

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น และสีของใบสะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน

Effect of temperature on moisture ratio and color changes of mint leaves during hot air drying process

เนาวนิตย์ โพธิ์ศรี¹ พิมลพรรณ คงบุตร¹ เกียรติศักดิ์ อุดตมะติง¹

และ ฤทธิชัย อัสวราชันย์^{1*}

Naowanit Phosee,¹ Pimonphan Khongbutr,¹ Krittisak Uttamating¹

and Rittichai Assawarachan^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของการอบแห้งใบสะระแหน่จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 6.98 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง เหลือความชื้น 0.064 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมคงที่ ที่ 0.25 เมตร/วินาที โดยใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 150, 90 และ 51 นาที ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นที่รู้จักในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งของผลผลิตทางการเกษตรจำนวน 4 สมการ ได้แก่ Newton, Page, Henderson and Pabis และ Midilli *et al.* (2002) ถูกนำมาศึกษาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองของ Midilli *et al.* (2002) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) ในขณะที่ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่าต่ำสุด จึงมีความเหมาะสมมากที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ของใบสะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.44×10^{-11} - 1.17×10^{-11} ตารางเมตร/วินาที และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เท่ากับ 46.14 กิโลจูล/โมล จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีในระบบ CIE ($L^*a^*b^*$) ของใบสะระแหน่อบแห้ง พบว่าค่าสีแดง/สีเขียว (a^* value) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ -1.52 ± 1.20 , 0.10 ± 0.75 , 0.85 ± 1.21 และ 8.37 ± 6.40 , 9.69 ± 5.90 , 31.64 ± 5.20 ที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

คำสำคัญ : สะระแหน่ การอบแห้งด้วยลมร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พลังงานกระตุ้น

¹ สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

¹ Food Engineering, Faculty of Engineering and Argo-Industry, MeaJo University, Chiangmai, 50290

* Corresponding author. E-mail: rittichai.assawaracha@gmail.com

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of temperature of mint leaves undergone laboratory-scale of the tray dryer. The time required to reduce moisture content of mint leaves from 6.98 to 0.064 $\frac{\text{g}_{\text{water}}}{\text{g}_{\text{dry matter}}}$ on drying at temperatures of 55, 65 and 75°C (constant air velocity of 0.25 m/s) was 150, 90 and 51 min respectively. Thin layer drying models including the Newton, Page, Henderson and Pabis and Midilli *et al.* (2002) models were fitted to the experimental drying data in order to find the most suitable drying model describing drying characteristics of mint leaves. The results showed that Midilli *et al.* (2002) model could represent the drying characteristics of mint leaves most satisfactorily. Effective moisture diffusivities were determined between 0.44×10^{-11} and $1.17 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. The activation energy for drying of mint leaves was well documented using an exponential expression based on Arrhenius models, and it was found to be 46.14 kJ/mol. The results indicated that the dried mint leaves had the highest quantified by a^* value and total color different (TCD) while increasing temperature was -1.52 ± 1.20 , 0.10 ± 0.75 , 0.85 ± 1.21 and 8.37 ± 6.40 , 9.69 ± 5.90 , 31.64 ± 5.20 at drying temperatures of 55, 65 and 75°C respectively.

Keywords : mint leaves, hot-air drying, mathematical modeling, activation energy

บทนำ

สะระแหน่ (*Metha cordifolia* Opiz.) วงศ์ Labiatae เป็นพืชล้มลุกเลื้อยตามพื้นดิน อยู่ในตระกูลมินต์ มีแหล่งกำเนิดมาจากแถบยุโรปตอนใต้และแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน มีลักษณะลำต้นสีแดงเข้ม ใบกลมค่อนข้างหนา ริมใบหยักโดยรอบ ภายในใบเป็นคลื่นยับย่น และมีกลิ่นหอมนิยมนำใบสะระแหน่มาปรุงอาหารเพื่อเพิ่มรสชาติความหอม อร่อยและใช้ทำยาเพื่อผสมลงไปในชาสมุนไพรหรือมาผสมลงในเครื่องดื่ม ใบสะระแหน่ยังสามารถนำไปทำเป็นยาปฏิชีวนะและยังใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระออกจากร่างกาย ใบสะระแหน่ยังใช้ไปทำน้ำมันหอมระเหยเพื่อใช้ในการทำสუნัขบำบัด (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2556) อย่างไรก็ตาม ใบสะระแหน่ก็มีอายุการเก็บรักษาที่สั้นจึงนิยมนำใบสะระแหน่มาอบแห้งเพื่อนำมาแปรรูปเป็นเครื่องเทศสำหรับการปรุงแต่งรสและเป็นส่วนประกอบของอาหาร (food ingredients) ที่ช่วยให้มีรสชาติที่น่ารับประทานมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้

