



ผลกระทบของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกและแบบจำลองการอบแห้งดอกเก๊กฮวย

Effect of Blanching Pretreatment and Drying Model of *Chrysanthemum indicum* Linn.ฤทธิชัย อัสวราชันย์^{1, 2*}, ปองพล สุริยะกันธร^{1, 2}, ประพันธ์ จิโน^{1, 2}Rittichai Assawarachan^{1, 2*}, Pongpon Suriyakunthorn^{1, 2}, Praphan Jino^{1, 2}¹สาขาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สันทราย, เชียงใหม่, 50290¹Food Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-Industry; Maejo University, Chiang Mai, Thailand, 50290²โครงการการพัฒนากระบวนการแปรรูปดอกคาร์โมมายล์ และดอกเบญจมาศ (เก๊กฮวย) อบแห้ง, ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงสะโงะ, สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน), กรุงเทพฯ, 10900²Sa Ngo Royal Project Development Center, Agricultural Research Development Agency (Public Organization), Bangkok, Thailand, 10900*Corresponding author: Tel: +66-8-1792-0946, Fax: +66-53-878-113, E-mail: rittichai.assawarachan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวก และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งดอกเก๊กฮวย ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C ด้วยความเร็วลมคงที่ 1.0 m s⁻¹ ความชื้นเริ่มต้นของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกมีค่าเท่ากับ 6.01 ± 0.44 g_{water} g_{dry matter}⁻¹ และความชื้นเริ่มต้นของดอกเก๊กฮวยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมขั้นต้น มีค่า 4.59 ± 0.27 g_{water} g_{dry matter}⁻¹ เวลาในการอบแห้งเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.071 ± 0.003 g_{water} g_{dry matter}⁻¹ เท่ากับ 570, 445, 340, 220 min และ 620, 480, 370, 245 min ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Page และ Henderson and Pabis ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของดอกเก๊กฮวยทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่างได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าโคก้างสอง (χ²) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) โดยอัตราการอบแห้งของเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าอัตราการอบแห้งอบแห้งดอกเก๊กฮวยสด เท่ากับ 1.41, 1.42, 1.43 และ 1.46 เท่า ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ และค่าพลังงานกระตุ้นของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นและที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมขั้นต้นซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสมีค่าเท่ากับ 30.38 และ 33.41 kJ mol⁻¹

คำสำคัญ: ดอกเก๊กฮวย, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล, พลังงานกระตุ้น

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of blanching pretreatment of *Chrysanthemum indicum* Linn. on drying performance and to develop mathematical drying models at a constant air velocity and temperatures (i.e., 1.0 m s⁻¹ and 50, 60, 70 and 80°C). The required drying time to reduce moisture content from 6.01 ± 0.44 g_{water} g_{dry matter}⁻¹ of blanched, and 4.59 ± 0.27 g_{water} g_{dry matter}⁻¹ of fresh *Chrysanthemum* to 0.071 ± 0.003 g_{water} g_{dry matter}⁻¹ were 570, 445, 340 and 220 min, and 620, 480, 370 and 245 min, respectively. Empirical moisture content curves were fitted to the Newton, Page and Henderson and Pabis drying models. The Page model yielded the highest coefficient of determination (R²), the least chi-square (χ²) and the lowest root mean square error (RMSE). The drying rates of the pre-treated *Chrysanthemum* were faster than those of untreated samples by 1.41, 1.42, 1.43 and 1.46 folds at 50, 60, 70 and 80°C, respectively. The activation energy for drying of pre-treated and untreated *Chrysanthemum* were well documented using an exponential expression based on by Arrhenius models and was found to be 30.38 and 33.41 kJ mol⁻¹.

Keywords: *Chrysanthemum indicum* Linn, Blanching pretreatment, Empirical models, Activation energy

