



การอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคผสมผสาน

BLACK GALINGALE DRYING USING HYBRID TECHNIQUES

ศรีมา แจ้คำ¹, อภินันต์ นามเขต¹, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา¹,

ทรงสุภา พุ่มชุมพล^{1*}, กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจ², เอกภูมิ บุญธรรม³

Srima Jaekhom¹, Apinunt Namkhat¹, Umphisak Teeboonma¹,

Songsupa Pumchumpol^{1*}, Kittisak Witinantakit², Eakpoom Boonthum³

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย 34190

²สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, Thailand, 34190

²School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,

Sriracha, Choburi, Thailand, 20110

³Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: pumchumpol.s@gmail.com

วันที่เข้าระบบ 26 ตุลาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 8 พฤศจิกายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 22 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ

กระชายดำมีสรรพคุณทางยารักษาโรคและยังเป็นพืชสมุนไพรเชิงเศรษฐกิจที่สามารถต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจนผลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำโดยใช้ 3 เทคนิค คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด การทดลองดำเนินการภายใต้อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C และความเร็วลม 2.0 m/s โดยทำการอบแห้งกระชายดำจากความชื้นเริ่มต้น 136.0 %d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้าย 8.0 %d.b. สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาสมรรถนะการอบแห้ง ได้แก่ คุณภาพด้านสี ปริมาณน้ำอิสระ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจนผลศาสตร์การอบแห้ง ผลจากการศึกษาพบว่า ความชื้นกระชายดำลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้พลังงานอินฟราเรดกระตุ้น โดยพบว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรด การอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานกับอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 515 557 และ 935 นาที ตามลำดับ ในส่วนของคุณภาพด้านสีพบว่า การอบแห้งด้วยอินฟราเรดมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานกับอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนเท่ากับ 2.67 และ 21.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานกับอินฟราเรดมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด สำหรับปริมาณน้ำอิสระพบว่าการอบแห้งทุกเทคนิคอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารแห้ง และสุดท้ายยังพบว่า แบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำด้วยลมร้อน, อินฟราเรด และลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดได้ดีที่สุดคือ Weibull distribution, Two-term และ Weibull distribution ตามลำดับ

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยลมร้อน, การอบแห้งด้วยอินฟราเรด, สมการอบแห้งชั้นบาง

Abstract

Black galingale has medicinal properties and it is also an economic medicinal plant that can be developed into a variety of products. Therefore, this research aimed at studying the drying kinetics of black galingale by using 3 techniques as follows: hot air drying (HA), infrared drying (IR) and hot air combined with infrared drying (HA&IR). The experiment was conducted under the followings condition: drying air temperature of 45°C and air velocity of 2.0 m/s. The black galingale was dried from the initial moisture content of 136.0 %d.b. to the final moisture content of 8.0 %d.b. The parameters used as criteria for investigating the drying performance are color quality, water activity, specific energy consumption, and mathematical models to predict drying kinetics. The experimental results showed that the moisture of black galingale decreased rapidly when it was activated with infrared energy. It was also found that IR, HA&IR and HA yielded the drying time of 515, 557 and 935 minutes, respectively. In terms of color quality, the color change of IR was lower than that for HA&IR and HA by 2.67 % and 21.46 %, respectively. Furthermore, it was found that the specific energy consumption of HA&IR was the lowest. For water activity, all drying techniques were in accordance with the standards of food drying. Finally, results revealed that the best mathematical model for predicting the drying kinetic of black galingale using HA, IR and HA&IR were Weibull distribution, Two-term and Weibull distribution, respectively.

Keywords: Hot air drying, Infrared drying, Thin layer drying equation

1. บทนำ

กระชายดำ (ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Kaempferia parviflora*) มีลักษณะเป็นเหง้ารูปทรงกลมเรียงต่อกัน เนื้อภายในสีม่วงอ่อน จนถึงสีม่วงดำ มีสรรพคุณตามตำรายาไทย คือ บำรุงกำลัง แก้อาการปวดเมื่อยและเหนื่อยล้า ขับลม แก้อุจจาระเสีย หรือใช้ชงกับเหล้าขาวคั้นน้ำดื่ม แก้โรคมดลูกพิการ

ใช้กวาดคอเด็ก แก้วโรคตานขางในเด็ก (Pitakpawasutthi *et al.*, 2018) ในปัจจุบันตลาดสมุนไพรทั่วโลกมีมูลค่ามากกว่า 3 ล้านล้านบาท มีอัตราการขยายตัวของการบริโภคผลิตภัณฑ์สมุนไพรอยู่ที่ 3-12% โดยกลุ่มสินค้าที่มีศักยภาพมากที่สุดในตลาดสมุนไพร ได้แก่ อาหารเสริมและเวชสำอาง ข้อมูลจากศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศมหาวิทยาลัยหอการค้าไทยระบุว่า ประเทศไทยส่งออกสมุนไพรและสารสกัดปีละประมาณ 1,000 ล้านบาท และการขยายตัวมีแนวโน้มที่ดีในเชิงเศรษฐกิจ (Vonggrachit, 2019) อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระขายดำมีความขึ้นสูงและเพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานจึงต้องนำไปอบแห้งเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสีย ในปัจจุบันบทบาทที่สำคัญอีกอย่าง คือ การกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแปรรูปต้องมีคุณภาพทางโภชนาการสูง และมีอายุการเก็บรักษายาวนาน ปลอดภัยและมีลักษณะปรากฏเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งการอบแห้งมีด้วยกันหลายวิธี อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป การตากแดดโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นการอบแห้งที่ต้นทุนต่ำ แต่ข้อด้อยคือไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิอบแห้งได้ (Aymen *et al.*, 2015; Hajar *et al.*, 2018) ทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การใช้เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนมีหลายรูปแบบแต่การอบแห้งบางรูปแบบใช้ระยะเวลายาวนาน สิ้นเปลืองพลังงานสูง และอาจทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารเนื่องจากการใช้ความร้อนสูง การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ (Wang *et al.*, 2018) ซึ่งข้อดี คือ สามารถระเหยน้ำออกจากอาหารที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและใช้เวลาสั้นลง ช่วยในการรักษากลิ่น รสชาติ และลักษณะทางกายภาพ แต่ข้อด้อยคือต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งสูง และสำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นและช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ แต่มีข้อด้อยคือปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดรอยไหม้ในบางจุด (Nathakaranakule *et al.*, 2019) การอบแห้งด้วยระบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Sa-adchom *et al.*, 2011) สามารถอบแห้งได้รวดเร็วเหมาะกับอาหารประเภทเนื้อสัตว์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากใช้ความร้อนสูงในการอบแห้งจึงมีข้อจำกัดสำหรับอาหารประเภทที่ไวต่อความร้อน จากที่กล่าวมาข้างต้นการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวนั้นยังมีข้อด้อย ดังนั้นการศึกษาเทคนิคการอบแห้งแบบผสมผสานจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว (Daniel *et al.*, 2016) การอบแห้งแบบผสมผสานเป็นการใช้เครื่องอบแห้งหลายลักษณะหรือหลายขั้นตอนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อแก้ไขข้อด้อยของการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว และจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Wang *et al.*, 2018; กิตติศักดิ์ และศรีมา, 2562; ศรีมา และคณะ, 2564) พบว่าการนำรังสีอินฟราเรดมาช่วยในการอบแห้งหรือผสมผสานจะสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ทั้งนี้เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านวัตถุหรือผลิตภัณฑ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือนมากกว่าปกติเป็นผลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น (Riadh *et al.*,

