

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

Thermal Properties Analyses of Combined Infrared and Hot Air Dryer

ภราดร หนูทอง*¹ ไพรัชต์ ดิฐคุณารักษ์กุล² รัชตวรรณ เอ็มโอช¹ อนุชา พรหมสิทธิ์¹

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ต. ในเมือง อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ต. ในเมือง อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

Paradorn Nuthong*¹ Piruch Dijkanarukkul² Ratchatawan Am-Oht¹ Anucha Promsit¹

¹Department of Applied Physics, Faculty of Sciences and Liberal Arts,

Rajamangala University of Technology Isan, Nakorn Ratchasima 30000

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Isan, Nakorn Ratchasima 30000

Tel: 0-4423-3000 Ext 4331-2, E-mail: pound96@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและกำลังอินฟราเรดที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและความชื้นรังสีที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และเพื่อพัฒนาสมการการถ่ายเทความร้อนและความชื้นรังสีอินฟราเรด ทำการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 40–80°C กำลังอินฟราเรด 300–600 W ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตกับแหล่งกำเนิด 200 mm และความเร็วลม 1.0 m/s ในการศึกษาข้อมูลจะถูกวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวด้วยวิธีการของดันแคน (Duncan) ที่ระดับความน่าเชื่อมั่น 95% พบว่า เมื่อกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ขณะที่อุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ และความชื้นของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและกำลังอินฟราเรด โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีความสัมพันธ์กับกำลังอินฟราเรดในรูปแบบสมการเอ็กโปเนนเชียล และความชื้นของรังสีอินฟราเรดมีความสัมพันธ์กับกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้งในรูปแบบสมการเชิงเส้น และจากการพัฒนาสมการพบว่าสมการมีความเหมาะสมและสามารถทำนายผลการทดลองได้ดี

คำหลัก รังสีอินฟราเรดระยะไกล การถ่ายเทความร้อน ความชื้นรังสี เครื่องอบแห้ง เพลตเทอร์โมมิเตอร์

Abstract

This paper was to study the effect of the drying temperatures and infrared powers on the heat transfer and incident radiation heat flux in the combined infrared and hot air dryer. The heat transfer coefficient and incident radiation heat flux models were developed. The experiments carried out at the drying temperature of 40–80°C, infrared power of 300–600 W, distance of plate and radiator of 200 mm and air velocity of 1.0 m/s. The data were analyzed by using the analysis of variance. Duncan multiple range test was used for establishing multiple comparisons of the mean values at 95% confidence level. The results were found that the heat transfer coefficient increased with increasing of infrared power, while drying temperature did not have significantly effect. Incident radiation heat flux increased with increasing of the drying temperature and infrared power. The heat transfer coefficient model related with the infrared power in an exponential form and the incident radiation heat flux model related with the drying temperature and infrared power in a linear form. Both models were

the suitable model and could be used to predict best results compared to the experimental data.

Keywords: Far-infrared, heat transfer, incident radiation heat flux, dryer, plate thermometer

1. บทนำ

การอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางการเกษตรในปัจจุบันเกษตรกรนิยมใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งเนื่องจากง่ายในการใช้งาน แต่มักใช้เวลาอบแห้งที่ยาวนาน จึงมีการหาแนวทางการอบแห้งที่สามารถลดเวลา ประหยัดพลังงาน และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดี อาทิเช่น การอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชัน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศหรือการอบแห้งด้วยบีบความร้อน แต่วิธีการเหล่านี้มักมีความยุ่งยากและซับซ้อน จึงจำเป็นต้องหาแนวทางการอบแห้งที่ง่ายต่อการใช้งานและสามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้ มีนักวิจัยหลายท่านได้ประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการอบแห้ง เช่น คลื่นไมโครเวฟ คลื่นอินฟราเรดหรือคลื่นความร้อน เพื่อลดเวลาอบแห้งและประหยัดพลังงาน [1-3]

การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งได้มีการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่าความชื้นของวัสดุมีผลต่อความเข้มรังสีอินฟราเรดและค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมประสิทธิภาพรวม [4] โดยการหาความเข้มรังสีด้วยวิธีการเพลดเทอร์โมมิเตอร์ตามมาตรฐาน ISO 834-1 และ EN 1363-1 สามารถคำนวณได้อย่างเหมาะสมเนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ [5] ต่อมา Nuthong, P. [3, 6] ได้ศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรด อุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วที่มีผลต่อความเข้มรังสีอินฟราเรดและการถ่ายเทความร้อน โดยพบว่ากำลังอินฟราเรดมีผลต่อค่าทั้งสอง ขณะที่อุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

