

การเปรียบเทียบวิธีการหาผลเฉลยของค่าการแผ่รังสีความร้อนตกกระทบบนระหว่างการใช้ สมการเชิงเส้นและสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล

The Comparison of Solution Method Solving Incident Radiation between using Linear and Exponential Integrals Equation

จตุพล ป้องกัน และ บัณฑิต กฤดาคม*

ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพอรุส

(Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory: DiTo-Lab)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th และ jattupon_mp2r@hotmail.com, โทรศัพท์ 044 233 073, โทรสาร 044 233 074

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการหาผลเฉลยของค่าการแผ่รังสีความร้อนตกกระทบบน (Incident radiation, G) ระหว่างการใช้สมการเชิงเส้น (Linear equation) และสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล (Exponential integrals equation, E_n) ในสมการการแผ่รังสีความร้อน (Radiative heat transfer equation, RTE) โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัลอันดับ 1 (E_1) และอันดับ 2 (E_2) เป็นสมการเส้นตรงอย่างง่ายด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square) และช่วงของการประมาณค่าเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการเชิงเส้นกับ E_1 และ E_2 จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1.5 โดยทำการคำนวณที่สภาวะสื่อกลางมีส่วนร่วม (Participating media) ในระบบพิกัดแบบระนาบขนาน 1 มิติ (One dimensional plan parallel) ที่มีความหนา 5 เซนติเมตร และขอบเขตการคำนวณเป็นแบบวัตถุดำ (Black body) ที่มีอุณหภูมิผิวด้านล่างและด้านบนเท่ากับ 400 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการเปรียบเทียบพบว่าค่า G ที่คำนวณโดยใช้สมการเชิงเส้นของงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกันในช่วงคุณภาพกับการคำนวณโดยใช้ E_n เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึง 23 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก: สมการเชิงเส้น, การแผ่รังสีความร้อนตกกระทบบน, ระบบพิกัดแบบระนาบขนาน 1 มิติ

Abstract

This paper is to present the comparison of solution method for solving incident radiation (G) between using linear and exponential integrals equation (E_n) in radiative heat transfer equation (RTE). The first-order (E_1) and the second-order (E_2) of exponential integrals function were produced as the simple linear equation by using least square method. To validate the accuracy of the present linear equation, the predicted range of E_1 and E_2 was in between 0 – 1.5. In the calculation, the medium was considered in the participating media and one dimensional plane parallel. Medium thickness was 5 cm. and was bounded by black body boundary condition which the top and the bottom temperatures were 400 and 700 °C respectively. From the comparison, the quantity of G evaluated by the present linear equation

CST-189

was quality agreement with the solution obtained by E_n owing to the maximum error was reached to 23 percentage.

Keywords: linear equation, incident radiation, one dimensional plane parallel.

1. บทนำ

จากความยุ่งยากและซับซ้อนของสมการการแผ่รังสีความร้อน (Radiative transfer equation, RTE) โดยเฉพาะในสื่อตัวกลางที่มีส่วนร่วมกับกลไกการแผ่รังสีความร้อน (Participating media) เนื่องจาก RTE เป็นสมการแบบ integro-differential [1-2] หมายถึงสมการที่มีทั้งการอินทิเกรตและอนุพันธ์ภายในสมการเดียว ทำให้มีวิธีการหาผลเฉลยมากมาย [2] โดยทั่วไปการหาผลเฉลยมีสองวิธีใหญ่ๆ ได้แก่ วิธีแรกการหาผลเฉลยแบบแม่นยำตรง (Exact solution) จะใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการคำนวณ โดยเฉพาะการคำนวณด้วยวิธีผลเฉลยสมการมาตรฐานทั่วไป (Formal solution) ซึ่งวิธีนี้ก็มีข้อเสียคือความยากในการใช้งานสมการ เอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล (Exponential integrals equation, E_n) ส่วนวิธีที่สองคือ การหาผลเฉลยแบบประมาณ (Approximation solution) ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีดิฟฟิวชัน (Diffusion) วิธีสเฟียร์ฮาร์โมนิกส์ (Spherical-Harmonics) หรือที่รู้จักกันดีในชื่อของการประมาณแบบ P_N (P_N approximation) วิธีแบบดิสครีต-ออร์ดิเนต (Discrete ordinates) หรือเรียกอีกชื่อว่าวิธีการประมาณแบบ S_N เป็นต้น สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันนี้นิยมใช้วัสดุพรุน (Porous medium) เป็นสื่อตัวกลางที่มีส่วนร่วมกับกลไกการแผ่รังสีความร้อน [3-5] เนื่องจากวัสดุพรุนมีสมบัติที่โดดเด่น คือมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อน (Radiative absorption coefficient) สูง วัสดุพรุนอาจทำมาจากเซรามิกส์ โลหะโครงข่ายเปิด ทนความร้อนสูง (Open cellular metal) หรือตาข่ายหลายแผ่นวางซ้อนและอัดแน่นเข้าด้วยกัน จึงทำให้วัสดุพรุนมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงาน

