

การพัฒนาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของการอบแห้งทุเรียนแผ่น ด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

Drying Kinitic of Durian Slices Using Solar Energy from Natural Convection Hot Air

ธีรเดช ชีวนันทชัย^{1*} ธานินทร์ หฤทัยสิริรัตน์²

^{1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ถนน พัฒนาการ แขวงสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

โทร 02-321-6930-9 ต่อ 1203 , โทรสาร 02-321-4444

*E-mail: theeradet_ch@kbu.ac.th

Theeradet Cheewananthachai^{1*} Thanin Haluethaisieirat²

^{1,2}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University , Suanluang , Bangkok 10250 , Thailand

Tel: +66-02-321-6930-9 Ext.1203 , Fax: +66-02-321-4444

*E-mail: theeradet_ch@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยอากาศร้อนโดยอาศัยหลักการลอยตัวตามธรรมชาติของอากาศร้อนโดยได้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งแบบจำลองได้ศึกษาถึงปัจจัยของพารามิเตอร์ในการอบแห้งโดยมีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนที่ป้อนเข้าตู้อบแห้งโดยมีความสัมพันธ์กับค่ารังสีอาทิตย์ โดยได้นำข้อมูลจากผลการทดลองมาสร้างแบบจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ที่มีผลในการทำนายการถ่ายเทความชื้นในรูปอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective Diffusion Coefficient) ในการแห้งตัวของทุเรียนแผ่น โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งในรูปแบบของอาร์เรเนียส (Arrhenius 's Equation) และสมการอบแห้งชั้นบางของ Page (Page's Equation) พบว่ารูปแบบสมการของ Page สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดีกว่าสมการของ อาร์เรเนียส

โดยทำการทดลองอบแห้งทุเรียนแผ่นสามครั้งการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ย ในวันที่ 10,11,12,13,24 และ 25 มีนาคม 2548 เวลาที่เก็บค่าการทดลองเริ่ม 9.30-16.00 น. สรุปได้ว่าเครื่องอบแห้งทุเรียนสามารถอบแห้งทุเรียนได้จำนวนหนึ่งกิโลกรัม จากค่าเฉลี่ยของความชื้นมาตรฐานแห้งและเปียกเริ่มต้น 162.59 %db. , 61.91 %wb. จะต้องลดความชื้นให้เหลือความชื้นสุดท้ายให้น้อยกว่า 10% wb. ซึ่งเครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นทุเรียนแผ่นโดยเฉลี่ยได้ 11.05 ± 3.8 %db. และ 9.69 ± 3.03 %wb. โดยใช้เวลา 7 ชั่วโมงในการอบแห้งในลดความชื้นดังกล่าว ซึ่งสามารถการลดความชื้นของทุเรียนได้เป็นที่น่าพอใจ ซึ่งค่ารังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันเท่ากับ

571.77 ± 240.24 W/m² ส่งผลให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งที่ออกจากตัวเก็บรังสีและป้อนเข้าตู้อบเฉลี่ยประมาณ 42 ± 6.03 °C ทำให้ความเร็วและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 ± 0.09 m/s และ $2.056 \times 10^{-3} \pm 5.9 \times 10^{-3}$ kg/s
คำหลัก อบแห้ง , ทุเรียน , พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

The purpose of this research was to study the mathematical equation model in predicting drying Durian slices period by using solar energy from natural convection hot air. The parameters set in the model were temperature and relative humidity of natural convection hot air from solar collector, which depend on solar radiation. Results of the study from the model was used in creating a numerical method model which affect humidity in the form of moisture ratio and the effective diffusion coefficient in drying Durian slice process. Two theories: Arrhenius's equation and Page's equation, were used, and the results were compared. It was found that Page's equation gave a better prediction ratio than that of Arrhenius's.

The test was carried out three times per each equation in order to get an average result. It was done on 10, 11, 12, 13, 24, and 25 March 2005. The time of the test was controlled during 9.30-16.00 in all of the days mentioned. The result was that the Durian drying oven could dry Durian at the quantity of 1 kilogram from the wet standard starting point of 162.59%db and 61.91%wb to

the ending wet standard point of less than 10% wb in 7 hours. This means that the machine could reduce the humidity of the Durian on an average rate of $11.05 \pm 3.8\%$ db and $9.69 \pm 3.03\%$ wb. The reduction from the test was at a satisfactory level. The average daily solar ray level during the test period was at $571.77 \pm 240.24 \text{ W/m}^2$, which means that the solar ray collector would give drying air temperature at the level of $42 \pm 6.03^\circ\text{C}$ and the average dry air circulation rate of $0.24 \pm 0.09 \text{ m/s}$ and $2.056 \times 10^{-3} \pm 5.9 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$.