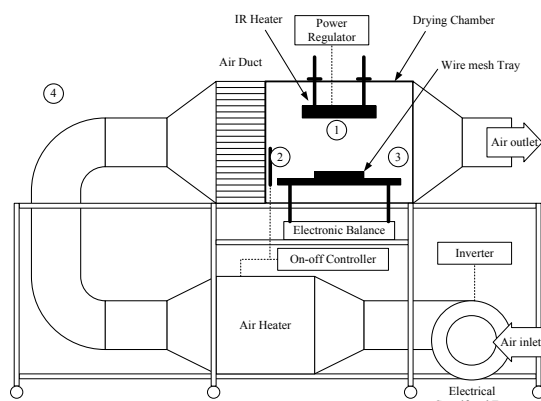
จะเห็นว่า ปัจจุบันได้ทำการศึกษาคูสมบัติความร้อนและความเข้มรังสีที่เกิดขึ้นการใช้รังสีอินฟราเรดเป็น การศึกษาพฤติกรรมของคุณสมบัติทางความร้อน แต่หากพิจารณาการใช้งานหรือต้องการทราบพฤติกรรมของตัวแปรดังกล่าวที่อยู่นอกช่วงการศึกษาจำเป็นต้องมีการประมาณค่า ซึ่งหากต้องทดลองใหม่ซึ่งเกิดความยุ่งยาก ดังนั้นการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประมาณค่า

ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเห็นถึงประโยชน์ของการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความเข้มรังสี งานวิจัยนี้จึงวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความเข้มรังสี และพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความเข้มรังสี เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้ประกอบการคำนวณหาพลังงาน อีกทั้งเพื่อเป็นข้อมูลเพื่อใช้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และสร้างเครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพในอนาคตต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมอุปกรณ์ทดลอง

การศึกษานี้ได้ใช้เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (รูปที่ 1) ประกอบด้วยห้องอบแห้งขนาด 600x600x600 mm³ ภายในห้องติดตั้งแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดทำจากเซรามิกที่มีผิวสีเหลืองขนาด 122x122 mm² กำลังไฟฟ้าสูงสุด 650 W ลมร้อนผลิตจากขดลวดความร้อนขนาด 5 kW ทำอุณหภูมิสูงสุด 100°C และพัดลมเชื่อมต่อกับมอเตอร์ขนาด 0.25 hp เพื่อขับเคลื่อนอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งและทำความเร็วได้สูงสุด 2 m/s



รูปที่ 1 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

2.2 การเตรียมเพลดเทอร์โมมิเตอร์

เพลดเทอร์โมมิเตอร์ (Plate Thermometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวของวัสดุทำจากแผ่นสังกะสีติดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100x100 mm² ด้านหน้าติดเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K บริเวณกึ่งกลางและปิดทับด้วย

ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์บอร์ดหนา 10 mm เชื่อมต่อกับ ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์

2.3 ขั้นตอนและวิธีการเก็บข้อมูล

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าความเข้มรังสี โดยพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 60 และ 80°C กำลังอินฟราเรด 300 450 และ 600 W ความเร็วลม 1.0 m/s และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิด และแผ่นเพลต 200 mm ในระหว่างการทดลองได้บันทึก อุณหภูมิเข้า/ออกจากห้องอบแห้ง อุณหภูมิผิวแผ่นเพลต (T_s) และอุณหภูมิผิวอินฟราเรด (T_{IR}) โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลเชื่อมต่อกับดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ (มีค่าความแม่นยำ $\pm 0.1^\circ\text{C}$) บันทึกทุกๆ 15 นาที และทำการทดลอง เงื่อนไขละ 3 ซ้ำ

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอบแห้งด้วย อินฟราเรดร่วมกับลมร้อนจะประกอบด้วย การถ่ายเท ความร้อนโดยการพาและการแผ่รังสี

