

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของการทำแห้งสัมแชก

อัสหิยะ สนิโซ¹ และ มะรุติง กาศา¹

มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา 133 ถนนเทศบาล 3 ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เกิดขึ้นในการทำแห้งชั้นสัมแชกแบบธรรมชาติด้วยแสงอาทิตย์ ที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 85 w.b. ความหนา 8.89 และ 16.70 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลาง 73.10 มม. โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ $Nu = h_c X / K = N(Ra)^n$ เมื่อกำหนดที่ N และ n หาได้จากการวิเคราะห์สมการการถดถอยเชิงเส้น จากการทดลองพบว่า ชั้นสัมแชกที่มีความหนา 8.89 มม. มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ $29.99 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ เมื่อกำหนด N และ n เท่ากับ 1.818 และ 0.245 ตามลำดับ และเท่ากับ $29.43 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ สำหรับชั้นสัมแชกที่มีความหนา 16.70 มม. เมื่อกำหนด N และ n เท่ากับ 1.455 และ 0.266 ตามลำดับ โดยที่ค่า $Pr = 0.705$ และ $2.692 \times 10^4 < Gr < 2.980 \times 10^4$

คำสำคัญ : สัมแชก / สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ / พลังงานแสงอาทิตย์

¹ อาจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร

* ผู้รับผิดชอบบทความ E-mail : Saniso.e@hotmail.com

Natural Convective Heat Transfer Coefficients of *Garcinia atroviridis* Drying

Eleeyah Saniso^{1,*} and Maruding Kasa¹

Yala Rajabhat University, 133 Tesaban Road 3, Amphur Muang, Yala 95000

Abstract

In this research work, an attempt has been made to evaluate the convective heat transfer coefficient during drying of *Garcinia atroviridis* in open sun drying conditions. The initial sample had moisture content of 85% w.b., slice thickness of 8.89 and 16.70 mm and diameter of 43.10 mm. The convective heat transfer coefficient was determined by $Nu = h_c X / K = N(Ra)^n$ equation. Values of the constant, N and n were obtained by linear regression analysis. The results showed that the natural convective heat transfer coefficients was 29.99 W/m²-°C, when N and n were found to be 1.818 and 0.245, respectively for *Garcinia atroviridis* slice of 8.89 mm thick and 29.43 W/m²-°C, when N and n were found to be 1.455 and 0.266, respectively for *Garcinia atroviridis* slice of 16.70 mm thick, at $Pr = 0.705$ and $2.292 \times 10^4 < Gr < 2.980 \times 10^4$

Keywords : *Garcinia atroviridis* / Convective Heat Transfer Coefficient / Solar Energy

¹ Lecturer, Major of Physics, Faculty of Science Technology and Agriculture.

* Corresponding author, E-mail : Saniso.e@hotmail.com

1. บทนำ

ส้มแขกเป็นไม้ยืนต้นในสกุลการ์ซีเนีย (*Garcinia*) พบในเขตร้อนแถบเอเชีย อเมริกา และแอฟริกา โดยพบมากใน 2 แหล่ง คือ ทางภาคใต้ของประเทศไทยโดยเฉพาะ จังหวัดยะลา ปัตตานี และนราธิวาส ซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Garcinia atroviridis* Griff. และในประเทศอินเดียที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Garcinia cambogia* Desr. [1] ในภาคใต้ของประเทศไทยได้มีการตั้งกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรเพื่อแปรรูปส้มแขกในรูปแบบต่างๆ เช่น กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร ต.ยะตะ อ.รามัน กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร ต.ท่าสาบ และ ต.ลำพะยา อ.เมือง และกลุ่มแม่บ้านเกษตรกร ต.ตาชี อ.ยะหา จ.ยะลา กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร ต.พร่อน อ.ตากใบ และกลุ่มแม่บ้านร้อนพัฒนา ต.ตันหยงมัส อ.ระแงะ จ.นราธิวาส เป็นต้น ส้มแขกที่แปรรูปออกมาส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของส้มแขกแห้งโดยการตากแดดที่ร้อนจัดประมาณ 3 วัน เมื่อส้มแขกแห้งสนิทแล้วนำไปบรรจุและเก็บไว้ในภาชนะที่สามารถป้องกันความชื้นเพื่อรอการจำหน่ายหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ส้มแขกบดผงสำเร็จรูป ชาขงส้มแขก และผลิตภัณฑ์ส้มแขกชนิดแคปซูล เป็นต้น

