

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของการลดความชื้นเมล็ดข้าวโพด
Natural Convective Heat Transfer Coefficients for Solar Dehydration of Corn Grains

อีลีเยะ สนิโซ^{1*}, ตาฮิระห์ จารู² และนูรีดา หะยิดือเระ²
Eleeyah Saniso^{1*}, Tahirah Charoo² and Nurida Hajiderih²

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เกิดขึ้นในการทำแห้งเมล็ดข้าวโพดแบบธรรมชาติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ $Nu = h_c X / K = N(Ra)^n$ เมื่อค่าคงที่ N และ n หาได้จากการวิเคราะห์สมการการถดถอยเชิงเส้น จากการทดลองพบว่า เมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ $1.6756 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ เมื่อค่า N และ n เท่ากับ 1.0009 และ 0.1190 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ $1.3421 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ เมื่อค่า N และ n เท่ากับ 0.9992 และ 0.1096 ตามลำดับ สำหรับเมล็ดข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียว โดยที่ค่า $Pr = 0.7052$ และ $4.3939 \times 10^4 < Gr < 2.2102 \times 10^6$

คำสำคัญ: ข้าวโพด สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

In this research work, an attempt has been made to evaluate the convective heat transfer coefficient during dehydration of corn (*Zea mays* Linn.) in open sun drying conditions. 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 of sweet corn grains was $1.6756 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, when N and n were found to be 1.0009 and 0.1190 , respectively and the natural convective heat transfer coefficients was $1.3421 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, when N and n were found to be 0.9992 and 0.1096 , respectively, for waxy corn grains, at $Pr = 0.7052$ and $4.3939 \times 10^4 < Gr < 2.2102 \times 10^6$

Keywords : Corn, Convective Heat Transfer Coefficient, Solar Energy

¹ อาจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา 95000

² นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา 95000

* Corresponding author : โทรศัพท์/โทรสาร: 086-2960787/073-227148 e-mail: saniso.e@hotmail.com

คำนำ

ข้าวโพด (Corn) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยซึ่งวิทยาศาสตร์ว่าซีเมส (Zeamays Linn.) เมล็ดจากฝักใช้เป็นอาหารคนและสัตว์ จำแนกตามลักษณะของแป้งและเปลือกหุ้มเมล็ดได้ 7 ชนิดคือข้าวโพดหัวนุบ (Dent corn) ข้าวโพดหัวแข็ง (Flint corn) ข้าวโพดหวาน (Sweet corn) ข้าวโพดแก้ว (Pop corn) ข้าวโพดข้าวเหนียว (Waxy corn) ข้าวโพดแป้ง (Flour corn) และข้าวโพดป้า (Pod corn) และจำแนกตามวัตถุประสงค์ของการปลูกได้ 4 ชนิดคือข้าวโพดใช้เมล็ด (Grain corn) ข้าวโพดหมัก (Silage corn) ข้าวโพดอาหารสัตว์ (Fodder corn) และข้าวโพดฝักอ่อน (Baby corn) [1] ปี พ.ศ. 2554-2555 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวโพดอาหารสัตว์ 7,255,950 ไร่ มีผลผลิตรวม 4,781,970 ตัน มีราคาเฉลี่ยอยู่ที่ ราคา 7.62 บาทต่อกิโลกรัม [2] จึงจำเป็นต้องมีการเก็บรักษาที่ดีเพื่อรักษาคุณภาพของเมล็ดข้าวโพด โดยต้องลดความชื้นให้ลดลงเหลือ 13-15 % w.b. ซึ่งเกษตรกรส่วนมากจะทำแห้งด้วยการตากแดดตามธรรมชาติและจะใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน การทำแห้ง (Drying) คือ กระบวนการลดความชื้นของวัสดุที่ส่วนใหญ่ใช้การถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยซึ่งถูกกำหนดโดยการถ่ายโอนความร้อน ได้แก่ การพา (Convection) การนำ (Conduction) และการแผ่รังสี (Radiation) ซึ่งการวิเคราะห์กระบวนการทำแห้งวัสดุมีค่าชีวิตที่สำคัญหลายประการและเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด [3] และหากการทำแห้งเป็นแบบตากแดดโดยตรงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Convective heat transfer coefficient) เป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่สำคัญในการทำแห้ง ดังงานวิจัยของ Anwar and Tiwari [4] ที่ได้ทดลองทำแห้งผลผลิตทางการเกษตร 6 ชนิด ได้แก่ พริกขี้หนูเขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว หอมหัวใหญ่ มันฝรั่งและดอกกะหล่ำ ด้วยการตากแห้งกลางแจ้งเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง 3.5-26