สีผลผลิตทางการเกษตรอบแห้งเป็นเกณฑ์ที่สำคัญในการตัดสินใจของผู้บริโภค การอบแห้งเป็นหน่วยปฏิบัติการในการแปรรูปอาหาร (unit operation in food processing) ที่นับได้ว่าเก่าแก่และมีความหลากหลายมาก (สั๊กมณ, 2555) และเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน เนื่องจากมีค่าความชื้นต่ำในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียในอาหาร นอกจากนี้ยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหารได้เป็นอย่างดี การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical modeling) ของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ (สั๊กมณ, 2555) ปัจจุบันการศึกษาแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ของผลผลิตทางการเกษตร ของกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ สามารถทำได้ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลองโดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear model) และแบบจำลองพหุนาม (polynomial model) เพื่อใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง และอธิบายกระบวนการอบแห้ง สัมมีความสำคัญต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ผลผลิตทางการเกษตรอบแห้งในด้านความชอบและการยอมรับของผู้บริโภค บางครั้งสีอาจใช้เป็นดัชนีชี้วัดในการคัดเลือกวัตถุดิบ ควบคุมขั้นตอนการผลิต และจัดแบ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ปัจจุบันนิยมใช้ระบบสีในการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ผลผลิตทางการเกษตรอบแห้งด้วยมาตรฐานด้านสีคือ Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการ ปัจจุบันรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการอบแห้งไบโสะระแห้งยังขาดแคลนข้อมูล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพสีของไบโสะระแห้งในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส รวมทั้งการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และค่าพลังงานกระตุ้น ตลอดจนการศึกษาผลกระทบของระดับอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีระบบ CIE ($L^* - a^* - b^*$)

วิธีการศึกษา

การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ค่าความชื้น

ตัวอย่างไบโสะระแห้งสดที่นำมาศึกษาจากตลาดสดแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ นำมาล้างทำความสะอาด ตัดใบโสะระแห้งเป็นใบและเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อไล่น้ำออกจากนั้นนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาทดลองนำไบโสะระแห้งจำนวน 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 ออนซ์ ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นออกนำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อน (Memmert Model 500/108I) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 2010) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (Sartorius Model CP2245) นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักไบโสะระแห้งก่อนและหลังการอบแห้งมาคำนวณหาค่าความชื้นของไบโสะระแห้ง โดยแสดงในสมการ (1)

$$MC = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ MC คือความชื้นของไบโสะระแห้ง (กรัมน้ำ/กรัมน้ำหนักแห้ง) และ W_i , W_f คือน้ำหนักเริ่มต้นของไบโสะระแห้งสด (กรัม) และน้ำหนักสุดท้ายของไบโสะระแห้ง (กรัม) ตามลำดับ และอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งไบโสะระแห้งด้วยลมร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_t , M_i , M_e คือความชื้นที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล ตามลำดับ

เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาด

เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดถูกออกแบบและสร้างโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.1 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ชุด และพัดลมระบายอากาศ (Panasonic Model: DVUS-940W1 ผลิตโดยประเทศญี่ปุ่น) ควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (Toho Model: TTM J4/J5 ประเทศญี่ปุ่น)

ถาดสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งตาข่าย (ยี่ห้อ CST รุ่น CDR-3 ผลิตโดยประเทศจีน) สำหรับวัดและบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของใบสะระแหน่และบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล จากนั้นนำใบสะระแหน่ที่มีน้ำหนักเริ่มต้นจำนวน 30 กรัม อบแห้งด้วยชุดทดสอบการอบแห้งแบบถาด (Figure 1) ที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมคงที่ที่ 0.25 เมตร/วินาที