ความร้อนระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนได้เป็นอย่างดี จากเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้การศึกษาและหาผลเฉลยของสมการการแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพรุนมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย

Viskanta และคณะ [6] ได้จัดรูปสมการมาตรฐานทั่วไป (Formal solution) ในการหาค่าฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน (Radiative heat flux) ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย คือเปลี่ยนเทอม Exponential integral function ให้เป็นฟังก์ชันของความเข้มการแผ่รังสี (Intensities radiation) ที่บริเวณผิวหรือขอบเขตวัสดุพรุน ผลการคำนวณที่น่ามีความน่าเชื่อถือคือ Kamiuto และคณะ [7] ได้ใช้ P_1 approximation ในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดร่วมกันระหว่างการนำความร้อน (Conductive heat transfer) กับการแผ่รังสีความร้อน ผลเฉลยที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี Krittacom และ Kamiuto [8] ได้ทำการปรับปรุงวิธี P_1 approximation ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายปัญหาการแผ่รังสีความร้อนเป็นหลัก วิธีที่ทำการปรับปรุงนี้ให้ผลเฉลยที่แม่นยำละเอียดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำอื่น ๆ

อย่างไรก็ตามงานส่วนใหญ่ที่กล่าวมาข้างต้นก็ยังเป็นเพียงการพัฒนาการหาผลเฉลยในวิธีโดยประมาณเป็นหลัก ซึ่งส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น หรือหากพัฒนาในวิธีแม่นยำก็อาจเป็นการหาแนวทางปรับปรุงผลเฉลยทางอ้อมเท่านั้น และแต่ละวิธีล้วนมีความยุ่งยาก ซับซ้อน ต้องใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงในการคำนวณ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการคำนวณหาผลเฉลยอย่างง่ายแต่มีความแม่นยำ โดยปรับเปลี่ยนสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัลอันดับ 1 (E_1) และอันดับ 2 (E_2) เป็นสมการเส้นตรงอย่างง่ายด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square) จะทำเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการแผ่รังสี

CST-189

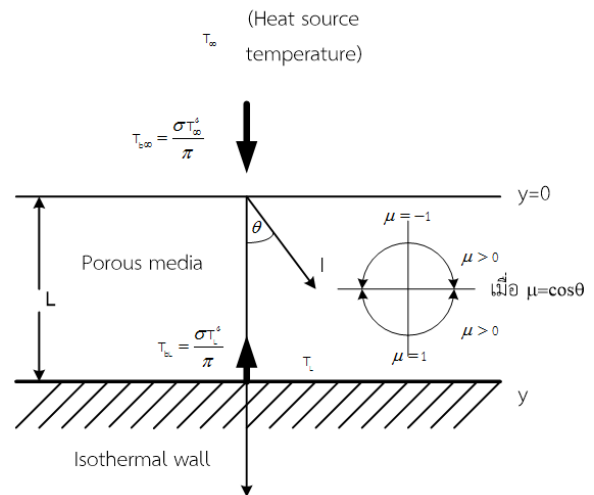
ความร้อนตกกระทบ (Incident radiation, G) ที่ได้จากสมการเชิงเส้น E_1 และ E_2 กับผลเฉลยแม่นยำตรงแบบมาตรฐานทั่วไป (Formal solution) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของสมการเชิงเส้นที่สร้างขึ้น