2015; Dan *et al.*, 2021) โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เสียไป ซึ่งพบว่าที่ผ่านมา มีการใช้รังสีอินฟราเรดอบแห้งผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น กระเทียม (Papu *et al.*, 2014), กล้วย (Khampakool *et al.*, 2019) และเนื้อวัว (Muga *et al.*, 2021) เป็นต้น

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำด้วยลมร้อน, อินฟราเรด และลมร้อน ผสมผสานอินฟราเรด

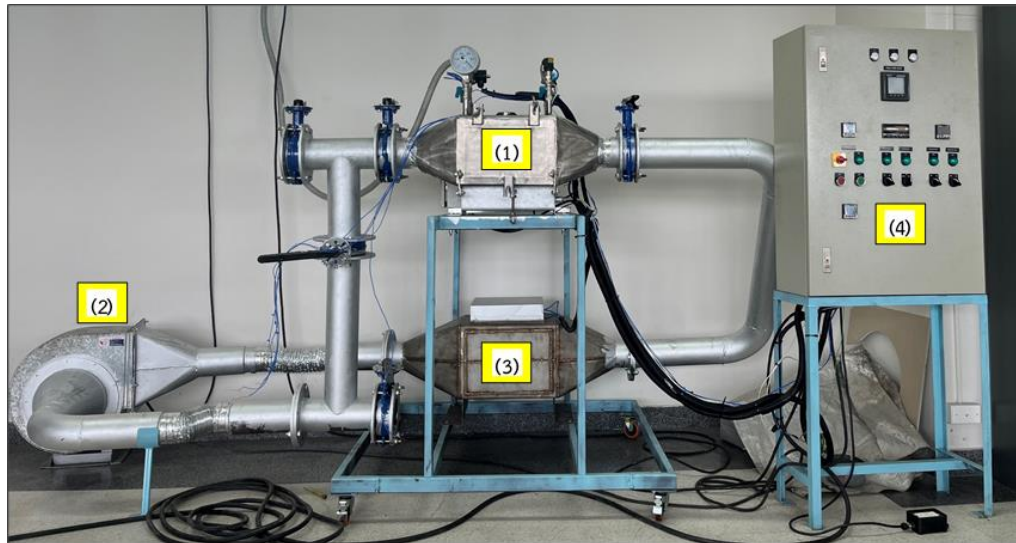
2.2 เพื่อศึกษาคุณภาพด้านสี, ปริมาณน้ำอิสระ, ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและสมการ เอมพิริคัลที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกระชายดำ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและเครื่องอบแห้ง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ กระชายดำ โดยหั่นให้มีความหนาประมาณ 3 mm ทำการอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 45 °C เนื่องจากสมุนไพรเป็นผลิตภัณฑ์ไวต่อความร้อนจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ และใช้ความเร็วลมเท่ากับ 2.0 m/s น้ำหนักกระชายดำที่ใช้ทดลองโดยเฉลี่ยเท่ากับ 100 g ทำการทดลอง 3 เงื่อนไขดังนี้ 1) การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying, HA) 2) การอบแห้งด้วยอินฟราเรด (Infrared drying, IR) และ 3) การอบแห้งด้วยลมร้อน ผสมผสานอินฟราเรด (Hot air and Infrared drying, HA&IR) ซึ่งเมื่อถึงจุดกระตุ้นพลังงานระบบจะปรับเปลี่ยนเงื่อนไขด้วยการปิดระบบขดลวดให้ความร้อน (Heater) และเปิดใช้เฉพาะอินฟราเรดโดยที่ความเร็วลมเท่าเดิม ทั้งนี้แต่ละเงื่อนไขได้ดำเนินการทดลอง 3 ชั่วโมง กระชายดำจะถูกอบแห้งจาก ความชื้นเริ่มต้น 136.0 %d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้าย 8.0 %d.b. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของ กระชายดำแห้ง มพช. 704/2547) ในการทดลองได้บันทึกค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ทุก 1 นาที ด้วย โหลดเซลล์ พร้อมทั้งบันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยกิโวลต์-ชั่วโมง มิเตอร์ ความละเอียด 0.01 kWh และนำผลิตภัณฑ์แห้งไปทดสอบคุณภาพด้านสีและปริมาณน้ำอิสระ

เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังนี้ (1) ห้องอบแห้งซึ่งภายในติดตั้งรังสีอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 4 แผง ยี่ห้อ Infrapara รุ่น EL-2-250 ด้านล่างติดตั้งชุดโหลดเซลล์ขนาด 5 kg เพื่อบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (2) ชุดพัดลม ขนาดมอเตอร์ 370 W ติดตั้งร่วมกับชุดปรับความเร็วรอบ (3) ชุดขดลวดให้ความร้อนแบบตัวยู ขนาดรวม 6 kW และ (4) ตู้ควบคุมระบบอบแห้ง สำหรับปรับระบบการทำงานแบบผสมผสาน ควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง ปรับความเร็วรอบพัดลม และบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน

3.2 การหาจุดกระตุ้นพลังงานด้วยอินฟราเรด

สำหรับการทดลองโดยใช้เทคนิคผสมผสานนั้น จะเริ่มจากการอบแห้งด้วยลมร้อนและเมื่อถึงจุดที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นผลิตภัณฑ์ค่อนข้างน้อยจะเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งจากการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการอบแห้งด้วยอินฟราเรด ซึ่งการเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งจะพิจารณาจากความชัน (Slope) ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาใดๆ เปรียบเทียบกับผลต่างของเวลาที่เก็บข้อมูล ดังสมการที่ (1)

$$\text{Slope} = \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ ΔM คือ ผลต่างของความชื้นในช่วงเวลาใดๆ (d.b.)
 Δt คือ ผลต่างของเวลาในช่วงความชื้นใดๆ ในงานวิจัยนี้ใช้เท่ากับ 1 นาที

3.3 การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

การหาความชื้นเริ่มต้นของกระชายดำ เมื่อเตรียมผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งเสร็จจะนำบางส่วนไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของ AOAC (2000) เพื่อใช้ในการหาน้ำหนักแห้งของกระชายดำ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) เริ่มต้นตลอดจนความชื้นที่เวลาใดๆ ได้จากสมการที่ (2)



$$MC = \frac{w - d}{d} \quad 2)$$

เมื่อ	MC	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)
	w	คือ	มวลเปียกของกระชายดำที่เวลาใดๆ (g)
	d	คือ	มวลแห้งของกระชายดำ (g)

3.4 การหาอัตราการอบแห้ง

การหาอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ในการทดลองได้ดำเนินการบันทึกการเปลี่ยนมวลหรือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกระชายดำ ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะสามารถวิเคราะห์หาอัตราการอบแห้งได้จากสมการที่ (3) (Vijayan *et al.*, 2016; Karthikeyan & Murugavelh, 2018)

$$DR = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (3)$$

เมื่อ	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (g/min)
	Δw	คือ	มวลน้ำที่ระเหย (g)
	Δt	คือ	เวลาที่เปลี่ยนแปลง (min)

3.5 การทดสอบคุณภาพด้านสี

กระชายดำก่อนและหลังการอบแห้งจะทดสอบสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d เป็นการทดสอบในระบบ CIE โดยจะนำค่าความแตกต่างของสีมาเปรียบเทียบกัน ที่เงื่อนไขใดมีค่า ΔE น้อยที่สุด ตามสมการที่ (4) จะถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีใกล้เคียงกับกระชายดำสดก่อนอบแห้งมากที่สุด (Caparino *et al.*, 2012; Kroehnke *et al.*, 2018) โดยใช้แสง Daylight ที่ 6,500 K ในการวัดสี

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

เมื่อ	ΔE	คือ	ความแตกต่างของสีโดยรวม
	ΔL	คือ	ความแตกต่างของความสว่าง
	Δa	คือ	ความแตกต่างของความเข้มสีแดงถึงเขียว

Δb คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงน้ำเงิน

3.6 การทดสอบค่าปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระหรือแอกทิวิตีของน้ำ (Water activity, a_w) เป็นค่าที่แสดงระดับพลังงานของน้ำมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา และความปลอดภัยของอาหาร (Pekke *et al.*, 2013) มีค่าตั้งแต่ 0-1 สำหรับกระชายดำที่ผ่านการอบแห้งจัดอยู่ในประเภทอาหารแห้งซึ่งต้องมีค่าปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 โดยในการทดลองทุกเงื่อนไขจะใช้เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ยี่ห้อ Aqua lab รุ่น Series 3 TE ในการทดสอบผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

3.7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้ง ต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังนี้ คือ มวลของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการอบแห้ง รวมถึงปริมาณการใช้พลังงานตลอดกระบวนการอบแห้ง มาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะโดยใช้สมการที่ (5) (Kaveh *et al.*, 2020)

$$SEC = \frac{3.6E_p}{w_i - w_f} \quad (5)$$

เมื่อ	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/g)
	w_i	คือ	มวลเปียกของกระชายดำก่อนอบแห้ง (g)
	w_f	คือ	มวลเปียกของกระชายดำหลังอบแห้ง (g)
	E_p	คือ	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล

การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetic) ของการอบแห้งกระชายดำ จะสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งโดยใช้สมการเอมพิริคัล เนื่องจากเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีกระบวนการวิเคราะห์ง่ายและไม่ซับซ้อน และเป็นแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร โดยแบบจำลองที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีจำนวน 7 สมการ แสดงดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

No.	Name of model	Model equation	References
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Gokhale & Lele, (2011)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page, (1949)
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Silva <i>et al.</i> , (2014)
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$	Darvishi <i>et al.</i> , (2013)
5	Weibull distribution	$MR = a-b \exp(-(kt)^n)$	Corzo <i>et al.</i> , (2008)
6	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t)+b \exp(-k_1t)$	Henderson, (1974)
7	Verma <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$	Verma <i>et al.</i> , (1985)

หมายเหตุ: a, b, c, g, k, k_0 , k_1 และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล

t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาท)

สมการเอมพิริคัลจะแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นจำเป็นต้องทราบค่าความชื้นสมดุล แต่ความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ จึงประมาณค่าความชื้นสมดุลให้เท่ากับศูนย์ (Vijayan *et al.*, 2016; Karthikeyan & Murugavelh, 2018; Khuthadzo & Tilahun, 2021) ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นได้ดังสมการที่ (6)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \frac{M_t}{M_i} \quad (6)$$

เมื่อ	MR	คือ	อัตราส่วนความชื้น (decimal)
	M_t	คือ	ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)
	M_i	คือ	ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)
	M_{eq}	คือ	ความชื้นสมดุล (d.b.)

การหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสม สำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง จะใช้ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองไปวิเคราะห์สมการโดยใช้วิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการในตารางที่ 1 ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของสมการเอมพิริคัล คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square

error, RMSE) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) และ (8) โดยสมการเอมพิริคัลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Faruq *et al.*, 2019)

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

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

เมื่อ	$MR_{exp,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)
	$\overline{MR_{exp}}$	คือ	ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)
	$MR_{pre,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล (decimal)
	N	คือ	จำนวนข้อมูลในการทดลอง

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

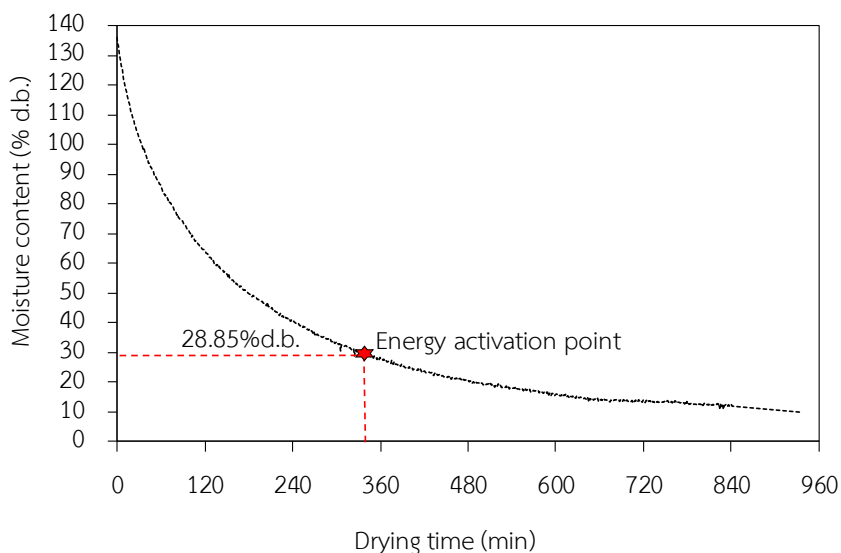
4.1 ผลการหาสภาวะที่ใช้พลังงานกระตุ้น

จากการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว และกำหนดความชื้นของกราฟให้เท่ากับหรือน้อยกว่า 1 นั้น (ซึ่งเป็นจุดที่ความชื้นผลิตภัณฑ์เริ่มเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย) จะได้ช่วงที่ความชื้นมีค่าประมาณ 28.85 %d.b. เวลาการอบแห้งประมาณ 350 นาที ดังรายละเอียดในภาพที่ 2 จุดนี้จะเป็นจุดที่ใช้อินฟราเรดกระตุ้นหรือเรียกได้ว่าเป็นจุดที่เปลี่ยนเงื่อนไขการอบแห้งจากการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

4.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำ

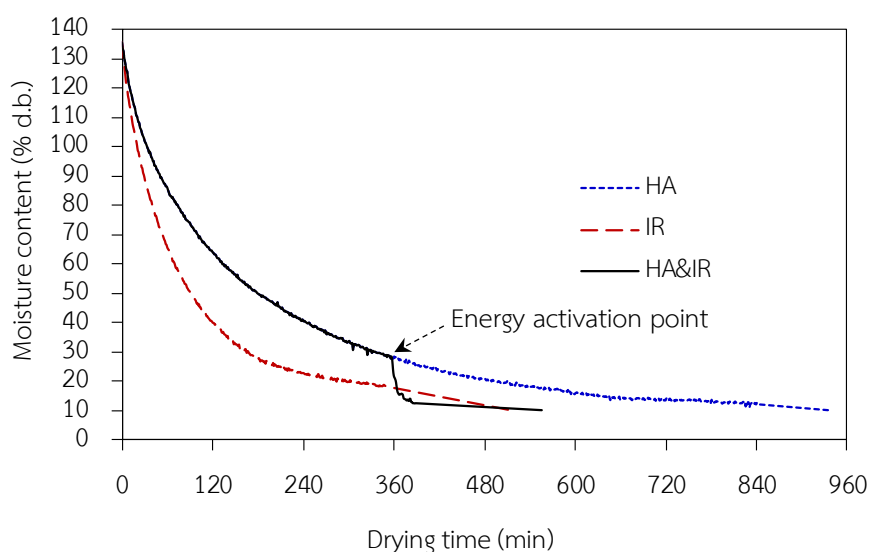
จากการทดลองพบว่า ความชื้นทุกเงื่อนไขจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง สำหรับการใช้เทคนิคผสมผสานพบว่า ความชื้นจะลดลงทันทีเมื่อใช้พลังงานอินฟราเรดกระตุ้นดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 3 และ 4 การอบแห้งด้วยอินฟราเรดจะมีความชื้นของเส้นกราฟค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอินฟราเรดสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในผลิตภัณฑ์ทำให้พลังงานส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีถูกผลิตภัณฑ์ดูดกลืนไว้ และทำให้โมเลกุลของผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือนและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นน้ำที่อยู่ในโมเลกุล

ก็จะได้รับความร้อน และเกิดการแพร่ไปยังบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้ลมร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Onwude *et al.*, 2016; Daniel *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020)

