปที่ 5 ใบมะกรูดก่อนและหลังการอบแห้ง

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งในแต่ละสภาวะเทียบกับใบมะกรูดสด ดังตารางที่ 3 สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 45 °C ให้ความแตกต่างของสีน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 55 °C เนื่องจากใบมะกรูดถือว่าเป็นสมุนไพรที่ไวต่อความร้อน ดังนั้นอิทธิพลของอุณหภูมิจึงมีผลมากกว่าของความดันในการอบแห้ง ดังนั้นที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45 °C

ให้ผลของ ΔE น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับใบมะกรูดก่อนการอบแห้ง ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดง ใบมะกรูดสดและที่สภาวะต่างๆ หลังการอบแห้ง

ตารางที่ 3 ความแตกต่างของสีใบมะกรูดหลังอบแห้ง

P (kPa)	T (°C)	ΔL	Δa	Δb	ΔE
15	45	-2.42±0.09 ^b	-1.46±0.10 ^d	1.77±0.04 ^a	3.33±0.08 ^c
	55	-4.88±0.05 ^a	-5.50±0.09 ^a	0.23±0.18 ^c	7.36±0.05 ^a
5	45	-1.07±0.07 ^c	-1.77±0.08 ^c	0.52±0.09 ^b	2.13±0.07 ^d
	55	-4.76±0.10 ^a	-4.76±0.03 ^b	-1.02±0.14 ^d	6.81±0.08 ^b

a-d means in the same column with different superscripts are significantly different (p<0.05)

3.4 น้ำมันหอมระเหยของใบมะกรูด

จากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของใบมะกรูดจากผลการทดสอบด้านสี และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่าที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45 °C ให้ผลที่ดีที่สุด จึงนำใบมะกรูดที่สภาวะนี้มาทดสอบหาปริมาณน้ำมันหอมระเหยเปรียบเทียบกับใบมะกรูดสดตามเงื่อนไขที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 2.5 จากผลการทดสอบพบว่า ใบมะกรูดสดมีค่า น้ำมันหอมระเหยเฉลี่ยที่ 0.7971% โดยน้ำหนัก ส่วนสภาวะหลังการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45 °C เฉลี่ยอยู่ที่ 0.7849% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าลดลงประมาณ 1.53% เมื่อเทียบกับใบมะกรูดสด ซึ่งถือว่าลดลงไม่มากนัก อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

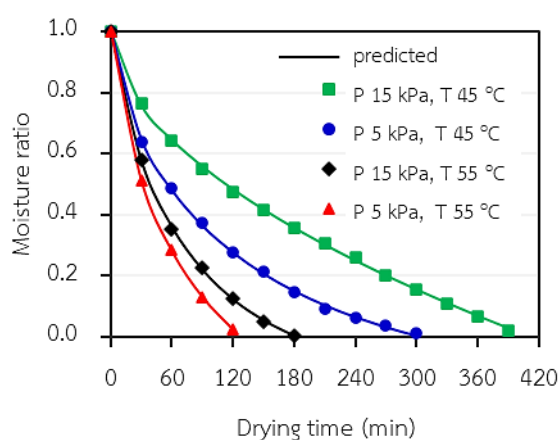
3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

เมื่อนำผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูดไปวิเคราะห์โดยวิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลของสมการในตารางที่ 1 จำนวน 7 สมการพบว่า สมการเอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.98333-0.99999 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.00058-0.03522 และค่าการลดลงไคกำลังสองอยู่ในช่วง 0.00166x10⁻³-1.33848x10⁻³ แสดงดังตารางที่ 4 โดยสมการเอมพิริคัลของ Demir et al. มีค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

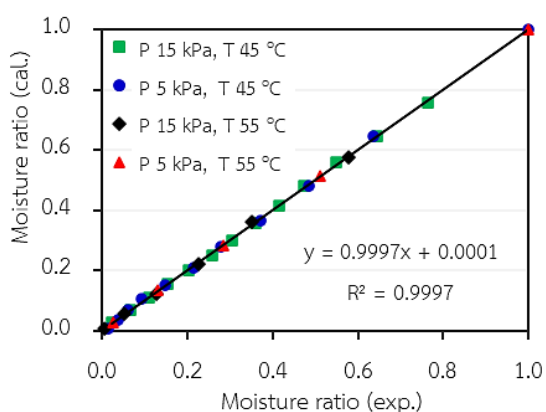
ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัล

Model	P (kPa)	T (°C)	Constant	R ²	RMSE	χ^2 ($\times 10^{-3}$)
Newton	15	45	k = 0.00627	<u>0.98333</u>	<u>0.03522</u>	1.33574
		55	k = 0.01770	0.99675	0.01863	0.40485
	5	45	k = 0.01140	0.99114	0.02731	0.82040
		55	k = 0.02235	0.99620	0.02131	0.56782
			Average	0.99186	0.02562	0.78220
Page	15	45	k = 0.00853 n = 0.94095	0.98458	0.03387	<u>1.33848</u>
		55	k = 0.01645 n = 1.01715	0.99681	0.01847	0.47746
	5	45	k = 0.01897 n = 0.89223	0.99461	0.02131	0.55497
		55	k = 0.01697 n = 1.06863	0.99686	0.01936	0.62476
			Average	0.99322	0.02325	0.74892
Henderson and Pabis	15	45	a = 0.96611 k = 0.00604	0.98537	0.03299	1.26998
		55	a = 0.99932 k = 0.01769	0.99675	0.01863	0.48572
	5	45	a = 0.96713 k = 0.01103	0.99268	0.02484	0.75384
		55	a = 1.00318 k = 0.02244	0.99622	0.02126	0.75350
			Average	0.99276	0.02443	0.81576
Logarithmic	15	45	a = 1.05123 k = 0.00473 c = -0.10960	0.98913	0.02844	1.02928
		55	a = 1.03098 k = 0.01595 c = -0.03971	0.99819	0.01390	0.33799
	5	45	a = 0.97096 k = 0.01085 c = -0.00555	0.99271	0.02477	0.84352
		55	a = 1.06419 k = 0.01914 c = -0.06898	0.99863	0.01278	0.40839
			Average	0.99467	0.01997	0.65480
Weibull distribution	15	45	a = -1.28795 b = -2.28357 k = 0.00099 n = 0.64110	0.99915	0.00795	0.08855
		55	a = -0.15441 b = -1.15464 k = 0.01284 n = 0.81782	0.99979	0.00469	0.05125
	5	45	a = -0.21149 b = -1.21040 k = 0.00725 n = 0.69736	0.99948	0.00664	0.06923
		55	a = -0.33910 b = -1.33908 k = 0.01176 n = 0.76120	0.99999	0.00058	0.00167
			Average	0.99960	0.00496	0.05267
Midilli	15	45	a = 1.00099 k = 0.03623 n = 0.56623 b = -0.00082	0.99971	0.00462	0.02989
		55	a = 1.00019 k = 0.02969 n = 0.84538 b = -0.00049	0.99981	0.00450	0.04733
	5	45	a = 0.99863 k = 0.03520 n = 0.72747 b = -0.00034	0.99934	0.00748	0.08797
		55	a = 0.99998 k = 0.04018 n = 0.79668 b = -0.00113	0.99999	0.00095	0.00450
			Average	0.99971	0.00439	0.04242
Demir et al.	15	45	a = 10.82489 k = 0.00347 n = 0.55310 b = -9.82445	0.99965	0.00510	0.03643
		55	a = 1.15475 k = 0.02840 n = 0.81772 b = -0.15452	0.99979	0.00469	0.05125
	5	45	a = 1.21079 k = 0.03222 n = 0.69714 b = -0.21186	0.99948	0.00664	0.06923
		55	a = 1.33962 k = 0.03399 n = 0.76095 b = -0.33964	<u>0.99999</u>	<u>0.00058</u>	<u>0.00166</u>
			Average	0.99973	0.00425	0.03964

สูงที่สุด ($R^2=0.99973$) ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด (RMSE= 0.00425) และค่าเฉลี่ยการลดลงไคกำลังสองต่ำที่สุด ($\chi^2=0.03964 \times 10^{-3}$) แสดงว่าเป็นสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด สอดคล้องกับรูปที่ 6 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของใบมะกรูดระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการของ Demir et al.



รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของใบมะกรูดระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการเอมพิริคัลของ Demir et al.



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการเอมพิริคัลของ Demir et al.

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการของ Demir et al. แสดงดังรูปที่ 7 มีความสัมพันธ์ของข้อมูลเกาะกลุ่มกันเป็นแนวเส้นตรง และมีความลาดชัน 45 องศา แสดงว่าแบบจำลองของ Demir et al. สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดได้ค่อนข้างแม่นยำ

3.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

เมื่อคำนวณหาความลาดชันของอัตราส่วนความชื้นในแต่ละการทดลองจากสมการที่ (7) จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจากสมการที่ (8) ได้ผลดังตารางที่ 5 ซึ่งจะพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 1.4221×10^{-12} - 6.1840×10^{-12} m^2/s โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลง [9] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง สอดคล้องกับผลการทดลองดังรูปที่ (2)-(3) นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 5 และ 15 kPa มีค่าปัจจัยเลขชี้กำลัง 23.90 และ 1,539.48 m^2/s และมีค่าพลังงานกระตุ้น 79,072.47 และ 91,568.28 J/mol ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 โดยพลังงานกระตุ้นมีค่าน้อยลงตามความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งที่ลดลง เนื่องจากที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำน้ำจะมีจุดเดือดต่ำกว่าที่ความดันสัมบูรณ์สูง ซึ่งส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำหรือความชื้นเคลื่อนที่ออกจากวัสดุน้อยลงตามไปด้วย