$W/m^2-^{\circ}C$ ในขณะที่ Goyal and Tiwari [5] ได้ทดลองศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลในการทำแห้งข้าวสาลีและถั่วเขียว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของข้าวสาลีและถั่วเขียวมีค่าเท่ากับ 16.68 และ $9.62 W/m^2-^{\circ}C$ ตามลำดับ และ Dilip [6] ได้ทดลองศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลในการทำแห้งกุ้งและปลาเลีย ซึ่งตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง $0.376-9.929 W/m^2-^{\circ}C$ ที่ $Pr = 0.70$ และ $0.02 \times 10^6 < Gr < 1.56 \times 10^6$ การวิจัยนี้จึงมุ่งทำการทดลองทำแห้งเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและพันธุ์ข้าวเหนียวด้วยการตากแห้งที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติสำหรับเป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองและออกแบบระบบการทำแห้งเมล็ดข้าวโพดที่เหมาะสมสำหรับชุมชน

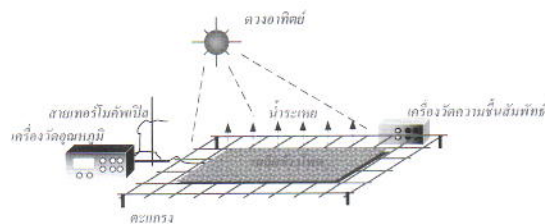
อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างทดลองการวิจัยนี้ใช้เมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและพันธุ์ข้าวเหนียวจาก ตลาดเมืองใหม่ จ.ยะลา ซึ่งมีน้ำหนักเริ่มต้น $345.00 \pm 40.00 g$ ไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ $3-5^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 วัน ระหว่างเก็บนี้ทำการคลุกเคล้าเมล็ดข้าวโพดทุกวันเพื่อให้ความชื้นมีค่าสม่ำเสมอ จากนั้นนำเมล็ดข้าวโพดไปพักไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 1 ชั่วโมงเพื่อให้เมล็ดข้าวโพดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม แล้วจึงตากแห้งกลางแจ้งที่อาศัยแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานแล้ววิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

วิธีการทดลอง

การทดลองทำได้โดยนำเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและพันธุ์ข้าวเหนียวน้ำหนักเริ่มต้น $345.00 \pm 40.00 g$ ความชื้นเฉลี่ย 52.7 % d.b. มาวางบนตะแกรงขนาด $30.0 cm \times 30.0 cm$ ความหนาเฉลี่ย 0.5 cm แล้วนำไปตากแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

ณ ชั้นคาเฟ่อาคาร 9 ศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์
ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา (รูปที่ 1) วัดอุณหภูมิ
เหนือผิว (T_A) และได้ผิวเมล็ดข้าวโพด (T_M) ด้วยเครื่อง
Digital Multimeter รุ่น UNAOHM 9400 ความละเอียด
 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ที่ต่อเข้ากับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด เค
(K-Type Thermocouple) วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์
ของอากาศแวดล้อมด้วยเครื่อง Flash Link Data Logger
รุ่น Delta TRAK ความละเอียด $\pm 0.1^\circ\text{C}$ และชั่ง
น้ำหนักเมล็ดข้าวโพดทุกๆ 15-30 min ด้วยเครื่องชั่ง
แบบดิจิทัล Mettler Toledo รุ่น PB 1502 ความละเอียด
0.01 g บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
ของเมล็ดข้าวโพดเป็นเวลา 300 min จึงหยุดการทดลอง
ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วใช้ค่าเฉลี่ย จากนั้นนำข้อมูล
ที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน
แบบธรรมชาติ