1 บทนำ

ดอกเก๊กฮวย (*Chrysanthemum*) หรือดอก “เบญจมาศ” ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Chrysanthemum indicum* Linn. ชื่อวงศ์ Compositae มีถิ่นกำเนิดในประเทศญี่ปุ่นและจีน เก๊กฮวยได้จากดอกเบญจมาศสวน (ดอกเก๊กฮวย) เก็บเมื่อบานถูกนำมาอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ แล้วต้มกับน้ำ น้ำเก๊กฮวยที่ได้จะมีสีเหลืองและสีเหลืองดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกคาโรทีนอยด์ (caratenoids) ที่มีคุณสมบัติละลายในไขมัน นอกจากนี้ยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ ที่ช่วยต้านโรคมะเร็งและโรคหัวใจ ปัจจุบันได้มีการสนับสนุนการเพาะปลูกดอกเก๊กฮวยเชิงพาณิชย์สำหรับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในพื้นที่เกษตรพื้นที่สูงของประเทศไทย อย่างไรก็ตามดอกเก๊กฮวยสด เป็นพืชที่เน่าเสียง่าย มีอายุการเก็บรักษาสั้น (3-5 d) ที่อุณหภูมิ 10°C จึงนิยมนำผลผลิตเก็บทั้งหมดจึงถูกนำมาอบแห้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ เนื่องจากมีค่าความชื้นต่ำในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียในอาหาร นอกจากนี้ยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหารได้เป็นอย่างดี (ฤทธิชัย และคณะ, 2554) โดยการอบแห้งเป็นหน่วยปฏิบัติการในการแปรรูปอาหาร (unit operation in food processing) ที่นับได้ว่าเก่าแก่และมีความหลากหลายมาก (สักรมณ, 2555) วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมนั้นมักใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อให้แห้งซึ่งเป็นวิธีควบคุมการทำงานได้ง่ายและไม่ซับซ้อน สีของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งจะมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคอย่างมาก โดย 40% ของผู้บริโภคจะใช้สีของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งในการตัดสินใจซื้อ นอกจากนี้การเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกด้วยไอน้ำก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้งยังเป็นการบรรเทาการแปรรูปที่สำคัญที่ช่วยรักษาคุณภาพสีของดอกเก๊กฮวยอบแห้ง โดยการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกด้วยวัตถุประสงค์เพื่อทำลายเอนไซม์ (enzyme) โดยที่ความร้อนจากการลวกจะทำลายเอนไซม์ ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสีย เช่น เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (enzymatic browning reaction) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสีของดอกเก๊กฮวยอบแห้ง ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกต่อการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนความชื้นและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอาหารและวัสดุทางการเกษตร เช่น Rocha et al. (1993) ศึกษาผลของการลวกและการปรับสภาพโดยเติมสารลดแรงตึงผิวต่ออัตราการอบแห้งและปริมาณคลอโรฟิลล์ในการอบแห้งใบกะเพรา ซึ่งพบว่าการลวก

และการปรับสภาพด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวจะช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้ดีกว่าใบกะเพราสดและช่วยรักษาสีของใบกะเพรา โดยการตรวจปริมาณคลอโรฟิลล์ที่คงเหลือได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ และณัฐพงษ์ (2553) ศึกษาผลกระทบการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 95°C ที่เวลา 3, 5 และ 7 min ต่ออัตราการอบแห้งลำไยด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70-75°C พบว่าผลลำไยที่ถูกเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกด้วยน้ำร้อนที่เวลา 7 min จะมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็วที่สุด และช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งได้ 5-15% ในขณะที่การศึกษาของวรรณรัตน์ และคณะ (2554) ซึ่งศึกษาผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกไอน้ำที่อุณหภูมิ 70-90°C ที่เวลา 1-4 min การยับยั้งค่ากิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสในมังคุดพบว่าการลวกที่อุณหภูมิ 80°C และเวลา 2 min เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ช่วยยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสในมังคุด สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Doymaz (2008) ซึ่งพบว่าผลของการลวกด้วยน้ำร้อนจะช่วยลดอัตราการอบแห้งของกระเทียมแผ่นได้รวดเร็วกว่าตัวอย่างแผ่นกระเทียมที่ไม่ได้ผ่านการลวก เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Gonzalez-Fesler (2008) ซึ่งศึกษาผลของการลวกต่ออัตราการอบแห้งและการรักษาสีของการอบแห้งแผ่นแอปเปิ้ลด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

การทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ (สักรมณ, 2555) การจำลองการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear model) และแบบจำลองพหุนาม (polynomial model) เพื่อใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง และอธิบายกระบวนการอบแห้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและการออกแบบเครื่องอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม ปัจจุบันรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการอบแห้งดอกเก๊กฮวยยังขาดแคลนข้อมูล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของดอกเก๊กฮวยแบบชิ้นบางในระหว่างการอบแห้งด้วย

เครื่องอบลมร้อนแห้งแบบถาด ที่อุณหภูมิเท่ากับ 50, 60, 70 และ 80°C และความเร็วมวลที่ 1.0 m s^{-1} ภายใต้สมมติฐานการถ่ายเทมวลความชื้นแบบ 1 มิติ และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และค่าพลังงานกระตุ้น

