

## การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของกล้วยหอม และเผือกสีม่วงอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

### ESTIMATION OF NATURAL CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF DRIED BANANA AND TARO BY SOLAR DRYING

จักราวุฒิ เตโช<sup>1\*</sup> อีลีหัยะ สนิโซ<sup>2</sup>

Jakkrawut Techo<sup>1\*</sup>, Eleeyah Saniso<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

<sup>1</sup>Major of Energy Engineering, Division of Industrial Technology, Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University.

<sup>2</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

<sup>2</sup>Major of Physics, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University.

\*Corresponding author, e-mail: jakkrawut\_engineering@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของการทำแห้งกล้วยหอม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 10.4 cm) และเผือกสีม่วง (หนา 0.5 cm กว้าง 4.7 cm ยาว 7.8 cm) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการ  $Nu = h_c X/K = N(Ra)^n$  เมื่อค่าคงที่  $N$  และ  $n$  หาได้จากการวิเคราะห์สมการการถดถอยเชิงเส้น จากการทดลองพบว่ากล้วยหอมและเผือกสีม่วงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เฉลี่ยเท่ากับ 3.463 และ 3.559  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  ตามลำดับ โดยที่  $N$  สำหรับกล้วยหอมและเผือกสีม่วงมีค่าเท่ากับ 1.000 และ 1.000 ส่วน  $n$  สำหรับกล้วยหอมและเผือกสีม่วงมีค่าเท่ากับ 0.253 และ 0.274 ตามลำดับ ที่ค่า  $Pr$  เท่ากับ 0.697 และ  $6.227 \times 10^7 < Gr < 6.139 \times 10^8$

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ผลผลิตทางการเกษตร การทำแห้ง

#### Abstract

This research was an attempt to estimate the natural convective heat transfer coefficient of Cavendish Banana (diameter of 2.5 cm, length of 10.4 cm) and Taro (depth of 0.5 cm, width of 4.7 cm, Length of 7.8 cm) 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 Cavendish Banana and Taro was 3.463 and 3.559  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ , when  $N$  for Cavendish Banana and Taro were found to be 1.000 and 1.000, respectively, while  $n$  were found to be 0.253 and 0.274, for Cavendish Banana and Taro, respectively, at  $Pr = 0.697$  and  $6.227 \times 10^7 < Gr < 6.139 \times 10^8$ .

**Keywords:** Convective Heat Transfer Coefficient, Agricultural Product, Dehydration

## บทนำ

การทำแห้ง (Dehydration) ของวัสดุทำได้โดยอาศัยการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer) ไปยังวัสดุให้ความชื้นระเหยออก ซึ่งอาจเกิดจากการพาความร้อน (Convection) การนำความร้อน (Conduction) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) หรืออาจผสมกันทั้งสามลักษณะ ขึ้นกับการออกแบบและชนิดของการทำแห้ง [1] ทั้งนี้ความร้อนจะถ่ายโอนสู่ผิวของวัสดุ (การพาความร้อน) เพื่อระเหยน้ำที่ผิวแล้วถ่ายโอนต่อไปยังภายในวัสดุ (การนำความร้อน) เพื่อเพิ่มความดันไอน้ำในวัสดุต่อไป ส่วนการถ่ายโอนมวลน้ำ (Mass Transfer) จะขึ้นกับกลไก 2 ลักษณะ คือ การเคลื่อนย้ายมวลน้ำในวัสดุเนื่องจากปัจจัยภายใน ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นในวัสดุ และการเคลื่อนย้ายของไอจากผิววัสดุเนื่องจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ อัตราการไหลของอากาศและพื้นที่ผิวของวัสดุ [2-3]

การวิเคราะห์กระบวนการลดความชื้นวัสดุ มีค่าชี้วัดที่สำคัญหลายประการที่แตกต่างกัน และเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด [2-3] ทั้งนี้กรณีการลดความชื้นด้วยการตากแดดโดยตรง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Convective Heat Transfer Coefficient,  $h_c$ ) เป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่สำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหลบนพื้นผิววัสดุและสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ไร้มิติ เช่น เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds Number,  $Re$ ) พรันด์ท์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl Number,  $Pr$ ) และนัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt Number,  $Nu$ ) นำไปสู่การวิเคราะห์ลักษณะการไหลบนพื้นผิวว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) หรือแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ได้ ซึ่ง Mani et al. [4] ได้ทดลองทำแห้งขิงด้วยการตากแห้งกลางแจ้งเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของขิงมีค่าเท่ากับ