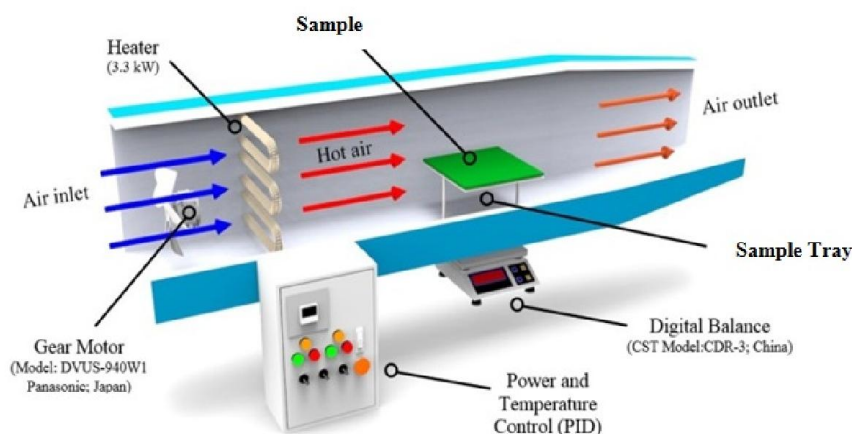


Figure 1 Tray drying system.

สมการกึ่งทฤษฎี (semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงในสมการ (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} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ (ตารางเมตร/วินาที) L คือความหนาของใบสะระแหน่ซึ่งวัดโดยดิจิตอลไมโครมิเตอร์ขนาดความละเอียด ± 0.0001 m และ t คือเวลาในการอบแห้ง (วินาที) การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับ

การแพร่ (activation energy for diffusion, E_d) โดยใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (วิกานดา และคณะ, 2556 ; Sacilik and Elicin, 2005 ; Kumar *et al.*, 2012; Singh and Pandey, 2012) ดังแสดงใน สมการ (4)

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

เมื่อ D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความขึ้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที) D_0 คือ ค่าคงที่ของระบบการแพร่ E_d คือค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล) T คืออุณหภูมิของลมร้อน (เคลวิน) และ R คือค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูล/โมล เคลวิน) การวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งโอบสัระระแห้งด้วยลมร้อนใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear regression) ด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง (ฤทธิชัย และคณะ, 2554; จินตนาพร และคณะ, 2555; วิกานดา และคณะ, 2556; Sacilik and Elicin, 2005; Kumar *et al.*, 2012; Saini *et al.*, 2012) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในสมการ (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 $MR_{pre,i}$ เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง

การวิเคราะห์พารามิเตอร์สี

วัดสีโอบสัระระแห้งที่อุณหภูมิของลมร้อนระดับต่างๆ ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (รุ่น Hunter Lab Model MiniScan XE Plus) ครั้งละ 10 กรัม โดยวัดค่าสีในระบบ CIE-Lab scale ในรูปแบบของค่าความสว่าง/ความมืด (L^*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) ของโอบสัระระแห้งที่อุณหภูมิระดับต่างๆ โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการ (7)

$$TCD = \sqrt{(L_0^* - L_t^*)^2 + (a_0^* - a_t^*)^2 + (b_0^* - b_t^*)^2} \quad (7)$$

เมื่อ L_t^* , a_t^* และ b_t^* คือค่าพารามิเตอร์สีของโอบสัระระแห้งในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เวลาใดๆ และ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือค่าพารามิเตอร์สีของโอบสัระระแห้งสด

ผลการศึกษา

ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น

จากการศึกษาผลของระดับอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (MR) ของโอบสัระระแห้งในระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดจากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 6.98 กรัม/น้ำ/กรัม น้ำหนักแห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.064 กรัม/น้ำ/กรัม น้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ

55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้ง 150, 90 และ 51 นาที และมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 2.76, 4.61 และ 8.13 กรัม/น้ำ/กรัม/น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ Figure 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นและเวลาในการอบแห้งของใบสาระแนซึ่งมีลักษณะของกราฟเป็นเอ็กโพเนนเชียล โดยมีกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งดังนี้ ช่วงแรกใบสาระแนจะสัมผัสกับลมร้อนจะเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนจนอุณหภูมิของใบสาระแนมีค่าสูงขึ้นและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงดังกล่าว ซึ่งเป็นค่าความร้อนของ sensible heat จากนั้นน้ำที่ผิวของใบสาระแนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะไอน้ำและถูกถ่ายเทมวลความชื้น และถูกพาออกไปกับอากาศร้อนที่ไหลผ่านโดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เรียกว่า latent heat of vaporization ความชื้นที่ผิวใบสาระแนจะเสีย