Keywords: Drying , Durian , Solar Energy

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยเรานั้น มีผลผลิตสินค้าทางการเกษตรเพิ่มมากขึ้นทุกปี ไม่ว่าจะเป็นพืช ผัก ผลไม้ ทำให้เกิดปัญหาสินค้าทางการเกษตรมากกว่าความต้องการของตลาด โดยเฉพาะสินค้าประเภทผลไม้ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาที่ได้รับความนิยมและได้ผลเป็นอย่างดีก็คือการแปรรูปผลไม้แบบแห้งและทุเรียนก็เป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่ได้รับการแปรรูป ในรูปแบบของทุเรียนทอด แต่ถ้าหากมีปริมาณทุเรียนมากจนไม่สามารถนำมาทำทุเรียนทอดให้หมดในคราวเดียวกันได้ จึงต้องมีวิธีการถนอมอาหาร ในรูปแบบของทุเรียนแผ่นตากแห้ง เพื่อนำมาทำทุเรียนทอด เนื่องจากการตากแห้งนั้นยังมีข้อเสียหลายประการเช่น ปัญหาฝุ่นละออง ฝน แดด เชื้อรา พื้นที่ รวมทั้งสิ้น ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการออกแบบและสร้างตู้อบแห้งเพื่อใช้ในการอบทุเรียนแผ่น ซึ่งมีขอบเขตที่จะสร้างเครื่องอบแห้งขนาดเล็ก เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายถึงจลนศาสตร์ของการอบแห้งทุเรียนแผ่นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์เป็นตัวสร้างอากาศให้ร้อนเพื่อประหยัดพลังงานและต้นทุนของเครื่องอบแห้งเพื่อให้เกิดประโยชน์ใช้งานได้ง่ายและเหมาะสมสภาพในสถานที่ที่ไม่มีไฟฟ้าเข้าถึงในสวนทุเรียน จึงต้องออกแบบ โดยอาศัยหลักการไหลของอากาศร้อนให้ไหลแบบตามธรรมชาติป้อนเข้าตู้อบแห้ง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการอบแห้งวัสดุ

การอบแห้งเนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรจะมีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยว ทำให้เก็บรักษาได้ไม่นาน ซึ่งการอบแห้งจะช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวได้นานขึ้น การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น โดยใช้พลังงานความร้อน แก้ววัสดุที่จะนำมาอบแห้ง เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังผิววัสดุที่ขึ้น โดยอาศัยอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการพาความร้อน ซึ่งกระบวนการการถ่ายเทความร้อนจะเกิดการถ่ายเทมวลไปพร้อมๆ กัน กล่าวคือ เมื่อความร้อนถ่ายเทจากอากาศร้อนไปยังผิวของวัสดุ ทำให้น้ำที่ผิววัสดุเกิดการระเหยกลายเป็นไอเคลื่อนที่ออกจากผิววัสดุสู่อากาศที่อยู่รอบๆ วัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกรายละเอียดของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับมวลวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ [1] คือ

ความชื้นมาตรฐานเปียกเป็นความชื้นแบบนี้นิยมใช้กับการค้า โดยทั่วไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ ($100M_w$)

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \quad (1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้งเป็นความชื้นที่ใช้ในการเปรียบเทียบในเชิงงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \quad (2)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก , M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง หน่วย เศษส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ , d คือ มวลแห้งวัสดุ (ไม่มีน้ำ) หน่วย kg และ w คือ มวลของวัสดุ , kg

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

จากการทดลองกำหนดให้รูปร่างของทุเรียนที่ใช้ในการศึกษากลไกการอบแห้งมีลักษณะเป็นแผ่นแบนกว้างและการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียว โดยที่ขณะทำการอบแห้งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เท่ากับอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้งเราสามารถหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆได้จากสมการการแพร่ทางทฤษฎี ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งทุเรียนแผ่นโดยสัมพันธ์กับอุณหภูมิในตู้อบในรูปสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) ดังสมการที่ 3 [1]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left\{ - (2n+1)^2 \left[\frac{\pi^2 (D_{eff}) \times t}{L^2} \right] \right\} \quad (3)$$

การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากสมการที่ 4

$$D_{eff} = D_o \cdot \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right) \quad (4)$$

D_o คือ Arrhenius factor หน่วย m^2/min , E_a = พลังงานที่ใช้ในการอบ หน่วย kJ/kg , R คือ ค่าคงที่ของอากาศ (kJ/kg/K) และ T คือ อุณหภูมิในตู้อบ (Kelvin)

จากสมการอบแห้งเอมไพริคัลที่ใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง ในการวิจัยจะใช้การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง American Society of Agricultural Engineering ได้เสนอสมการพื้นฐาน เพื่อแสดงข้อมูลอัตราการอบแห้งตามสมการของ Page (Page's Equation) [2] ดังสมการที่ (5)

$$MR = \left(\frac{M - M_e}{M_i - M_e} \right) = \exp(-Kt^N) \quad (5)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น(ไร้น้ำ) , K และ N คือค่าคงที่ในการอบแห้ง , D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีหน่วยเป็น (m^2/min) , t คือเวลาการอบแห้งมีหน่วยเป็น (sec) , L คือความหนาครึ่งหนึ่งของวัสดุมีหน่วย (m) , M_i คือความชื้นที่เวลาเริ่มต้นมีหน่วยเป็นร้อยละมาตรฐานแห้ง , M คือความชื้นในเวลาใดๆ มีหน่วยเป็นร้อยละมาตรฐานแห้ง , M_e คือความชื้นสมดุล มีหน่วยร้อยละมาตรฐานแห้ง

จากการทดลองในการอบแห้งจากการใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ จะทำการทดลองอบแห้งจนน้ำหนักของทุเรียนแผ่นนั้นไม่เปลี่ยนแปลง