การทำแห้ง (Drying) คือ กระบวนการลดความชื้นของวัสดุที่ส่วนใหญ่ใช้การถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยซึ่งถูกกำหนดโดยการถ่ายโอนความร้อน ได้แก่ การพา (Convection) การนำ (Conduction) และการแผ่รังสี (Radiation) เป็นผลให้มีการถ่ายโอนความร้อนและมวลน้ำของวัสดุกับอากาศแวดล้อม การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) อาจเกิดจากการพา การนำ และการแผ่รังสีความร้อน หรือผสมกันทั้งสามแบบก็ได้ ขึ้นกับการออกแบบและชนิดของการทำแห้งโดยความร้อนจะถ่ายโอนสู่ผิวของวัสดุเพื่อระเหยน้ำที่ผิวออกไปและจะถ่ายโอนต่อไปยังภายในวัสดุเพื่อเพิ่มความดันไอน้ำภายในวัสดุต่อไป ส่วนการถ่ายโอนมวลน้ำ (Mass transfer) จะขึ้นอยู่กับกลไก 2 ลักษณะ คือ การเคลื่อนย้ายของมวลน้ำภายในวัสดุเนื่องจากปัจจัยภายใน ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นภายในวัสดุและการเคลื่อนย้ายของไอน้ำจากผิวของวัสดุเนื่องจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ อัตราการไหลของอากาศและพื้นที่ผิวของวัสดุ [2-3] การวิเคราะห์

กระบวนการอบแห้งวัสดุมีค่าที่วัดที่สำคัญหลายประการ ซึ่งจะแตกต่างกันและเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด [4] และหากการทำแห้งเป็นแบบตากแดดโดยตรง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Convective heat transfer coefficient) เป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่สำคัญในการทำแห้ง ดังเช่นในงานวิจัยของ Anwar และ Tiwari [5] ที่ได้ทดลองทำแห้งผลผลิตทางการเกษตร 6 ชนิด ได้แก่ พริกชี้หนูเขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง และดอกกะหล่ำ ด้วยการตากแห้งกลางแจ้งเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง $3.5-26 \text{ W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่ Goyal และ Tiwari [6] ได้ทดลองศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลในการทำแห้งข้าวสาลีและถั่วเขียว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของข้าวสาลีและถั่วเขียวมีค่าเท่ากับ 16.68 และ $9.62 \text{ W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ส่วน Marina et al. [7] ได้ทดลองทำแห้งขิงโดยการตากแห้งที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของขิงมีค่าเท่ากับ $26.25 \text{ W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$ ในทำนองเดียวกัน มารินา และจอมภพ [8] ที่ได้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในระหว่างการทำแห้งแกนสับปะรดแช่อิ่มภายใต้การตากแห้งที่ใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสับปะรดแช่อิ่มมีค่าเท่ากับ $9.11 \text{ W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$ ที่ $Pr = 0.7$ และ $1.47 \times 10^2 < Gr < 1.19 \times 10^3$

การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะทำการทดลองทำแห้งส้มแขกด้วยการตากแห้งที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองและออกแบบระบบการทำแห้งส้มแขกที่เหมาะสมสำหรับชุมชนต่อไป

2. ทฤษฎีการประมาณค่า

เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นส้มแขกและอากาศแวดล้อมจะเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปทั่วไป ดังนี้

$$\dot{Q}_{cv} = h_c A (T_A - T_M) \quad (1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) สำหรับการทำให้แห้งโดยการตากแดดที่กลางแจ้งซึ่งมีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ [5-7, 9-14] สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ไร้มิติได้ ดังนี้

$$Nu = \frac{h_c X}{K} = N(Ra)^n \quad (2)$$

หรือ

$$h_c = \frac{K}{X} \cdot N(Ra)^n \quad (3)$$

เนื่องจากการทำให้แห้งขึ้นสัมชกโดยการตากแดดที่กลางแจ้งอยู่ในเป็นช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ จึงสามารถคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อน (\dot{Q}_{ev}) ที่ใช้ในการระเหยน้ำ [5-7, 9-14] ในชั้นสัมชกได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{ev} = 0.016 \cdot h_c \cdot [P(T_M) - RH \cdot P(T_A)] \quad (4)$$

