

การจำลองแบบการตอบสนองเชิงอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าขนาดเล็กโดยไม่ต้องใช้ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

A Simulation of Temperature Responses of a Small Electrical Oven without Using Thermal Emissive Coefficients

วงศ์ วัชรอดมประเสริฐ¹ และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ์²
Wong Watcharodomprasert¹ and Wichai Siwakosit²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงการจำลองแบบทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า เพื่อหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของวัตถุภายในเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยไม่ต้องใช้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุในเตาอบ บทความนี้ได้แสดงการสร้างแบบจำลองโดยใช้ Correction Filter เพื่อชดเชยผลของสัมประสิทธิ์ดังกล่าว และทำให้การตอบสนองเชิงอุณหภูมิของแบบจำลองแม่นยำขึ้น บทความนี้ยังแสดงผลการทดสอบแบบจำลอง กับอลูมิเนียมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่างๆ และ เปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยอื่น และ ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ผลปรากฏว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการตอบสนองเชิงอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ดี

Abstract

This study shows a thermal model simulation of an electrical oven for its temperature responses without using thermal emissive coefficients of objects. This paper uses correction filters to compensate for the effect of the above coefficient in the model, and to make the responses more accurate. Also, comparative results from the model with aluminum blocks of different thermal emissivities, a model of a related work, and experiments are shown and discussed. The outcome indicates that the model introduced herein has predicted thermal responses well.

Key Words: electrical oven, thermal emissivity, temperature response

W. Siwakosit: wichai.s@ku.ac.th

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok

คำนำ

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีมีความยากในการหาค่าให้ได้ผลลัพธ์ที่แน่นอน งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากการสร้างแบบจำลองทางความร้อนที่ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองของเตาอบไฟฟ้าเพื่อหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของวัตถุภายในเตาอบในสภาวะต่างๆ โดยไม่ต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี โดยจะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองและแบบจำลองจากงานวิจัยอื่น

ได้มีงานวิจัยต่างๆ ซึ่งศึกษาผลของการการแผ่รังสีที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาอบ โดยที่ Shaughnessy et al.(1999) [4] ออกแบบเตาไฟฟ้าที่มีการแผ่รังสีต่ำ (low-emissivity oven) ขนาด 63 ลิตร ซึ่งภายนอกเตาอบหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 25 มิลลิเมตร ภายในเตาอบปิดด้วยอลูมิเนียมอัลลอยหนา 0.9 มิลลิเมตร เพราะอลูมิเนียมอัลลอยมีค่าการแผ่รังสีต่ำโดยมีค่าเพียง 0.07 และมีความทนต่ออุณหภูมิสูงได้ Scarisbrick(1994) [3] ได้ออกแบบเตาอบไฟฟ้าที่มีการแผ่รังสีต่ำ (low-emissivity oven) ขนาด 64 ลิตร ภายนอกหุ้มด้วยฉนวนหนา 25 มิลลิเมตร และภายในตู้อบปิดด้วยแผ่นสะท้อนรังสีทุกด้าน ซึ่งจะทำให้เตาอบมีค่าการแผ่รังสี และ ค่าการดูดกลืนรังสีต่ำ Abraham และ Sparrow (2001) [1] ได้ทำการศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้า เน้นศึกษาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของวัตถุภายในเตาอบจากการแผ่รังสี โดยทดลองอบอลูมิเนียม อลูมิเนียมทาสีดำ และ อลูมิเนียมหุ้มด้วยฟอยล์ และได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัตถุภายในตู้อบไฟฟ้า จากการพาความร้อนจากอากาศภายในเตาอบ และ การแผ่รังสีจากผนังเตาอบไฟฟ้า

อุปกรณ์และวิธีการ

เตาอบไฟฟ้าที่ใช้เป็นเตาอบขนาดเล็กยี่ห้อ OTTO รุ่น CO758 1200 Watt ขนาด 23 ลิตร ในการสร้างแบบจำลองของเตาอบไฟฟ้า ใช้หลักการของสมดุลพลังงาน โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\text{Heat} - \text{Heat loss} = mc\Delta T \quad (1)$$