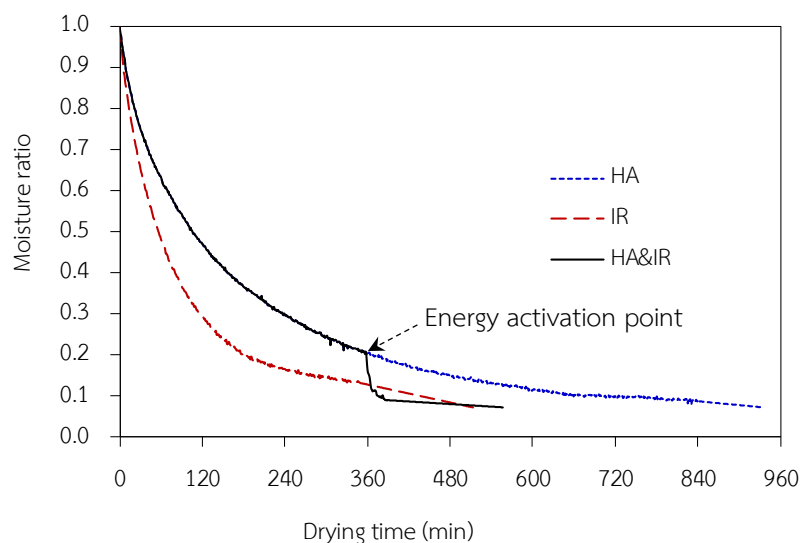


ภาพที่ 2 สภาวะที่ใช้พลังงานกระตุ้นด้วยอินฟราเรด

นอกจากนั้นจากข้อมูลการทดลองพบว่า การอบแห้งกระชายดำเพื่อให้เหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 8.0 %d.b. ด้วย HA, HA&IR และ IR ใช้เวลาเท่ากับ 935 นาที, 557 นาที และ 515 นาที ตามลำดับ โดยพบว่า HA&IR ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า HA เท่ากับ 67.8 เปอร์เซ็นต์

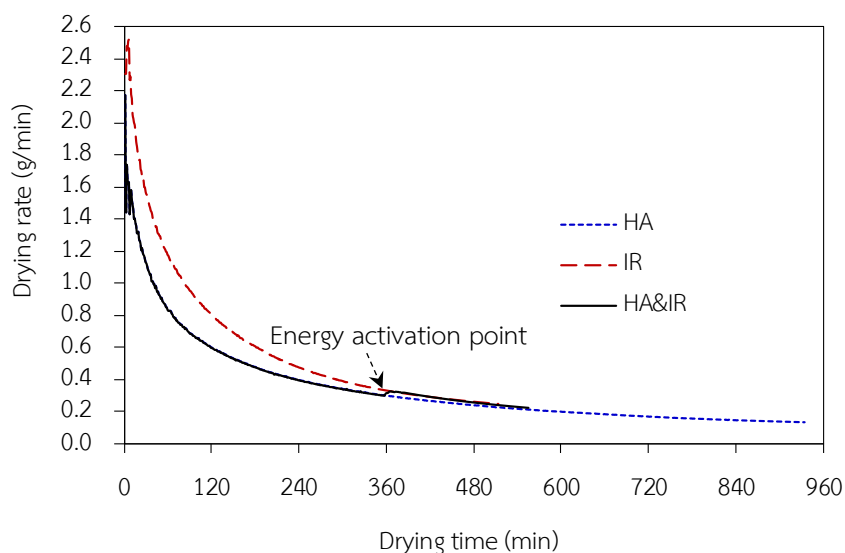


ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระชายดำเทียบกับเวลา



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของกระชายดำเทียบกับเวลา

ภาพที่ 5 นำเสนออัตราการอบแห้งของแต่ละเทคนิค จากข้อมูลจะพบว่า HA&IR จะมีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเริ่มกระตุ้นด้วยอินฟราเรด ส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 5 อัตราการอบแห้งของกระชายดำเทียบกับเวลา

4.3 ผลการทดสอบคุณภาพด้านสีและปริมาณน้ำอิสระ

ตารางที่ 2 แสดงค่าความแตกต่างด้านสีและปริมาณน้ำอิสระของกระชายดำหลังการอบแห้ง จากข้อมูลในตารางจะพบว่าทุกเงื่อนไขของการอบแห้ง จะมีค่าความสว่าง (L^*) สูงขึ้นเมื่อ

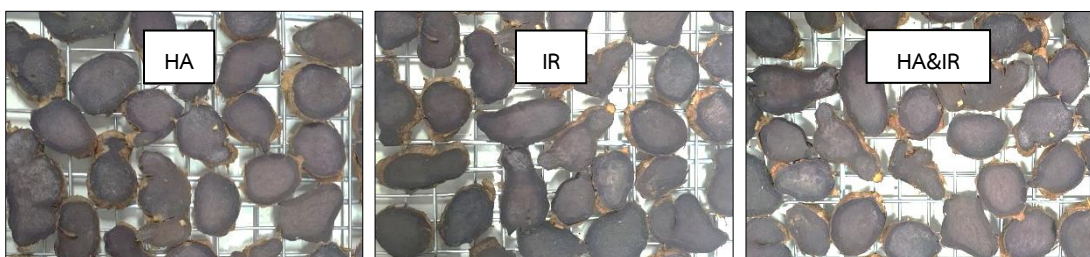
เปรียบเทียบกับกระชายดำสด และทุกเงื่อนไขการทดลองได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีค่าเพิ่มขึ้นทุกเงื่อนไขเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์สด โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่าความแตกต่างของสีแดงมากที่สุด ค่าความเป็นสีน้ำเงิน (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการอบแห้งทุกเงื่อนไขดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 6