โดยการนำสมการ (3) แทนในสมการ (4) จะได้

$$\dot{Q}_{ev} = 0.016 \cdot \frac{K}{X} \cdot N(Ra)^n \cdot [P(T_M) - RH \cdot P(T_A)] \quad (5)$$

ทำการหารสมการ (4) ด้วยค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (L) แล้วคูณด้วยพื้นที่ (A) และเวลา (t) ที่ชั้นสัมชกได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ จะสามารถคำนวณมวลของไอน้ำที่ระเหย (M_{ev}) [5-7, 10-14] ได้ ดังนี้

$$M_{ev} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{L} \cdot A \cdot t = 0.016 \cdot \frac{K}{XL} \cdot N(Ra)^n \cdot [P(T_M) - RH \cdot P(T_A)] \cdot A \cdot t \quad (6)$$

จากสมการ (6) ถ้ากำหนดให้

$$0.016 \cdot \frac{K}{XL} \cdot [P(T_M) - RH \cdot P(T_A)] \cdot A \cdot t = Z \quad (7)$$

แล้วจัดรูปสมการ (6) ใหม่จะได้ ดังนี้

$$\frac{M_{ev}}{Z} = N(Ra)^n \quad (8)$$

ทำการใส่ ln ทั้งสองข้างของสมการ (8) จะได้

$$\ln \left[\frac{M_{ev}}{Z} \right] = n \ln(Ra) + \ln N \quad (9)$$

พิจารณาสมการ (9) เทียบกับรูปแบบของสมการเชิงเส้นตรง จะพบว่าเมื่อพล็อตค่า $\ln(Ra)$ และ $\ln(M_{ev}/Z)$ จะได้ความชันของกราฟเส้นตรงเท่ากับ n และค่าจุดตัดแกน Y (Y-Intercept) เท่ากับ $\ln N$ (รูปที่ 3 และ 4) โดยใช้สมบัติทางกายภาพของอากาศซึ่งประกอบด้วยค่าความร้อนจำเพาะ (C) สภาพการนำความร้อน (K) ความหนาแน่น (ρ) ความหนืดพลวัต (μ) ค่าความดันไอย่อย (P(T)) ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (L) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ (β) ตามสมการที่ 10-16 [5, 11-13]

$$c = 999.2 + 0.1434 T_{av} + 1.101 \times 10^{-4} T_{av}^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_{av}^3 \quad (10)$$

$$K = 0.0244 + 0.6773 \times 0.6773 \times 10^{-4} T_{av} \quad (11)$$

$$\rho = 353.44 / T_{av} \quad (12)$$

$$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 4.620 \times 10^{-8} T_{av} \quad (13)$$

$$P(T) = \exp(25.317 - 5144 / T_{av}) \quad (14)$$

$$L = 3.1615 \times 10^6 (1 - 7.6166 \times 10^{-4} T_{av}) \quad (15)$$

$$\beta = 1/T_{av} \quad (16)$$

$$\text{เมื่อ } T_{av} = (T_A + T_M) / 2$$

3. การเตรียมตัวอย่าง และวิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมตัวอย่างทดลอง