Heat = พลังงานความร้อนที่ให้โดยฮีตเตอร์ หน่วย Watt

Heat Loss = $UA\Delta T_L$ = พลังงานความร้อนสูญเสียออกจากเตาอบไฟฟ้า หน่วย Watt

ΔT_L = อุณหภูมิแตกต่างระหว่างนอกและในเตาอบ หน่วย K A = พื้นที่ผนังเตาอบ หน่วย m^2

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังเตาอบ หน่วย $Watt/m^2.K$

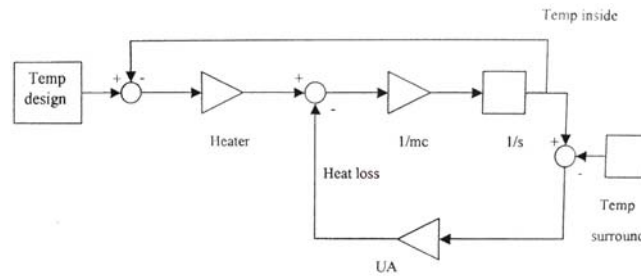
m = มวลของสสาร หน่วย kg

C = ความจุความร้อนจำเพาะของสสาร หน่วย $Watt/kg.K$

ΔT = อุณหภูมิของสสารที่เปลี่ยนไปภายในเตาอบไฟฟ้า หน่วย K

แบบจำลองเบื้องต้นนี้มีเตาอบไฟฟ้าเป็นระบบ และ สมมุติให้อุณหภูมิทุกตำแหน่งภายในเตาอบมีค่าเท่ากัน เมื่อได้สมการทางความร้อนแล้วจะใช้ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้าจากการทดลอง มาสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB[®] และ SIMULINK[®] ซึ่งการจำลองแบบเชิงตัวเลขนี้จะช่วยให้สามารถหาค่าอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการควบคุม

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงใน Block Diagram ดังรูปที่ 1 จะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังเตาอบ โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปร U และ ทำการจำลองแบบจนกระทั่งกราฟแสดงอุณหภูมิจากการจำลองแบบมีค่าใกล้เคียงกับกราฟจากการทดลองจริง



รูปที่ 1 แสดง Block Diagram ของแบบจำลอง

จากนั้นทำการเปรียบเทียบการเพิ่มอุณหภูมิของสสารที่ได้จากการจำลองแบบ และ ที่ได้จากการทดลอง ในกรณีที่ใส่อุณหภูมิเนยพอนด์ดำซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ประมาณ 0.90 และ อุณหภูมิเนยพอยล์ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ประมาณ 0.05 [2] ไว้ในเตาอบ ขนาดของก้อนอุณหภูมิเนยทั้งสองคือ 55x40x40 มม. ผลต่างจากการเปรียบเทียบจะใช้เป็นข้อมูลในการสร้าง Transfer Function เพื่อใช้กับแบบจำลองต่อไป รายละเอียดของการสร้างจะได้กล่าวในส่วนของผลการทดลอง

นอกจากนี้ จะทำการเปรียบเทียบแบบจำลองจากงานวิจัยนี้เทียบกับแบบจำลองของ Abraham และ Sparrow (2004) [2] ซึ่งสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของวัตถุโดยอาศัยสมการ

$$mc \frac{dT_{load}}{dt} = Q \quad (2)$$

โดยที่ Q = ความร้อนที่ถ่ายเทสู่วัตถุ หน่วย Watt m = มวลวัตถุ หน่วย kg

c = ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ หน่วย Watt/kg.K T_{load} = อุณหภูมิของวัตถุ หน่วย K

กำหนดให้อุณหภูมิของวัตถุมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่งบนวัตถุนั้น โดยการถ่ายเทความร้อนรวมสู่วัตถุนั้น เป็นผลจากความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากอากาศภายในตู้อบมายังวัตถุ และ ความร้อนจากการแผ่รังสี ดังสมการ

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (3)$$

โดย $Q_{conv} = \bar{h}_{conv} A_{load} (T_{air} - T_{load}) \quad (4)$

\bar{h}_{conv} = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของทั่วทั้งพื้นผิว หน่วย Watt/m².K