สูญเสียสมดุลความชื้นและแห้ง ส่งผลให้มวลความชื้นในชั้นเนื้อเยื่อพาเรงคิมา (parenchyma) เคลื่อนที่มายังผิวหน้าเพื่อชดเชยมวลความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างการอบแห้ง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำในโครงสร้างเซลล์และผนังเนื้อเยื่อพาเรงคิมา จึงมีการแพร่มวลความชื้นมาทดแทนยังบริเวณผิวหน้าเซลล์และมีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าอาหาร การอบแห้งช่วงนี้จึงเรียกว่าอัตราการทำให้แห้งคงที่ (constant drying rate period) จากผลการศึกษาพบว่ามวลความชื้นของใบสาระแนลดลงอย่างรวดเร็วทั้งในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งและเมื่อการอบแห้งดำเนินการต่อไปจนกระทั่งอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารที่แพร่มาแทนที่ผิวหน้าช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของอาหาร (falling drying rate period)

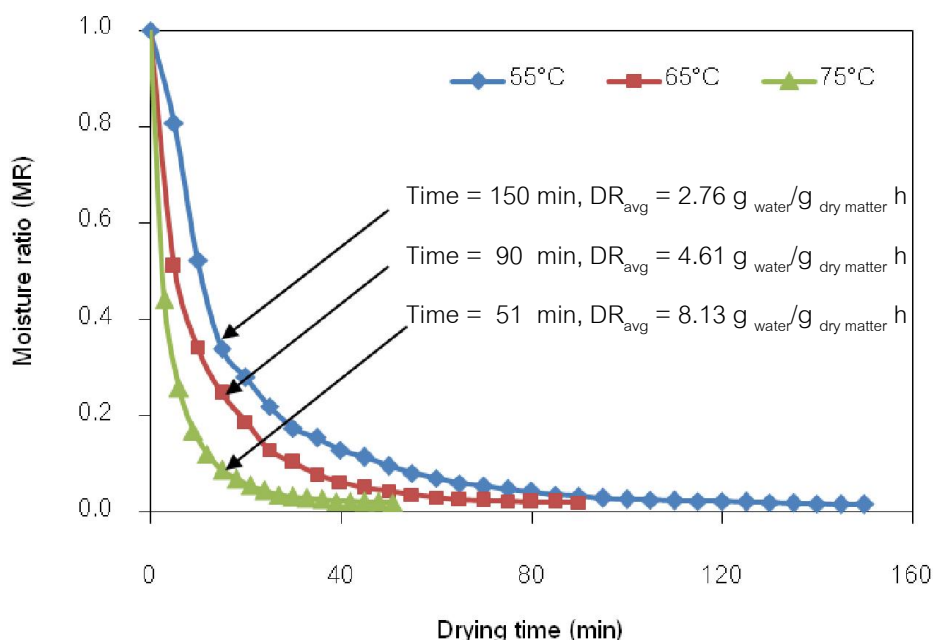


Figure 2 Effect of temperature on the moisture ratio of mint leaves at drying time.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทดลองโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายความชื้นที่เปลี่ยนแปลงของใบสะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ได้แก่ Newton, Page, Henderson and Pabis และ Midilli *et al.* (2002) ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายความชื้นที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยใช้ค่า R^2 , χ^2 และ RMSE ช่วยในการวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลอง โดยทั้ง 4 แบบจำลอง (Table 1) จากผลการวิเคราะห์ Table 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ (empirical model) และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่นๆ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองของ Midilli *et al.* (2002) มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบสะระแหน่ได้ดีที่สุด โดยมี ค่า R^2 ในช่วง 0.9928 - 0.9997 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบอื่นๆ และค่า χ^2 และ RMSE มีค่าระหว่าง 0.00156×10^{-3} ถึง 0.61499×10^{-3} และ 0.0011 ถึง 0.0231 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบอื่นๆ โดยที่ค่า R^2 สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม โดยถ้าค่า R^2 มีค่ามากจะแสดงว่าตัวแปรต้นสามารถอธิบายค่าตัวแปรตามได้ดี ในขณะที่ค่า χ^2 และ RMSE เป็นค่าพารามิเตอร์ในทางสถิติที่