$26.25 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ในขณะที่ Anwar and Tiwari [5] ได้ทดลองทำแห้งพริกชี้หูเขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว หอมหัวใหญ่ มันฝรั่งและดอกกะหล่ำ ด้วยการตากแห้งกลางแจ้งเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ได้อยู่ในช่วง  $3.5\text{--}26 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ส่วน Goya and Tiwari [6] ได้ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและมวลในการทำแห้งข้าวสาลีและถั่วเขียวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของข้าวสาลีและถั่วเขียวมีค่าเท่ากับ  $16.68$  และ  $9.62 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ตามลำดับ รวมถึงมารีนา มะหนิ และจอมภพ แวตักดิ์ [7] ที่ได้ทดลองเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติระหว่างการทำแห้งแกนสับปะรดเชื่อมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของแกนสับปะรดเชื่อมมีค่าเท่ากับ  $9.11 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ที่  $Pr = 0.7$  และ  $1.47 \times 10^2 < Gr < 1.19 \times 10^3$

นอกจากนี้ ยังมีการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของการทำแห้งชิ้นสับแชกความชื้นเริ่มต้น  $106.2\% \text{ d.b.}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $73.10 \text{ mm}$  ความหนา  $8.89$  และ  $16.70 \text{ mm}$  พบว่า ชิ้นสับแชกที่หนา  $8.89 \text{ mm}$  มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ  $29.99 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  เมื่อค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ  $1.818$  และ  $0.245$  ตามลำดับ และเท่ากับ  $29.43 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  สำหรับชิ้นสับแชกที่หนา  $16.70 \text{ mm}$  เมื่อค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ  $1.455$  และ  $0.266$  ตามลำดับที่  $Pr = 0.705$  และ  $2.692 \times 10^4 < Gr < 2.980 \times 10^4$  [8] ในขณะที่เดียวกันอีลีหิยะ สนิโซ และคณะ [9] ได้ทดลองเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำแห้งชิ้นปลาช่อนขนาด  $0.5 \times 4.5 \times 7.0 \text{ cm}^3$  แบบธรรมชาติด้วยแสงอาทิตย์ โดยแบ่งการทดลองเป็นการตาก

แบบมีและไม่มีที่บังลม ซึ่งพบว่า ชี้นปลาช่อน ที่ตากแบบไม่มีที่บังลมมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ  $10.9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  เมื่อค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ 2.2 และ 0.1 ตามลำดับ และเท่ากับ  $9.4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  สำหรับชี้นปลาช่อน ที่ตากแห้งแบบมีที่บังลม เมื่อค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ 1.3 และ 0.2 ตามลำดับ โดยที่ค่า  $Pr = 0.7$  และ  $1.9 \times 10^4 < Gr < 3.6 \times 10^4$

รวมทั้งการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการทำแห้งพริกแดงและพริกชี้ฟ้า แดงแบบธรรมชาติด้วยแสงอาทิตย์ของอีลีหียะ สนิโซ และคณะ [10] ซึ่งพบว่า พริกแดงตากแห้ง มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ  $0.7199 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ที่ค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ 1.0011 และ 0.0705 ตามลำดับ ส่วนพริกชี้ฟ้าแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ  $0.9020 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ที่ค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ 1.0017 และ 0.0871 ตามลำดับ ทั้งนี้ อีลีหียะ สนิโซ และคณะ [11] ยังได้ทดลองเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของการลดความชื้น เมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและพันธุ์ข้าวเหนียว ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งพบว่า เมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ  $1.6756 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  เมื่อค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ 1.0009 และ 0.1190 ตามลำดับ ในขณะที่เมล็ดข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ  $1.3421 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  เมื่อค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ 0.9992 และ 0.1096 ตามลำดับ โดยที่ค่า  $Pr = 0.7052$  และ  $4.3939 \times 10^4 < Gr < 2.2102 \times 10^6$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นพารามิเตอร์เบื้องต้นที่สำคัญยิ่งสำหรับการออกแบบระบบอบแห้งวัสดุหรือผลผลิตทางการเกษตรด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสม โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