A_{load} = พื้นที่ผิวของวัตถุ หน่วย m² T_{air} = อุณหภูมิอากาศในตู้อบ หน่วย K

T_{load} = อุณหภูมิของวัตถุในเตาอบ หน่วย K

การแผ่รังสีความร้อนสุทธิ มีค่าเท่ากับ

$$Q_{rad} = \bar{h}_{rad} A_{load} (T_{wall} - T_{load}) \quad (5)$$

\bar{h}_{rad} = ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยของทั่วทั้งพื้นผิว หน่วย Watt/m².K

T_{wall} = อุณหภูมิของผนังเตาอบ หน่วย K

จากสมการ(2),(3),(4) และ (5) จะได้

$$mc \frac{dT_{load}}{dt} = \bar{h}_{rad} A_{load} (T_{walls} - T_{load}) + \bar{h}_{conv} A_{load} (T_{air} - T_{load}) \quad (7)$$

หากกำหนดให้มีการอุ่นอากาศภายในเตาอบจนกระทั่งอุณหภูมิผนัง มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศภายใน และ เท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม ($T_{walls} \approx T_{air} \approx T_{set-point}$) แล้วจึงใส่วัตถุลงไปในเตาอบ จากสมการ(7) จะได้

$$mc \frac{dT_{load}}{dt} = (\bar{h}_{rad} + \bar{h}_{conv}) A_{load} (T_{set-point} - T_{load}) \quad (8)$$

อินทิเกรตสมการ (8)

$$T_{load}(t) = T_{set-point} + (T_{load}^{initial} - T_{set-point}) e^{-wt} \quad (9)$$

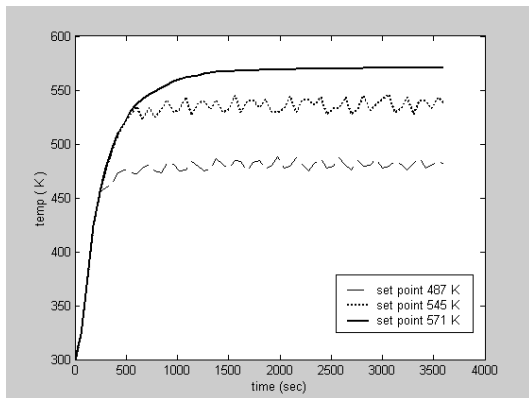
โดยที่ $w = (\bar{h}_{rad} + \bar{h}_{conv}) A_{load} / mc$ (10)

$T_{load}^{initial}$ = อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุในเตาอบ หน่วย K

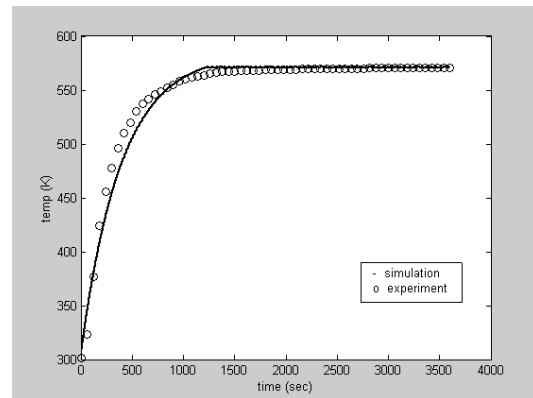
$T_{set-point}$ = อุณหภูมิที่ตั้งไว้ของเตาอบ หน่วย K

ผลการทดลองและวิจารณ์

เก็บข้อมูลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้าเมื่อทำการทดสอบอบตุ๋นปลาที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2