3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาเป็นการถ่ายเท ความร้อนที่เกิดจากอากาศไหลผ่านจากแหล่งกำเนิด ไปยังห้องอบแห้ง เมื่อของไหลไหลสัมผัสกับผิววัตถุทำให้เกิดความแตกต่างกันของอุณหภูมิของอากาศกับผิวแผ่นเพลต โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ($\dot{q}_c$) หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการที่ 1

$$\dot{q}_c = h_c (T_a - T_s) \quad (1)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (h_c) เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับลักษณะการไหล ความเร็ว อุณหภูมิ ของไหล และขนาดห้องอบแห้ง เป็นต้น โดยการคำนวณ จะพิจารณาจากค่า Nusselt number (Nu) กรณีการไหล แบบราบเรียบด้วยแรงจากภายนอกและค่า Prandtl number (Pr) อยู่ในช่วงของ $0.6 \leq Pr \leq 50$ สามารถหาค่า Nu ได้จากสมการที่ 2 [3-5]

$$Nu = \frac{h_c L}{k} = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2)$$

เมื่อ k คือสภาพนำความร้อนของอากาศ ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), Re คือ Reynolds number ($Re = \rho v L / \mu$), Pr คือ Prandtl

number ($Pr = \mu c_p / k$), ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3), v คือความเร็วของอากาศ (m/s), L คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง (m), μ คือความหนืดของอากาศ ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$), T_a คืออุณหภูมิของอากาศ ($^\circ\text{C}$) และ T_s คืออุณหภูมิผิวของแผ่นเพลต ($^\circ\text{C}$)

3.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเป็นการถ่ายเท ความร้อนโดยการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจาก อิเล็กตรอนภายในอะตอมลดลงจนถึงจุดที่ต่ำกว่าพลังงาน ที่ใช้ในการโคจรตามกฎของ Stefan-Boltzmann โดย อัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิ ($\dot{q}_{rad}$) ที่เกิดขึ้น ระหว่างผิวแผ่นเพลตกับอากาศ หาได้จากสมการที่ 3 [7]

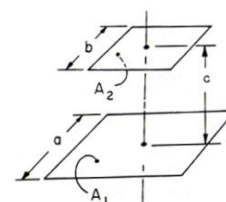
$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon \sigma F_{1 \rightarrow 2} (T_a^4 - T_s^4) \quad (3)$$

ทำการจัดสมการใหม่ ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (h_r) ได้จากสมการที่ 4

$$\dot{q}_{rad} = h_r (T_a - T_s) \quad (4)$$

เมื่อ ε คือค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี, σ คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), h_r คือค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี และ $F_{1 \rightarrow 2}$ คือตัวแปรรูปร่าง

ปริมาณความร้อนที่ตกกระทบบนของแผ่นเพลตจะ ขึ้นกับตำแหน่งการวางและระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต กับแหล่งกำเนิด สามารถอธิบายได้จากตัวแปรรูปร่าง (radiation configuration factor) ดังรูปที่ 2 เป็นการแผ่ รังสีที่จากผิว A_2 ไปยังผิว A_1 โดยตรง และสามารถหา ค่าตัวแปรรูปร่างจากสมการที่ 5



รูปที่ 2 การหาค่าแฟกเตอร์รูปร่าง [8-9]

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi A^2} \left\{ \ln \left[\frac{(A^2(1+B^2)+2)^2}{(Y^2+2)(X^2+2)} \right] + (Y^2+4)^{1/2} \left[Y \tan^{-1} \left(\frac{Y}{(Y^2+4)^{1/2}} \right) - X \tan^{-1} \left(\frac{Y}{(Y^2+4)^{1/2}} \right) \right] + (X^2+4)^{1/2} \left[X \tan^{-1} \left(\frac{X}{(X^2+4)^{1/2}} \right) - Y \tan^{-1} \left(\frac{Y}{(Y^2+4)^{1/2}} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

โดยที่ $A=a/c$, $B=b/a$, $X=A(1+B)$ และ $Y=A(1-B)$

ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิ ($\dot{q}_{net}$) เท่ากับผลรวมของอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการแผ่รังสี ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (h_T) หาได้จาก

$$h_T = h_c + h_r \quad (6)$$

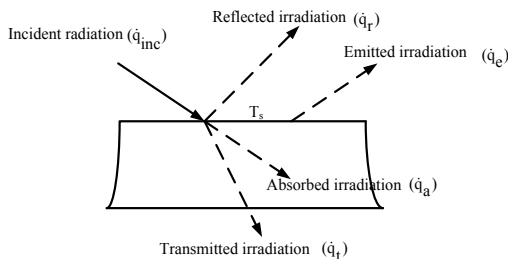
3.2 การวิเคราะห์ค่าความเข้มรังสีอินฟราเรด