แบบธรรมชาติของวัสดุหรือผลผลิตทางการเกษตร ที่มีอยู่นั้นยังไม่ครอบคลุมถึงผลผลิตทางการเกษตรอีกหลายชนิดในประเทศไทย จึงจำเป็นต้องทดลองเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของกล้วยหอมและเผือกสีม่วงให้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบอบแห้งที่มีการไหลของอากาศแบบราบเรียบ (Laminar Flow) หรือแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ที่เหมาะสมสำหรับชุมชนและผู้ประกอบการอบแห้งต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากกล้วยหอมเป็นกล้วยที่นิยมบริโภคและนำมาแปรรูปเป็นอาหารได้หลายชนิด มีน้ำตาลซูโครส ฟรักโตส และกลูโคส ช่วยเพิ่มความสดชื่นให้ร่างกาย เป็นที่นิยมสำหรับนักวิ่งระยะไกลหรือนักกีฬาที่ออกกำลังกายหนักเป็นประจำ มีสารอัลลิซิน (Allicin) และแร่เซเลเนียม (Mineral Selenium) ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ที่ช่วยลดความเสี่ยงการเกิดโรคหัวใจ นอกจากนี้กล้วยหอมยังมีกรดอะมิโนประเภททริปโตเฟน ที่ช่วยกระตุ้นฮอร์โมนเซโรโทนินทำให้ร่างกายรู้สึกผ่อนคลาย (ช่วยลดความเครียด) รวมทั้งช่วยย่อยอาหารและแก้ท้องผูกอีกด้วย [12] ในขณะที่เผือกสีม่วงเป็นพืชหัวที่ให้พลังงาน มีโปรตีนและไขมันต่ำ นิยมแปรรูปเป็นขนมขบเคี้ยวและผลิตภัณฑ์สำหรับสถานท่องเที่ยวต่างๆ เนื่องจากมีสีที่สวยงามน่ารับประทาน

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้จึงมุ่งทำการทดลองลดความชื้นกล้วยหอมและเผือกสีม่วงด้วยการตากแห้งที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติให้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาแบบจำลองและออกแบบระบบการลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตรที่เหมาะสมต่อไป

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

พิจารณาการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุและอากาศแวดล้อม จะสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปทั่วไป ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) พื้นที่ ( $A$ ) และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง [13-17] ได้ดังนี้

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

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการพาแก๊สโดยการตากแดดที่กลางแจ้งซึ่งมีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ในรูปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ไรต์ได้ ดังนี้

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

หรือ

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

พิจารณาการทำแห้งวัสดุโดยการตากแดดที่กลางแจ้ง จะสามารถคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อน ( $\dot{Q}_{ev}$ ) ที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุได้จากสมการความสัมพันธ์ [15-17] ดังนี้

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

แทนสมการ (3) ในสมการ (4) จะได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

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

สามารถคำนวณมวลน้ำที่ระเหย ( $M_{ev}$ ) ออกจากวัสดุได้ 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) กำหนดให้

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

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

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

พิจารณาสมการ (9) เทียบกับรูปแบบสมการเชิงเส้นตรง (Linear Equation) พบว่า เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $\ln(Ra)$  และ  $\ln(M_{ev}/Z)$  จะได้ความชัน (Slope) ของกราฟเส้นตรงเท่ากับ  $n$  และค่าจุดตัดแกน Y (Y-Intercept) เท่ากับ  $\ln N$  โดยอาศัยสมบัติทางกายภาพของอากาศซึ่งประกอบด้วยค่าความชื้นจำเพาะ ( $C$ )

สภาพการนำความร้อน ( $K$ ) ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความหนืดพลวัต ( $\mu$ ) ความดันไอล้อย ( $P(T)$ ) ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $L$ ) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ ( $\beta$ ) ตามสมการที่ 10-17 [14, 16-17] จะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของวัสดุได้

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

$$K = 2.440 \times 10^{-2} + 7.673 \times 10^{-5} T_{avg} \quad (11)$$

$$\rho = 353.44 / (T_{avg} + 273.15) \quad (12)$$

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

$$P(T) = \exp(25.317 - 5144 / (T_{avg} + 273.15)) \quad (14)$$

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

$$\beta = 1 / (T_{avg} + 273.15) \quad (16)$$

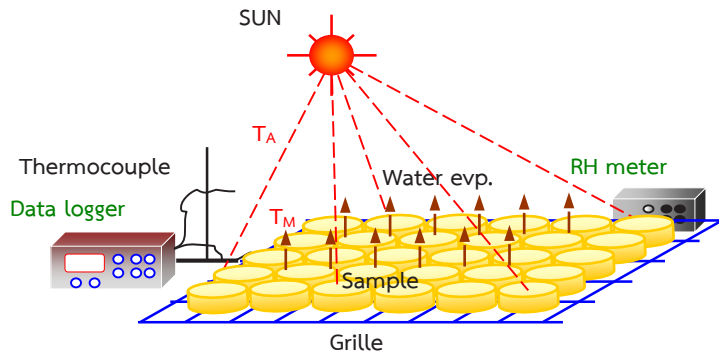
$$T_{avg} = (T_A + T_M) / 2 \quad (17)$$