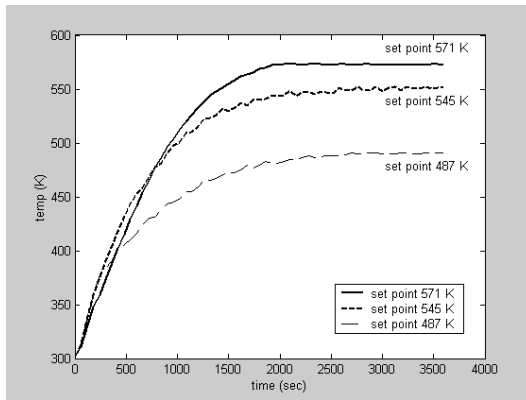


รูปที่ 2 แสดงค่าอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา

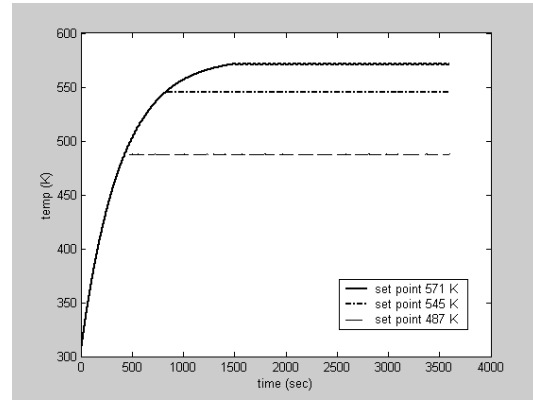


รูปที่ 3 แสดงอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้าจากการทดลอง และจากแบบจำลอง

รูปที่3 แสดงผลการเพิ่มอุณหภูมิจากการจำลองแบบ เทียบกับผลจากการทดลองจริง ซึ่งค่า UA ที่เหมาะสมเท่ากับ 4.4 kWatt/K รูปที่4 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอลูมิเนียมแผ่นสี่ด้านจากการทดลอง และจากการจำลองแบบพบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองแบบ มีการเพิ่มขึ้นเร็วกว่าจากการทดลอง รูปที่ 5 แสดงการใช้ Correction Filter มาช่วยทำให้ผลจากการจำลองแบบ มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นโดยที่ Step response ของ Correction Filter จะต้องสามารถชดเชยผลของค่าที่แตกต่างกันระหว่างแบบจำลอง และการทดลองได้

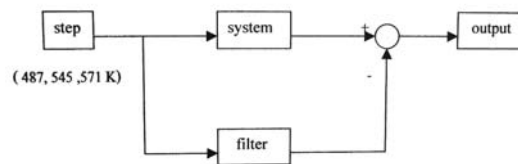


(ก)

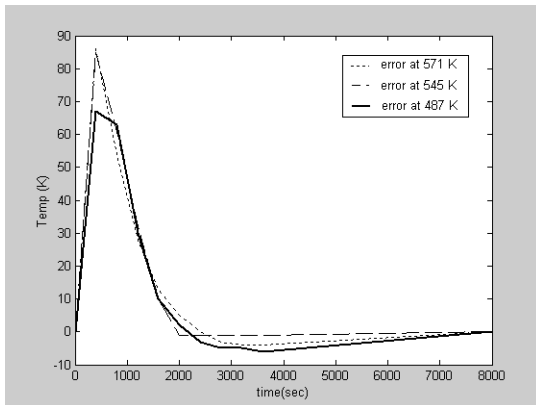


(ข)

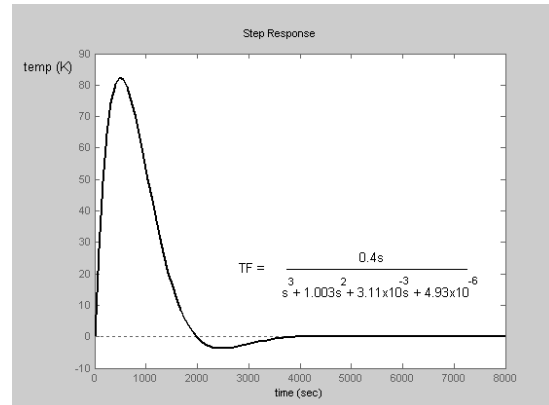
รูปที่ 4 (ก) แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอุณหภูมิเนี่ยมพ่นสึด้าจากผลการทดลอง
(ข) แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอุณหภูมิเนี่ยมพ่นสึด้าจากแบบจำลอง



รูปที่ 5 แสดง Block Diagram ของแบบจำลอง เมื่อใช้ Correction Filter



รูปที่ 6 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากการทดลอง และ จากแบบจำลอง