ภาพที่ 1 การทดลองทำแห้งเมล็ดข้าวโพดแบบธรรมชาติ

ทฤษฎีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน แบบธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้น
บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเมล็ดข้าวโพดและอากาศ
แวดล้อมจะเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปทั่วไป ดังนี้

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

เมื่อ $\dot{Q}_{cv}$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ใช้ในการ
ระเหยน้ำในเมล็ดข้าวโพด ($\text{J/m}^2\text{s}$), h_c คือ สัมประสิทธิ์
การพาความร้อนแบบธรรมชาติของเมล็ดข้าวโพด
($\text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$), A คือ พื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวโพดที่ได้รับ
พลังงานแสงอาทิตย์ (m^2), T_A คือ อุณหภูมิของอากาศ
เหนือผิวเมล็ดข้าวโพด ($^\circ\text{C}$) และ T_M คือ อุณหภูมิ

ของอากาศใต้ผิวเมล็ดข้าวโพด ($^\circ\text{C}$)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) สำหรับ
การทำแห้งโดยการตากแดดที่กลางแจ้งซึ่งมีการพา
ความร้อนแบบธรรมชาติ [4, 6-8] สามารถแสดงในรูป
ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ไร้มิติได้ ดังนี้

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

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

เมื่อ Nu คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt Number)
มีค่าเท่ากับ $h_c X/K$, X คือ ขนาดของเมล็ดข้าวโพดเฉพาะ
มีค่าเท่ากับ A/S (m), S คือ เส้นรอบวงของเมล็ดข้าวโพด
บนตะแกรง (m), K คือ สภาพการนำความร้อนของอากาศ
($\text{J/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$), N คือ ค่าคงที่ของสมการ, n คือ ค่าคงที่ของ
สมการ, Ra คือ ไรเลย์นัมเบอร์ (Rayleigh Number)
มีค่าเท่ากับ $GrPr$, Gr คือ กราสฮอฟนัมเบอร์ (Grashof
Number) มีค่าเท่ากับ $\beta g X^3 \rho^2 \Delta T / \mu^2$, β คือ สัมประสิทธิ์
การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ ($1/^\circ\text{C}$), g คือ ความเร่ง
เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2), ρ คือ ความหนาแน่น
ของอากาศ (kg/m^3), ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิเหนือผิว
และใต้ผิวเมล็ดข้าวโพด ($^\circ\text{C}$), μ คือ ความหนืดพลวัต
ของอากาศ (kg/m-s), Pr คือ พรันด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl
Number) มีค่าเท่ากับ $\mu C/K$ และ C คือ ค่าความร้อน
จำเพาะของอากาศ ($\text{J/kg-}^\circ\text{C}$)

เนื่องจากการทำแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยการตาก
แดดที่กลางแจ้งอยู่ในเป็นช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่
(รูปที่ 2) จึงสามารถคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อน
($\dot{Q}_{cv}$) ที่ใช้ในการระเหยน้ำ [6-7, 9] ในเมล็ดข้าวโพด
ได้จากสมการ

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

เมื่อ $P(T_M)$ คือ ไอ้อย่อยอิ่มตัวในเมล็ดข้าวโพดที่
อุณหภูมิใดๆ (N/m^2), RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
เหนือผิวเมล็ดข้าวโพด (decimal), $P(T_A)$ คือ ไอ้อย่อย
อิ่มตัวที่ผิวเมล็ดข้าวโพดที่อุณหภูมิใดๆ (N/m^2)

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) ที่เมล็ดข้าวโพดได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ จะสามารถคำนวณมวลของไอน้ำที่ระเหย (M_{ev}) [4-5, 6-11] ได้ ดังนี้

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

เมื่อ M_{ev} คือ มวลของไอน้ำในเมล็ดข้าวโพดที่ระเหย เนื่องจากการตากแห้ง (kg), L คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg) และ t คือ เวลา (s)