#### การเตรียมตัวอย่างทดลอง

การวิจัยนี้ใช้กล้วยหอมและเปลือกสีม่วง โดยนำกล้วยหอมสุกที่สังเกตด้วยสายตาจากภายนอกเป็นสีเหลืองสม่ำเสมอมาปอกเปลือกแล้วผ่าออกเป็น 2 ซีก เท่าๆ กัน ส่วนเปลือกสีม่วงได้หั่นเป็นชั้นความหนา 0.5 cm ซึ่งวัดขนาดด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ (Vernier Caliper) ความละเอียด 0.05 mm จากนั้นแบ่งกล้วยหอมและเปลือกสีม่วงไปหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC [18] และวางบนตะแกรงขนาด  $35 \times 35$  cm<sup>2</sup> เพื่อทำแห้งโดยการตากแดดกลางแจ้งที่อาศัยแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน

#### การทดลอง

การวิจัยนี้ทำการทดลองโดยนำกล้วยหอมน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 465.5 g (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 10.4 cm) และเปลือกสีม่วงน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 428.3 g (หนา 0.5 cm กว้าง 4.7 cm ยาว 7.8 cm) ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 151.4% และ 153.7% d.b. ตามลำดับ มาวางบนตะแกรง (กล้วยหอมวางแบบหงาย) ขนาด  $35 \times 35$  cm<sup>2</sup> แล้วนำไปตากแดดกลางแจ้งที่อาศัยแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 วิธีการทดลองสำหรับการทำแห้งของกล้วยหอมและเผือกสีม่วงที่ตากแบบธรรมชาติ

ระหว่างการตากแดดทำการวัดอุณหภูมิบนผิว ใต้ผิว และที่ระดับกึ่งกลางความหนาของวัสดุ จำนวน 10 ตำแหน่ง นับจากขอบตะแกรงทั้งสี่ด้าน เข้าไปเป็นระยะ 2.2 cm (ระยะห่างระหว่างตำแหน่งวัดอุณหภูมิแต่ละจุดบนตะแกรงเท่ากับ 3.4 cm) ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Digital Multimeter รุ่น UNAOHM 9400) ความละเอียด  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  ที่ต่อเข้ากับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด เค (K-Type Thermocouple) รวมทั้งวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมเหนือผิว วัสดุด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Flash Link Data Logger รุ่น Delta TRAK) ความละเอียด  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  และทำการชั่งน้ำหนักวัสดุทุกๆ 30-60 min ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (Mettler Toledo รุ่น BP 1502) ความละเอียด 0.01 g ทำการทดลองพร้อมกันจำนวน 3 ชุด ในบริเวณและเวลาเดียวกัน แล้วใช้ค่าเฉลี่ยจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

### ผลการวิจัย

จากการทดลองตากแห้งกล้วยหอม และเผือกสีม่วงด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงเวลา

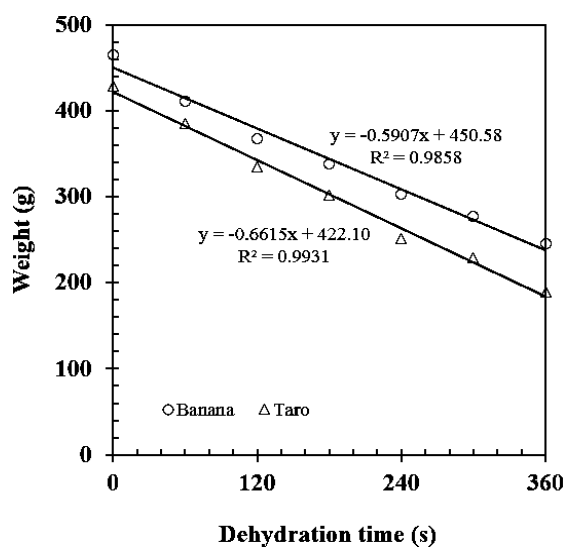
การตากแห้ง 360 นาที ของกล้วยหอม และเผือกสีม่วง มีค่าลดลงจากน้ำหนักเริ่มต้น ประมาณ 219.5 g (47.2%) และ 398.1 g (92.9%) ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (การลดลงของความชื้น) กับเวลาการทำแห้ง พบว่าการทำแห้งกล้วยหอมและเผือกสีม่วงในช่วงที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง (151.4 และ 153.7% d.b.) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังภาพที่ 2 ซึ่งบ่งชี้ว่าการทำแห้งกล้วยหอม และเผือกสีม่วงอยู่ในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Drying Rate) สอดคล้องกับการทดลองตากแห้งขิงของ Mani et al. [4] การทำแห้งข้าวสาลีและถั่วเขียวของ Goya and Tiwari (1998) [6] การทำแห้งพริกชี้หนูเขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง และดอกกะหล่ำ โดยการตากแห้งกลางแจ้งของ Anwar and Tiwari [5] และการทำแห้งแกนสับปะรดเชื่อมของมารีนา มะหนิ และจอมภพ แวตักดี [7]