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุ

ตัวอย่างดอกเก็กฮวยเป็นผลผลิตจากศูนย์พัฒนาโครงการหลวงสะโงะ จังหวัดเชียงราย ซึ่งเป็นดอกที่บ้านเดิมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2–3 cm ซึ่งเก็บเกี่ยวช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2556 ตัวอย่างน้ำหนัก 50 kg ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ดอกเก็กฮวยที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 4 min ซึ่งเป็นสภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่สุด (ปองพล และคณะ, 2557) และดอกเก็กฮวยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นหรือดอกเก็กฮวยสด ความชื้นเริ่มต้นของดอกเก็กฮวยถูกหาโดยนำดอกเก็กฮวย จำนวน 5 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นจำนวน 20 ตัวอย่าง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อน (500/108I, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2010) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (CP2245, Sartorius Analytical, Switzerland) ความชื้นของดอกเก็กฮวยถูกคำนวณโดยใช้ Eq. (1)

$$MC = \frac{W_i - W_f}{W_f} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นของดอกเก็กฮวย ($\text{g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$) W_i และ W_f คือน้ำหนักเริ่มต้นของดอกเก็กฮวย (g) และน้ำหนักสุดท้ายของดอกเก็กฮวย (g) ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการอบแห้ง (DR) ถูกคำนวณโดยผลต่างของค่าความชื้นในเวลาใดๆ แสดงใน Eq. (2)

$$DR = \frac{d(MC)}{d \text{ time}} \quad (2)$$

2.2 คุณสมบัติการอบแห้ง

เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดถูกออกแบบและสร้างโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.1 kW จำนวน 3 ชุด

และพัดลมระบายอากาศ (DVUS-940W1, Panasonic Corp., Japan) ควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (TTM J4/J5, Toho, Japan) ถาดสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งตาข่าย (CDR-3, CST, China) สำหรับวัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของดอกเก็กฮวย และบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่ถูกรับบันทึกค่าประกอบด้วยน้ำหนักของดอกเก็กฮวยที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งถูกบันทึกทุกๆ 5 min ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งดอกเก็กฮวย

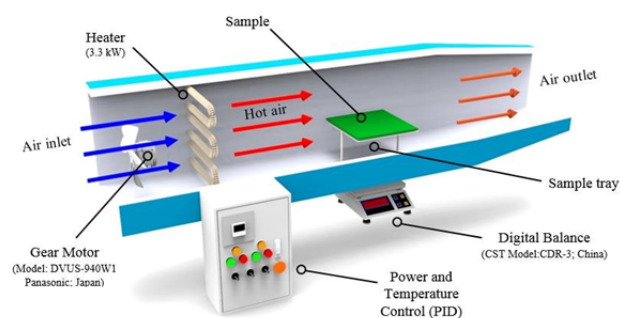


Figure 1 Diagram of the tray drying system.

นำดอกเก็กฮวยน้ำหนักเริ่มต้น 100 g อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Figure 1) ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C ด้วยความเร็วมวลที่ 1.0 m s^{-1} จากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ $0.071 \pm 0.003 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.3 แบบจำลองการอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (empirical equation) เช่น แบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis และ Page ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดัง Table 1 (Doymaz, 2008; ฤทธิชัย และคณะ, 2554; วิกานดา และคณะ, 2556; เนาวนิตย และคณะ, 2556) และสมการกึ่งทฤษฎี (semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงใน Eq. (3) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก (infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารหรือวัสดุชีวภาพที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

เมื่อ D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ($m^2 s^{-1}$), L คือความหนาของดอกเก๊กฮวย (m) และ t คือเวลาในการอบแห้ง (s)

Table 1 Mathematical models given by various authors.

Model name	Model equation
1. Newton	$MR = \exp(-kt)$
2. Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$

สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ความชื้นประสิทธิผล (activation energy for diffusion, E_a) โดยมีรูปแบบสมการดังแสดงใน Eq. (4) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ฤทธิชัย และคณะ (2554); วิภาดา และคณะ (2556); เนาวนิตย์ และคณะ (2556)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

เมื่อ D_0 คือ ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง ($m^2 s^{-1}$), E_a คือ พลังงานกระตุ้น ($kJ mol^{-1}$), R คือ ค่าคงที่ของก๊าซซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.008314 kJ mol^{-1}$ และ T คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K)

การวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear regression) ด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง (Thao and Noomhorm, 2011; Kumar et al., 2012; Wankhade et al., 2013) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2), ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงใน Eq. (5)–(6)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n_p} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (6)$$

เมื่อค่า $MR_{exp,i}$ และ $MR_{pre,i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง

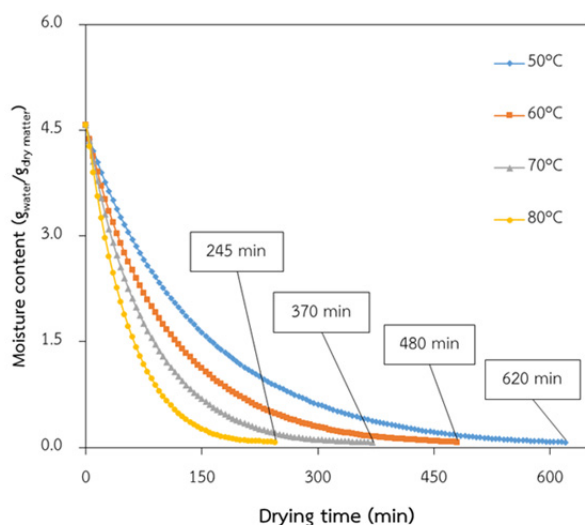
3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการในระหว่างการอบแห้ง

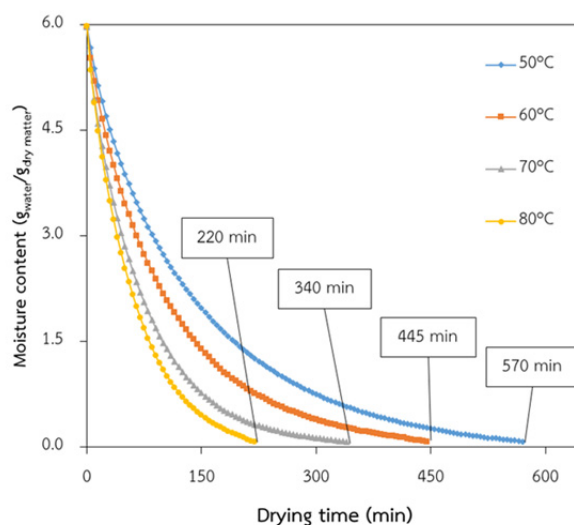
ตัวอย่างดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ $95^\circ C$ เป็นเวลา 4 min ซึ่งเป็นสภาวะการเตรียมขั้นต้นที่เหมาะสมที่สุดในการรักษาสีของดอกเก๊กฮวยและวัตถุดิบหลักเพื่อช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจากเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) และรักษาให้ดอกเก๊กฮวยมีสีส้มที่สวยงาม (ปองพล และคณะ, 2557) การลวกจะส่งผลให้ดอกเก๊กฮวยมีความชื้นสูงขึ้น เนื่องจากไอน้ำจะเป็นตัวนำความร้อน ยังส่งผลให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อในโครงสร้างเซลล์ ทำให้น้ำในเนื้อเยื่อ (capillary water) และน้ำที่อยู่ในรูน้ำอิสระ (free water) สะสมในดอกเก๊กฮวยซึ่งผ่านการเตรียมด้วยวิธีขั้นต้น ซึ่งมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจากดอกเก๊กฮวยสด เท่ากับ 30.93% โดยดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่าความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้น เท่ากับ $6.01 \pm 0.44 g_{water} g_{dry matter}^{-1}$ ในขณะที่ยังมีความชื้นเริ่มต้นของดอกเก๊กฮวยที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่าเท่ากับ $4.59 \pm 0.27 g_{water} g_{dry matter}^{-1}$ ถึงแม้ว่าดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการลวกจะมีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าดอกเก๊กฮวยสด แต่เวลาในการอบแห้งดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการลวก จนเหลือความชื้นสุดท้าย $0.071 \pm 0.003 g_{water} g_{dry matter}^{-1}$ ใช้เวลาเท่ากับ 570, 445, 340 และ 220 min ซึ่งน้อยกว่าเวลาในการอบแห้งดอกเก๊กฮวยสด ซึ่งใช้เวลาเท่ากับ 620, 480, 370 และ 245 min ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ $80^\circ C$ ตามลำดับ โดยเวลาในการอบแห้งดอกเก๊กฮวยสดมีค่าลดลงเท่ากับ 7.91, 7.29, 8.18 และ 10.22% Figure 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการลวก และเวลาในการอบแห้งดอกเก๊กฮวยสด (Figure 2(a)) และดอกเก๊กฮวยซึ่งผ่านการเตรียมด้วยการลวก (Figure 2(b)) โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งของดอกเก๊กฮวยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ช่วงแรกตัวอย่างดอกเก๊กฮวยจะสัมผัสกับลมร้อนจะเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน จนอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงดังกล่าว ซึ่งเป็นค่าความร้อนของ sensible heat จากนั้นน้ำที่ผิวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะไอน้ำและถูกถ่ายเทมวล

