

จลนศาสตร์การอบแห้งชาสาระแห่นในระบบสเปาเต็ด

Drying Kinetics of Mints Tea in Spouted Bed System

บดินทร์ชาติ สุขบท^{1*} สุรฤทธิ ปี่เพราะ² บัญชา เกิดมณี¹ และสมบัติ ทิมทรัพย์³

Bodinchat Sukbot^{1*}, Surarit Pepore², Bancha Kirdmanee¹, and Sombat Teekasap³

¹มหาวิทยาลัยชนบุรี เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 101602

²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน e-mail : bodinchat@gmail.com

บทคัดย่อ เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดแบบคอกแบบโดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของใบสาระแห่นสด ที่ความชื้นเริ่มต้นที่ 87%wb หรือ 660%db พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงอุณหภูมิ 40 – 45 °C ส่วนใหญ่เป็นแบบ Polynomial Function และในช่วงอุณหภูมิ 50 – 55 °C มีลักษณะเป็นแบบ Exponential Function ซึ่งสอดคล้องกับโมเดลการอบแห้งแบบ Logarithmic ชนิด Two term และแบบ Modified Henderson and Pabis เมื่อพิจารณาโดยรวมโมเดลแบบ Two term เหมาะสมที่สุด ที่ระดับอุณหภูมิ 55 °C ความเร็วลมร้อน ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศ 0.3233 เมตร/วินาที ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง $1.038 \times 10^{-3} - 1.581 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ และพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 65.84 kJ/mole ส่วนการเปลี่ยนแปลงสีของใบสาระแห่นอบแห้งอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้นจะทำให้ค่า L^* และค่า b^* ลดลง ในขณะที่ ค่า a^* เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : จลนศาสตร์การอบแห้ง, ชาสาระแห่น, เครื่องอบแห้งสเปาเต็ดแบบคอก

Abstract Testing data from a spouted bed drier which was designed base on physical properties of mint leaves were collected and analyze for drying kinetics equation. Kinetics equations of drying mint leaves with moisture from 87% wb or 660% db, humidity changes versus time in the temperature range of 40 °C - 45 °C are likely to be a Polynomial Function while in the temperature range of 50 °C. - 55 °C are likely to be Exponential Function, particularly temperature range of 50 °C - 55 °C conform to Logarithmic, Two term and Modified Henderson & Pabis drying model. However, the most appropriate is Two term model, when apply hot air at distribution grid with constant velocity of 0.3233 m/s and temperature of 55 °C, the effective diffusion coefficient of moisture in the $1.038 \times 10^{-3} - 1.581 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ and activation energy was 65.84 kJ/mole. The color of dried mint leaves due to the temperature of the hot air was increased, the value of L^* and b^* values were decreased while a^* values tend to increase.

Keywords: Drying Kinetics, Mints Tea, Spouted Bed Dryer

1. บทนำ

พืชสะระแหน่เป็นไม้ล้มลุกเลื้อยตามพื้นดิน ลำต้นสีเขียวเข้ม ใบกลมขนาดหัวแม่มือ ใบค่อนข้างหนา ริมใบหยักโดยรอบ ภายในใบเป็นคลื่นขยับขึ้น (รูปที่ 1) และมีกลิ่นหอม ชื่อวิทยาศาสตร์ *Metha cordifolia* Opiz. ชื่อวงศ์ Labiatae ชื่อสามัญ Kitchen Mint, Marsh Mint และมีชื่ออื่นอีก เช่น หอมค่าน หอมเดือน (ภาคเหนือ) มังงะ สะแน (ภาคใต้) สะระแหน่สวน (ภาคกลาง) และชะแยะ (อีสาน) เป็นต้น ใบสะระแหน่มีสรรพคุณ เป็นยาขับร้อนถอนพิษไข้ ขับลม ขับเหงื่อ รักษาอาการหวัด แก้อาการปวดท้อง ท้องอืด ท้องเฟ้อ หากนำน้ำที่คั้นจากต้นและใบมาดื่ม จะช่วยขับลมในกระเพาะ หรือกินสดเพื่อดับกลิ่นปากก็ได้ การบริโภคสะระแหน่จะช่วยให้สมองปลอดโปร่ง โล่งคอ ป้องกัน ไข้หวัด บำรุงสายตา และช่วยให้หัวใจแข็งแรง ที่ใบและลำต้นมีน้ำมันหอมระเหย ซึ่งประกอบด้วยสารเมนทอล (Menthol) ไลโมนีน (Limonene) นีโอเมนทอล (Neo-menthol) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารอาหารหลายอย่าง เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต แคลเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส วิตามินบี 1 บี 2 และวิตามินซี (อังควารา, 2542)



ภาพที่ 1 ใบสะระแหน่

สะระแหน่มักใช้เป็นส่วนผสมในการทำไอศกรีมและชาสมุนไพร ทั้งร้อนและเย็น และมักผสมใน

อาหารกับสมุนไพรชนิดอื่นเช่น สเปร์รี่มินต์ อีกทั้งยังเหมาะในการเป็นเครื่องเคียงในอาหารจำพวกผลไม้สดและขนมหวาน

สะระแหน่ยังมีคุณสมบัติเป็นยาปฏิชีวนะ เป็นตัวขับไล่อนุมูลอิสระออกจากร่างกาย เป็นยาเย็น เป็นยาคลายความเครียด และเป็นยารักษาโรคเกี่ยวกับต่อมไทรอยด์ (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2557)

เมื่อนำใบสะระแหน่มาบดแล้วทาลงบนผิวหนัง จะทำให้ผิวหนังชุ่มชื้น ช่วยโล่ง และใช้ไปทำน้ำมันหอมระเหยในการทำสுகอนธบำบัด มีงานวิจัยอย่างน้อยหนึ่งชิ้นระบุว่า สะระแหน่ช่วยคลายความเครียดของกล้ามเนื้อจากความเหนื่อยล้า นอกจากนี้ยังนิยมผสมลงไปในชาสมุนไพรหรือคั้นน้ำมาผสมกับน้ำผักและ/หรือผลไม้เพื่อทำเป็นเครื่องดื่ม