ตารางที่ 1 ข้อมูลผลการทดลองสำหรับการทำแห้งของกล้วยหอมที่ตากแบบธรรมชาติ

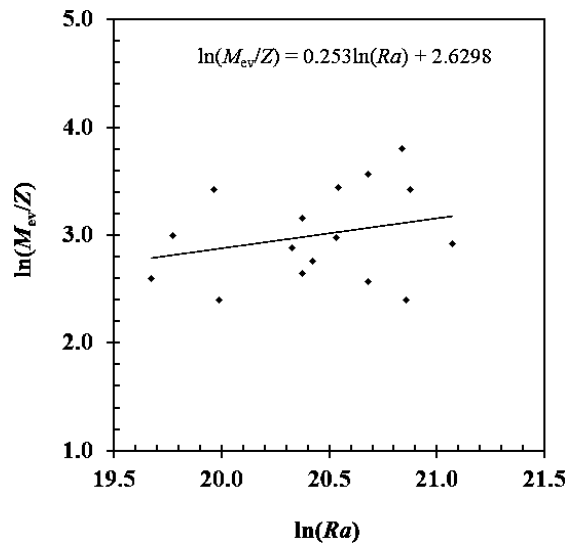
Time (min)	T <sub>A, avg</sub> (°C)	T <sub>M, avg</sub> (°C)	RH <sub>avg</sub> (%)	Weight <sub>avg</sub> (g)	M <sub>ev, avg</sub> (g)
0	28.3±1.5	27.8±1.0	69.3±3.1	465.5±38.5	-
60	37.7±1.5	32.3±2.0	62.7±2.3	411.4±36.8	54.1±1.6
120	38.3±2.1	33.3±1.7	58.7±2.5	368.1±31.4	43.3±0.4
180	39.8±1.8	33.4±1.7	56.3±3.1	338.2±34.2	29.9±2.6
240	36.0±3.5	32.4±1.7	55.0±3.6	303.7±37.8	34.5±6.5
300	35.7±4.5	33.6±3.6	55.0±5.6	277.3±39.8	26.4±1.8
360	33.7±1.2	31.7±1.7	67.0±3.2	245.6±31.9	31.7±5.2

ตารางที่ 2 ข้อมูลผลการทดลองสำหรับการทำแห้งของเผือกสีม่วงที่ตากแบบธรรมชาติ

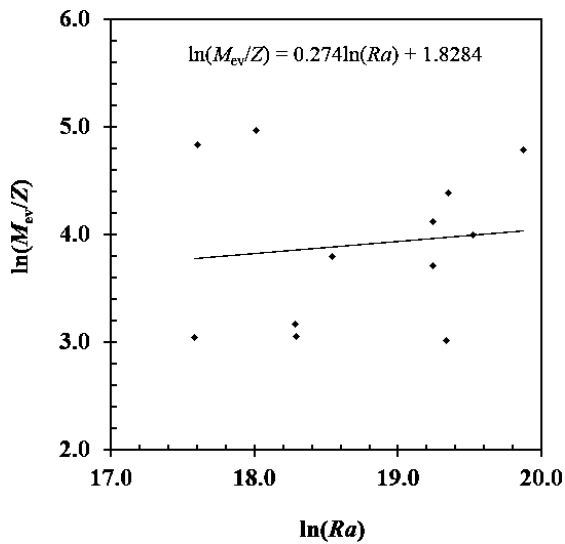
Time (min)	T <sub>A, avg</sub> (°C)	T <sub>M, avg</sub> (°C)	RH <sub>avg</sub> (%)	Weight <sub>avg</sub> (g)	M <sub>ev, avg</sub> (g)
0	33.0±1.7	33.7±0.3	60.0±3.6	428.3±12.4	-
60	36.7±1.9	36.3±0.1	47.5±5.7	385.4±10.6	42.9±4.2
120	34.6±2.5	36.0±0.5	54.5±4.7	334.7±9.3	50.7±6.5
180	35.5±3.4	36.9±0.5	44.5±3.7	302.2±8.1	32.5±4.1
240	37.3±1.4	37.4±0.1	50.0±7.4	251.8±5.5	50.4±5.3
300	37.3±0.6	36.5±0.5	45.9±6.7	229.1±5.3	22.7±2.2
360	36.7±1.2	37.5±0.5	41.2±4.3	189.7±6.8	39.4±2.9