ความชื้น และถูกพาออกไปกับอากาศร้อนที่ไหลผ่าน โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เรียกว่า latent heat of vaporization มวลความชื้นที่ผิวตัวอย่างดอกเก๊กฮวย จะสูญเสียสมดุลความชื้นและแห้ง ส่งผลให้มวลความชื้นในชั้นเนื้อเยื่อเคลื่อนที่มายังผิวหน้าเพื่อชดเชยมวลความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างการอบแห้ง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำในโครงสร้างเซลล์และผนังเนื้อเยื่อชั้นใน จึงมีการแพร่มวลความชื้นมาทดแทนยังบริเวณผิวหน้าเซลล์เท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าอาหาร การอบแห้ง

ช่วงนี้จึงเรียกว่าอัตราการแห้งคงที่ (constant drying rate period) และเมื่อการอบแห้งดำเนินการต่อไปจนกระทั่ง อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารที่แพร่มาแทนที่ผิวหน้าช้ากว่า อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของอาหาร (falling drying rate period) อัตราการอบแห้งของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นด้วยการลวกมีค่าเท่ากับ 0.0104, 0.0133, 0.0174 และ 0.0269 $\frac{\text{g}_{\text{water}}}{\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}}$ ในขณะที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของดอกเก๊กฮวยสดมีค่าเท่ากับ 0.0073, 0.0094, 0.0122 และ 0.0184 $\frac{\text{g}_{\text{water}}}{\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}}$ ตามลำดับ



(a) Unblanching pretreatment



(b) Blanching pretreatment

Figure 2 Drying characteristics of blanching and unblanched *Chrysanthemum indicum* Linn. at four drying temperatures.

อัตราการอบแห้งของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการลวกมีค่ารวดเร็วมากกว่าอัตราการอบแห้งของเก๊กฮวยสดเท่ากับ 1.41, 1.42, 1.43 และ 1.46 เท่า ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50, 60, 70 และ 80°C ด้วยความเร็วลมคงที่ 1.0 m s^{-1} ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกด้วยไอน้ำส่งผลต่อการอ่อนตัวของโครงสร้างเซลล์ ซึ่งช่วยลดการเรียงตัวของเซลล์ในเนื้อเยื่อ และเกิดเป็นช่องว่างระหว่างเนื้อเซลล์ส่งผลต่อการแพร่มวลความชื้นจากเนื้อเยื่อภายในออกสู่ที่ชั้นผิวได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ Fellows (2000) ได้อธิบายปรากฏการณ์ในแนวทางที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกความร้อนจะช่วยทำลายชั้นเยื่อเคลือบผิวคิวติเคิล (cuticular membrane) ซึ่งมีลักษณะไขเคลือบอยู่ที่ชั้นผิวนอกและทำหน้าที่ป้องกันการระเหยน้ำของเซลล์พืช ดังนั้นจึงช่วยอัตราการแพร่ของมวล

ความชื้นจากเนื้อเยื่อภายในได้ดีขึ้น ดังนั้นผลกระทบของการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกไอน้ำและอุณหภูมิของการอบแห้งจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับรายงานวิจัยของ Rocha et al. (1993) ได้อธิบายผลของการลวกใบกะเพราด้วยไอน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเซลล์ ซึ่งจะเกิดช่องว่างระหว่างเซลล์จำนวนมากและมีขนาดใหญ่ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าใบกะเพราไม่ได้ทำการลวก ในขณะที่ผลการศึกษาของ Alvarez et al. (1995) ซึ่งใช้วิธีเตรียมโดยการลวกและการแช่ในสารละลายกลูโคสเข้มข้นของผลสตอเบอร์รี่ก่อนนำไปอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลของการลวกจะทำให้เกิดรูพรุนที่ผนังของเซลล์ และแรงดันออสโมซิสที่เกิดขึ้นจากการแช่ในสารละลายกลูโคสจะช่วยให้เกิดการเร่งการเคลื่อนที่ของน้ำใน