อุดมพร พุฒพิลา (2554) เสนอผลการวิจัยว่า น้ำมันหอมระเหยจากสะระแหน่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค แต่ การเสริมสะระแหน่ (*M. cordifolia*) บดแห้งในอาหารไก่ไม่มีประโยชน์ทางโภชนาการ การเจริญเติบโต และการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุลินทรีย์ แต่พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีในการต้านอนุมูลอิสระและลดการสะสมไขมันช่องท้องของไก่เนื้อ

เนื่องจากสารจากสะระแหน่มีคุณสมบัติที่ดีหลายด้าน จึงควรยกระดับองค์ความรู้ที่ชุมชนในท้องถิ่นสามารถนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญของการศึกษาการผลิตชาสะระแหน่ โดยเฉพาะส่วนการอบแห้ง

ในกระบวนการทำชาสะระแหน่ด้วยการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ช่วยให้เข้าใจกระบวนการควบคุมตัวแปรของการอบแห้ง เพื่อลดเวลาและลดการใช้พลังงานลง โดยทั่วไปการทำแห้งชาสะระแหน่ นิยมใช้เครื่องอบแห้งมากกว่าการตากแห้ง แต่เครื่องอบแห้งมีข้อเสียคือผลิตภัณฑ์มักไม่สม่ำเสมอเนื่องจากวัตถุดิบสัมผัสกับความร้อนไม่ทั่วถึง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงใช้การอบแบบสะเป้าเต็ดเบด ซึ่งทำให้ใบสะระแหน่ลอยตัวและสัมผัสกับลมได้อย่างทั่วถึง

โดยการเคลื่อนที่ของใบสาระแนจะมีสมบัติคล้ายของไหล (Freitas & Freire, 2001).

งานวิจัยนี้สามารถหาคุณลักษณะและสมการจลนศาสตร์ที่เหมาะสมของการอบแห้งชาสาระแน โดยวิเคราะห์จากใช้สมการการทดลอง และนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองจากความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

2. วิธีการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการคำนวณหาแฟลคเตอร์รูปร่าง เพื่อหาค่าทางกายภาพ ที่จะนำไปสู่การกำหนดสัดส่วนของท่อลมต่อขนาดของท่อเบด และขนาดของแหล่งความร้อนที่เหมาะสม โดยการทดสอบเพื่อหาสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งชาสาระแนที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ค่าพลังงานกระตุ้น และการเปลี่ยนแปลงสีของใบสาระแนอบแห้งอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสภาพสีเทียบก่อนและหลังการอบแห้ง

2.1 ฟลูอิดไอเซชันในสเป็คเตดเบด

ปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันของแก๊สหรือของแข็ง แสดงดัง รูปที่ 2 พฤติกรรมของของแข็งจะมีลักษณะคล้ายกับของไหล โดยแก๊สที่มีความเร็วในการไหลต่ำจะค่อย ๆ ซึมผ่านอนุภาคของแข็งที่อยู่ก้นที่ แต่เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้น อนุภาคจะยกตัวเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเร็วของแก๊ส จนเกิดความสมดุลของแรงยกกับน้ำหนักของอนุภาค ที่จุดนี้อนุภาคทั้งหมดจะลอยขึ้นไปตามการไหลของแก๊ส ชั้นของอนุภาคจะเริ่มเกิดการฟลูอิดไอเซชัน และมีลักษณะคล้ายเป็นเนื้อเดียวกัน ความเร็วของแก๊สที่จุดจุดนี้เรียกว่า ความเร็วค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิดไอเซชัน (Minimum Fluidization Velocity, U_{mf}) หากความเร็วของแก๊สมีสูงกว่าความเร็วนี้ แก๊สที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันจะมีลักษณะเป็นฟองอากาศ (Bubbles) และกระจายตัวไปตามรูปร่างของอุปกรณ์และเกาะตัวกันอย่างรวดเร็ว ชั้นบน

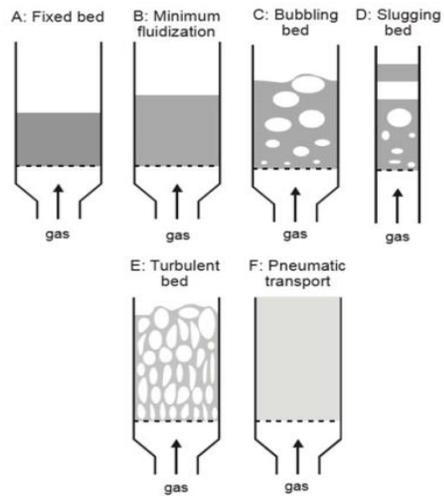
ของอนุภาคก็จะเคลื่อนตัวสูงขึ้น อนุภาคของแข็งที่อยู่ในระดับต่ำกว่าก็จะเคลื่อนที่สูงขึ้นด้วย ค่าความเร็วของแก๊สที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (Incipient Fluidizing Velocity) ค่าความเร็วที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิดไอเซชันสามารถอธิบายได้จากสมการของ Ergun (Kunii and Livenspiel, 1991)

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} Re_{mf} = Ar \quad (1)$$

เมื่อ $Re = \frac{(D_p U_{mf} \rho_g)}{\mu}$ (2)

และ $Ar = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g_c}{\mu^2}$ (3)

สมการ (1) สามารถใช้ได้กับสภาวะการไหลทั้งแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน



ภาพที่ 2 แสดงฟลูอิดไอเซชันเบดระบบต่าง ๆ ที่มา: Kunii and Livenspiel, 1991

2.2 แฟลคเตอร์รูปร่างและค่าทางกายภาพของเครื่องอบแห้งแบบสเป็คเตดเบด

มีการนำระบบฟลูอิดไอเซชันมาใช้ในเครื่องอบแห้ง เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้น และการไหลแบบม้วนลงของวัสดุที่บริเวณผนังเครื่องอบทำให้มีการคลุกเคล้ากันในส่วนบนของเบด จึงเป็นจุดเด่นของระบบแบบสเป็คเตดเบด โดยที่แฟลคเตอร์รูปร่าง (Geometry Factor, ϕ_s) ของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราส่วน

ระหว่างพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิว ซึ่งมีผลต่อความเร็วค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิดไดเซชันตามสมการ (4) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากัน}}{\text{พื้นที่ผิวของวัตถุที่มีปริมาตรเท่ากันนั้น}} \quad (4)$$

ปัจจัยสำคัญในการออกแบบระบบ สเป้าเต็ดเบดสำหรับการทดลอง โดยเฉพาะความสูงของเบด H ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันอย่างน้อยต้องเป็นสองเท่า คำนึงจากฐานการคำนวณค่าความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน จากสมการ

$$L_{mf} = \frac{(1-\varepsilon)L_0}{(1-\varepsilon_{mf})} \quad (5)$$

- เมื่อ L_{mf} = ความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน
- L_0 = ความสูงของวัสดุที่ความหนาแน่น ρ_s
- ε = สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยของวัสดุที่ความหนาแน่น ρ_s
- ε_{mf} = สัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของวัสดุที่มีอยู่ในกองวัสดุ

ปริมาณมวล หมายถึงช่องว่างภายในชั้นวัสดุซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างหรืออากาศในกองวัสดุหรือในชั้นวัสดุนั้นต่อปริมาตรรวมทั้งหมด และมีความสำคัญต่อการออกแบบเครื่องมือ อุปกรณ์การแปรรูปอาหาร หากทำได้จากสมการ

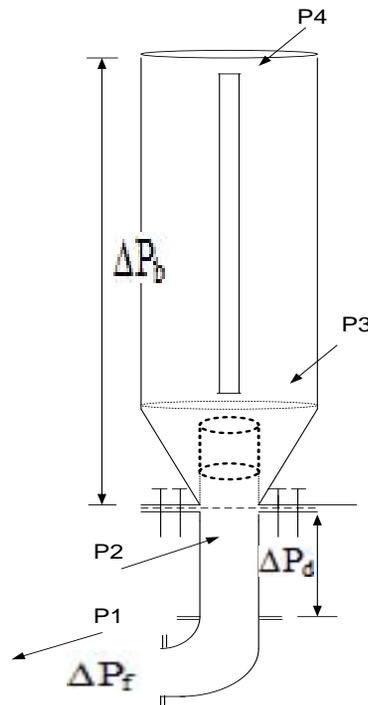
$$\varepsilon_{mf} = \frac{\text{ปริมาตรของวัสดุ}}{\text{ปริมาตรวัสดุก่อนอัด}} \quad (6)$$

กำลังของพัดลมอัดอากาศ (Blower) ในสเป้าเต็ดเบด พิจารณาจากความดันตกคร่อมเบด ความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายความดัน และความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศแสดงดังรูปที่ 3 รวมกับความเร็วค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิดไดเซชัน โดยเม็ด

ของแข็งเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลแรงสองแรงที่กระทำต่อเม็ดของแข็ง ประกอบด้วยแรงยกตัวของของไหลที่พยายามให้เม็ดของแข็งเคลื่อนที่ขึ้น และน้ำหนักของเม็ดของแข็งแสดงตามสมการ (7)

$$\Delta P_b A_t = A_t L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) [(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c}] \quad (7)$$

- เมื่อ $\Delta P_d = 0.1 \Delta P_b$
- $= P_2 - P_3$
- และ $\Delta P_f = P_2 - P_{1(atm)}$
- $A_t =$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเบด



ภาพที่ 3 ความดันตกคร่อม

ขนาดของฮีตเตอร์ พิจารณาจากแนวคิดการพาความร้อนแบบบังคับในเบด ขนาดของฮีตเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสเป้าเต็ดเบดคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (hw) โดยการปรับรูปสมการการพาความร้อนแบบบังคับในท่อจากการไหลแบบปั่นป่วน (Heerden et al., 1951) ดังสมการ

$$\frac{h_w}{k_g} = 0.58 \frac{1}{D_p} \left(\frac{C_{pg}\mu_g}{k_g} \right)^{0.5} \left(\rho_s \frac{D_p U_o \rho_g}{\mu_g} \right)^{0.45} \left(\frac{\rho_s (1-\epsilon_{mf})}{\rho_g} \right)^{0.18} \left(\frac{C_s}{C_p} \right)^{0.36} \quad (8)$$

ส่วนการประมาณค่ากำลังทางไฟฟ้า พิจารณาจากสมมูลของพลังงานที่มีความสัมพันธ์ ตามสมการ

$$R = \frac{E^2}{h_w A_w \Delta T_b} \quad (9)$$

เมื่อ R = ความต้านทานของฮีตเตอร์ (Ω)

E = แรงดันไฟฟ้า (V)

ΔT_b = ผลต่างอุณหภูมิในเบดกับอุณหภูมิ

บรรยากาศ (K)

A_w = พื้นที่ผิวทั้งหมดของผนังเบด (m^2)

2.3 ความชื้นสมดุลและสัดส่วนความชื้น

เมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงขณะนั้น ความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอ เท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบวัสดุ เรียกว่า ความชื้นสมดุล (M_{eq})