ซึ่งความชื้นสุดท้ายของมวลแห้งของทุเรียนแผ่น (M_f) จะเป็นความชื้นสุดท้ายที่สมดุลกับอุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม โดยที่ความชื้นอากาศร้อน (RH) ที่อบแห้งนั้นจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (T) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำความชื้นสุดท้ายของมวลแห้งของทุเรียนแผ่น (M_f) ของมวลทุเรียนแห้งนำมาแทนค่าแทนที่ในเทอมความชื้นสมดุล (M_e) โดยสามารถใช้แทนได้ จากการแนะนำจาก Brooker et al. (1974). และ Weller and Bunn (1993). [3] ดังนั้นสมการที่ 5 จะเปลี่ยนรูปดังสมการที่ 6

$$MR = \left(\frac{M - M_f}{M_i - M_f} \right) = \exp(-Kt^N) \quad (6)$$

โดยที่ K และ N คือ ค่าคงที่, M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของมวลแห้งของทุเรียนแผ่นในตู้อบแห้งแสงอาทิตย์ หน่วยเป็นร้อยละมาตรฐานแห้ง

2.3 การสมดุลพลังงานของตัวเก็บรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์

พิจารณาจากรูปที่ 1 ชุดตัวเก็บรังสีความร้อนจากการสมดุลพลังงานบนตัวรับรังสี ความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์ เท่ากับการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของกระแสอากาศร้อน รวมกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของตัวรับรังสี จัดรูปได้ [4]

$$T_{co} = \left[\frac{(\eta A_c G_T \cdot \cos \theta) + (W_{ci} C_v T_{ci}) + (C_a T_{ci})}{(C_a + C_v W_{ci})} \right] \quad (7)$$

ค่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีหาได้ดังนี้

$$\eta = \frac{\dot{m} C_a (T_{co} - T_{ci})}{A_c G_T \cdot \cos \theta} \quad (8)$$

โดยที่ $\dot{m}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศหน่วย kg/s, T_{co} คืออุณหภูมิหลังออกจากแผงตัวรับรังสี หน่วย $^{\circ}\text{C}$, RH_{co} คือความชื้นสัมพัทธ์ออกจากแผงรับรังสี หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์, T_{ci} คืออุณหภูมิก่อนเข้าแผงตัวรับรังสี หน่วย $^{\circ}\text{C}$, A_c คือพื้นที่ตัวรับรังสี หน่วย m^2 , G_T คือค่ารังสีตรงของแสงอาทิตย์ชั่วขณะรายชั่วโมง หน่วยเป็น W/m^2 , W_{ci} คืออัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{dryair}}$, C_a คือความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง หน่วย $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}^{\circ}$, η คือ ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีหน่วย % , θ คือมุมของรังสีอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับแผงรับรังสีโดยในงานวิจัย ทำมุม 30° ทำมุมจากแนวตั้ง โดย B.Zeghamati, J.Hirunlabh และ J.Khedari (2003) [5] ได้ทำการศึกษาการไหลแบบ Free convection ในกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบเอียงทำมุมต่างๆ กับพื้นราบ โดยให้ความร้อนกับแผ่นด้านบนและศึกษาการพาความร้อนแบบธรรมชาติของการไหลของอากาศร้อนได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการไหลของการพาความร้อนตามธรรมชาติ ในเทอมของ Nu และ Re ระหว่างความสัมพันธ์กับค่า $R_a \sin 30^{\circ}$ และของมุมเอียง และอัตราส่วนของช่องว่างความสูงกับความยาวของกล่องสี่เหลี่ยม ดังแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

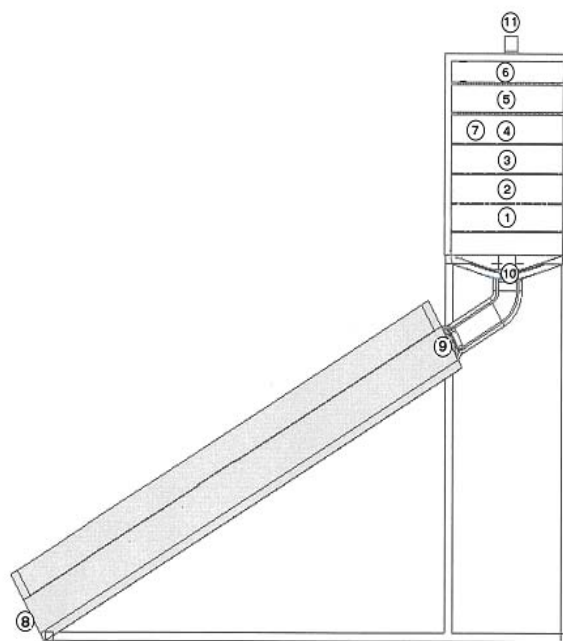
$$Nu = 27.479(R_a \sin 30^{\circ})^{0.103} \left(\frac{S}{H} \right)^{0.686} \quad (9)$$

$$Re = 0.00023(R_a \sin 30^{\circ})^{0.633} \left(\frac{S}{H} \right)^{-1.675} \quad (10)$$

โดยที่ R_a คือค่าตัวเลขกลุ่มตัวแปรไร้มิติ(Rayleigh Number), Nu คือค่าตัวเลขกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Nusselt Number), Re คือค่าตัวเลขกลุ่มตัวแปรไร้มิติ(Reynolds Number), S คือระยะห่างระหว่างสังกะสีและฉนวนด้านล่าง (m), H คือความยาวของช่องกล่องรับรังสีแสงอาทิตย์ (m)

3. อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการทดลองเริ่มจากนำเนื้อทุเรียนที่มีลักษณะห่ามาแกะเมล็ดออกแล้วใส่กับแท่นสไลให้เป็นแผ่นหนา 1 mm. จากนั้นนำเนื้อทุเรียนแผ่นมาซึ่งให้ได้ประมาณ 1 กก. แล้วนำมาวางเรียงบนตะแกรง ซึ่งน้ำหนักแต่ละตะแกรงแล้วบันทึกค่า และนำทุเรียนแผ่นวางบนตะแกรงและเข้าตู้อบที่เวลา 09.30 น.ทำการตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และอัตราการไหลของอากาศ แล้วบันทึกค่าการทดลองเพื่อเป็นค่าเริ่มต้นของการอบแห้ง และทำการชั่งน้ำหนักแต่ละตะแกรง ทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบเวลาการอบแห้งที่ 7 ชั่วโมง หรือเวลา 16.00 น.