บ่งบอกความแตกต่างระหว่างข้อมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งหากมีค่าน้อยจะบ่งบอกถึงความผิดพลาดในการทำนายที่น้อยลง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่ดีควรมีค่า R^2 มาก แต่มีค่า χ^2 และ $RMSE$ น้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่น แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรูปแบบนั้น มีประสิทธิภาพสูงในการทำนาย

อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นเนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Limpaboon (2011) ซึ่งศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมของการอบแห้งแผ่นผักทองอบแห้ง

Table 1 Thin layer drying model constants and statistical parameters of mint leaves.

drying model	temperature (°C)	empirical drying model constants	analytical parameters		
			R^2	$\chi^2 \times 10^{-4}$	$RMSE$
Newton	55	$k=0.0582$	0.9858	10.8096	0.0323
	65	$k=0.0963$	0.9821	16.5021	0.0395
	75	$k=0.2175$	0.9825	14.1899	0.0356
Page	55	$k=0.0919, n=0.8471$	0.9894	8.4647	0.0281
	65	$k=0.2307, n=0.6671$	0.9996	0.3412	0.0055
	75	$k=0.4304, n=0.6262$	0.9988	0.976	0.0091
Henderson and Pabis	55	$k=0.0576, a=0.9918$	0.9858	11.128	0.0323
	65	$k=0.0899, a=0.9424$	0.9863	13.4038	0.0346
	75	$k=0.2095, a=0.9668$	0.9827	14.3777	0.0348
Midilli et al. (2002)	55	$k=0.0844, n=0.8931, a=1.0251, b=0.0002$	0.9928	6.1499	0.0231
	65	$k=0.1661, n=0.7615, a=0.9007, b=0.0002$	0.9995	0.1274	0.0032
	75	$k=0.7036, n=0.5214, a=1.5345, b=0.0003$	0.9997	0.0156	0.0011

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบใบสะระแหน่ที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.44×10^{-11} , 0.70×10^{-11} และ 1.17×10^{-11} ตารางเมตร/วินาที โดยที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น (Figure 3) ส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเติมเต็มบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเท

มวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion) การหาค่าพลังงานกระตุ้นของใบสะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส (สมการ (4)) โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง จะได้ค่าพลังงานกระตุ้นของใบสะระแหน่มีค่าเท่ากับ 46.14 กิโลจูล/โมล ได้ค่าพลังงานกระตุ้นสูงเนื่องจากใบสะระแหน่มีคุณลักษณะทางกายภาพพื้นที่ในการถ่ายเทความชื้นมาก ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งใบสะระแหน่จึงมีค่าสูง

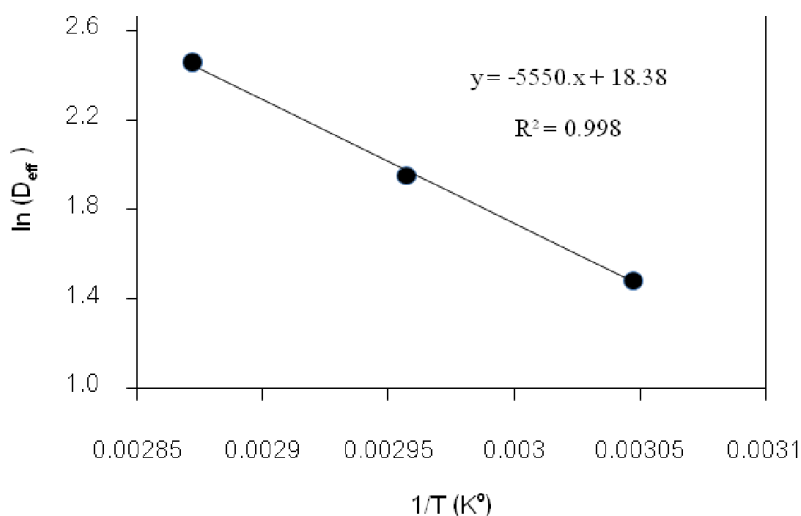


Figure 3 Effect of temperature on moisture diffusivity in mint leaves.

ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสีของใบสาระแนอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงสีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งใบสาระแนด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดนั้นเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time dependent process) และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการอบแห้ง (Figure 4) จากผลการศึกษาพบว่า ผลของระดับอุณหภูมิเครื่องอบลมร้อนจะส่งผลต่อค่า L^* -value โดยเมื่อระดับอุณหภูมิเครื่องอบลมร้อนมากขึ้นจะส่งผลให้ใบสาระแนอบแห้งมีค่า L^* -value ลดลง โดยมีค่า 28.47 ± 3.39 , 25.14 ± 3.08 และ 23.32 ± 2.53 เช่นเดียวกับค่า b^* value จะมีค่าลดลง เมื่อระดับอุณหภูมิเครื่องอบลมร้อนมากขึ้น ซึ่งมีค่า 7.24 ± 0.89 , 5.53 ± 1.06 และ 5.14 ± 0.88 ที่ระดับอุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่า L^* -value ของใบสาระแนอบแห้งจะมีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่า a^* -value จะสามารถแบ่งกลุ่มทางสถิติออกเป็น 3 กลุ่ม โดยที่ใบสาระแนอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 และ 75 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญ ในการวัดค่าสีของใบสาระแนอบแห้ง โดยค่า a^* -value มีค่า -1.52 ± 1.20 , 0.10 ± 0.75 และ 0.85 ± 1.21 ที่ระดับอุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ค่าแตกต่างสีโดยรวม (total color difference, TCD) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของใบสาระแน โดยเปรียบเทียบกับค่าสีของใบสาระแนสด (เมื่อใบสาระแนสดมีค่า $L_0^* = 30.53 \pm 1.88$, $a_0^* = -5.60 \pm 0.58$ และ $b_0^* = 11.15 \pm 1.62$) มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่า 1.52 ± 1.20 , 0.10 ± 0.75 , 0.85 ± 1.21 และ 8.37 ± 6.40 , 9.69 ± 5.90 , 31.64 ± 5.20 ที่ระดับอุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

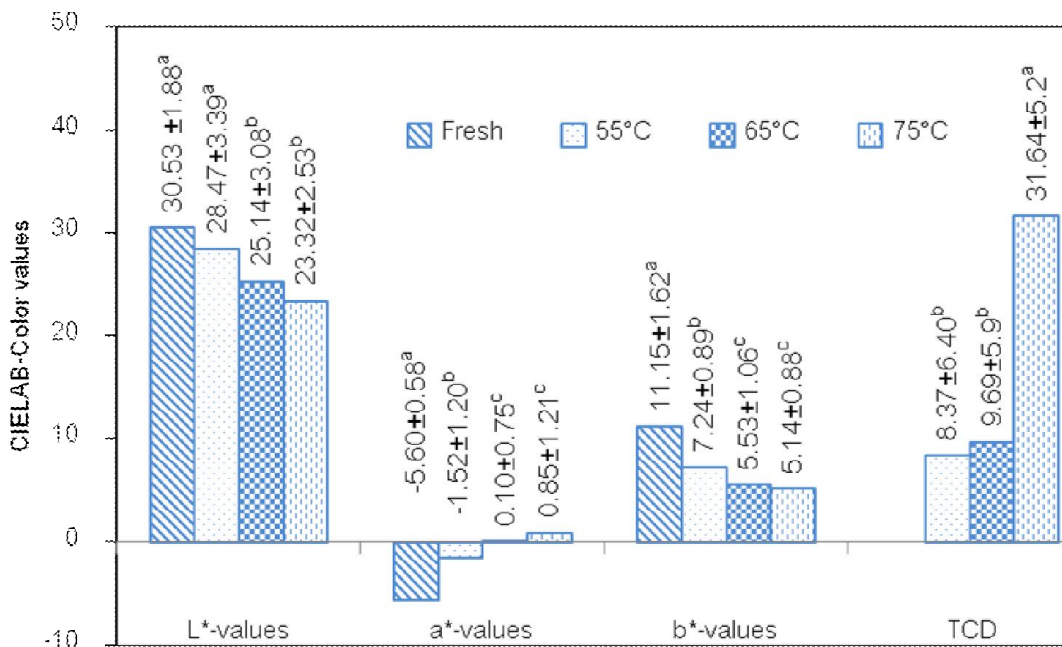


Figure 4 Effect of temperature on moisture diffusivity in mint leaves.