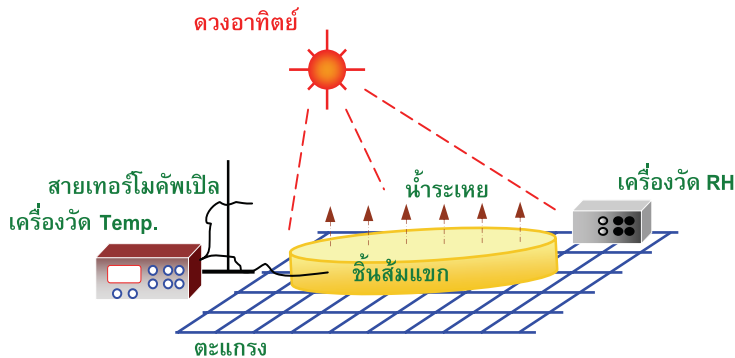
การวิจัยนี้ใช้ผลสัมชกสุกและสดที่สังเกตสีด้วยสายตาจากภายนอกเป็นสีเหลืองส้มอำเสมจากตลาดเมืองใหม่ อ.เมือง จ.ยะลา ผลสัมชกที่ได้จะถูกหั่นเป็นชั้นบางขนาดความหนาประมาณ 9.00 และ 17.00 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 70.00 มม. โดยใช้เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ (Venier caliper) ความละเอียด 0.05 มม. วัดขนาดจากนั้นนำชั้นสัมชกไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 3-5°C เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ความชื้นมีค่าสม่ำเสมอแล้วนำไปหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC 2005 [9] จากนั้นนำชั้นสัมชกไปตากแห้งกลางแจ้งที่อาศัย

แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานแล้ววิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติต่อไป

3.2 วิธีการทดลอง

การวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2551 โดยการนำชั้นสับแซกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 73.10 มม. ความชื้นเริ่มต้น 85% w.b. ความหนา 8.89 และ 16.70 มม. มาวางบนตะแกรงแล้วนำไปตากแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ณ ชั้นดาดฟ้า อาคาร 9 ศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา (รูปที่ 1) วัดอุณหภูมิของชั้นสับแซกที่ระดับกึ่งกลางความหนาด้วยเครื่อง Digital Multimeter รุ่น UNAOHM 9400

ความละเอียด $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ที่ต่อเข้ากับสายเทอร์โมคัพเบิลชนิด เค (K-Type Thermocouple) วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือผิวชั้นสับแซกด้วยเครื่อง Flash Link Data Logger รุ่น Delta TRAK ความละเอียด $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ โดยวัดอุณหภูมิของชั้นสับแซก อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 5 จุด แล้วใช้ค่าเฉลี่ย และชั่งน้ำหนักชั้นสับแซกทุกๆ 20 นาที ด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิทัล Mettler Toledo รุ่น PB 1502 ความละเอียด 0.01 ก. บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง 180 นาที จึงหยุดการทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วใช้ค่าเฉลี่ย จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

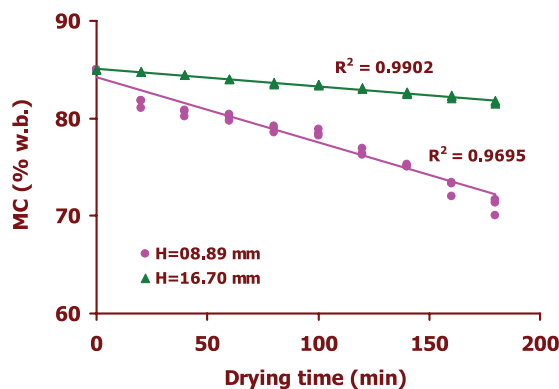


รูปที่ 1 การทดลองทำแห้งชั้นสับแซกแบบธรรมชาติ (ไม่คิดความเร็วลมที่พัดผ่าน)

4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองตากแห้งชั้นสับแซกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 73.10 มม. ที่มีความชื้นเริ่มต้น

เท่ากับ 85% w.b. ความหนา 8.89 มม. และ 16.70 มม. ด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของชั้นสับแซกระหว่างการทำแห้งแบบธรรมชาติ

ตารางที่ 1 ผลการทดลองทำแห้งชิ้นสั้มแขกแบบธรรมชาติ (H=8.89 มม., D=73.10 มม.)