รูปที่ 1 เครื่องอบทุเรียนพลังงานแสงอาทิตย์

3.1 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอททำการวัดอุณหภูมิในตู้อบตาม ตำแหน่ง 1-6 และใช้อุปกรณ์ไฮโกรมิเตอร์ (HYGROMETER รุ่น Barigo) วัดความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบตำแหน่งที่ 7 และอุปกรณ์เครื่องวัดทิศทางลม Air Velocity Meters รุ่น 8347 ใช้เก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในตำแหน่งที่ 8, 9, 10 และ 11

3.2 ค่ารังสีแสงอาทิตย์

ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่แผงรับรังสีอาทิตย์ได้รับ โดยใช้ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา ศูนย์บางนา กรุงเทพฯ ใช้ข้อมูลในวันที่ 10,11,12,13,24 และ 25 มีนาคม 2548 ทำการวิเคราะห์ในแบบจำลอง

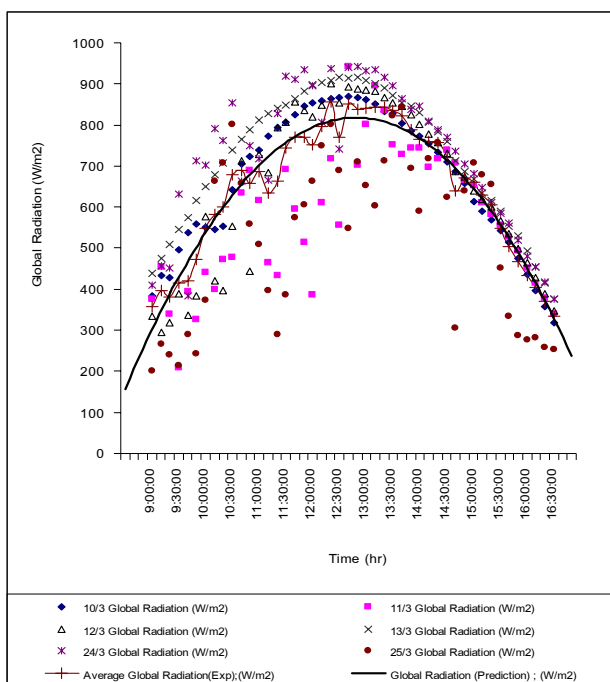
3.3 การวัดอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้เครื่องวัดดิจิตอล Air Velocity Meters รุ่น 8347 ความละเอียด 0.1 m/s เก็บผลอัตราการไหลของอากาศและความเร็วของอากาศร้อน

3.4 การหาความชื้นมาตรฐานของทุเรียน ใช้ตาชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (ความละเอียด 0.01 g) จดบันทึกน้ำหนักของทุเรียนแผ่นพร้อมตะแกรง นำออกมาชั่งทุก 2 ชม. รวมเวลาเป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยทำการทดลองต่อเนื่องกันสองวันต่อหนึ่งครั้งการทดลอง และทำการคำนวณหาความชื้นมาตรฐานเปียกและแห้งของทุเรียนที่อบแห้ง โดยเปรียบเทียบกับมวลแห้งของทุเรียนแผ่นซึ่งทำไปอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C อบแห้งจนน้ำหนักทุเรียนไม่เปลี่ยนแปลง

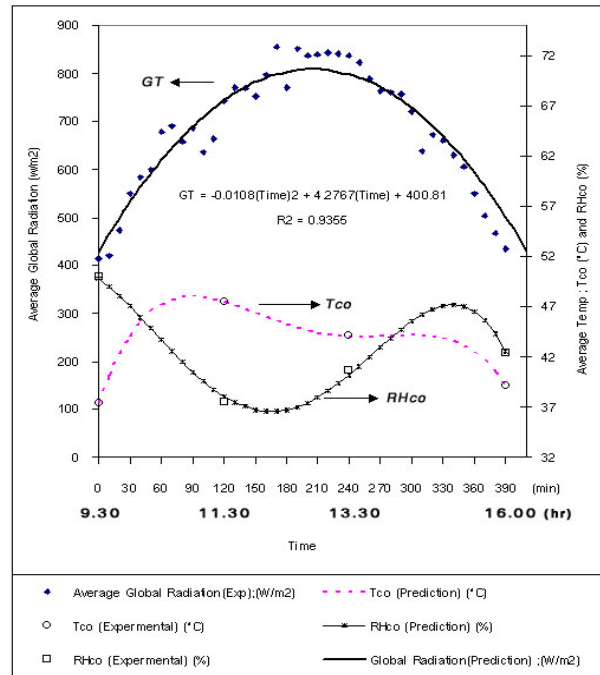
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่ารังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิและความชื้นทางออกตัวเก็บรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์