จากสมการ(6) ถ้ากำหนดให้

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

แล้วจัดสมการ (6) ใหม่ได้ดังนี้

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

ทำการใส่ ln ทั้งสองข้างของสมการ (8) จะได้

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

พิจารณาสมการ (9) เทียบกับรูปแบบของสมการเชิงเส้นตรง $Y = aX + b$ เมื่อ $Y = \ln \left[\frac{M_{ev}}{Z} \right]$, $a = n$, $X = \ln(Ra)$ และ $b = \ln N$ แล้วอาศัยการวิเคราะห์สมการการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) จะสามารถคำนวณค่า a และ b ได้ดังนี้

$$a = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (10)$$

$$b = \frac{\sum Y \sum X^2 - \sum X \sum XY}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (11)$$

โดยใช้สมบัติทางกายภาพของอากาศซึ่งประกอบด้วยค่าความร้อนจำเพาะ (C) สภาพการนำความร้อน (K) ความหนาแน่น (ρ) ความหนืดพลวัต (μ) ไอ้อย่ออิมตัว ($P(T)$) ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (L) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ (β) ตามสมการที่ 12-19 [4, 6, 8-10] ดังนี้

$$C = 999.2 + 0.1434T_{av} + 1.101 \times 10^{-4}T_{av}^2 - 6.7581 \times 10^{-8}T_{av}^3 \quad (12)$$

$$K = 0.0244 + 0.6773 \times 10^{-4}T_{av} \quad (13)$$

$$\rho = 353.44 / (T_{av} + 273.15) \quad (14)$$

$$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 4.620 \times 10^{-8}T_{av} \quad (15)$$

$$P(T) = \exp(25.317 - 5144 / (T_{av} + 273.15)) \quad (16)$$

$$L = 3.1615 \times 10^6 (1 - 7.6166 \times 10^{-4}T_{av}) \quad (17)$$

$$\beta = 1/T_{av} \quad (18)$$

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

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดลองตากแห้งเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและพันธุ์ข้าวเหนียวบนตะแกรงขนาด $30.0 \text{ cm} \pm 30.0 \text{ cm}$ ด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือความชื้นกับเวลาการทำแห้ง พบว่า การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดในช่วงเวลาการทำแห้ง 300 min มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น คือ ลดลงประมาณ $81.00 \pm 1.00 \text{ g}$ จากน้ำหนักเริ่มต้น $345.00 \pm 40.00 \text{ g}$ (รูปที่ 2) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการทำแห้งเมล็ดข้าวโพดจะอยู่ในช่วงของอัตราการทำแห้งคงที่ (Constant drying rate) ซึ่งสอดคล้องกับการทำแห้งพริกขี้หนูเขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง และดอกกะหล่ำ โดยการตากแห้งกลางแจ้งของ Anwar and Tiwari [4] และการทำแห้งข้าวสาลีและถั่วเขียวของ Goyal and Tiwari [5] จึงนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติแล้ววิเคราะห์สมการการถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ a และ b ต่อไป

ตารางที่ 1 ผลการทดลองทำแห้งเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานแบบธรรมชาติ

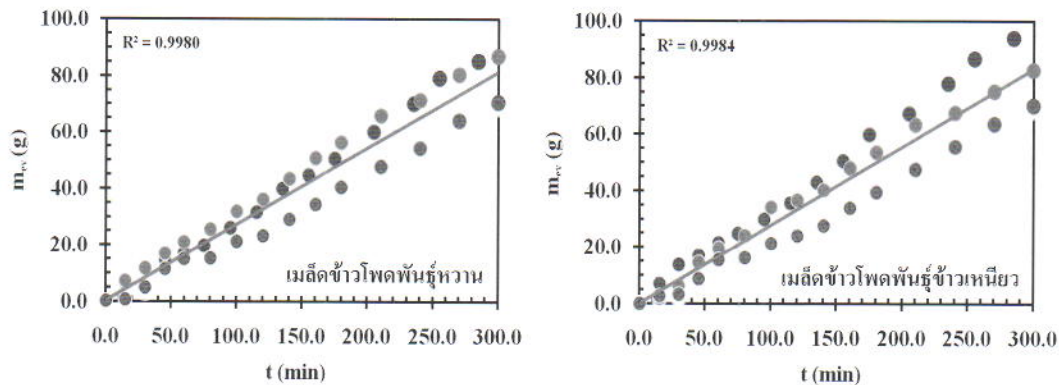
Time (min)	$T_{A,av}$ (°C)	$T_{M,av}$ (°C)	RH_{av} (decimal)	W_{av} (g)	$M_{cv,av}$ (g)	$X=Ln(Ra)$	$Y=Ln[M_{cv}/Z]$
0	31.5	30.5	0.62	307.93	0.00	-	-
15	32.7	31.9	0.39	303.20	4.73	12.35	1.74
30	34.4	33.5	0.38	298.63	9.30	12.69	1.93
45	36.4	33.6	0.34	293.60	14.33	13.09	1.90
60	34.5	33.1	0.32	290.27	17.67	12.41	1.86
80	35.6	35.0	0.35	287.77	20.17	11.68	1.68
100	37.4	35.7	0.26	281.50	26.43	12.80	1.53
120	38.3	37.0	0.06	277.63	30.30	12.96	1.18
140	37.1	36.0	0.05	270.53	37.40	12.59	1.28
160	38.3	36.5	0.03	264.70	43.23	12.89	1.23
180	39.0	37.7	0.02	258.87	49.07	12.41	1.18
210	40.4	39.3	0.03	250.10	57.83	12.62	1.11
240	37.8	37.2	0.02	242.77	65.17	12.02	1.20
270	39.9	37.5	0.02	233.47	74.47	12.59	1.17
300	39.5	36.9	0.01	227.17	80.77	12.62	1.17