ตารางที่ 2 ความแตกต่างด้านสีและปริมาณน้ำอิสระของกระชายดำหลังการอบแห้ง

Conditions	L^*	a^*	b^*	ΔL	Δa	Δb	ΔE	a_w
Fresh	31.36 $\pm$ 0.93 ^b	1.92 $\pm$ 0.45 ^c	-3.22 $\pm$ 1.05 ^b	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
HA	55.14 $\pm$ 4.27 ^a	7.31 $\pm$ 1.45 ^a	-5.57 $\pm$ 1.29 ^a	23.78 $\pm$ 4.27 ^a	5.38 $\pm$ 1.45 ^a	-2.35 $\pm$ 1.29 ^a	24.56 $\pm$ 4.30 ^a	0.51 $\pm$ 0.01 ^a
IR	51.07 $\pm$ 2.42 ^a	6.27 $\pm$ 0.25 ^{ab}	-4.24 $\pm$ 0.52 ^{ab}	19.71 $\pm$ 2.42 ^a	4.35 $\pm$ 0.25 ^{ab}	-1.02 $\pm$ 0.52 ^b	20.22 $\pm$ 2.36 ^b	0.29 $\pm$ 0.02 ^c
HA&IR	51.59 $\pm$ 3.12 ^a	5.51 $\pm$ 0.98 ^b	-5.77 $\pm$ 1.24 ^a	20.22 $\pm$ 3.12 ^a	3.59 $\pm$ 0.98 ^b	-2.55 $\pm$ 1.24 ^a	20.76 $\pm$ 3.06 ^{ab}	0.42 $\pm$ 0.01 ^b

หมายเหตุ: a-c means in the same column with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

ในส่วนของการอบแห้งที่มีอินฟราเรดร่วมด้วยจะมีค่าสีใกล้เคียงกับกระชายดำสดมากกว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ผลต่างโดยรวมพบว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดให้ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) น้อยที่สุด โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานกับอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนเท่ากับ 2.67 และ 21.46 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนอาศัยอากาศร้อนเป็นตัวกลางพา ความชื้นออกจากผิวของกระชายดำ ซึ่งแตกต่างจากการใช้อินฟราเรดที่จะทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนขึ้นในวัสดุ ดังนั้นจึงทำให้น้ำระเหยได้เร็วกว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ส่งผลให้การอบแห้งด้วยอินฟราเรดมีค่าความแตกต่างของสีโดยรวมน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (Wang *et al.*, 2019; Sakare *et al.*, 2020)

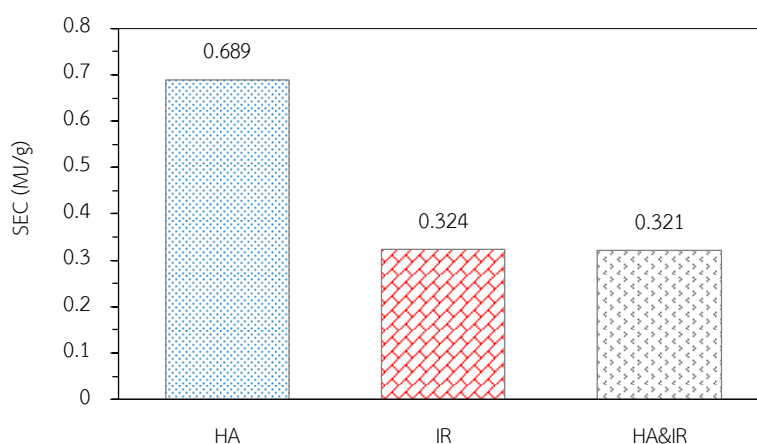


ภาพที่ 6 กระชายดำหลังการอบแห้ง

สำหรับค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงระดับพลังงานของน้ำมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา การเสื่อมเสีย และความปลอดภัยของอาหาร มีค่าตั้งแต่ 0-1 พบว่าทุกเงื่อนไขการทดลองกระชายดำอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ของอาหารแห้งทั้งหมด (Pekke *et al.*, 2013) โดยมีค่า a_w ไม่เกิน 0.6 ค่าที่ได้ทุกเงื่อนไขการทดลองอยู่ในช่วง 0.29-0.51

4.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากข้อมูลจะพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีการใช้พลังงานสูงที่สุด เนื่องจากระยะเวลาของการอบแห้งยาวนาน ส่วนการอบแห้งด้วยอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าแบบลมร้อน ดังข้อมูลที่น่าเสนอในภาพที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากผลของอินฟราเรดที่ช่วยกระตุ้นให้น้ำในผลิตภัณฑ์ออกมาสู่ผิวส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงและส่งผลต่อการใช้พลังงานในการระเหยน้ำ จากข้อมูลจะพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวประมาณ 114.64 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกระชายดำ

4.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลในการทำนายการอบแห้ง

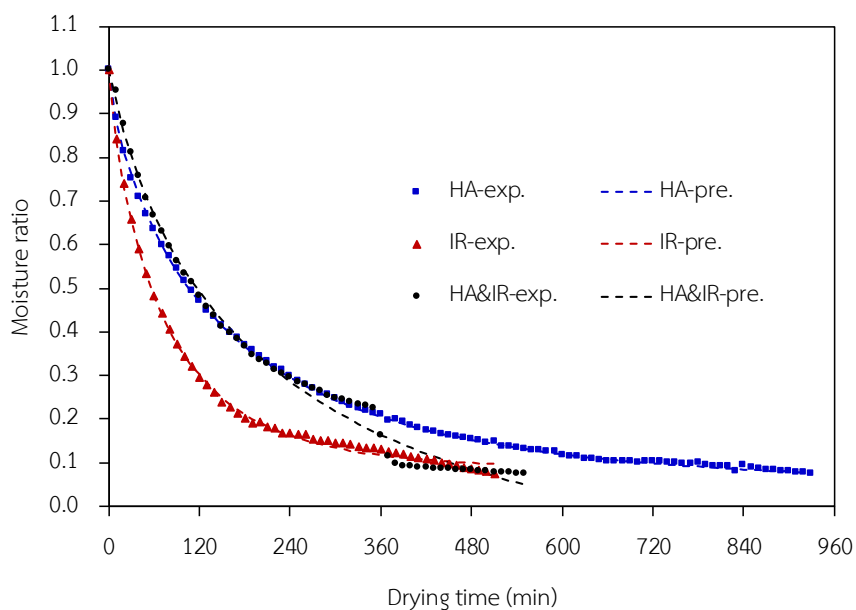
สำหรับการนำผลการทดลองอบแห้งกระชายดำไปวิเคราะห์โดยวิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลของสมการในตารางที่ 1 จำนวน 7 สมการ ทุกเงื่อนไขสมการเอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.85771 - 0.99974 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.00315 - 0.14614 ดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อน สมการเอมพิริคัลของ Weibull distribution สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ($R^2 = 0.99974$, RMSE = 0.00315) การอบแห้งด้วยอินฟราเรด สมการเอมพิริคัลของ Two-term สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ($R^2 =$