จากผลการทดลองอบแห้งทุเรียนแผ่นสามครั้งการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ย ในวันที่ 10,11,12,13,24 และ 25 มีนาคม 2548 เวลาที่เก็บค่าการทดลองเริ่ม 9.30-16.00 น. โดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายนอกเฉลี่ย 35.2 ± 2.1 °C หาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออกตัวรับรังสีและค่ารังสีแสงอาทิตย์สัมพันธ์กับเวลาโดยนำค่าต่างๆไปวิเคราะห์สมการถดถอยในรูปแบบสมการโพลีโนเมียล เพื่อหาค่าคงที่ของสมการ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยในเดือนมีนาคม ซึ่งค่ารังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ (G_T) 571.78 ± 240.24 ดังรูปที่ 2 และนำสมการการทำนายค่าเฉลี่ยรังสีอาทิตย์ที่ได้ ดังสมการที่ 11 และนำไปทำนายหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ทางออกตัวรับรังสี ดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นสมการอยู่ในรูปแบบการทำนายดังสมการที่ 12 และ 13



รูปที่ 2 ค่ารังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตลอดวัน



รูปที่ 3 อุณหภูมิและความชื้นเฉลี่ยที่ทางออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยสัมพันธ์กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ย

โดยที่อุณหภูมิทางออกตัวรับรังสีเฉลี่ย (T_{co}) 42.03 ± 6.03 °C ซึ่งความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนเฉลี่ยรายวันของตัวเก็บรังสี (RH_{co}) $42.65 \pm 9.49\%$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของค่ารังสีแสงอาทิตย์

$$G_T = -0.0108(\text{Time})^2 + 4.276(\text{Time}) + 400.8 \quad (11)$$

โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(Coefficient of determination); $R^2=0.935$ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อุณหภูมิและความชื้นทางออกตัวเก็บรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์

$$T_{co} = (0.632 + 0.091G_T) + [(0.0902 - 0.00046G_T) \cdot \text{Time}] + [(-0.00015 + 1 \times 10^{-6} G_T) \cdot \text{Time}^2] \quad (12)$$

โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(Coefficient of determination); $R^2=0.999$

$$RH_{co} = (5.698 + 0.11G_T) + [(-0.445 - 0.00023G_T) \cdot \text{Time}] + [(0.00091 + 1 \times 10^{-6} G_T) \cdot \text{Time}^2] \quad (13)$$

โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(Coefficient of determination); $R^2=.9965$

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นมาตรฐานแห้งและเปียก เทียบกับแบบจำลองของอุณหภูมิในตู้อบ โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลา

การทดลองทั้งสามครั้งสรุปออกมาเป็นค่าเฉลี่ย โดยความชื้นมาตรฐานแห้ง (MC) เฉลี่ยทั้ง 3 การทดลองเทียบกับเวลา(วันที่ 10-11,12-13,24-25 มีนาคม 2548) เวลาที่ทดลอง 09.30-16.00 น. ในแต่ละวัน ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 โดยการทดลองอบแห้ง ความเร็วอากาศร้อนเฉลี่ย 0.24 m/s และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อนเฉลี่ยที่ 2.056×10^{-3} kg/s โดยความชื้นมาตรฐานแห้งเริ่มต้น เท่ากับ $162.58 \pm 5.29 \times 10^{-6}$ %db. อบจนความชื้นลดลงเหลือ 11 ± 3.82 %db.

จากค่ามาตรฐานในการเก็บรักษาอาหารควร อดลดความชื้นให้อยู่ที่ประมาณ 10-15% ถึงจะควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ประมาณ 65% ดังนั้นในการอบแห้งในวันแรกจึงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่ได้ทำการอบแห้งต่อไปในวันที่สอง จนได้มวลแห้งของทุเรียนเป็นค่าความชื้นสุดท้าย (M_f) เท่ากับ 5.3 ± 4.17 %db. เพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้น Moisture ratio (MR) ของทุเรียนแผ่น และตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งคือ T_f , RH_f ดังรูปที่ 4 แสดงความชื้นมาตรฐานแห้งสัมพันธ์กับอุณหภูมิในตู้อบ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อุณหภูมิในตู้อบ (T_f) ชั้นตะแกรง 1-6 และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RH_f) แสดงในรูปแบบสมการอยู่ในรูปแบบการทำนายโพลีโนเมียล ดังสมการที่ 14 และ 15 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อุณหภูมิในตู้อบเฉลี่ยในตำแหน่งตะแกรงชั้นที่ 1-6 ดังแสดงในรูปแบบสมการอยู่ในรูปแบบการทำนายโพลีโนเมียล ดังสมการที่ 12 และ 13 และค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยแต่ละชั้นในตู้อบแสดงในตารางที่ 1

$$T_{f(i-6)} = a + (b \cdot \text{time}) + (c \cdot \text{time}^2) + (d \cdot \text{time}^3) + (e \cdot \text{time}^4) \quad (14)$$

$$RH_{f(i-6)} = a + (b \cdot \text{time}) + (c \cdot \text{time}^2) \quad (15)$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียลโดยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิแต่ละชั้นในตู้อบ และค่าของความชื้นเฉลี่ยในตู้อบ โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลาต่างๆ ที่อบแห้ง

อุณหภูมิแต่ละชั้น	a	b	c	d	e	R ²
Temp ชั้น1; T1 (°C)	34.959	0.2563	-0.0014	2.996×10^{-6}	-1.925×10^{-9}	0.912
Temp ชั้น2; T1 (°C)	31.321	0.2262	-0.0012	2.689×10^{-6}	-1.762×10^{-9}	0.940
Temp ชั้น3; T1 (°C)	30.175	0.1619	-0.0009	1.998×10^{-6}	-1.358×10^{-9}	0.943
Temp ชั้น4; T1 (°C)	29.861	0.1203	-0.0006	1.599×10^{-6}	-1.135×10^{-9}	0.956
Temp ชั้น5; T1 (°C)	29.970	0.1384	-0.0008	1.957×10^{-6}	-1.361×10^{-9}	0.959
Temp ชั้น6; T1 (°C)	30.344	0.1323	-0.0008	1.906×10^{-6}	-1.331×10^{-9}	0.959
RHavgในตู้อบเฉลี่ย %	75.069	-0.1002	0.00005	-	-	0.953