เนื้อเยื่อเซลล์ออกสู่ผิวเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ ณัฐพงษ์ (2553), Doymaz (2008) และ Gonzalez-Fesler (2008) ซึ่งพบว่าผลกระทบของการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกด้วยความร้อนและอุณหภูมิช่วยเร่งอัตราการอบแห้ง ลำใย กระเทียมแผ่น และแอปเปิ้ลแผ่น ได้ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการลวกด้วยความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าโคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำของแบบจำลองในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง แบบจำลองที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า R^2 สูงที่สุด แต่ในขณะที่ยังค่า χ^2 และค่า RMSE จะมีค่าต่ำที่สุด Table 2 และ Table 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการลวก และดอกเก๊กฮวยที่ไม่ผ่านการลวก ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งดอกเก๊กฮวยได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9993–0.9998 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton และ Henderson and Pabis และมีที่ค่า χ^2 และค่า RMSE ของแบบจำลอง Page มีค่าน้อยที่สุด และมีค่าระหว่าง 0.36×10^{-4} – 4.23×10^{-4} และ 0.0045–0.0098 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองการอบแห้งอื่นๆ

3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งดอกเก๊กฮวยในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีจัดรูปแบบของ Eq. (7) ซึ่งเป็นฟังก์ชันลอการิทึมของความสัมพันธ์แบบเส้นตรง

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงดังกล่าวซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t) เมื่อ L คือความหนาของดอกเก๊กฮวย ดังแสดงใน Eq. (8)

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

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกลุ่มตัวอย่างดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกไอน้ำ และดอกเก๊กฮวยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมขั้นต้นในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C มีค่าเท่ากับ 1.45×10^{-9} , 1.89×10^{-9} , 2.64×10^{-9} , 4.15×10^{-9} $m^2 s^{-1}$ และ 1.42×10^{-9} , 1.87×10^{-9} , 2.58×10^{-9} , 3.79×10^{-9} $m^2 s^{-1}$ ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศสูงขึ้นจะเพิ่มพลังงานความร้อนหรือค่าเอนทัลปีในระบบให้มีค่าสูงขึ้น ช่วยเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของตัวอย่างดอกเก๊กฮวย และอัตราการระเหยมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเติมเต็มบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion) สอดคล้องกับรายงานวิจัย Pongtong et al. (2011); ฤทธิชัย และคณะ (2554); เนาวนิตย์ และคณะ (2556) ซึ่งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเมล็ดทับทิม เปลือกทับทิมแบบชั้นบางและใบโหระพา ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเท่ากับ 1.25×10^{-10} – 2.91×10^{-10} $m^2 s^{-1}$, 0.34×10^{-10} – 1.22×10^{-10} $m^2 s^{-1}$ และ 0.44×10^{-11} – 1.17×10^{-11} $m^2 s^{-1}$ ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการลวกไอน้ำมีค่ามากกว่าดอกเก๊กฮวยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมขั้นต้น เนื่องจากดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการลวกไอน้ำจะส่งผลต่อโครงสร้างเนื้อเยื่อ และสมบัติการนำความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ส่งผลให้อัตราการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำในเนื้อเยื่อ (capillary water) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมถึงอัตราการเกิดค่าความร้อนของ sensible heat และ latent heat of vaporization ในระหว่างอัตราการอบแห้งในช่วง constant drying rate period และ falling drying rate period

Table 2 Statistical analysis of empirical drying models for blanched *Chrysanthemum indicum* Linn. at four drying temperatures.

Drying model	Drying temp. (°C)	Empirical drying model constants	Analytical parameters		
			R^2	χ^2 ($\times 10^{-4}$)	RMSE
Newton	50	$k = 0.0076$	0.9984	2.6423	0.0476
	60	$k = 0.0102$	0.9989	1.9004	0.0137
	70	$k = 0.0146$	0.9992	1.3235	0.0114
	80	$k = 0.0177$	0.9994	0.9992	0.0099
Page	50	$k = 0.0119, n = 0.9129$	0.9994	0.7577	0.0086
	60	$k = 0.0151, n = 0.9192$	0.9997	0.3655	0.0060
	70	$k = 0.0184, n = 0.9338$	0.9996	0.4084	0.0063
	80	$k = 0.0198, n = 0.9914$	0.9993	1.0011	0.0098
Henderson and Pabis	50	$K = 0.0072, a = 0.9488$	0.9991	1.0002	0.0099
	60	$K = 0.0097, a = 0.9536$	0.9995	0.5852	0.0076
	70	$K = 0.0141, a = 0.9608$	0.9996	0.4341	0.0065
	80	$K = 0.0175, a = 0.9854$	0.9994	0.8537	0.0090

Table 3 Statistical analysis of empirical drying models at various drying temperature of unblanched *Chrysanthemum indicum* Linn.