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกล้วยหอมและเผือกสีม่วงระหว่างที่ตากแบบธรรมชาติ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\ln(M_{ev}/Z)$  และ  $\ln(Ra)$  สำหรับการทำแห้งของกล้วยหอมที่ตากแบบธรรมชาติ



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\ln(M_{ev}/Z)$  และ  $\ln(Ra)$  สำหรับการทำแห้งของเปลือกส้มวงที่ตากแบบธรรมชาติ



### สรุปและอภิปรายผล

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\ln$  (Mev/Z) และ  $\ln$ (Ra) ของกล้วยหอมและเผือกสีม่วงที่ตากแห้งแบบธรรมชาติดัง ภาพที่ 3 และภาพที่ 4 พบว่า ค่า  $N$  และ  $n$  ของการทำแห้งกล้วยหอมมีค่าเท่ากับ 1.000 และ 0.253 ตามลำดับ ที่  $Pr = 0.697$  และ  $1.803 \times 10^8 < Gr < 2.234 \times 10^9$  ในขณะที่การทำแห้งเผือกสีม่วง มีค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ 1.000 และ 0.274 ตามลำดับ ที่  $Pr = 0.697$  และ  $6.227 \times 10^7 < Gr < 6.139 \times 10^8$  เมื่อนำค่าคงที่  $N$  และ  $n$  ที่ได้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยการแทนค่ากลับในสมการ (3) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งกล้วยหอมและเผือกสีม่วงมีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 3.463 และ 3.559  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  ตามลำดับ

การที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งกล้วยหอมและเผือกสีม่วงมีค่าใกล้เคียงกันนี้เป็นไปได้ว่าเมื่อตากแดดกล้วยหอมและเผือกสีม่วงที่มีความชื้นสูงพื้นผิวที่เกิดจากการผ่าซีกและหันเป็นชั้นได้สัมผัสกับอากาศแวดล้อมซึ่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันที่ประมาณ  $35^\circ C$  ความชื้นที่ลดลงจึงเป็นการระเหยน้ำที่บริเวณผิวเท่านั้นซึ่งขึ้นกับผิวสัมผัสของวัสดุกับอากาศแวดล้อมเป็นหลักไม่ได้ขึ้นกับการแพร่ความชื้นภายในวัสดุ ซึ่งเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (การลดลงของความชื้น) ในลักษณะเส้นตรงกับเวลาการตากแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 2 การถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิววัสดุกับอากาศแวดล้อมจึงไม่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของกล้วยหอมและเผือกสีม่วงไม่แตกต่างกัน

เมื่อนำข้อมูลการทดลองตากแห้งกล้วยหอมและเผือกสีม่วงตาม ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 ไปวิเคราะห์เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยอาศัยความสัมพันธ์

เชิงเส้นระหว่าง  $\ln$  (Mev/Z) และ  $\ln$ (Ra) ตามสมการ (9) ได้ดังภาพที่ 3 และ ภาพที่ 4 ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งกล้วยหอมและเผือกสีม่วงมีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของการทำแห้งชิ้นสัมแชก ( $29.43-29.99 W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ) [8] ประมาณ 8.5 เท่า อาจเนื่องจากชิ้นสัมแชกมีโครงสร้างของเนื้อที่อ่อนนุ่ม (ชุ่มน้ำ) กว่ากล้วยหอมและเผือกสีม่วง การระเหยน้ำจึงเกิดได้เร็วและลึกลงไปในเนื้อวัสดุด้วยมีผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้มากกว่ากล้วยหอมและเผือกสีม่วงซึ่งมีพื้นผิวที่หนาแน่นกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของการตากแห้งชิ้นสัมแชกจึงมีค่าสูงกว่า

ในทางกลับกันสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งกล้วยหอมและเผือกสีม่วงมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของการทำแห้งพริกแดงและพริกชี้ฟ้าแดงที่มีค่าเท่ากับ 0.7199 และ 0.9020  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  ตามลำดับ [9] เมล็ดข้าวโพดพันธุ์หวานและพันธุ์ข้าวเหนียวซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ 1.6756 และ 1.3421  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  ตามลำดับ [11] ทั้งนี้ เนื่องจากทั้งพริกและเมล็ดข้าวโพดเป็นวัสดุที่มีเปลือกบางๆ หุ้มอยู่โดยรอบ การถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิววัสดุไปยังอากาศแวดล้อมจึงเกิดได้ช้ากว่ากล้วยหอมและเผือกสีม่วง ทำให้การถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุช้าลงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติมีค่าต่ำกว่ากล้วยหอมและเผือกสีม่วงที่เกิดการถ่ายโอนความร้อนกับอากาศแวดล้อมที่ผิวสัมผัสโดยตรง

ดังนั้นจากการทดลองทำแห้งกล้วยหอมและเผือกสีม่วงสีม่วงแบบธรรมชาติโดยการตากแห้งที่กลางแจ้งที่มีแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานพบว่า กล้วยหอมมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเท่ากับ 3.463  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  เมื่อค่า  $N$  และ  $n$  มีค่าเท่ากับ 1.000 และ 0.253

ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกันกับเฟือกสีม่วงที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเท่ากับ  $3.559 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  เมื่อมีค่า  $N$  และ  $n$  เท่ากับ 1.000 และ 0.274 ตามลำดับ โดยค่า  $Pr = 0.697$  และ  $6.227 \times 10^7 < Gr < 2.234 \times 10^9$  ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ได้นี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองและออกแบบระบบการทำแห้งกล้วยหอม

และเฟือกสีม่วงที่มีความเร็วการไหลของอากาศต่ำหรือเป็นการอบแห้งแบบธรรมชาติ (Natural Convective Dehydration) ซึ่งไม่มีการบังคับความเร็วลม (Force Convective Dehydration) ของเครื่องอบแห้งที่สูงเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้นี้ทดลองที่อากาศแวดล้อมไม่มีการเป่าอากาศไหลผ่านวัสดุที่อบแห้ง

### รายการสัญลักษณ์

$A$	คือ	พื้นที่ผิวของวัสดุที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ ( $\text{m}^2$ )
$C$	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศ ( $\text{J/kg K}$ )
d.b.	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) (%)
$N$	คือ	ค่าคงที่ของสมการ
$n$	คือ	ค่าคงที่ของสมการ
$Gr$	คือ	กราชฮอฟนัมเบอร์ (Grashof Number) มีค่าเท่ากับ $\beta g X^3 \rho^2 \Delta T / \mu^2$
$g$	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{ms}^{-2}$ )
$h_C$	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของวัสดุ ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )
$K$	คือ	สภาพการนำความร้อนของอากาศ ( $\text{J/m}^2\text{K}^1$ )
$L$	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $\text{J/kg}$ )
$M_{ev}$	คือ	มวลของน้ำในชั้นวัสดุที่ระเหย ( $\text{kg}$ )
$N_u$	คือ	นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt Number) มีค่าเท่ากับ $h_C X / K$
Pr	คือ	พรันด์ท์นัมเบอร์ (Prandtl Number) มีค่าเท่ากับ $C / K$
$P(T)$	คือ	ความดันไอลอยยที่อุณหภูมิต่างๆ ( $\text{N/m}^2$ )
$P(T_M)$	คือ	ความดันไอลอยยที่อุณหภูมิของวัสดุ ( $\text{N/m}^2$ )
$P(T_A)$	คือ	ความดันไอลอยยที่อุณหภูมิจากอากาศเหนือผิววัสดุ ( $\text{N/m}^2$ )
$\dot{Q}_{ev}$	คือ	อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในวัสดุ ( $\text{J/m}^2 \text{ s}^1$ )
$Ra$	คือ	ราเลย์นัมเบอร์ (Rayleigh Number) มีค่าเท่ากับ $Gr Pr$
$RH$	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือผิววัสดุ (Decimal)
$S$	คือ	เส้นรอบวงของวัสดุ ( $\text{m}$ )
$T_A$	คือ	อุณหภูมิของอากาศเหนือผิววัสดุ ( $^\circ\text{C}$ )
$T_{avg}$	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุและอากาศเหนือวัสดุ ( $^\circ\text{C}$ )
$T_M$	คือ	อุณหภูมิของวัสดุ ( $^\circ\text{C}$ )
$\Delta T$	คือ	ผลต่างอุณหภูมิของวัสดุและอากาศเหนือผิววัสดุ ( $^\circ\text{C}$ )
$t$	คือ	เวลา ( $\text{s}$ )
$X$	คือ	ขนาดของชั้นวัสดุเฉพาะ มีค่าเท่ากับ $A/S$ ( $\text{m}$ )