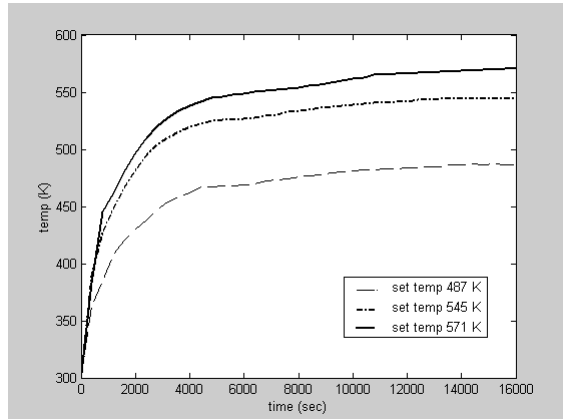


รูปที่ 7 แสดงค่า Step Response ของ Correction Filter

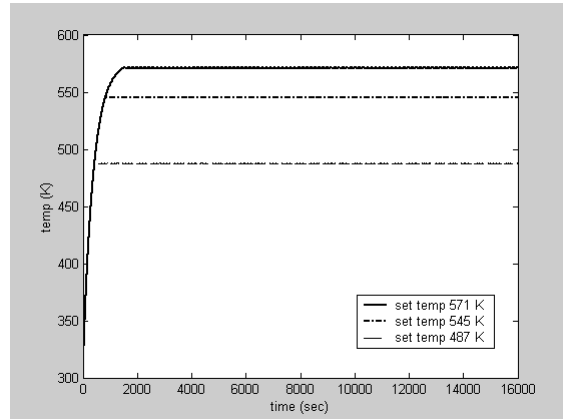
รูปที่6 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิทั้ง3 การทดลองพบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าเริ่มต้นจากศูนย์ และ มีค่าความแตกต่างสูงสุดที่ 500 วินาที และลดลงสู่ศูนย์อีกครั้งภายใน 8000 วินาที

รูปที่ 7 แสดงค่า Step Response ของ Correction Filter ที่ใช้ชดเชย ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง โดย Transfer Function ของ Correction Filter หาได้จากการ Trail and Error เป็น

$$TF = \frac{0.4s}{s^3 + s^2 + 3.11e - 3s + 4.93e - 6}$$
 ซึ่งเป็น Correction Filter ที่ใช้กับแบบจำลองของเตาอบที่ใส่ก้อนอลูมิเนียมสีดำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอลูมิเนียมหุ้มฟอยล์จากการทดลอง

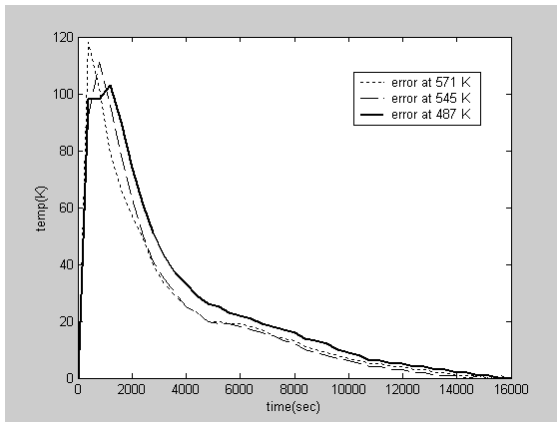
(ข) แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอลูมิเนียมหุ้มฟอยล์จากแบบจำลอง

รูปที่ 8 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอลูมิเนียมหุ้มฟอยล์จากการทดลอง และ จากการจำลอง แบบ พบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากการ จำลองแบบมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เร็วกว่าจากการทดลอง