อภิปรายผล

จากการศึกษาผลกระทบของระดับอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบสะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ที่ 0.25 เมตร/วินาทีของใบสะระแหน่ที่มีความชื้นเริ่มต้น 6.98 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง อบแห้งจนเหลือความชื้น 0.064 กรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 150, 90 และ 51 นาที ตามลำดับ ผลของระดับอุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการอบแห้งที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการแพร่ความชื้น โดยการอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับระดับอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์หาแบบจำลองการอบแห้งของใบสะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่าแบบจำลองของ Midilli *et al.* (2002) มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9928-0.9997 ค่า χ^2 มีค่าระหว่าง 0.0016×10^{-3} - 0.6150×10^{-3} ค่า $RMSE$ มีค่าระหว่าง 0.0011-0.0231 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบอื่น ค่า D_{eff} ของใบสะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.44×10^{-11} , 0.70×10^{-11} และ 1.17×10^{-11} ตารางเมตร/วินาที ตามลำดับ และมีค่า E_a ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส มีค่าเท่ากับ 46.14 กิโลจูล/โมล และจากการวัดค่าสี พบว่า L^* -value มีค่า 28.47 ± 3.39 , 25.14 ± 3.08 และ 23.32 ± 2.53 , ค่า a^* -value มีค่า -1.52 ± 1.20 , 0.10 ± 0.75 และ 0.85 ± 1.21 , ค่า b^* -value มีค่า 7.24 ± 0.89 , 5.53 ± 1.06 และ 5.14 ± 0.88 และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) มีค่า 8.37 ± 6.40 ,

9.69 ± 5.90 และ 31.64 ± 5.20 ที่ระดับอุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้

สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Midilli *et al.* (2002) มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9928-0.9997 ค่า χ^2 มีค่าระหว่าง 0.0016×10^{-3} - 0.6150×10^{-3} , ค่า $RMSE$ มีค่าระหว่าง 0.0011-0.0231 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบอื่น และค่า D_{eff} ของใบสะระแหน่จะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง โดยมีค่า E_a มีค่าเท่ากับ 46.14 กิโลจูล/โมล และจากการวัดค่าสีพบว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะในการรักษาค่าสีของใบสะระแหน่ได้เหมาะสมที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- จินตนาพร ปันพรม, จุฑามาศ บุญเลา, โชติพงศ์ กาญจนประโชติ และฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2555. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากมะพร้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 43(3): 224-227.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์, ภาณุเดช แสงเจริญรัตน์, สุนทร สืบคำ, เตียรณณิ มั่งมูล และดวงกมล จินใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกทับทิม. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย* 17(1): 27-34.
- วิภาดา แก้วยอด, รัชฎา แยมศรวล และ ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2556. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอัตราการถ่ายเทมวลในระหว่างการอบแห้งเปลือกทับทิมแบบชั้นบางด้วยลมร้อน. ใน: การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล.

- ครั้งที่ 2 ประจำปี 2556 30 สิงหาคม 2556.
โรงแรมวินเซอร์สวิตส์ สุขุมวิท กรุงเทพฯ.
วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2556. สระแนะ. (ระบบออนไลน์).
แหล่งข้อมูล: <http://th.wikipedia.org/wiki/สระแนะ>
(18 กันยายน 2556).
- สั๊กกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและ
วัสดุชีวภาพ. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.
- AOAC. 2010. Official methods of analysis. (18th Ed)
Association of official analytical chemists,
Washington, DC. USA.
- Kumar, N., B.C Sarkar, and H.K. Sharma. 2012.
Mathematical modeling of thin layer hot air
drying of carrot pomace. *J. Food Sci. Technol.*
49 (1): 33-41.
- Limpai boon, K. 2011. Effects of temperature and slice
thickness on drying kinetics of pumpkin slices.
Walailak J. Sci. & tech. 8(2): 159-166.
- Midilli, A., H. Kucuk and Z. Yapar. 2002. A new model
for single-layer drying. *Drying Technol.* 20(7):
1053-1513
- Sacilik, K. and A.K. Elicin. 2005. The thin layer drying
characteristics of organic apple slices. *J. Food
Eng.* 73: 281-289.
- Saini, C., S. Singh and D.C. Saxen. 2012. Thin layer
drying characteristics of sweet potato starch
based films and mathematical modeling. *J.
Food Process Technol.* 3(7): 1-4.
- Singh, N.J. and R.K. Pandey. 2012. Convective air
drying characteristics of sweet potato cube
(*Ipomoea batatas* L.). *Food Bioprod. Process.*
90: 317-322.