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นมาตรฐานแห้งและเปียกในตำแหน่งตะแกรงแต่ละชั้นที่ 1-6 แสดงสมการในรูปแบบสมการตัดแปลงของความชื้นสมดุลของ Oswin [5],[6] ดังสมการที่ 16 และค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของความชื้นมาตรฐานแห้งและเปียก แต่ละชั้นในตู้อบแสดงในตารางที่ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลาในการอบแห้ง

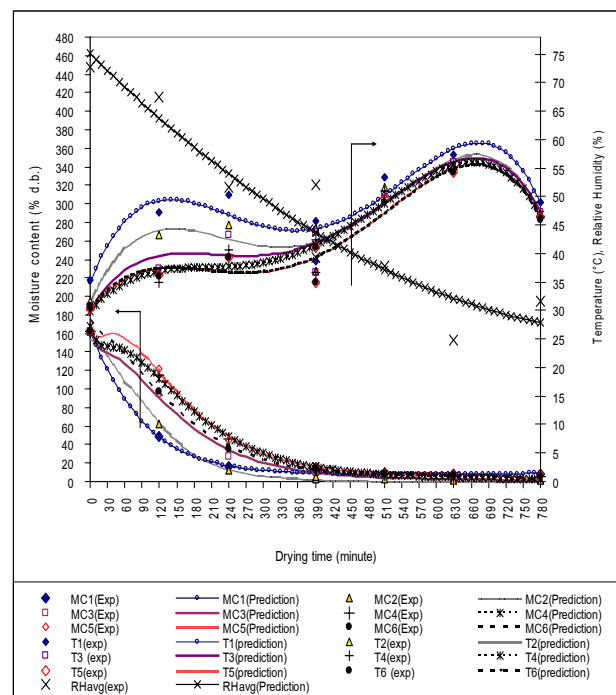
$$MC_{(i-6)} = \left[A + (B \cdot \text{time}) + (C \cdot \text{time}^2) \right] \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{RH_{f \text{ avg}}}{100} \right)^{[D + (E \cdot T_{1-6})]}}{1 - \left(\frac{RH_{f \text{ avg}}}{100} \right)} \right\} \quad (16)$$

ตารางที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความชื้นมาตรฐานแห้งในแต่ละชั้นในตู้อบ (Moisture Content ; %dry basis)

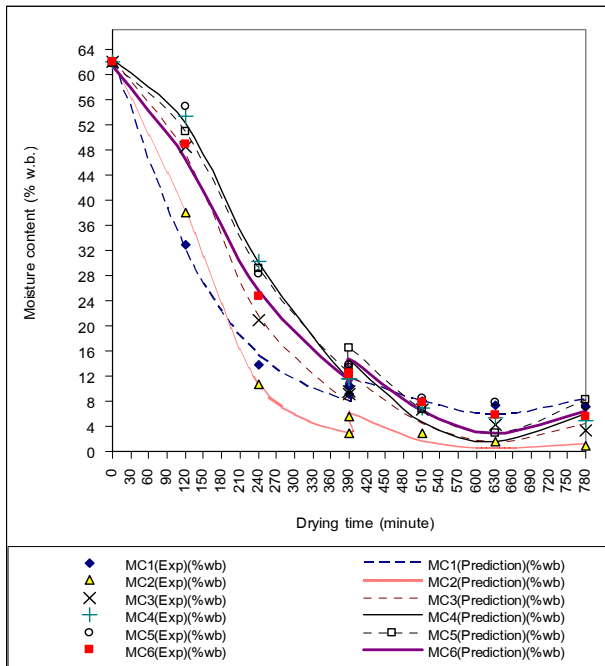
Moisture content (MC)	A	B	C	D	E	R ²
ชั้น MC1 (% db.)	26.393	-0.0970	0.00016	1.2145	0.0122	0.997
ชั้น MC2 (% db.)	0.6045	-0.0080	0.00009	0.3760	0.1485	0.999
ชั้น MC3 (% db.)	0.2592	0.0052	0.00022	7.2628	-0.0457	0.998
ชั้น MC4 (% db.)	0.5154	0.0087	0.00033	6.0506	-0.0268	0.998
ชั้น MC5 (% db.)	0.2751	0.0067	0.00034	8.3400	-0.0635	0.998
ชั้น MC6 (% db.)	0.3109	0.0100	0.00025	8.2251	-0.0630	0.999

ตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความชื้นมาตรฐานเปียกในแต่ละชั้นในตู้อบ (Moisture Content ; %Wet basis)

Moisture content	a	b	c	d	g	R ²
ชั้น MC1 (% w.b.)	25.884	-0.0612	0.000058	1.5027	-0.0173	0.988
ชั้น MC2 (% w.b.)	20.523	-0.0554	0.000044	0.6156	0.0161	0.999
ชั้น MC3 (% w.b.)	44.648	-0.1251	0.000102	-0.7385	0.0351	0.996
ชั้น MC4 (% w.b.)	69.660	-0.2096	0.000172	-1.6359	0.0506	0.996
ชั้น MC5 (% w.b.)	61.085	-0.1721	0.000145	-1.3700	0.0480	0.984
ชั้น MC6 (% w.b.)	52.104	-0.1412	0.000113	-0.7360	0.0300	0.987