ปริมาณความชื้นในวัสดุทางการเกษตรตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists หรือ AOAC (AOAC, 2005) คำนวณได้จากน้ำหนักวัสดุก่อนอบเป็นน้ำหนักเปียก (W_w) แล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นในวัสดุออกจนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงเป็นน้ำหนักแห้ง (W_d) และคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก (Wet Basis, %wb) หรือเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง (Dry Basis, %db) ดังสมการที่ 10 และ 11

$$M_w(\%wb) = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100\% \quad (10)$$

และ

$$M_d(\%db) = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (11)$$

เมื่อ W_w = น้ำหนักเปียกของวัสดุ

W_d = น้ำหนักแห้งของวัสดุ

$M_w(\%wb)$ = เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก

$M_d(\%db)$ = เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง

สัดส่วนความชื้น เป็นสัดส่วนของผลต่างของความชื้นขณะเวลาใด ๆ (M_t) กับความชื้นสมดุล (M_{eq}) และผลต่างความชื้นเริ่มต้น (M_0) กับความชื้นสมดุล (M_{eq}) แสดงตามสมการ

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (12)$$

ในทางปฏิบัติถือว่าค่าความชื้นสมดุล (M_{eq}) มีค่าน้อยมาก ($M_{eq} \ll M_0, M_{eq} \ll M_t$) (Jena and Das, 2007) จึงสามารถปรับสมการใหม่ได้เป็น

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (13)$$

สมบัติเฉพาะทางกายภาพที่แสดงถึงความสามารถที่จะทำให้น้ำเคลื่อนที่ในวัสดุและออกจากวัสดุ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective Moisture Diffusivity Coefficient, D_{eff}) ซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความเร็วของลมร้อน ปกติสภาพการแพร่ที่เกิดขึ้นในเบดเป็นแบบ Non-Steady State Diffusion ตาม Fick's Second Law และวิธีการแปลงลาปลาซ (Crank, 1975) ดังสมการ

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi \frac{D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (14)$$

เมื่อ MR เป็นสัดส่วนส่วนความชื้นเฉลี่ย

t เป็นเวลา มีหน่วยเป็น hr

D_{eff} เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่รวม มีหน่วยเป็น m^2/hr และ

L เป็นความบาง มีหน่วยเป็น m

เนื่องจากใบสาระแหน่มีรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อประยุกต์ใช้สมการข้างต้นโดยไม่สนใจรูปร่างของใบ พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยรวม ตามสมการของ Arrhenius (Crank, 19757; Raghavan et al., 1995; Sithipong et al., 1992) ดังสมการ

$$D_{eff} = D' \exp\left(\frac{-E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (15)$$

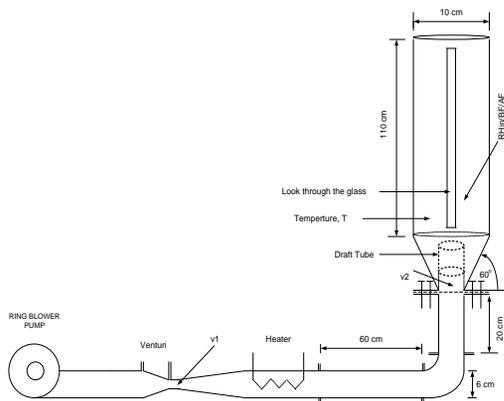
เมื่อ D' เป็นแฟกเตอร์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius' factor หรือ frequency factor) มีหน่วยเป็น m^2/hr

E_a เป็นพลังงานกระตุ้น (activation energy) มีหน่วยเป็น kJ/mol

R เป็นค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ (ideal gas constant = 8.314 kJ/mol K)

T เป็นอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

2.4. เครื่องอบแห้งแบบสะเป้าเต็ดเบดสำหรับการทดลอง



ภาพที่ 4 แผนภาพชุดสะเป้าเต็ดเบดที่ใช้ทดลอง และแสดงจุดวัดความเร็วลม และอุณหภูมิ

นำผลการคำนวณทางทฤษฎีมาใช้พัฒนาชุดทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ โดยเลือกใช้พัดลมอัดอากาศขนาด $\frac{1}{4}$ hp ความสูงของเบด 1.1 m เส้นผ่านศูนย์กลางเบด 0.10 m ท่ออัดอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.06 m มุมเอียงของกรวย 60° ตะแกรงกระจายอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลางรู 2 mm จำนวน 20 รู/ cm^2 และฮีตเตอร์มีความต้านทาน $1 \text{ k}\Omega$ แผนภูมิเครื่องอบแห้งแบบสะเป้าเต็ดเบดสำหรับการทดลอง และจุดวัดความเร็วลมกับอุณหภูมิ แสดงดังภาพที่ 4

2.5 การทดลอง

2.5.1 การเตรียมวัสดุการทดลอง

นำใบที่เด็ดแล้วลงภาชนะเพื่อล้างทำความสะอาด แล้วนำใส่เครื่องสลัดน้ำ และนวดโดยการนำลูกบิดไม้เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm จำนวน 200 g ใสลงในเครื่องสลัดน้ำ เพื่อให้สารประกอบที่อยู่ภายในเซลล์ทำปฏิกิริยาเคมีและเคลือบส่วนของใบ หลังจากนั้นนำไปชั่งกองละ 20 g แล้วบรรจุไว้ในถุงพลาสติกบรรจุอาหารเพื่อนำไปทำการอบแห้งในขั้นตอนต่อไป แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ใบสะระแหน่บรรจุถุงพลาสติก

2.5.2 ขั้นตอนการทดลองและการบันทึกผล

นำวัตถุดิบใส่ในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 83% และจัดเตรียมเครื่องอบแห้งแบบสะเป้าเต็ดเบด แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เครื่องอบแห้งแบบสเป้าเต็ดเบด