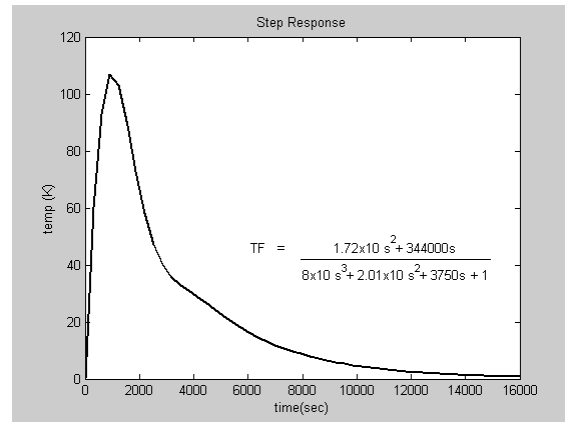
รูปที่ 9 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิทั้ง 3 การทดลอง พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าเริ่มต้นจากศูนย์ และ มีค่าความแตกต่างสูงสุดที่ 500 วินาที และลดลงสู่ศูนย์อีกครั้งภายใน 16000 วินาที รูปที่ 10 แสดงค่า Step Response ของ Correction Filter ที่ใช้ชดเชยค่าความคลาดเคลื่อน ของแบบจำลอง โดย Transfer Function ของ Correction Filter หาได้จากการ Trail and Error เป็น

$$TF = \frac{17.2s^2 + 344000s}{80s^3 + 20s^2 + 3750s + 1}$$
 ซึ่งเป็น Correction Filter ที่ใช้กับแบบจำลองของเตาอบที่ใส่ก้อนอลูมิเนียม

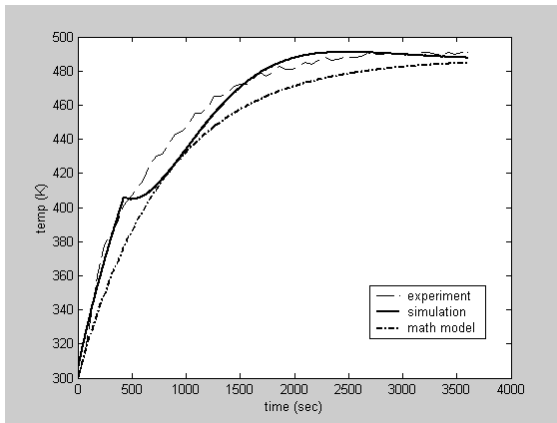
หุ้มฟอยล์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลจากการ Simulation แบบจำลองที่มีการใส่ Correction Filter กับงานวิจัยของ Abraham และ Sparrow (2004) [2] โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 11 ,12 , 13 และ 14 รูปที่ 11 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอลูมิเนียมพ่นสีดำที่ 487 K พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่าที่ต่ำกว่าการทดลองในช่วงเวลาที่ 500—1500 วินาที ส่วนค่าอุณหภูมิที่หาค่าได้โดยอาศัยสมการที่ 9 ต่ำกว่าค่าจากการทดลองตลอดช่วงการทดลอง 3600 วินาที รูปที่ 12 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอลูมิเนียมพ่นสีดำที่ 527 K พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ตลอดช่วงการทดลอง 3600 วินาที ส่วนค่าอุณหภูมิที่หาค่าได้โดยอาศัยสมการที่ 9 ต่ำกว่าค่าจากการทดลองในช่วงเวลา 1000-3600 วินาที



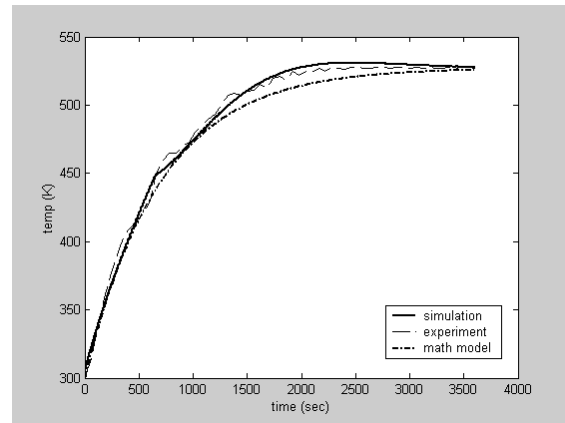
รูปที่ 9 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากการทดลอง และ จากแบบจำลอง