2. หลักการและแบบจำลองทางกายภาพ

รูปที่ 1 แสดงรูปแบบทางกายภาพของการศึกษาพฤติกรรมการณ์แผ่รังสีของวัสดุพอร์นที่ได้รับจากแหล่งความร้อนใด ๆ ภายนอก โดยกำหนดให้วัสดุพอร์นถูกบรรจุอยู่ในช่องฉนวนกันความร้อน (Thermal insulation) ทำให้ด้านข้างและด้านล่างไม่มีการสูญเสียความร้อน แต่ด้านบนจะเปิดสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งด้านนี้ จะได้รับการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) จากแหล่งพลังงานใด ๆ ที่มีอุณหภูมิ T_∞ จากรูปแบบทางกายภาพนี้ สมมติฐานที่จำเป็นในการคำนวณมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) การคำนวณเป็นแบบระนาบขนานหนึ่งมิติ (One-dimensional plane-parallel) และวัสดุเป็นแบบเทา (Gray medium) มีความหนา (Porous thickness) เท่ากับ L
- 2) ขอบเขตด้านล่าง (A lower boundary) เป็นแบบวัตถุดำ (Black body) ได้รับอุณหภูมิคงที่ T_L พร้อมทั้งมีสมบัติเป็นเสมือนผนังไอโซเทอร์มอล (Isothermal wall) ซึ่งจะแผ่รังสีความร้อน ส่วนขอบเขตด้านบน (An upper boundary) เปิดสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอุณหภูมิ T_∞ ซึ่งจะแผ่รังสีตกกระทบมายังวัสดุพอร์นแบบวัตถุดำ (Black body) และภายนอกไม่มีอากาศหรือของไหลใด ๆ ไหลผ่าน
- 3) วัสดุพอร์นมีความเป็นเนื้อเดียว (Homogenous media) มีความสามารถในการดูดซับรังสีความร้อน (Absorbing radiation) และการกระจายรังสีความร้อน (Emitting radiation) แต่ไม่เกิดการกระเจิงรังสีความร้อน (Scattering radiation)

- 4) ภายในวัสดุพอร์นไม่เกิดการแผ่รังสีความร้อนของสถานะแก๊ส (อากาศ) เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสถานะของแข็ง (เนื้อวัสดุพอร์น)
- 5) สมบัติทางกายภาพของระบบไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
- 6) การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพอร์นเป็นสภาวะคงที่ (Steady state)



รูปที่ 1 รูปแบบทางกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3. สมการการคำนวณ

จากสมมติฐานทั้ง 6) ข้อ สมการควบคุมหลัก (Governing equation) ที่ใช้แก้ปัญหาการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพอร์นที่ได้รับพลังงานความร้อนใด ๆ จากภายนอก กระทำได้โดยพิจารณาให้วัสดุพอร์นมีความต่อเนื่อง (Continuant) ดังนั้นจะได้สมการควบคุมหลักการแผ่รังสีความร้อน (Radiative heat transfer, RTE) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) คือ

$$\frac{\mu}{\kappa} \frac{dI(\mu)}{dy} = \frac{\sigma T_\infty^4}{\pi} - I(\mu) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} y = 0 : I(0) = T_\infty^4 \quad (y=0) &= \frac{\sigma T_\infty^4}{\pi} \\ y = L : I(L) = T_L^4 \quad (y=L) &= \frac{\sigma T_L^4}{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

CST-189

โดยทั่วไปปัญหาการแผ่รังสีจะนิยามกำหนดพิกัด ด้วยความหนาเชิงแสง (Optical thickness) [2] คือ $d\tau = \kappa dy$ ดังนั้นสมการที่ (1) จะเปลี่ยนเป็น

$$\mu \frac{dI(\tau)}{d\tau} = \frac{\sigma T_s^4(\tau)}{\pi} - I(\tau) \quad (3)$$