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือทดลองในเครื่องอบสเป้าเตดเบดแบบไม่มีดราฟท์ทิวบ์ (Non Draft Tube) และแบบมีดราฟท์ทิวบ์ โดยใช้วัสดุตัวอย่างตามข้อ 2.5.1 แต่ละการทดลองย่อยประกอบด้วย 10 การทดลองใช้เวลา 15 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิด้วย RKC Multi-zone Temperature Controllers รุ่น MA901 ให้ไม่เกินอุณหภูมิของการอบสมุนไพร (55 °C) และใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเคทีพีเป็นตัวตรวจรู้อุณหภูมิ และใช้ลูกบิดไม้จำนวนเท่าเดิม แสดงดังภาพที่ 7

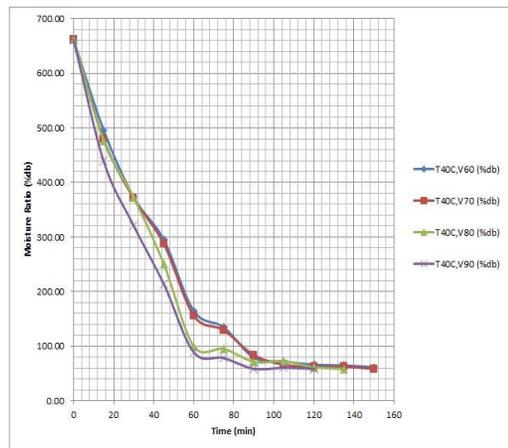


ภาพที่ 7 ลูกบิดไม้บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด

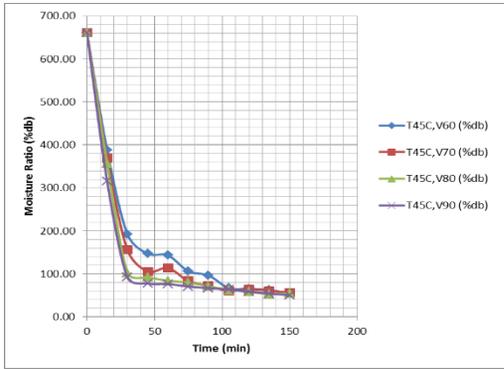
ความเร็วของลมร้อนผ่านฮีตเตอร์สามารถหาได้จากเวเนจิวรีที่แสดงผลผ่านมาโนมิเตอร์ ความเร็วของลมร้อน ณ จุดต่าง ๆ ในท่อหาได้จากสมการต่อเนื่องสมดุลอัตราการไหล โดยใช้ตัวปรับความเร็วลมร้อน รุ่น ATV312H03M2 ควบคุมการทำงานของพัดลมอัดอากาศ (Ring Blower) และนำไปบดระแหงน้ำหนัก (g) ด้วยเครื่องชั่งยี่ห้อ Professional Digital รุ่น SCL266 ขนาด 500 g ความละเอียด 0.01g การทดลองที่ 2 ถึง 10 จะเพิ่มเวลาขึ้น 15 นาทีในแต่ละครั้งตลอดการทดลอง จากนั้นทำการพลอตกราฟและวิเคราะห์ผลต่อไป

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

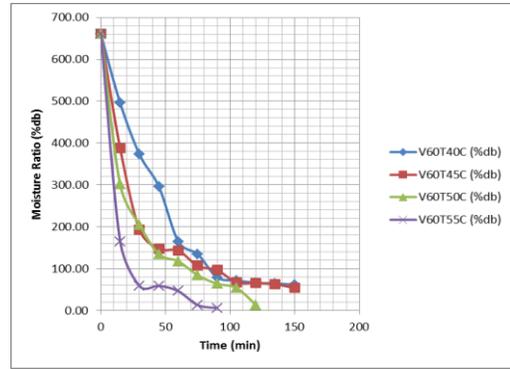
ผลการทดลองของตัวแปรสำคัญ 4 ตัวแปร โดยตัวแปรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิ (T, °C) และความเร็วของลมร้อน (v, m/s) สัดส่วนความชื้น (MR, %db) เป็นตัวแปรตาม และเวลา (t, min) เป็นตัวแปรอิสระ เมื่อจัดกลุ่มตามตัวแปรควบคุมสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้น และเวลาแสดงดังภาพที่ 8 ถึง ภาพที่ 15



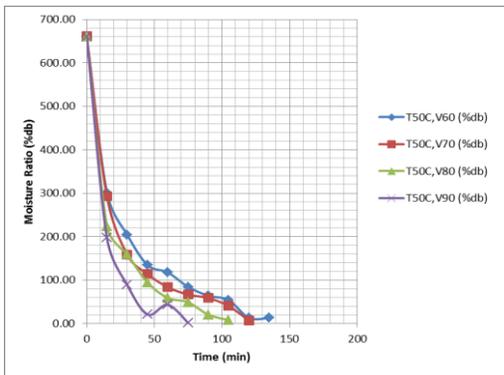
ภาพที่ 8 อุณหภูมิคงที่ที่ 40 °C เป่าลมร้อนด้วยความเร็ว V60 = 0.3233, V70 = 0.3960, V80 = 0.4572 และ V90 = 0.4983 m/s (ความเร็ว ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด)



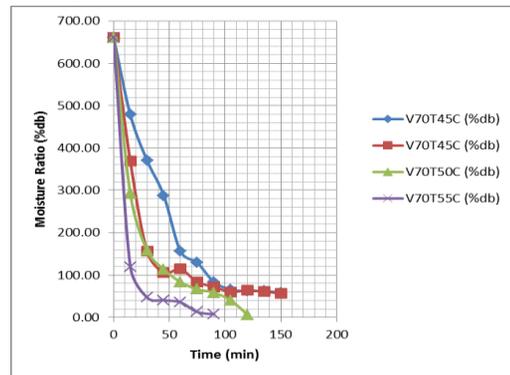
ภาพที่ 9 อุณหภูมิคงที่ที่ 45 °C เป่าลมร้อนด้วยความเร็ว V60 = 0.3233, V70 = 0.3960, V80 = 0.4572 และ V90 = 0.4983 m/s