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

P (kPa)	T (°C)	Slope	$D_{\text{eff}} (\text{m}^2/\text{s})$
15	45	-0.00011042	1.4221×10^{-12}
	55	-0.00031709	4.0841×10^{-12}
5	45	-0.00019307	2.4868×10^{-12}
	55	-0.00048013	6.1840×10^{-12}

ตารางที่ 6 ปัจจัยเลขชี้กำลังและพลังงานกระตุ้น

P (kPa)	T (°C)	D ₀ (m ² /s)	E _a (J/mol)
15	45	1,539.48	91,568.28
	55		
5	45	23.90	79,072.47
	55		

4. สรุป

การอบแห้งใบมะกรูดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล สรุปว่า อุณหภูมิการอบแห้งและสภาวะความดันสุญญากาศมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของใบมะกรูด โดยเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งน้อยลง การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้การเปลี่ยนแปลงสีของใบมะกรูดน้อยที่สุด แต่ที่อุณหภูมิเดียวกัน การอบแห้งที่ความดัน 15 kPa ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงขึ้นเนื่องจากใช้ระยะเวลานานกว่า ดังนั้นที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45 °C เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูด โดยมีน้ำมันหอมระเหยลดลงประมาณ 1.53% เมื่อเทียบกับใบมะกรูดสด นอกจากนี้ยังพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพมีค่าอยู่ระหว่าง 1.4221×10^{-12} – 6.1840×10^{-12} m²/s และสมการเอมพิริคัลของ Demir et al. สามารถทำนายผลการอบแห้งใบมะกรูดได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2=0.99973$) สูงที่สุด ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE=0.00425) และค่าเฉลี่ยการลดลงค่ากำลังสองเฉลี่ย ($\chi^2=0.03964 \times 10^{-3}$) ต่ำที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Borompichaichartkul, "Hybrid drying technology: application for preservation of heat sensitive food products," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 269-283, Apr.-June. 2012.
- [2] K. Vonggrachit. (2019, June 12). The government is preparing to push 4 top economic herbs [Online]. Available: <http://www.voicetv.co.th/read/Hk3DwZ0lQ>
- [3] S. Tirawanichakul, S. Lamaepae and Y. Tirawanichakul, "Combined infrared/microwave and hot air drying for jackfruit: kinetics, quality and sensory analysis," *Burapha Sci. J.*, vol. 17, no. 1, pp. 117-129, Jan. 2012.
- [4] K. Witinantakit and S. Jaekhom, "Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 29-44, Sep.-Dec. 2019.
- [5] Y. Xie, Z. Gao, Y. Liu and H. Xiao., "Pulsed vacuum drying of rhizoma dioscoreae slices," *LWT- Food Science and Technology*, vol. 80, pp. 237-249, Jul. 2017.
- [6] L. Xie, A. S. Mujumdar, X. M. Fang, J. Wang, J. W. Dai, Z. L. Du, H. W. Xiao, Y. Liu and Z. J. Gao, "Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): effects on drying kinetics and quality attributes," *Food and Bioprocess Processing*, vol. 102, pp. 320-331, Mar. 2017.

- [7] J. Wang, C.-L. Law, P. K. Nema, J.-H. Zhao, Z.-L. Liu and L.-Z. Deng, "Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 224, pp. 129-138, May. 2018.
- [8] A. Nathakaranakule, S. Paengkanya and S. Soponronnarit, "Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 116, pp. 105-117, Jul. 2019.
- [9] K. Witinantakit, N. Uengkimbuan and S. Rungsawang, "Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique," *SWU Engineering Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 1-13, Sep-Dec. 2019.
- [10] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis. 17thed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg, 2000.
- [11] S. Malaniyom. (2019, June 2). Essential oil Thai herbal plant extracts [Online]. Available: <http://library.tisi.go.th/multim/bulletin/2545/325Jul02.pdf>.
- [12] P. Rattanapitigorn. "Essential oils from plant extracts and theirs application as antimicrobial agents in food products," *Journal of Food Technology, Siam University*, vol. 13, no. 2, pp. 1-10, Jul.-Dec. 2018.
- [13] V. Demir, T. Gunhan, and A.K. Yagcioglu, "Mathematical modelling of convection drying of green table olives," *Biosystems Engineering*, vol. 98, no. 1, pp. 47-53, Sep. 2007.
- [14] A. Midilli, H. Kucuk and Z. Yapar, "A new model for single-layer drying," *Drying Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 1503-1513, Jul. 2002.
- [15] M. Younis, D. Abdelkarim and A. Z. El-Abdein, "Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices," *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 25, pp. 332-338, 2018.
- [16] U. Teeboonma and S. Jongjam, "Ginger drying using infrared-vacuum technique," *Burapha Sci. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 76-86, 2010.