ทำการอินทิเกรต RTE หรือสมการ (3) ในช่วง $\tau=0$ ถึง $\tau = \tau_L$ จะได้ผลลัพธ์คือ

$$I(\tau) = I^+(\tau) + \Gamma(\tau) \quad (4a)$$

$$I^+(\tau) = I(0)e^{-\frac{\tau}{\mu}} + \int_0^\tau \frac{1}{\mu} \left[\frac{\sigma T_s^4(\tau^*)}{\pi} \right] e^{-\frac{(\tau-\tau^*)}{\mu}} d\tau^* \quad (4b)$$

$$\Gamma(\tau) = I(\tau_L)e^{-\frac{(\tau_L-\tau)}{\mu}} - \int_\tau^{\tau_L} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\sigma T_s^4(\tau^*)}{\pi} \right] e^{-\frac{(\tau-\tau^*)}{\mu}} d\tau^* \quad (4c)$$

เมื่อ κ คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีความร้อน (Absorption coefficient) และ G คือ ค่าการแผ่รังสี ความร้อนตกกระทบ (Incident radiation) [1-2] ซึ่งเป็นปริมาณที่จะทำการคำนวณในงานวิจัยนี้ สามารถคำนวณได้จาก

$$G(\tau) = \int I(\tau, \mu) d\mu$$

$$G(\tau) = 2\pi \left[I(0) \int_0^1 e^{-\frac{\tau}{\mu}} d\mu + I(\tau_L) \int_0^1 e^{-\frac{(\tau_L-\tau)}{\mu}} d\mu + \int_0^\tau \frac{\sigma T_s^4(\tau^*)}{\pi} \int_0^1 e^{-\frac{(\tau-\tau^*)}{\mu}} \frac{d\mu d\tau^*}{\mu} + \int_\tau^{\tau_L} \frac{\sigma T_s^4(\tau^*)}{\pi} \int_0^1 e^{-\frac{(\tau^*-\tau)}{\mu}} \frac{d\mu d\tau^*}{\mu} \right] \quad (5)$$

รูปแบบของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล (Exponential integrals equation, E_n) ได้ถูกนำมาใช้

เพื่อจัดรูปสมการของปริมาณการแผ่รังสีความร้อน ตกกระทบ (G) โดยมีสมการทั่วไปคือ

$$\left. \begin{aligned} E_n(x) &= \int_1^\infty e^{-xt} \frac{dt}{t^n} = \int_0^1 \mu^{n-2} e^{-\mu x} d\mu \\ E_n(x) &= \int_x^\infty E_{n-1}(x) dx \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ดังนั้นเมื่อหาค่า $E_1(\tau)$ และ $E_2(\tau)$ แล้ว สมการ การคำนวณหาค่า G จะได้รูปสมการใหม่ดังนี้

$$G(\tau) = 2\pi \left[I(0)E_2(\tau) + I(\tau_L)E_2(\tau_L - \tau) + \int_0^\tau \frac{\sigma T_s^4(\tau^*)}{\pi} E_1(\tau - \tau^*) d\tau^* + \int_\tau^{\tau_L} \frac{\sigma T_s^4(\tau^*)}{\pi} E_1(\tau^* - \tau) d\tau^* \right] \quad (7)$$

4. วิธีการคำนวณ

จากสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งเงื่อนไข ขอบเขต และค่าการแผ่รังสีความร้อนตกกระทบ (G) จะทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการไร้หน่วย (Dimensionless equation) เพื่อให้สะดวกในการ คำนวณ โดยกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่นำมาใช้ได้แก่

$$\left. \begin{aligned} \theta_\infty &= \frac{T_\infty}{T_s}, \theta_s = \frac{T_s}{T_s}, \tau = \kappa y, \tau_L = \kappa L, \\ \chi &= \frac{G}{\sigma T_s^4}, J = \frac{I(0)\pi}{\sigma T_s^4}, J = \frac{I\pi}{\sigma T_s^4}, \\ J_b &= \frac{\sigma T_s^4(y)/\pi}{\sigma T_s^4/\pi}, J_b = \frac{I(0)\pi}{\sigma T_s^4} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