ตารางที่ 2 ผลการทดลองทำแห้งเมล็ดข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวแบบธรรมชาติ

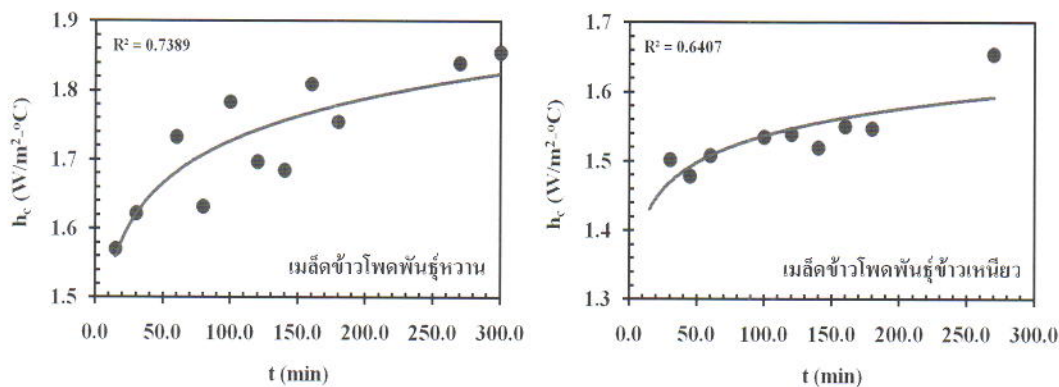
Time (min)	$T_{A,av}$ (°C)	$T_{M,av}$ (°C)	RH_{av} (decimal)	W_{av} (g)	$M_{cv,av}$ (g)	$X=Ln(Ra)$	$Y=Ln[M_{cv}/Z]$
0	30.6	30.2	0.60	382.47	0.00	-	-
15	34.3	33.1	0.38	378.80	3.67	12.55	1.61
30	35.0	33.8	0.38	374.87	7.60	12.93	1.60
45	34.5	33.4	0.34	369.10	13.37	12.96	1.86
60	35.3	34.1	0.31	363.60	18.87	13.05	1.88
80	35.1	34.1	0.35	360.77	21.70	12.33	1.80
100	37.0	35.4	0.27	354.13	28.33	13.13	1.61
120	38.7	37.2	0.06	350.40	32.07	12.89	1.22
140	37.7	36.3	0.04	345.60	36.87	12.65	1.24
160	39.8	38.1	0.04	338.37	44.10	12.96	1.16
180	39.1	37.4	0.03	331.57	50.90	12.79	1.22
210	39.5	37.9	0.05	323.17	59.30	12.63	1.20
240	39.6	38.4	0.03	315.50	66.97	12.30	1.14
270	38.7	37.5	0.01	307.37	75.10	11.80	1.21
300	37.5	37.0	0.02	300.37	82.10	12.07	1.24