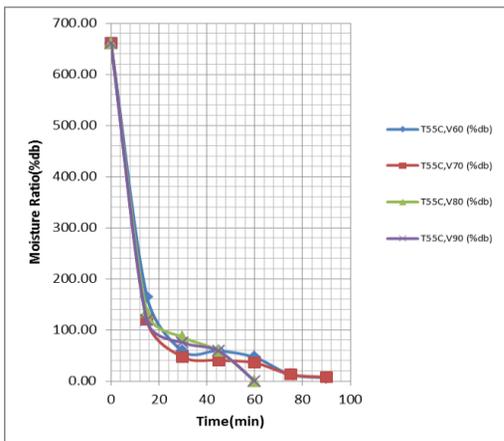
ภาพที่ 12 เป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ที่ V60 = 0.3233 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อุณหภูมิของลมร้อนที่ 40 °C, 45 °C, 50 °C และ 55 °C



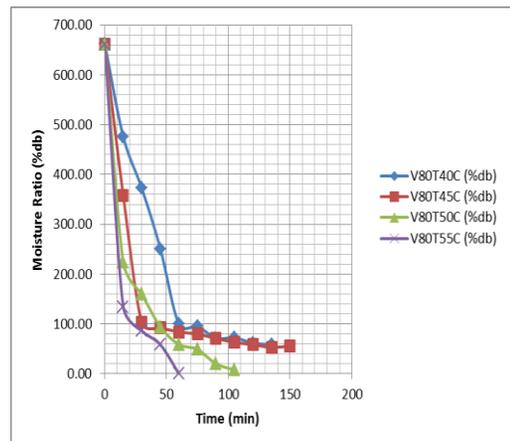
ภาพที่ 10 อุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C เป่าลมร้อนด้วยความเร็ว V60 = 0.3233, V70 = 0.3960, V80 = 0.4572 และ V90 = 0.4983 m/s



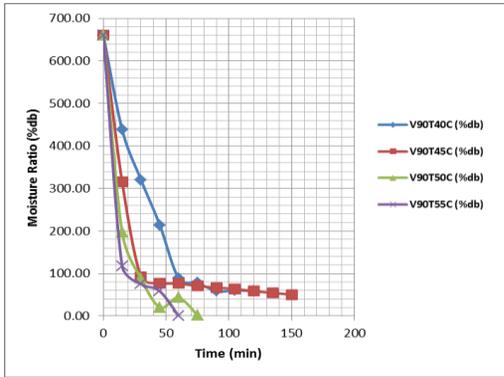
ภาพที่ 13 เป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ที่ V70 = 0.3960 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อุณหภูมิของลมร้อนที่ 40 °C, 45 °C, 50 °C และ 55 °C



ภาพที่ 11 อุณหภูมิคงที่ที่ 55 °C เป่าลมร้อนด้วยความเร็ว V60 = 0.3233, V70 = 0.3960, V80 = 0.4572 และ V90 = 0.4983 m/s



ภาพที่ 14 เป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ที่ V80 = 0.4572 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อุณหภูมิของลมร้อนที่ 40 °C, 45 °C, 50 °C และ 55 °C



ภาพที่ 15 เป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ที่ V90 = 0.4983

m/s บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อูน
ภูมิของลมร้อนที่ 40 °C, 45 °C, 50 °C และ 55 °C

จากกราฟในภาพที่ 9 ถึง ภาพที่ 15 เมื่อนำมา
สร้างสมการจะพบว่าค่า R² มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงดังตาราง
ที่ 1 ถึง ตารางที่ 8

ตารางที่ 1 สมการ เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 40 °C เป่าลม ร้อน
ด้วยความเร็ว V60 = 0.3233, V70 = 0.3960, V80
= 0.4572 และ V90 = 0.4983 m/s

V (m/s)	T = 40 °C	
	สมการ	R ²
V60 = 0.4930	MR=0.0415t ² -9.9649t-644.8290	0.9931
V70 = 0.4572	MR=0.0416t ² -9.9574t+638.3924	0.9915
V80 = 0.3960	MR=0.0540t ² -11.4893t+650.9817	0.9817
V90 = 0.4983	MR=0.0666t ² -12.6679t+640.0991	0.9908

ตารางที่ 2 สมการ เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 45 °C เป่าลมร้อน
ด้วยความเร็ว V60 = 0.3233, V70 = 0.3960, V80
= 0.4572 และ V90 = 0.4983 m/s

V (m/s)	T = 45 °C	
	สมการ	R ²
V60 = 0.4930	MR=400.9387e ^{-0.0152t}	0.8956
V70 = 0.4572	MR=0.0495t ² -10.3023t+544.0825	0.8658
V80 = 0.3960	MR=0.0514t ² -10.4032t+528.1821	0.8199
V90 = 0.4983	MR=0.0513t ² -10.2540t+509.8008	0.7917

ตารางที่ 3 สมการ เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C เป่าลมร้อน
ด้วยความเร็ว V60 = 0.3233, V70 = 0.3960, V80
= 0.4572 และ V90 = 0.4983 m/s

V (m/s)	T = 50 °C	
	สมการ	R ²
V60 = 0.4930	MR=534.8425e ^{-0.0263t}	0.9244
V70 = 0.4572	MR= 528.0702e ^{-0.0300t}	0.9345
V80 = 0.3960	MR=533.0801e ^{-0.0372t}	0.9697
V90 = 0.4983	MR=0.2089t ² -22.9478t+598.4112	0.9261

ตารางที่ 4 สมการ เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 55 °C เป่าลมร้อน
ด้วยความเร็ว V60 = 0.3233, V70 = 0.3960, V80
= 0.4572 และ V90 = 0.4983 m/s