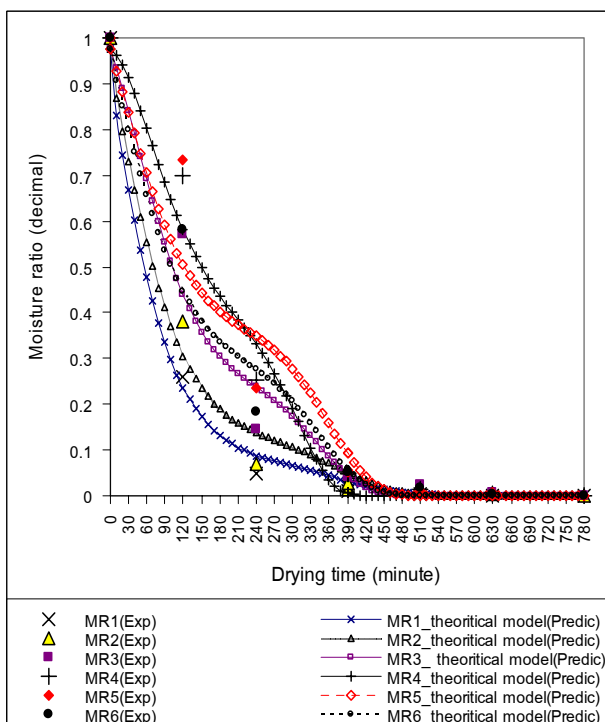


รูปที่ 4 ความชื้นมาตรฐานแห้ง (MC) (%db.) ในแต่ละชั้นเทียบกับเวลา



รูปที่5 ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb.) ในแต่ละชั้นเทียบกับเวลา

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางจลนศาสตร์ของการอบแห้งทุเรียนแผ่น



รูปที่6 อัตราส่วนความชื้น (MR effective diffusion Mode) ของสมการอาร์เรเนียส จากแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่

4.3.1 แบบจำลองการอบแห้งทำนายจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

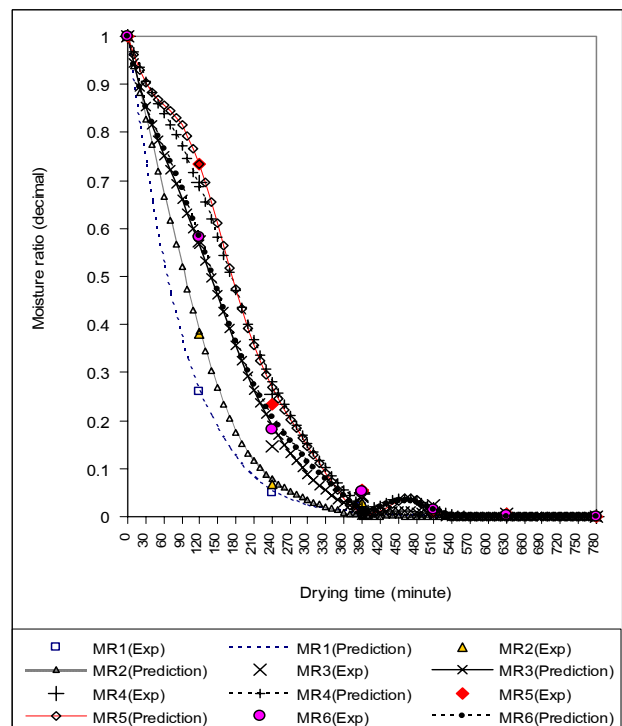
แบบจำลองการอบแห้งจากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius 's Equation) ทำนายหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของทุเรียนอบแห้งด้วยอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิในแต่ละชั้นในตู้อบ ใช้เทคนิคการวิเคราะห์หาค่าคงที่แบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการสมการที่ 17 และแสดงค่า D_0 (Arrhenius factor) และ E_a (Energy of Activity) ในตารางที่ 4

$$MR_{Effective} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{L^2} \left(D_0 \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{R \cdot T} \right] \times \text{time} \right) \right] \quad (17)$$

ตารางที่4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของทุเรียนแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

Moisture Ratio (MR)	D_0 (m^2/min)	E_a (kJ/kg)	R^2
ชั้นที่1 MR1	0.001883	810.4156	0.99237
ชั้นที่2 MR2	0.003480	1037.987	0.97746
ชั้นที่3 MR3	0.178004	2382.420	0.97818
ชั้นที่4 MR4	87.16331	4307.411	0.98421
ชั้นที่5 MR5	0.092569	2125.177	0.95165
ชั้นที่6 MR6	0.046685	1838.928	0.97369