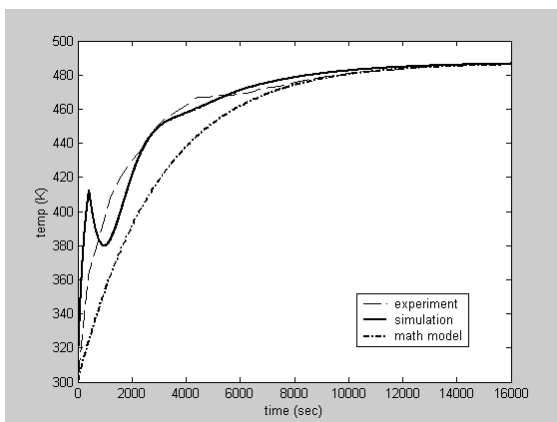
รูปที่ 10 แสดงค่า Step Response ของ Correction Filter



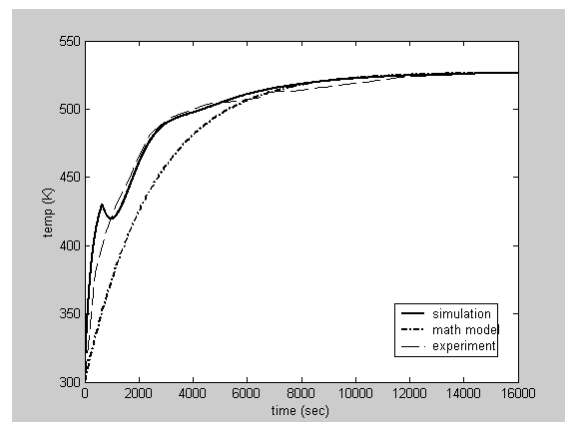
รูปที่11 แสดงเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นของการอบอุณหภูมิเนื้อมันสดดำที่ 487 K



รูปที่12 แสดงเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นของการอบอุณหภูมิเนื้อมันสดดำที่ 527 K



รูปที่13 แสดงเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นของการอบอุณหภูมิเนื้อมันฟอยล์ที่ 487 K



รูปที่14 แสดงเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นของการอบอุณหภูมิเนื้อมันฟอยล์ที่ 527 K

รูปที่ 13 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอุณหภูมิเนี่ยมหุ้มฟอยล์ที่ 487 K พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง หลังจาก 2000 วินาที ส่วนค่าอุณหภูมิที่หาค่าได้โดยอาศัยสมการที่ 9 ต่ำกว่าค่าจากการทดลองตลอดในช่วงการทดลอง 8000 วินาที จากนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง รูปที่ 14 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอุณหภูมิเนี่ยมหุ้มฟอยล์ที่ 527 K พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง หลังจาก 1000 วินาที ส่วนค่าอุณหภูมิที่หาค่าได้โดยอาศัยสมการที่ 9 ต่ำกว่าค่าจากการทดลองตลอดในช่วงการทดลอง 8000 วินาที จากนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการในการหาอุณหภูมิของวัตถุในเตาอบ โดยการหลีกเลี่ยงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และการแผ่รังสีโดยการสร้างแบบจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัตถุ และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง โดยทำการทดสอบกับอุณหภูมิเนี่ยมหุ้มที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่างๆ นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ผลปรากฏว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำนายการตอบสนองของเตาอบไฟฟ้าได้ดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Abraham, J.P. and E.M. Sparrow. 2001. Experiments on discretely heat, vented/unvented enclosures for various radiation surface characteristics of the thermal load, enclosure temperature sensor, and enclosure walls. **International Journal of Heat and Mass Transfer**.2002 (45): 2255-2263.
- [2] Abraham, J.P. and E.M. Sparrow. 2003. A simple model and validating experiments for predicting the heat transfer to a load situated in an electrically heated oven. **Journal of Food Engineering**. 2004 (62): 409-415.
- [3] Scarisbrick ,C. 1994. Improving the thermal performances of domestic electric oven. **Applied Energy**. 1991 (39): 263-300.
- [4] Shaughnessy, B.M. and M. Newborough. 1999. Energy performance of low- emissivity electrically heated oven. **Applied Thermal Engineering**. 2000 (20): 813-830.