ความเข้มของรังสีอินฟราเรด ($\dot{q}_{inc}$) เป็นปริมาณความเข้มรังสีที่แผ่จากแหล่งกำเนิดมายังแผ่นเพลต โดยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี (α) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (ε) และค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (τ) ของแผ่นเพลต การคำนวณหาความเข้มรังสีด้วยวิธีเพลตเทอร์โมมิเตอร์หาได้จากการทำสมดุลความร้อน ดังรูปที่ 3 ปริมาณรังสีจากแหล่งกำเนิดมายังแผ่นเพลต ความร้อนบางส่วนถูกดูดกลืนด้วยแผ่นเพลต ($\dot{q}_a$) ดังสมการที่ 7 บางส่วนทะลุผ่านแผ่นเพลต ($\dot{q}_t$) แต่เนื่องจากแผ่นเพลตทำจากวัสดุทึบแสงและมีการหุ้มฉนวน ทำให้รังสีไม่สามารถทะลุผ่านได้ ($\tau=0$) ความร้อนบางส่วนที่ตกกระทบบนแผ่นเพลตถูกสะท้อนกลับ ($\dot{q}_r$) ดังสมการที่ 8 และเมื่อแผ่นเพลตได้รับรังสีเกิดความร้อนสะสมทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (T_s) และแผ่รังสีความร้อนออกมาจากผิววัสดุ ($\dot{q}_e$) ดังสมการที่ 9 [4-5]

$$\dot{q}_a = \varepsilon \dot{q}_{inc} \quad (7)$$

$$\dot{q}_r = (1 - \varepsilon) \dot{q}_{inc} \quad (8)$$

$$\dot{q}_e = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (9)$$



รูปที่ 3 ลักษณะของแผ่นเพลตเทอร์โมมิเตอร์และการทำสมดุลความร้อน [10-11]

จากการทำสมดุลความร้อนบนแผ่นเพลต จะได้ความร้อนจากการแผ่รังสีสุทธิ ($\dot{q}_{rad}$) สมการที่ 10 [12]

$$\dot{q}_{rad} = \dot{q}_{inc} - \dot{q}_e - \dot{q}_r = \varepsilon (\dot{q}_{inc} - \sigma T_s^4) \quad (10)$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิเท่ากับผลรวมของอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการแผ่รังสี ดังสมการที่ 11

$$\dot{q}_{net} = h_c (T_a - T_s) + \varepsilon F_{1 \rightarrow 2} (\dot{q}_{inc} - \sigma T_s^4) \quad (11)$$

จากนั้นเมื่อแผ่นเพลตได้รับความร้อนจากลมร้อนและรังสีอินฟราเรดเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจากอากาศไปยังแผ่นเพลตโดยการนำความร้อนเกิดความร้อนสะสมในแผ่นเพลต ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิภายในแผ่นเพลตเท่ากับผลรวมของอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ($\dot{q}_d$) และความร้อนสะสมภายในแผ่นเพลต ($\dot{q}_s$) ดังสมการที่ 12 และ 13 จะได้

$$\dot{q}_d = \frac{k}{d} (T_s - T_a) \quad (12)$$

$$\dot{q}_s = \rho p c_p d \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\text{จะได้ } \dot{q}_{net} = \frac{k}{d} (T_s - T_a) + \rho p c_p d \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \quad (14)$$

จากการทำสมดุลความร้อนสามารถหาค่าความเข้มรังสีอินฟราเรดจากสมการที่ 15 และ 16 [4-5]

$$h_c (T_a - T_s) + \varepsilon F_{1 \rightarrow 2} (\dot{q}_{inc} - \sigma T_s^4) = \frac{k}{d} (T_s - T_a) + \rho p c_p d \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \quad (15)$$

$$\dot{q}_{inc} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(h_c + \frac{k}{d} \right) (T_s - T_a) + \rho p c_p d \frac{\Delta T_s}{\Delta t} + \varepsilon \sigma T_s^4 \right] \quad (16)$$