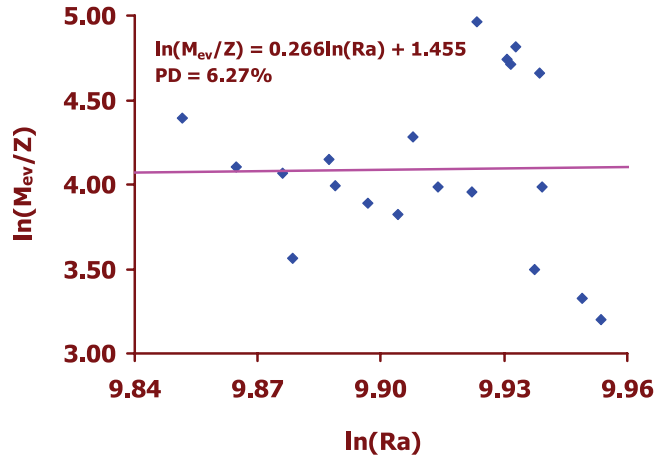
Time (min)	T _{A, av} (°C)	T _{M, av} (°C)	RH _{av} (%)	Weight _{av} (g)	M _{ev, av} (g)	MC _{av} (% w.b.)
0	48.7	27.5	22.0	38.15	-	85.00
20	47.7	28.0	23.5	33.91	4.24	81.78
40	51.3	30.0	21.8	29.40	4.51	80.77
60	52.1	31.5	20.3	28.32	1.08	80.22
80	54.2	31.0	19.0	27.08	1.24	78.98
100	45.0	30.3	22.3	26.01	1.07	78.45
120	43.4	28.8	25.0	24.42	1.59	76.37
140	49.1	31.7	21.2	23.02	1.40	75.04
160	55.0	32.5	19.8	21.17	1.85	72.02
180	45.9	31.5	22.5	19.79	1.38	69.99

ตารางที่ 2 ผลการทดลองทำแห้งชิ้นสั้มแขกแบบธรรมชาติ (H=16.70 มม., D=73.10 มม.)

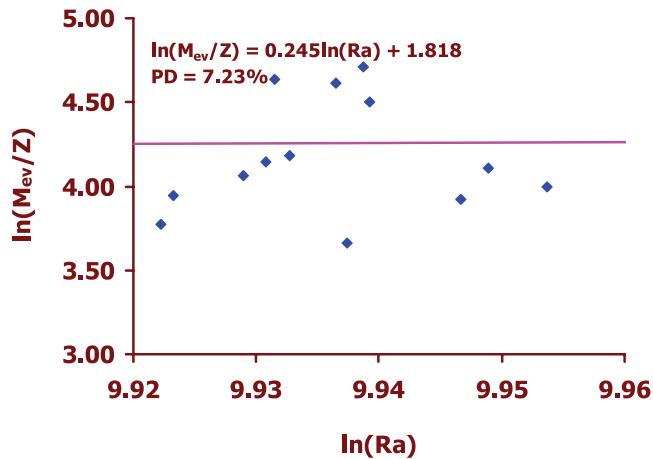
Time (min)	T _{A, av} (°C)	T _{M, av} (°C)	RH _{av} (%)	Weight _{av} (g)	M _{ev, av} (g)	MC _{av} (% w.b.)
0	48.7	27.5	22.0	58.44	-	85.00
20	47.7	28.0	23.5	57.40	1.04	84.75
40	51.3	30.0	21.8	56.28	1.12	84.40
60	52.1	31.5	20.3	54.84	1.44	83.97
80	54.2	31.0	19.0	53.39	1.45	83.67
100	45.0	30.3	22.3	52.26	1.13	83.36
120	43.4	28.8	25.0	51.25	1.01	82.98
140	49.1	31.7	21.2	50.19	1.06	82.46
160	55.0	32.5	19.8	49.07	1.12	82.05
180	45.9	31.5	22.5	47.80	1.27	81.48

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการทำแห้ง พบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาการทำแห้ง 180 นาที มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้น คือ ลดลงประมาณ 15.01 และ 3.52% w.b. สำหรับชิ้นสั้มแขกที่มีความหนา 8.89 และ 16.70 มม. ตามลำดับ เป็นการชี้ให้เห็นว่าการทำแห้งชิ้นสั้มแขกในช่วงที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง (0-180 นาที) [5-8] จะอยู่ในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองทำแห้งพริกชี้หนู

เขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว ทอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง และดอกกะหล่ำ โดยการตากแห้งกลางแจ้งของ Anwar และ Tiwari [5] การทำแห้งข้าวสาลีและถั่วเขียวของ Goyal และ Tiwari [6] การตากแห้งขิงของ Marina *et al.* [7] และการทำแห้งแกนลับประรดแช่อิ่มของ มารีน่า และ จอมภพ [8] และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นหรืออัตราการทำแห้งพบว่า ชิ้นสั้มแขกที่มีความหนา 8.89 มม. มีอัตราการทำแห้งสูงกว่าชิ้นสั้มแขกที่มีความหนา 16.70 มม. (รูปที่ 2)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\ln(M_{ev}/Z)$ และ $\ln(Ra)$ ของชั้นสั้มแซกที่มีความหนา 16.70 มม. เมื่อดักแห้งแบบธรรมชาติ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\ln(M_{ev}/Z)$ และ $\ln(Ra)$ ของชั้นสั้มแซกที่มีความหนา 8.89 มม. เมื่อดักแห้งแบบธรรมชาติ

จากรูปที่ 3 และ 4 พบว่า ค่า N และ n ของการทำแห้งชั้นสั้มแซกที่มีความหนา 16.70 มม. มีค่าเท่ากับ 1.455 และ 0.266 ตามลำดับ ที่ $Pr = 0.705$ และ $2.692 \times 10^4 < Gr < 2.980 \times 10^4$ ในขณะที่การทำแห้งชั้นสั้มแซกที่มีความหนา 8.89 มม. มีค่า N และ n เท่ากับ 1.818 และ 0.245 ตามลำดับ ที่ $Pr = 0.705$ และ $2.692 \times 10^4 < Gr < 2.980 \times 10^4$ เมื่อนำค่าคงที่ N และ n ที่ได้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยการแทน

ค่ากลับในสมการ (3) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งชั้นสั้มแซกมีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 29.99 และ 29.43 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ สำหรับชั้นสั้มแซกที่มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 8.89 และ 16.70 มม. ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของชิงเมื่อดักแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทดลองโดย Marina et al. [7]

5. สรุป

จากการทดลองทำแห้งชิ้นลัมแชกแบบธรรมชาติโดยการตากแห้งที่กลางแจ้งที่มีแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานพอที่จะสรุปได้ว่าอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วงการอบแห้งคงที่โดยชิ้นลัมแชกที่มีความหนาเท่ากับ 8.89 มม. จะมีอัตราการทำแห้งสูงกว่าชิ้นลัมแชกที่มีความหนา 16.70 มม. และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของชิ้นลัมแชกมีค่าเท่ากับ 29.99 และ 29.43 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ สำหรับชิ้นลัมแชกที่มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 8.89 และ 16.70 มม. ตามลำดับ ที่ค่า $Pr = 0.705$ และ $2.692 \times 10^4 < Gr < 2.980 \times 10^4$

6. สัญลักษณ์

- A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นลัมแชกที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ (m^2)
- C คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kgK)
- N, n คือ ค่าคงที่
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นลัมแชก (m)
- Gr คือ กราซฮอฟนัมเบอร์ (Grashof Number) มีค่าเท่ากับ $\beta g X^3 \rho^2 \Delta T / \mu^2$
- g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
- h_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของชิ้นลัมแชก ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- H คือ ความหนาของชิ้นลัมแชก (m)
- K คือ สภาพการนำความร้อนของอากาศ (J/m^2K)
- L คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg)
- M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)
- M_{ev} คือ มวลของน้ำในชิ้นลัมแชกที่ระเหย (kg)
- M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
- Nu คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt Number) มีค่าเท่ากับ $h_c X / K$
- PD คือ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง หาได้จาก [(ค่าทดลอง - ค่าทำนาย) / ค่าเฉลี่ย] $\times 100$
- Pr คือ พรันด์ทิลนัมเบอร์ (Prandtl Number) มีค่าเท่ากับ $\mu C / K$
- P(T) คือ ความดันไอย่อยที่อุณหภูมิใดๆ (N/m^2)
- Q_{ev} คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในชิ้นลัมแชก (J/m^2s)