V (m/s)	T = 55 °C	
	สมการ	R ²
V60 = 0.4930	MR=432.5959e ^{-0.0462t}	0.9345
V70 = 0.4572	MR=329.7978e ^{-0.0432t}	0.9062
V80 = 0.3960	MR=0.3035t ² -27.5256t+604.1608	0.9022
V90 = 0.4983	MR=0.3158t ² -28.1528t+600.8039	0.8916

ตารางที่ 5 สมการเมื่อเป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ V60 =
0.4930 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศ
ของเบด อูนภูมิของลมร้อนที่ 40, 45, 50 และ 55
°C

T (°C)	V60 = 0.4930 m/s	
	สมการ	R ²
40	MR=0.0415t ² -9.9649t-644.8290	0.9931
45	MR=400.9387e ^{-0.0152t}	0.8956
50	MR=534.8425e ^{-0.0263t}	0.9244
55	MR=432.5959e ^{-0.0462t}	0.9345

ตารางที่ 6 สมการเมื่อเป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ V70 = 0.4572 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อุณหภูมิของลมร้อนที่ 40, 45, 50 และ 55 °C

T (°C)	V70 = 0.4572	
	สมการ	R ²
40	MR=0.0416t ² -9.9574t+638.3924	0.9915
45	MR=0.0495t ² -10.3023t+544.0825	0.8658
50	MR= 528.0702e ^{-0.0300t}	0.9345
55	MR=329.7978e ^{-0.0432t}	0.9062

ตารางที่ 7 สมการเมื่อเป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ V80 = 0.3960 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อุณหภูมิของลมร้อนที่ 40, 45, 50 และ 55 °C

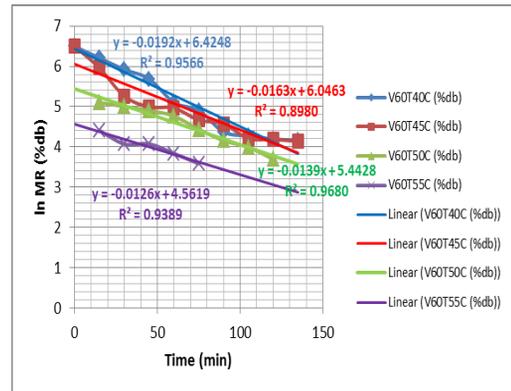
T (°C)	V80 = 0.3960	
	สมการ	R ²
40	MR=0.0540t ² -11.4893t+650.9817	0.9817
45	MR=0.0514t ² -10.4032t+528.1821	0.8199
50	MR=533.0801e ^{-0.0372t}	0.9697
55	MR=0.3035t ² -27.5256t+604.1608	0.9022

ตารางที่ 8 สมการเมื่อเป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ V90 = 0.4983 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อุณหภูมิของลมร้อนที่ 40 °C, 45 °C, 50 °C และ 55 °C

T (°C)	V90 = 0.4983	
	สมการ	R ²
40	MR=0.0666t ² -12.6679t+640.0991	0.9908
45	MR=0.0513t ² -10.2540t+509.8008	0.7917
50	MR=0.2089t ² -22.9478t+598.4112	0.9261
55 °C	MR=0.3158t ² -28.1528t+600.8039	0.8916

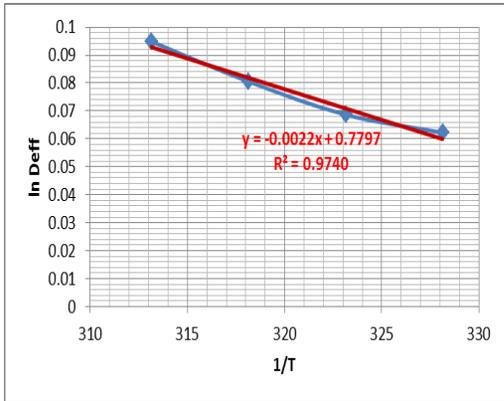
การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่อเทียบกับเวลา ในช่วงอุณหภูมิ 40–45 °C ส่วนใหญ่เป็นแบบ Polynomial Function และในช่วงอุณหภูมิ 50–55 °C ส่วนใหญ่เป็นแบบ Exponential Function

นำสมการจากกลุ่มที่มีค่า R² สูงสุด 3 อันดับ มาทดสอบในโมเดล พบว่าผลสอดคล้องกับโมเดลการอบแห้งแบบ Logarithmic ชนิด Two term และแบบ Modified Henderson and Pabis โดยโมเดลที่เหมาะสมที่สุดคือแบบ Two term ที่ระดับอุณหภูมิ 55 °C ความเร็วลมร้อน ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศ 0.3233 m/s และเมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพและพลังงานกระตุ้น โดยใช้ข้อมูลชุดเป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ V60=0.3233 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อุณหภูมิของลมร้อนที่ 40, 45, 50 และ 55 °C ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln MR (%db) และ t (min) แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln MR (%db) และ t (min)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 1.038×10^{-3} – 1.581×10^{-3} m²/s และเมื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นโดยใช้สมการของ Arrhenius ได้ค่าพลังงานกระตุ้น (Activated Energy: E_a) เท่ากับ 65.84 kJ/mole ความสัมพันธ์แสดงดังภาพที่ 17



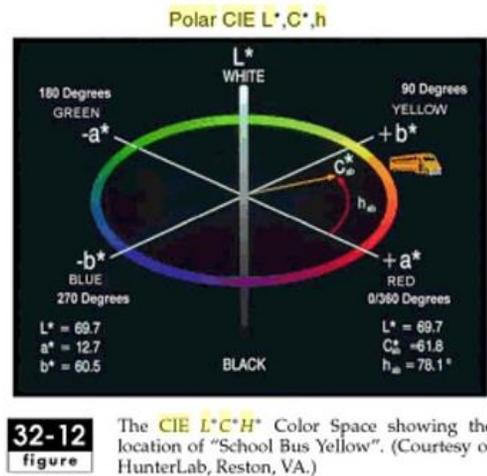
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln Deff กับ 1/T