โดยอาศัยสมการที่ (10) และ (11) คำนวณค่า N และ n ของการตกแห้งเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานได้เท่ากับ 1.0009 และ 0.1190 ตามลำดับ ที่ $Pr = 0.7052$ และ $9.9250 \times 10^4 < Gr < 9.20176 \times 10^5$ ส่วนเมล็ดข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีค่า N และ n เท่ากับ 0.9992 และ 0.1096 ตามลำดับ ที่ $Pr = 0.7052$ และ $4.3939 \times 10^4 < Gr < 2.2102 \times 10^6$ ซึ่งเมื่อนำค่าคงที่ N และ n ที่ได้นี้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยการแทนค่ากลับในสมการ (3) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและพันธุ์ข้าวเหนียวโดยการตากแห้งกลางแจ้งมีค่าเท่ากับ 1.6756 และ 1.3421 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

แบบธรรมชาติของเมล็ดข้าวโพดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 70 min แรกของการตากแห้ง หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเข้าสู่สมดุล เนื่องจากเมล็ดข้าวโพดมีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำในเมล็ดมากในช่วง 50 min แรก เมื่อตากแห้งพลังงานจากแสงอาทิตย์จะระเหยน้ำได้อย่างรวดเร็วหลังจากนั้นจึงค่อยๆ ลดลง (รูปที่ 3) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและพันธุ์ข้าวเหนียวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของกุ้ง (*Macrobrachium lamarret*) และปลาช่อน (*Oxygaster bacaila*) [6] ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.376-9.929 $W/m^2 \cdot ^\circ C$



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดระหว่างการทำแห้งแบบธรรมชาติ



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเมล็ดข้าวโพดระหว่างการทำแห้งแบบธรรมชาติ

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองทำแห้งเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวาน และพันธุ์ข้าวเหนียวแบบธรรมชาติโดยการตากแห้งที่กลางแจ้งซึ่งมีแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน สรุปได้ว่า อัตราการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดอยู่ในช่วงการอบแห้งคงที่ โดยเมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวตากแห้งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเท่ากับ 1.6756 และ $1.3421 \text{ W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ที่ค่า $Pr = 0.7052$ และ $4.3939 \times 10^4 < Gr < 2.2102 \times 10^6$

คำขอบคุณ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายชูเชื่อง ขาดนา และนายมะยุฟรี ยะแอโซ๊ะ นักวิทยาศาสตร์สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่อำนวยความสะดวกและอุปถัมภ์ในการทดลองต่างๆ จนทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. (ม.ป.ป.). ข้าวโพด. สืบค้นเมื่อ 10 ตุลาคม 2554 จาก <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK3/chapter2/t3-2-l2.htm>
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สรุปผลการพยากรณ์ผลผลิตการเกษตร. วารสารพยากรณ์ผลผลิตการเกษตร. 27(1), 2555. สืบค้นเมื่อ 2 เมษายน 2555 จาก http://www2.oae.go.th/mis/Forecast/page3_th.html
- [3] Bala, B.K. (1997). **Drying and storage of cereal grains**. Oxford : Oxford & IBH Publishing.
- [4] 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 Mangement**. 42 (5), 627-637.
- [5] Goya, R.K. and Tiwari, G.N. (1998). Heat and mass transfer relations for crop drying. **Drying Technology**. 16 (18), 1741-1754.
- [6] Dilip Jain. (2006). Determination of convective heat and mass transfer coefficients for solar drying of fish. **Biosystems Engineering**. 94 (3), 429-435.
- [7] Tiwari, G.N., Kumar, S. and Prakash, O. (2003). Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jiggery. **Journal of food engineering**. 63 (2), 219-227.
- [8] Tiwari, G.N. and Tripathi, R. (2003). Study of heat and mass transfer in door conditions for distillation. **Desalination**. 154 (2), 161-169.
- [9] Tiwari, G.N., Minocha, A., Sharma, P.B., and Emen K.M. (1997). Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process. **Energy conversion and management**. 38 (8), 761-770.
- [10] Tiwari, G.N. and Suneja, S. (1997). **Solar thermal engineering systems**. New Delhi, India : Narosa Publisging House.
- [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**. 67, 67-73.