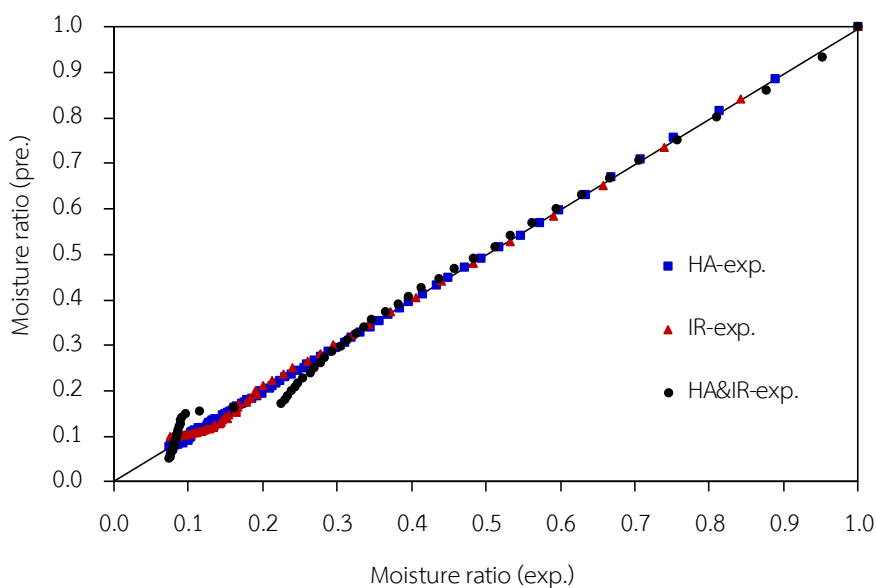
0.99902, RMSE = 0.11930) และการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด สมการเอมพิริคัลของ Weibull distribution สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ($R^2 = 0.98995$, RMSE = 0.04322) เมื่อนำสมการที่กล่าวมาข้างต้นไปใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแต่ละเทคนิคการอบแห้งจะได้ผลลัพธ์ดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 8 และเมื่อเปรียบเทียบผลจากการคำนวณโดยใช้สมการกับผลจากการทดลอง จะพบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกันมีแนวโน้มที่เป็นเส้นตรง และมีความลาดชัน 45 องศา ดังภาพที่ 9 อย่างไรก็ตามสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานจะมีความคลาดเคลื่อนในช่วงท้ายของการอบแห้ง เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอินฟราเรดส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำจากภายในผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นความชื้นของข้อมูลจึงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน ส่งผลให้การทำนายมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในช่วงนี้

ตารางที่ 3 ค่าคงที่และผลการทำนายสมการเอมพิริคัล

Model	Conditions	Constants	R^2	RMSE
Newton	HA	k= 0.00487	0.89034	0.06419
	IR	k= 0.00899	0.85771	0.14614
	HA&IR	k= 0.00543	0.97789	0.06257
Page	HA	k= 0.03392 n= 0.64795	0.99651	0.01145
	IR	k= 0.05687 n= 0.62433	0.98503	0.11808
	HA&IR	k= 0.01128 n= 0.86438	0.98785	0.04062
Henderson and Pabis	HA	a= 0.79017 k= 0.00360	0.95816	0.03965
	IR	a= 0.78239 k= 0.00659	0.92479	0.12683
	HA&IR	a= 0.93334 k= 0.00503	0.98422	0.04909
Logarithmic	HA	a= 0.79470 k= 0.00573 c = 0.09003	0.99425	0.01470
	IR	a= 0.81587 k= 0.01239 c = 0.10999	0.99325	0.12118
	HA&IR	a= 0.92231 k= 0.00550 c = 0.02714	0.98480	0.04515
Verma et al.	HA	a= 0.44875 k= 0.00214 g = 0.01338	0.99608	0.01214
	IR	a= 0.30018 k= 0.00251 g = 0.01948	0.99842	0.11941
	HA&IR	a= 0.83825 k= 0.00457 g = 0.02672	0.98916	0.03990
Two-term	HA	a= 0.35114 k_0 = 0.00176 b = 0.58126 k_1 = 0.00951	0.99808	0.00850
	IR	a= 0.69166 k_0 = 0.01777 b = 0.27698 k_1 = 0.00231	0.99902	0.11930
	HA&IR	a= 0.19335 k_0 = 0.03225 b = 0.84086 k_1 = 0.00457	0.98952	0.04032
Weibull distribution	HA	a= 0.05350 b= -0.95336 k= 0.00642 n= 0.72759	0.99974	0.00315
	IR	a= 0.08741 b= -0.93794 k= 0.01387 n= 0.77070	0.99764	0.11933
	HA&IR	a= -0.14319 b= -1.21277 k= 0.00441 n= 0.68400	0.98995	0.04322



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของกระชายดำระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณ



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณ

5. สรุปผล

ผลจากการศึกษาพบว่า ความชื้นกระชายดำลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้อินฟราเรดกระตุ้น โดยพบว่า IR, HA&IR และ HA ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 515, 557 และ 935 นาที ตามลำดับ ในส่วนของคุณภาพด้านสี พบว่า IR มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุดลำดับถัดมาคือ HA&IR และ HA

ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่า HA&IR มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด ถัดมาคือ IR และ HA ตามลำดับ สำหรับปริมาณน้ำอิสระพบว่า การอบแห้งทุกเทคนิคอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารแห้ง และสุดท้ายยังพบว่า แบบจำลองที่สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำ ด้วย HA, IR และ HA&IR ได้ดีที่สุด คือ Weibull distribution, Two-term และ Weibull distribution ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- Association of Official Analytical Chemists. (2000). Official methods of analysis. (17th ed.). Maryland: Gaithersburg.
- Aymen, E., Sami, K., Ilhem, H., & Abdelhamid, F. (2015). Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. **Renewable Energy**, 77, 1-8.
- Caparino, O.A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. **Journal of Food Engineering**, 111, 135-148.
- Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., & Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. **LWT- Food Science and Technology**, 41, 2023-2028.
- Dan, H., Pei, Y., Xiaohong, T., Lei, L., & Bengt, S. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products, **Trends in Food Science & Technology**, 110, 765-777.
- Daniel, I.O., Norhashila, H., & Guangnan, C. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. **Trends in Food Science & Technology**, 57, 132-145.

- Daniel, I.O., Norhashila, H., Khalina, A., Rimfiel, J., & Guangnan, C. (2019). The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. **Journal of Food Engineering**, 241, 75-87.
- Darvishi, H., Azadbakht, M., Rezaeiasl, A., & Farhang, A. (2013). Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 12, 121-127.
- Faruq, A.A., Zhang, M., & Fan, D. (2019). Modeling the dehydration and analysis of dielectric properties of ultrasound and microwave combined vacuum frying apple slices. **Drying Technology**, 37(3), 409-423.
- Gokhale, S.V., & Lele, S.S. (2011). Dehydration of red beet root (beta vulgaris) by hot air drying: process optimization and mathematical modeling. **Food Science and Biotechnology**, 20(4), 955-964.
- Guo, Y., Wu, B., Guo, X., Ding, F., Pan, Z., & Ma, H. (2020). Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characterizations. **LWT- Food Science and Technology**, 126, 109312. Doi: 10.1016/j.lwt.2020.109312
- Hajar, E., Mohammed, B., Rachid, T., & Bargach, M.N. (2018). Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 49, 58-64.
- Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. **Trans ASAE**, 17, 1167-1172.
- Khampakool, A., Soisungwan, S., & Park, S. H. (2019). Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, 99, 355-363.
- Karthikeyan, A.K., & Murugavelh, S. (2018). Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. **Renewable Energy**, 128, 305-312.
- Kaveh, M., Chayjan, R.A., Taghinezhad, E., Sharabiani, V.R., & Motevali, A. (2020). Evaluation of specific energy consumption and GHG emissions for different drying

- methods (Case study: Pistacia Atlantica). **Journal of cleaner production**, 259, 120963. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120963
- Khuthadzo, M., & Tilahun S.W. (2021). The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality. **Heliyon**, 7, 1-15.
- Kroehnke, J., Szadzinska, J., Stasiak, M., Radziejewska-Kubzdela, E., Bieganska-Marecik, R., & Musielak, G. (2018). Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots- process kinetics and product's quality analysis. **Ultrasonics Sonochemistry**, 48, 249-258.
- Muga, F.C., Marenja, M.O., & Workneh, T.S. (2021). Modelling the thin-layer drying kinetics of marinated beef during infrared-assisted hot air processing of biltong. **International Journal of Food Science**, 8819780. Doi: 10.1155/ 2021/8819780
- Nathakaranakule, A., Paengkanya, S. & Soponronnarit, S. (2019). Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input. **Food and Bioproducts Processing**, 116, 105-117.
- Onwude, D.I., Hashim, N., Chen, G. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. **Trends in Food Science & Technology**, 57, 132-145.
- Page, G. (1949). Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer. M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Papu, S., Singh, A., Jaivir, S., Sweta, S., Arya, A.M. & Singh, B.R. (2014). Effect of drying characteristics of garlic-A Review. **Food Processing & Technology**, 5(4), 1-6.
- Pitakpawasutthi, Y., Palanuvej, C., & Ruangrunsi, N. (2018). Quality evaluation of Kaempferia parviflora rhizome with reference to 5, 7-dimethoxyflavone. **Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research**, 9(1), 26-31.
- Pekke, M.A., Pan, Z.L., Atungulu, G.G., Smith, G., & Thompson, J.F. (2013). Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 6(3), 58-70.
- Riadh, M.H., Ahmad, S.A.B., Marhaban, M.H. & Soh, A.C. (2015). Infrared heating in food drying: An overview. **Drying Technology**, 33(3), 322-335.

- Sa-adchom, P., Swasdisevi, T., Nathakaranakule, A., & Soponronnarit, S. (2011). Mathematical model of pork slice drying using superheated steam. **Journal of Food Engineering**, 104, 499-507.
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R. & Sharma, S.C. (2020). Infrared drying of food materials: Recent advances. **Food Engineering Reviews**, 12, 381-398.
- Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Gama, F.J.A., & Gomes, J.P. (2014). Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 13, 67-74.
- Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B., Wratten, F.T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. **Trans ASAE**, 28, 296-301.
- Vijayan, S., Arjunan, T.V., & Kumar, A. (2016). Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible storage based indirect solar dryer. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 36, 59-67.
- Vonggrachit, K. (2019). The government is preparing to push 4 top economic herbs. Retrieved from <http://www.voicetv.co.th/read/Hk3DwZ0lQ>
- Wang, J., Law, C.L., Nema, P.K., Zhao, J.H., Liu, Z.L. Deng, L.Z., Gao, Z.J., & Xiao, H.W. (2018). Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. **Journal of Food Engineering**, 224, 129-138.
- Wang, Q., Li, S., Han, X., Ni, Y., Zhao, D., & Hao, J. (2019). Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave assisted drying methods. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, 107, 236-242.
- กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ และศรีมา แจ้คำ. (2562).แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด. **วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 9(3), 29-44.
- ศรีมา แจ้คำ, กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ และเอกภูมิ บุญธรรม. (2564). การอบแห้งสมุนไพรด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดและอากาศร้อน. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 3(1), 32-43.