### ตัวอักษรกรีก

$\beta$	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ ( $1K^{-1}$ )
$\mu$	คือ ความหนืดพลวัตของอากาศ ( $kgms^{-1}$ )
$\rho$	คือ ความหนาแน่นของอากาศ ( $kgm^{-3}$ )

### สัญลักษณ์กำกับล่าง

$A$	คือ อากาศ
$avg$	คือ ค่าเฉลี่ย
$c$	คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ
$ev$	คือ การระเหย

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ และคณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Soponronnarit, S. (1997). *Grain Drying and Some Food*. 7th ed., Textbook, King Mongkut University of Technology Thonburi.
- [2] Bala, B.K. (1997). *Drying and storage of cereal grains*. Oxford: Oxford & IBH Publishing.
- [3] Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W.; and Hall, C.W. (1974). *Drying cereal grains*. 3rd ed. Westport, Connecticut: The AVI publishing company, Inc.
- [4] Mani, M., Kaew-on, J.; and Boonma, P. (2008). *Determination of Convective Heat Transfer Coefficient of Ginger Drying Under Natural Convection*. Retrieved August 22, 2017, from [http://www.scisoc.or.th/stt/30/sec\\_j/paper/stt30\\_J0016.pdf](http://www.scisoc.or.th/stt/30/sec_j/paper/stt30_J0016.pdf)
- [5] Anwar, S.I.; and Tiwari, G.N. (2001, March). Evaluation of Convective Heat Transfer Coefficient in Crop Drying Under Open Sun Drying Conditions. *Energy Conversion and Mangement*. 42(5): 627-637.
- [6] Goya, R.K.; and Tiwari, G.N. (1998, April). Heat and Mass Transfer Relations for Crop Drying. *Drying Technology*. 16(8): 1741-1754.
- [7] Mani, M.; and Waewsak, J. (2005). *Evaluation of Convective Heat Transfer Coefficient of Pineapple GlaceCore Drying Open Sun Drying*. Proceeding of the 1<sup>st</sup> National Conference on Energy Network of Thailand. pp 1-4. Chonburi: Ambassador City Jomtien.
- [8] Saniso, E.; and Kasa, M. (2009, October - December). Natural Convective Heat Transfer Coefficients of *Garcinia atroviridis* Drying. *KMUTT Journal*. 32(4): 435-443.
- [9] Saniso, E., Saseng, A.; and Vaedoorloh, V. (2013, January - March). Natural Convective Heat Transfer Coefficients for Solar Drying of Striped Snakehead Fish (*Channa Striatus*). *KKU Science Journal*. 41(1): 193-202.

- [10] Saniso, E., Wani, L.; and Hama, N. (2013, July - December). Natural Convective Heat Transfer Coefficients for Solar Dehydration of Chili. *Journal of Yala Rajabhat University*. 8(2): 118-129.
- [11] Saniso, E., Charoo, T.; and Hajderih, N. (2011, July - December). Natural Convective Heat Transfer Coefficients for Solar Dehydration of Corn Grains. *Journal of Thaksin University*. 14(2): 16-22.
- [12] Healthy Food. (2018, January 15). Benefits of Banana. *Department of Health : Ministry of Public Health*. Retrieved May 10, 2018, from <https://health.kapook.com/view166598.html>
- [13] Tiwari, G.N.; and Suneja, S. (1997). *Solar Thermal Engineering Systems*. New Delhi: Narosa Publishing House.
- [14] Tiwari, G.N.; and Tripathi, R. (2003, April). Study of Heat and Mass Transfer in Door Conditions for Distillation. *Desalination*. 154(2): 161-169.
- [15] Tiwari, G.N.; Kumar, S.; and Prakash, O. (2004, June). Evaluation of Convective Mass Transfer Coefficient During Drying of Jaggery. *Journal of food engineering*. 63(2): 219-227.
- [16] Tiwari, G.N.; Minocha, A.; Sharma, P.B.; and Emran K.M. (1997, May). Simulation of Convective Mass Transfer in a Solar Distillation Process. *Energy conversion and management*. 38(8): 761-770.
- [17] Toyama, S.; Nakamura, M.; Salah, H.M.; Futamura, S.; and Murase, K. (1987, December). Laboratory Test of Solar-Distillator with a Heat Penetrating Plate Having a Bend. *Desalination*. 67: 67-73.
- [18] AOAC. (2016). *Official methods of analysis*. 20th ed. Washington, D.C.: Association of official analytical chemists.