การเปลี่ยนแปลงสีของใบสาระแหน่อบแห้ง วัดด้วยเครื่อง KONIKI MINOLTA Color Reader รุ่น CR – 10 แสดงดังรูปที่ 18 ซึ่งมีระบบการอ่านแบบ L* a* b* โดย L* คือค่าความสว่าง ถ้ามีค่าสูงหมายถึงสีมีความสว่างและถ้ามีค่าต่ำหมายถึงสีมีความทึบ สำหรับค่า a* บ่งบอกถึงความเป็นสีแดง ถ้ามีค่าสูงหมายถึง

สีแดงเข้มและถ้าหากมีค่าต่ำก็จะหมายถึงสีแดงอ่อน ส่วนค่า b* คือความเป็นสีเหลือง ถ้ามีค่าสูงหมายถึงสีเหลืองเข้มและถ้ามีค่าต่ำหมายถึงสีเหลืองอ่อน (Jintasatoporn et al., 2005) แสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 18 เครื่อง KONIKI MINOLTA Color Reader รุ่น CR – 10 (ของภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)



32-12 figure The CIE L* C* H* Color Space showing the location of "School Bus Yellow". (Courtesy of HunterLab, Reston, VA.)

ภาพที่ 19 แผนภูมิ Polar CIE L*, C*, h

จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้น ค่า L* มีแนวโน้มลดลง จาก 34.0333±2.5166 ขณะที่ใบสาระแหน่อยู่ในสภาพสดเป็น 32.6000±2.2605, 24.3667±0.6658 และ 21.2667±1.9296 เมื่ออยู่ในสภาพแห้ง ทำนองเดียวกับค่า b* มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้น จาก 21.1333±1.4295 ในสภาพสดเป็น 15.9333±1.0017, 12.0333±1.0408 และ 9.0000±1.2124 ในสภาพแห้ง ที่ระดับอุณหภูมิ 45, 50 และ 55 °C ตามลำดับ ในขณะที่ค่า a* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จาก 4.5333±0.9292 ขณะที่อยู่ในสภาพสด เป็น 1.8333±0.4041, 1.7667±0.2309 และ 2.2333±0.2082 ในสภาพแห้ง ที่ระดับอุณหภูมิ 45, 50 และ 55 °C ตามลำดับ

4. สรุปผลการวิจัย

ผลทดลองพบว่า สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งใบสาระแหน่ที่ความชื้นเริ่มต้นที่ 87%wb หรือ 660%db ในช่วงอุณหภูมิ 40 – 45 °C การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่อเทียบกับเวลา มีแนวโน้มเป็นแบบ Polynomial Function และในช่วงอุณหภูมิ 50 – 55 °C มีแนวโน้มเป็นแบบ Exponential Function โดยเฉพาะช่วง

อุณหภูมิ 50 – 55 °C สอดคล้องกับ โมเดลการอบแห้งแบบ Logarithmic ชนิด Two term และแบบ Modified Henderson and Pabis โดยโมเดลแบบ Two term เหมาะสมที่สุด ขณะที่เป่าลมร้อนด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.3233 m/s ณ บริเวณตะแกรงกระจายอากาศของเบด อุณหภูมิของลมร้อนที่ 55 °C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง $1.038 \times 10^{-3} - 1.581 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ และค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ที่ 65.84 kJ/mole สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีของใบสาระแหน่อบแห้งอันเนื่องมาจากอุณหภูมิพบว่าเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้นจะทำให้ค่า L^* และค่า b^* มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า a^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ankwar. 1999. Healthy Food. Bangkok: Pailinsrinam-ngern. (in Thai) (อ้าง คี ว ร ๑ . ๒ ๕ ๔ ๒ . อาหารต้านโรค, กรุงเทพฯ, ไพลินสีน้ำเงิน.)
- [2] Putpila, U. 2011. Utilization of Mentha Cordifolia Opiz as Supplementary Food in Chicken Feed Food. Master of Sciences Thesis, Animal Production Technology Program, Suranarie University. (In Thai) (อุดมพร พุดพิลา. 2554. การใช้สาระแหน่ (Mentha cordifolia Opiz.) เป็นสารเสริมในอาหารไก่เนื้อ, วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.)
- [3] AOAC. 2005. Official Methods of Analysis. (18th ed.). Washington.
- [4] Crank, J. 1975. Mathematics of Diffusion. London: Oxford University Press, Ely House.
- [5] Freitas, L. A. P., and Freire, J. T. 2001. Heat Transfer in a Draft Tube Spouted Bed with Bottom Solids Feed. Powder Technology, 114, 152–162.
- [6] Heerden, C. van, Nobel, A. P. P., and Krevelen, D. W. van., 1951. Chem. Eng. Sci., 1, 51
- [7] Jena, S. and Das, H., 2007. Modeling for Vacuum Drying Characteristics Coconut Press-cake. Journal of Food Engineering, 79, 92-99.
- [8] Jintasataporn O, Yuangsoi B, Stoner GR, Smithiwong P, Gabaudan J., 2005. Optimal Concentration of Total Carotenoids on Color Intensity of Fancycarp (Cyprinus carpio). 43rd Kasetsart University Annual Conference; 2005, Bangkok, Thailand. (In Thai).
- [9] Kunii, D. et al. 1991. Fluidization Engineer-ing. 2nd ed. U.S.A : Butterworth Heinemann,
- [10] Raghavan, G.S.V., T.N. Tulasidas, Sablani and H.S. Ramaswamy. 1995. A Method of Determination of Concentration Dependent Effective Moisture Diffusivity. Drying Tech. 13: 1477-1488.
- [11] Sitthipong, N., A. Hirun, W. Klongpanich, P. Thertoon, T. Siratanapanta, S. Thavornun and S. Kamalaspitak. 1992. Multi-crop Dryers Project. Final report (phase 2). Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University. 179 p.