Ra คือ ราเลย์นัมเบอร์ (Rayleigh Number) มีค่าเท่ากับ

$$GrPr$$

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือผิวชิ้นลัมแชก (decimal)

S คือ เส้นรอบวงของชิ้นลัมแชก (m)

T_A คือ อุณหภูมิของอากาศเหนือผิวชิ้นลัมแชก ($^\circ C$)

T_{av} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นลัมแชกและอากาศเหนือชิ้นลัมแชก ($^\circ C$)

T_M คือ อุณหภูมิของชิ้นลัมแชก ($^\circ C$)

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิของชิ้นลัมแชกและอากาศเหนือผิวชิ้นลัมแชก ($^\circ C$)

t คือ เวลา (min)

X คือ ขนาดของชิ้นลัมแชกเฉพาะ มีค่าเท่ากับ A/S (m)

ตัวอักษรกรีก

β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ ($1/K$)

μ คือ ความหนืดพลวัตของอากาศ (kg/ms)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

สัญลักษณ์กำกับล่าง

A คือ อากาศ

av คือ ค่าเฉลี่ย

c คือ แบบธรรมชาติ

d คือ มาตรฐานแห้ง

ev คือ การระเหย

M คือ วัสดุ

W คือ มาตรฐานเปียก

7. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร และศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่อำนวยความสะดวกและอุปกรณ์ในการทดลองต่างๆ จนทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

1. สถาบันการแพทย์แผนไทย, 2550, “ส้มแขก,” http://ittm.dtam.moph.go.th/product_champion/herb9.htm, [22 กุมภาพันธ์].
2. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540, *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, p. 338
3. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., and Hall, C.W., 1974, *Drying Cereal Grains* (3rd edition). Westport, Connecticut : The AVI publishing company, Inc., USA, p. 265
4. Bala, B.K., 1997, *Drying and Storage of Cereal Grains*, Oxford & IBH Publishing, Oxford, p.0312
5. Anwar, S.I. and Tiwari, G.N., 2001, “Evaluation of Convective Heat Transfer Coefficient in Crop Drying under Open Sun Drying Conditions,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, No. 5, pp. 627-637.
6. Goya, R.K. and Tiwari, G.N., 1998, “Heat and Mass Transfer Relations for Crop Drying,” *Drying Technology*, Vol. 16, No. 18, pp. 1741-1754.
7. Mani, M., Kaew-on, J., and Boonma, P., 2008, “Determination of Convective Heat Transfer Coefficient of Ginger Drying under Natural Convection,” http://www.scisoc.or.th/stt/30/sec__j/paper/stt30__J0016.pdf. [22 August].
8. มารีนา มะหนิ และ จอมภพ แวควักดี, 2548, “การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแกนสับประรดแช่อิ่มมอบแห้งภายใต้การตากแห้งโดยแสงอาทิตย์,” *การประชุมเชิงวิชาการเครื่องช่วยพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1*, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จังหวัดชลบุรี วันที่ 11-13 พฤษภาคม, RE08, pp. 1-4.
9. AOAC., 2005, *Official Methods of Analysis* (18th edition), Association of Official Analytical Chemists : Washington, D.C.
10. Tiwari, G.N. and Suneja, S., 1997, *Solar Thermal Engineering Systems*, Narosa Publishing House, New Delhi, India, 412 p.
11. Toyama, S., Nakamura, M., Salah, H.M., Futamura, S., and Murase, K., 1987, “Laboratory Test of Solar-distillator with a Heat Penetrating Plate Having a Bend,” *Desalination*, Vol. 67, pp. 67-73.
12. Tiwari, G.N. and Tripathi, R., 2003, “Study of Heat and Mass Transfer in Door Conditions for Distillation,” *Desalination*, Vol. 154, No. 2, pp. 161-169.
13. Tiwari, G.N., Minocha, A., Sharma, P.B., and Emran K.M., 1997, “Simulation of Convective Mass Transfer in a Solar Distillation Process,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, No. 8, pp. 761-770.
14. Tiwari, G.N., Kumar, S. and Prakash, O., 2003, “Evaluation of Convective Mass Transfer Coefficient during Drying of Jaggery,” *Journal of Food Engineering*, Vol. 63, No. 2, pp. 219-227.