4.3.2 แบบจำลองสมการเอ็มไพริเคิลการอบแห้งชั้นบางทำนายจากสมการของ Page 's Model



รูปที่7 อัตราส่วนความชื้นทำนายจากสมการของ Page Mode

จากแบบจำลองสมการอบแห้งเอ็มไพริคัล ในการอบแห้งแบบชั้นบางในรูปแบบสมการของ Page (1949) โดยข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย (Moisture Ratio , MR) กับ เวลาที่ใช้ในการอบ และค่าคงที่ที่ใช้ในการอบแห้งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิความชื้นที่ทางออกของตัวเก็บรังสี (T_{co} , RH_{co}) และอุณหภูมิในตูอบแห้งชั้น (T_f (1-6)) โดยใช้สมการของ Page (1949) สามารถใช้ทำนายการอบแห้งได้ดี ดังสมการที่ 18

$$MR = \frac{M - M_f}{M_i - M_f} = \exp(K (Time)^N) \quad (18)$$

เมื่อ Time เป็นเวลาในการอบแห้ง (min) ; K และ N เป็นค่าคงที่ในการอบแห้งโดยมีความสัมพันธ์กับ (T_{co} , RH_{co} และ T_f (1-6)) ดังแสดงในสมการที่ 19 และ 20

$$\text{โดยที่ ค่า } K = A + B \cdot T_{co} + C \cdot RH_{co} \quad (19)$$

$$\text{และ ค่า } N = D + E \cdot T_f(1-6) \quad (20)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์คงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากสมการของ Page Modelในการทำนายอัตราส่วนความชื้น (MR 1-6) ละชั้นในตูอบแห้งแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์คงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของสมการของ Page Mode สัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (MR 1-6)

Moisture Ratio	A	B	C	D	E	R ²
ชั้น1 MR1	-0.00842	0.00042	-0.00048	0.08782	0.02058	0.999
ชั้น2 MR2	-0.01123	0.00030	-0.00017	0.15737	0.02323	0.998
ชั้น3 MR3	-0.00945	0.00022	-0.00010	0.64746	0.01164	0.997
ชั้น4 MR4	-0.00516	0.00010	-0.00002	0.91697	0.00825	0.998
ชั้น5 MR5	-0.00958	0.00021	-0.00003	0.64282	0.01544	0.997
ชั้น6 MR6	-0.01251	0.00025	-0.00005	0.84318	0.00737	0.998

5. สรุป

จากการศึกษาการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถให้อัตราการอบแห้งทุเรียนแผ่นได้เป็นอย่างดีโดยสามารถแห้งสามารถอบทุเรียนจำนวน 1 กิโลกรัม จากค่าเฉลี่ยของความชื้นมาตรฐานแห้งและเปียกเริ่มต้น 162.59 %db. , 61.91 %wb. ซึ่งเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นสามารถลดความชื้นทุเรียนแผ่นโดยเฉลี่ยได้ 11.05 ± 3.8 %db. และ 9.69 ± 3.03 %wb. โดยใช้เวลา 7 ชั่วโมง ในการอบแห้งในลดความชื้นดังกล่าว ซึ่งอยู่เกณฑ์มาตรฐานในการเก็บรักษาต้องลดความชื้นให้เหลือความชื้นสุดท้ายให้น้อยกว่า 10% wb. โดยสามารถลดความชื้นของทุเรียนได้เป็นที่น่าพอใจ

ในส่วนจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทั้งสองแบบโดยเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งของอาร์เรเนียส (Arrhenius 's Equation) ทำนายในรูปแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective Diffusion Model) และทำนายจากสมการเอ็มไพริคัลอบแห้งชั้นบางของ Page โดยค่าพิจารณาจากค่า R² เฉลี่ยของ (Page 's Equation)

ที่ชั้นอบแห้งชั้น 1- 6 เท่ากับ 0.997 และจากการทำนายสมการอบแห้งทางทฤษฎีสามารถทำนายในรูปสัมประสิทธิ์แพร่ประสิทธิผล (Effective Diffusion coefficient) ในการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยพลังงานจากอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดี โดยค่า R² เฉลี่ยที่ชั้นอบแห้งชั้น 1- 6 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination); R² เท่ากับ 0.975 พบว่ารูปแบบสมการของ Page สามารถทำนายการอบแห้งในรูปอัตราส่วนความชื้นได้ดีว่าสมการของอาร์เรเนียส แต่โดยทั้งสองแบบให้เกณฑ์ในการพิจารณาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination); R² ได้อยู่ในเกณฑ์ยอมรับในทางวิศวกรรม ซึ่งให้ความผิดพลาดไม่เกิน 5%

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2540 หน้า 63-87 , 113-114.
- [2] ASAE STANDARD, "Thin-Layer Drying of Drying of Grains and Crops", Dec 98, No. ASAE S448,1999, pp. 581-563.
- [3] Brooker D.B., Bakker Arkema, and F.W.&Hall C.W., Theory and Simulation of Cereal Grain Drying In Drying Cereal Grain, AVI Publishing Co., Westport, C.N.,1974, pp. 185-221.
- [4] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ ณัฐวุฒิ ดุษฎี จงจิตร หิรัญลาก พิษัย นามประกาย และ ศิริชัย เทพา "การจำลองแบบการอบแห้งผลไม้โดยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริม" วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2535 หน้า 1-12
- [5] W. Puangsombut, J. Hirunlabh, J. Khedari, and B. Zeghamati, "Experiment Investigation of Free Convection Produce by a Heated Top Plate in an Open ended Inclined Rectangular Channel with Radiant Barrier , 1st Int. Conference on Sustainable Energy and Green Architecture , Sega , 2003 , pp.136-141
- [6] อารีย์ อัจฉริยวิริยะ จิรวรรณ เตียรต์ เตียรต์สุวรรณ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ "จลนศาสตร์ของการอบแห้งและความชื้นสมดุลของลำไยทั้งลูก" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16 ภูเก็ต ประเทศไทย 14-16 ตุลาคม 2545 หน้า 689-693.
- [7] ASAE STANDARD, "Moisture Relationship of Plant-base Agriculture Products", Oct 95, No. ASAE D245,1999, pp. 512-528.