เมื่อ d คือความหนาของแผ่นสังกะสี (0.25 mm), p คือความหนาแน่นของสังกะสี (7,833 kg/m³) และ c_p คือค่าความจุความร้อนของสังกะสี (502 J/kg·K) และ ΔT_s คือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพลตในช่วงเวลา Δt

3.3 การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความเข้มรังสีที่มีสัมพันธ์กับกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้ง โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้วิธีถดถอย (regression analysis) ด้วยโปรแกรม Statistica 7.0 และพิจารณาสมการที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R^2) และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) ดังสมการที่ 17 และ 18 ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{pre,i} - X_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{X}_{pre,i} - X_{exp,i})^2} \quad (17)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{pre,i} - X_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

เมื่อ $X_{exp,i}$, $X_{pre,i}$, $\bar{X}_{pre,i}$ คือค่าตัวแปรจากการทดลอง ค่าจากการคำนวณ และค่าเฉลี่ยจากการคำนวณ ตามลำดับ และ N คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

3.4 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้อุณหภูมิอบแห้งตั้งแต่ 40–80°C และกำลังอินฟราเรดตั้งแต่ 300–600 W ซึ่งทำการทดลองเงื่อนไขละ 3 ซ้ำ โดยนำเสนอข้อมูลในรูปของค่าเฉลี่ย และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน อีกทั้งได้วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One Way Anova) ด้วยวิธีการทดสอบของ Duncan ที่ระดับความน่าเชื่อมั่น 95%

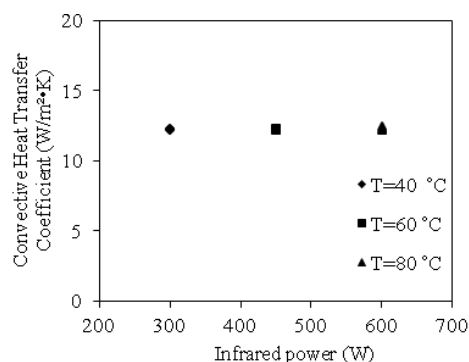
4. ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

4.1 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อน

4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

การถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งโดยเกิดจากแหล่งกำเนิดความร้อน 2 แหล่ง คือแหล่งกำเนิดลมร้อนและรังสีอินฟราเรด การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (h_c) ด้วยการวิเคราะห์ค่าตัวแปรไร้มิติ ดังสมการที่ 2 เพื่อหาค่า Nusselt number (Nu), Reynolds number (Re) และ Prandtl number (Pr) โดยค่า Re และ Pr ซึ่งเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของการไหลของอากาศและอุณหภูมิของอากาศ โดยได้กำหนดให้ความเร็วของอากาศไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งคงที่ที่ 1.0 m/s ขณะที่ค่าความหนาของอากาศ ค่าความหนาแน่นของอากาศ และค่าความจุความร้อนของของอากาศ ซึ่งเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอากาศซึ่งเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ส่งผลให้ค่า Nu, Re และ Pr มีค่าค่อนข้างคงที่ เท่ากับ 42.48 ± 2.66 , $5,172.59 \pm 643.99$ และ 0.708 ± 0.002 ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาเท่ากับ $12.25 \pm 0.07 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าเนื่องจากได้ความเร็วของของไหลด้วยคงที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่ ขณะที่

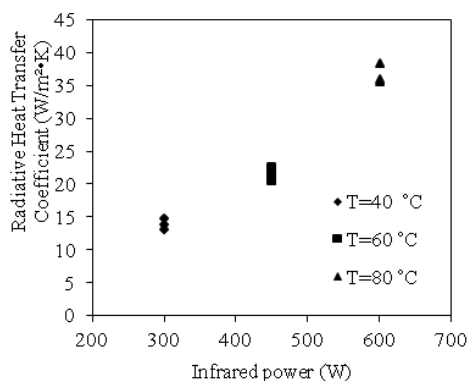
การเพิ่มกำลังอินฟราเรดไม่มีผลต่อค่าดังกล่าว เนื่องจากการแผ่รังสีเป็นการถ่ายเทความร้อนที่ไม่อาศัยตัวกลาง จึงไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของอากาศ ทำให้ไม่มีผลต่อค่า Nu, Re, Pr และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาด้วย จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการของดันแคน (Duncan) พบว่า กำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความน่าเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ingason และ Wickstrom [5] และ Nuthong [6]



รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยแผ่รังสี

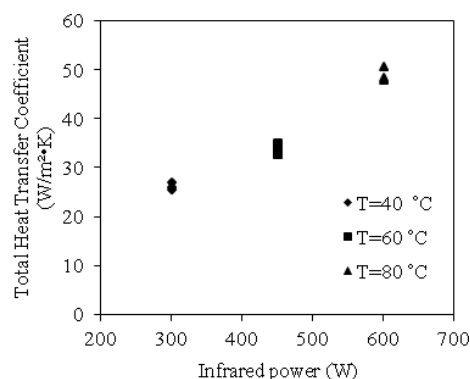
การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งกำเนิดเป็นการศึกษาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (h_r) ด้วยวิธีการกำลังสองถดถอยน้อยที่สุดที่กำลังอินฟราเรด 300 450 และ 600 W พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมีค่าเท่ากับ 14.12 ± 0.82 , 20.36 ± 0.07 และ $34.93 \pm 1.11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ตามลำดับ ตารางที่ 1 และรูปที่ 5 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรดส่งผลให้อุณหภูมิผิวของแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานจากการแผ่รังสีเพิ่มขึ้นตามกฎของ Stefan-Boltzmann ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งภายในห้องอบแห้ง ที่ระดับกำลังอินฟราเรดเดียวกัน พบว่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความน่าเชื่อมั่น 95% [5]



รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (h_T) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการแผ่รังสี จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่า 26.39 ± 0.76 , 32.63 ± 0.11 และ 47.15 ± 1.13 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ที่กำลังอินฟราเรด 300 450 และ 600 W ตามลำดับ ดังรูปที่ 6 ซึ่งการเพิ่มขนาดกำลังอินฟราเรดจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากกำลังอินฟราเรดมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี แต่ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา ทำ



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม

ตารางที่ 1 ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความเข้มรังสีอินฟราเรด

P (W)	T (°C)	h_c (W/m²·K)	h_r (W/m²·K)	$h_r \pm \text{SD}$ (W/m²·K)	h_T (W/m²·K)	$h_T \pm \text{SD}$ (W/m²·K)	$\dot{q}_{\text{inc}}$ (kW/m²)
300	40	12.27±0.06	13.33	14.12±0.82	25.66	26.39±0.76	0.60
	60		14.07		26.34		0.71
	80		14.97		27.18		0.88
450	40	12.27±0.06	20.36	20.36±0.07	32.69	32.63±0.11	0.64
	60		20.43		32.70		0.80
	80		20.30		32.51		1.03
600	40	12.21±0.11	34.61	34.93±1.11	46.94	47.15±1.13	0.79
	60		34.02		46.13		0.92
	80		36.16		48.37		1.21

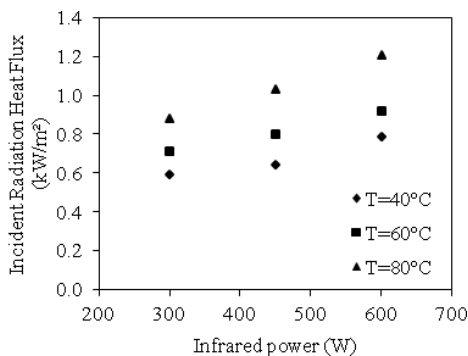
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มรังสีอินฟราเรด

การวิเคราะห์ค่าความเข้มรังสีอินฟราเรด ($\dot{q}_{\text{inc}}$) โดยใช้เพลตเทอร์โมมิเตอร์ โดยนำข้อมูลมาคำนวณค่าความเข้มรังสีด้วยวิธีการกำลังสองถดถอยน้อยที่สุดที่

กำลังอินฟราเรด 300 450 และ 600 W และอุณหภูมิอบแห้ง 40 60 และ 80°C พบว่าค่าความเข้มรังสีมีค่าในช่วง 0.60 ถึง 1.21 kW/m^2 ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 7 โดยที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน เมื่อเพิ่มขนาดกำลัง

ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความน่าเชื่อมั่น 95% ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดเดียวกัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความน่าเชื่อมั่น 95% เนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแต่ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลให้การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจึงไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม

อินฟราเรดจะทำให้ค่าความเข้มข้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรดเป็นการเพิ่มระดับพลังงานบริเวณผิวของแหล่งกำเนิด ทำให้มีอุณหภูมิผิวของแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการแผ่รังสีจากแหล่งกำเนิดมายังแผ่นเพลตเพิ่มขึ้นตามกฎของ Stefan-Boltzmann ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของรังสีบริเวณแผ่นเพลตเพิ่มขึ้น ขณะที่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้ค่าความเข้มข้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งจะมีผลต่อการพาความร้อนภายในห้องอบแห้งและการนำความร้อนจากอากาศไปยังแผ่นเพลต โดยค่าทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งจะส่งผลทำให้ความเข้มข้นที่สะสมในแผ่นเพลตเพิ่มขึ้นด้วย ดังสมการที่ 16 ส่งผลให้อุณหภูมิมีผลต่อความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความน่าเชื่อมั่น 95% [5-6]



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นอินฟราเรด

4.3 การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์

4.3.1 สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

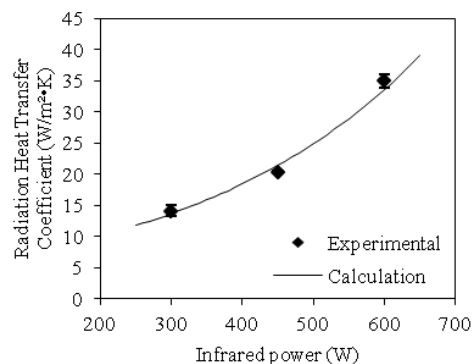
การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนซึ่งประกอบด้วยสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี และสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้ง (T) และกำลังอินฟราเรด (P) จากการศึกษาที่ผ่านมาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะการไหลของอากาศ จากการศึกษาได้กำหนดให้การไหลของอากาศคงที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงการศึกษา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การ

ถ่ายเทความร้อน ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีและสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีความสัมพันธ์กับกำลังอินฟราเรด จากการศึกษาในหัวข้อ 4.1.2 และ 4.1.3 เมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรดทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นในลักษณะเอ็กโปเนนเชียล ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกำลังอินฟราเรดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ผิวแหล่งกำเนิดเพิ่มมากขึ้นด้วย อันจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองเพิ่มขึ้นด้วย

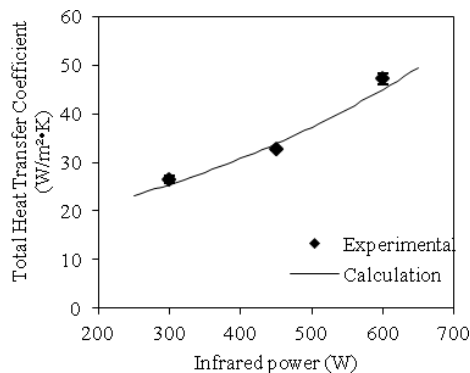
ดังนั้นการพัฒนาสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งสองมีความสัมพันธ์กับกำลังอินฟราเรดในรูปแบบสมการเอ็กโปเนนเชียลมีความเหมาะสม ดังสมการที่ 19 และ 20 ตามลำดับ ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีและสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมที่ได้จากสมการกับผลการทดลองสามารถทำนายได้ค่อนข้างดี ดังรูปที่ 8 และ 9 โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.981 และ 0.964 และค่า RMSE เท่ากับ 0.020 และ 0.036 ตามลำดับ