Drying model	Drying temp. (°C)	Empirical drying model constants	Analytical parameters		
			R^2	χ^2 ($\times 10^{-4}$)	RMSE
Newton	50	$K = 0.0071$	0.9996	5.0306	0.0071
	60	$K = 0.0098$	0.9998	3.9004	0.0062
	70	$K = 0.0132$	0.9998	3.0675	0.0055
	80	$K = 0.0187$	0.9990	16.3668	0.0127
Page	50	$k = 0.0078, n = 0.9800$	0.9997	4.2326	0.0065
	60	$k = 0.0110, n = 0.9767$	0.9998	2.6730	0.0051
	70	$k = 0.0119, n = 1.0225$	0.9998	2.0616	0.0045
	80	$k = 0.0131, n = 1.0857$	0.9998	2.2437	0.0046
Henderson and Pabis	50	$k = 0.0069, a = 0.9827$	0.9997	3.3642	0.0058
	60	$k = 0.0096, a = 0.9865$	0.9998	2.7482	0.0052
	70	$k = 0.0133, a = 1.0093$	0.9998	2.5592	0.0050
	80	$k = 0.0193, a = 1.0307$	0.9992	10.7191	0.0101

3.4 ค่าพลังงานกระตุ้น

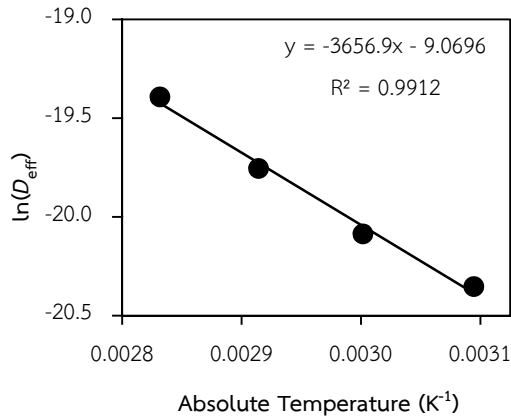
พลังงานกระตุ้นของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกไอน้ำ และดอกเก๊กฮวยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมขั้นต้นในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถคำนวณจาก

ความสัมพันธ์ในรูปฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส ดังแสดงใน Eq. (4) โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงใน Eq. (10)

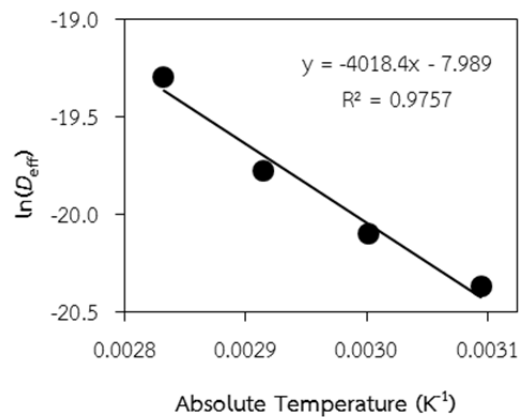
$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (10)$$

ค่าความชัน ตามลำดับ ของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(D_{eff})$ และ (T^{-1})

ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง (D_0) และค่าพลังงานกระตุ้นของดอก
เก็กฮวย (E_0) สามารถคำนวณจากค่าจุดตัดแกนตั้งและ



(a) Unblanching pretreatment



(b) Blanching pretreatment

Figure 3 Effect of drying temperature on the effective diffusion coefficient of blanching and unblanched *Chrysanthemum indicum* Linn.

ค่า E_0 ของดอกเก็กฮวยที่ผ่านการลวกไอน้ำ และดอกเก็กฮวยสด และมีค่าเท่ากับ 30.38 และ 33.41 kJ mol⁻¹ ตามลำดับ (Figure 3) ซึ่งค่า E_0 ของดอกเก็กฮวยที่ผ่านการลวกไอน้ำ มีค่าน้อยกว่าค่า E_0 ของดอกเก็กฮวยสด สามารถบ่งบอกปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพของการเกิดการเคลื่อนที่ของมวลความชื้น โดยค่า E_0 ที่มีค่าน้อยชี้ให้เห็นถึงปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นหรืออัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว เนื่องจากใช้พลังงานกระตุ้นในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นที่น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่มากกว่าดอกเก็กฮวยสด

4 สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมด้วยเทคนิคทางสถิติแบบการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุดในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่าต่ำที่สุด อัตราการอบแห้งของดอกเก็กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าอัตราการอบแห้งของดอกเก็กฮวยสด เท่ากับ 1.41, 1.42, 1.43 และ 1.46 เท่า ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ

80°C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ดอกเก็กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ซึ่งมีค่ามากกว่า ค่า D_{eff} ของดอกเก็กฮวยสด อย่างไรก็ตามค่าพลังงานกระตุ้น (E_0) ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสของการอบแห้งเก็กฮวยที่ผ่านการลวกมีค่าน้อยกว่า E_0 ของการอบแห้งดอกเก็กฮวยสด ซึ่งมีเท่ากับ 30.38 และ 33.41 kJ mol⁻¹

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการพัฒนากระบวนการแปรรูปดอกคาร์โมมายล์ และดอกเบญจมาศ (เก็กฮวย) อบแห้งของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงสะโง๊ะ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปีงบประมาณ 2556

6 เอกสารอ้างอิง

ณัฐพงษ์ กิพงษ์. 2553. ผลกระทบของการลวกด้วยน้ำร้อนต่ออัตราการอบแห้งลำไย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
เนาวนิตย์ โพธิ์ศรี, พิมลพรรณ คงบุตร, เกียรติศักดิ์ อุตตะมตัง, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2556. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการ

- เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและสีของใบสาระแนในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน. วารสารวิชาการ มทร. สุวรรณภูมิ 1(2), 103-114.
- ปองพล สุริยะกันธร, ประพันธ์ จิโน, ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2557. ผลของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกต่อการอัตราการอบแห้งและค่าสีของดอกเบญจมาศ (เก็กฮวย) อบแห้งด้วยลมร้อน. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 15 ประจำปี 2557 พระนครศรีอยุธยา: โรงแรมกรุงศรีริเวอร์. 2-4 เมษายน 2557, พระนครศรีอยุธยา, พระนครศรีอยุธยา.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์, ภาณุมาศ แสงเจริญรัตน์, สุนทร สืบคำ, เทียรณมณี มั่งมูล, ดวงมล จนใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกทับทิม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1), 27-34.
- วรรณรัตน์ ธิสุสวีสต์, อนุวัตร แจ่มชัด, นันทวัน เทิดไทย. 2554. ผลของการลวกต่อกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสในมังคุดและผลของสารละลายซูโครสร่วมกับกรดซิตริกในการถายโอนมวลสารระหว่างการอบแห้ง. รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49 ประจำปี 2554, 508-514. กรุงเทพมหานคร: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน. 1-4 กุมภาพันธ์ 2554, บางเขน, กรุงเทพมหานคร.
- วิกานดา แก้วยอด, รัชฎา แยมศรวล, ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2556. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอัตราการถายโอนมวลในระหว่างการอบแห้งเปลือกทับทิมแบบชั้นบางด้วยลมร้อน. การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล. ครั้งที่ 2 ประจำปี 2556 กรุงเทพมหานคร: โรงแรมวินเซอร์สวิตส์. 30 สิงหาคม 2556, สุขุมวิท, กรุงเทพมหานคร.
- ลักกมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- Alvarez, C.A., Aguerre, R., Romez, R., Vidales, S., Alzamora, S.M., Gerschenson, L.N. 1995. Air dehydration of strawberries: Effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. Journal of Food Engineering 25, 167-178.
- AOAC. 2010. Official Methods of Analysis. 18th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC., USA.
- Doymaz, I. 2008. Influence of blanching and slice thickness on drying characteristics of leek slices. Chemical Engineering and Processing 47, 41-47.
- Fellows, P.J. 2000. Food processing technology. 2nd ed. Woodhead Publishing Limited. Cambridge, England.
- Gonzalez-Fesler, M., Salvatori, D., Gomez, P., Alzamora, S.M. 2008. Convective air drying of apples as affected by blanching and calcium impregnation. Journal of Food Engineering 87, 323-332.
- Kumar, N., Sarkar, B.C., Sharma, H.K. 2012. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. Journal of Food Science and Technology 49(1), 33-41.
- Pongtong, K., Assawarachan, R., Noomhorm, A. 2011. Mathematical models for vacuum drying characteristics of Pomegranate Aril. Journal of Food Science and Engineering 1(1), 11-19.
- Rocha, T., Lebert, A., Marty-Audouin, C. 1993. Effect of pretreatment and drying conditions rate and colour retention of Basil (*Ocimum basilicum*). LWT. 26(5), 456-463.
- Thao, H.M., Noomhorm, A. 2011. Modeling and effects of various drying methods on sweet potato starch properties. Walailak Journal of Science and Technology 8(2): 139-158.
- Wankhade, P.K., Sapkat, R.S., Sapkal, V.S. 2013. Drying characteristics of Okra slices on drying in hot air dryer. Procedia Engineering 51, 371-374.