$$h_r = 5.5452 e^{0.0030P} \quad (19)$$

$$h_T = 14.3905 e^{0.0019P} \quad (20)$$



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีจากการคำนวณกับการทดลอง

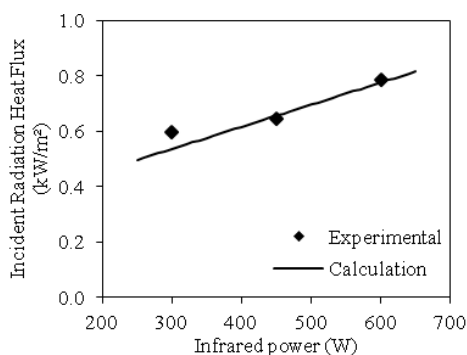


รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมจากการคำนวณกับการทดลอง

4.3.2 สมการความเข้มของรังสีอินฟราเรด

การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ของค่าความเข้มรังสีอินฟราเรดเป็นการสร้างความสัมพันธ์ที่ได้จากเส้นแนวโน้มของค่าความเข้มรังสีที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอบแห้งและกำลังอินฟราเรด จากการศึกษาในหัวข้อ 4.2 โดยความเข้มรังสีมีพฤติกรรมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและกำลังอินฟราเรดในลักษณะเชิงเส้น ดังนั้น การพัฒนาสมการความเข้มรังสีที่เกิดขึ้นกับเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า สมการความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีกับกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้งในรูปสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 21 จะมีความเหมาะสม และเมื่อนำสมการมาใช้นำมาทำนายผลการทดลองพบว่าสามารถทำนายได้ค่อนข้างดี ดังรูปที่ 10 โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.959 และ RMSE เท่ากับ 0.041

$$\dot{q}_{inc} = 0.0008P + 0.0091T - 0.0682 \quad (21)$$



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสีอินฟราเรดจากผลการคำนวณกับการทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 40°C

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนและความเข้มรังสีที่เกิดขึ้นกับเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 60 และ 80°C กำลังอินฟราเรด 300 450 และ 600 W ความเร็วลม 1.0 m/s และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีและแผ่นเพลต 200 mm พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนมีค่า $12.25 \pm 0.07 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมีค่า 13.33 ถึง 36.16 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่า 25.66 ถึง 48.37 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ และความเข้มของรังสีอินฟราเรดด้วยวิธีเพลตเทอร์โมมิเตอร์ พบว่า มีค่าในช่วง 0.60 ถึง 1.21 kW/m^2 โดยกำลังอินฟราเรดมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ขณะที่อุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ และความเข้มของรังสีเพิ่มขึ้นเมื่อขณะที่ทั้งอุณหภูมิอบแห้งและกำลังอินฟราเรดมีอิทธิพลต่อค่าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความน่าเชื่อมั่น 95% และจากการพัฒนาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พบว่ามีความสัมพันธ์กับกำลังอินฟราเรดในรูปแบบสมการเอ็กโปเนนเชียล ขณะที่ความเข้มของรังสีความสัมพันธ์กับกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้งในรูปแบบสมการเส้นตรง ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนายผลการทดลองได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่ทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S. 2007. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. Journal of Food Engineering, 81: 459–468.
- [2] Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Numsanguan, Y. and Achariyaviriya, S. 2011. Kinetics and Modeling of Whole Longan with Combined Infrared and Hot Air. Journal of Food Engineering, 102: 233–239.

- [3] ภราดร หนูทอง, ชีรพงษ์ วุฒิมาม, นราวัฒน์ ปันพะสงค์, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และอารีย์ อัจฉริยวิริยะ. 2551. การพัฒนาเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, 15-17 ตุลาคม 2551.
- [4] สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2552. สมบัติทางการแผ่รังสีอินฟราเรดของการอบแห้งลำไยแผ่น. การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 8, จังหวัดเชียงราย, 12-13 มีนาคม 2552.
- [5] Ingason, H. and Wickstrom, U. 2006. Measuring incident radiant heat flux using the plate thermometer. *Fire Safety Journal*, 42: 161-166.
- [6] Nuthong, P. 2011. Continuous whole longan drying by infrared and hot air. Doctor's of Engineering in Energy Engineering Thesis. Chiang Mai University.
- [7] Peter S.C. 2010. Measuring radiation heat fluxes from a jet fire using a lumped capacitance model. *Fire Technology*, 47: 665-685.
- [8] Modest, M. F. 1993. Radiation heat transfer. McGraw-Hill, New York.
- [9] Siegel, R. and Howell, J.R. 1992. Thermal radiation heat transfer. 3rd ed. McGraw-Hill, New York.
- [10] Martins, L.L., Ribeiro, A.S. and Santos, C.P. 2009. Study of the influence of convective effects in incident radiative heat flux density measurement uncertainty. XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, Portugal, September 6-11, 2009.
- [11] Sun, D.W. 2006. Thermal Food processing: New technologies and quality issues. Taylor & Francis Group, NW, 493-526.
- [12] Xue, S.C., Poladian, L., Barton, G.W. and Large, M.C.J. 2007. Radiative heat transfer in performs for microstructure optical fibres. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50: 1569-1576.