หลังจากได้สมการไร้หน่วยเรียบร้อยแล้วจะทำการหาผลเฉลยของการแผ่รังสีความร้อนตกกระทบ (G) โดยค่าความพรุน (ϕ) ที่ใช้ในการคำนวณ คือ 0.675 เริ่มต้นคำนวณ โดยสมมติค่าโครงสร้างของ อุณหภูมิภายในวัสดุพรุน จะทำให้ได้ค่าความเข้มการแผ่รังสี (Radiation intensity, I) ออกมา และสุดท้าย จะคำนวณหาค่าการแผ่รังสีตกกระทบ G ตามสมการที่

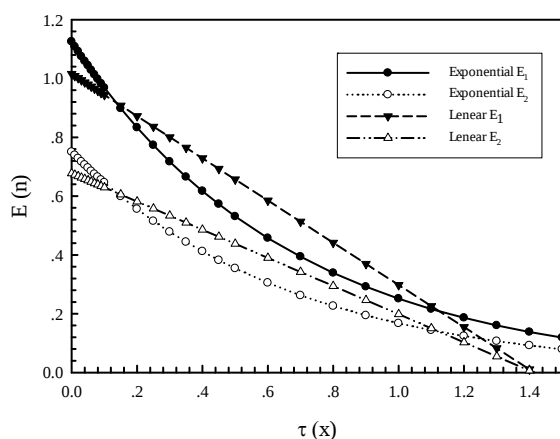
CST-189

(7) แต่ใช้ค่า E_n จาก 2 วิธีคือจากสมการทั่วไปกับแบบเชิงเส้น เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณ

5. ผลการคำนวณและอภิปรายผล

5.1 ค่า E_1 และ E_2

รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่า E_1 และ E_2 ระหว่างสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล (แบบแม่นยำ) กับสมการเชิงเส้น (โดยประมาณ) โดยทำการเปรียบเทียบในช่วง $0 < \tau < 1.5$ จะพบว่าค่า E_1 และ E_2 เมื่อสร้างเป็นสมการเส้นตรงจากวิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square) [9] จะมีความแตกต่างจากค่า E_n ที่ได้จากสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัลพอสมควร อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Determination coefficient, R^2) ของ E_1 และ E_2 จะได้ว่ามีค่าเท่ากับ 0.802 และ 0.807 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 ในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นสมการเส้นตรงของ E_n ทั้งสองสมการสามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อทำนายกลไกการแผ่รังสีความร้อนได้

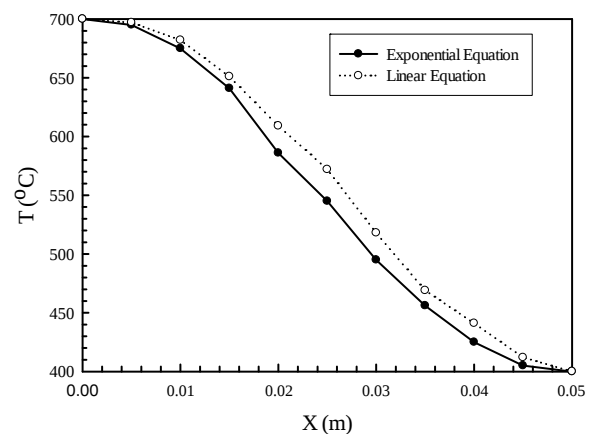


รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่า E_1, E_2 จากสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลและสมการเชิงเส้น

5.2 โครงสร้างทางอุณหภูมิภายในชั้นวัสดุพูน

รูปที่ 3 แสดงผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชั้นวัสดุพูน ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile, T) ภายในชั้นวัสดุพูนระหว่างผลเฉลยที่ได้จากสมการ

เอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัลและสมการเชิงเส้น จากผลการคำนวณพบว่าแนวโน้มอุณหภูมิ (T) ลดลงตามความหนาของแผ่นวัสดุพูน (y) กล่าวคือที่ตำแหน่งด้านบนของแผ่นวัสดุพูน ($y = 0$) จะมีอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่ด้านล่าง ($y = L$) ผลการคำนวณที่ได้นี้เป็นไปตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนทั่วไปเพราะที่ตำแหน่งด้านบน ($y = 0$) เป็นตำแหน่งที่วัสดุพูนได้รับความร้อนจากภายนอก (สิ่งแวดล้อม) ย่อมส่งถ่ายความร้อนมายังด้านล่าง ($y = L$) นอกจากนี้หากเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างสองสมการจะสังเกตเห็นได้ว่าระดับ T ที่คำนวณได้จากสมการเชิงเส้นมีค่าสูงกว่า T ของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุดประมาณ 27°C อย่างไรก็ตามแนวโน้มของทั้งสองวิธีก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 3 โครงสร้างทางอุณหภูมิภายในชั้นวัสดุพูน

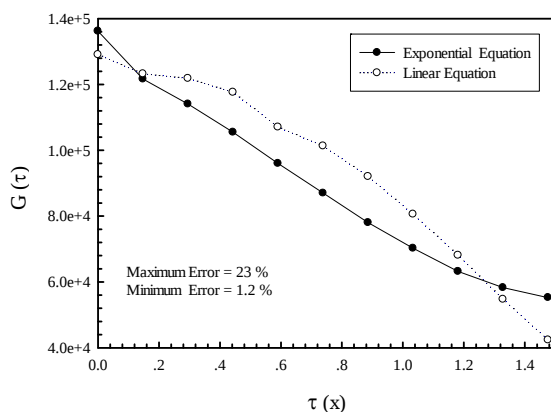
5.3 ค่าการแผ่รังสีความร้อนตกกระทบ (G)

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยค่าการแผ่รังสีตกกระทบ (Incident radiation, G) ที่ได้จากสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัลกับสมการเชิงเส้น จากผลการคำนวณทั้งสองสมการพบว่าค่า G มีแนวโน้มลดลงตามความหนาของแผ่นวัสดุพูน ซึ่งเกิดจากการบริเวณตำแหน่งด้านบน ($y = 0$)

CST-189

ได้รับพลังงานความร้อนจากภายนอกส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงและมีการแผ่รังสีอย่างเข้มข้น (ในที่นี้แสดงในรูปของรังสีตกกระทบ) ดังได้อธิบายไว้แล้วในรูปที่ 3 และจะค่อย ๆ ลดปริมาณลงตามความเข้มข้นหรืออุณหภูมิภายในชั้นวัสดุพูนสำหรับการเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างสองสมการ จะสังเกตเห็นได้เด่นชัดว่าปริมาณ G ที่คำนวณได้จากสมการเชิงเส้นมีค่าสูงกว่า G ของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 23 %

จากผลการเปรียบเทียบที่ได้กล่าวไว้ได้ว่าค่า G ที่คำนวณโดยใช้สมการเชิงเส้นของงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกันในเชิงคุณภาพกับการคำนวณโดยใช้ E_n จากสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล กล่าวคือ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ยังมีค่าแตกต่างกันพอสมควร ดังนั้นสมการเชิงเส้นของ E_1 และ E_2 ที่นำเสนอสามารถใช้ทำนายผลในเชิงแนวโน้มได้ อย่างไรก็ตามควรมีการปรับปรุงสมการเชิงเส้นนี้เพื่อให้ได้ผลการคำนวณในเชิงปริมาณที่ดียิ่งขึ้นต่อไป



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าการแผ่รังสีตกกระทบ (G) ระหว่างสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล กับสมการเชิงเส้น

6. สรุปผลการศึกษา

1) สมการเชิงเส้นที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งสร้างขึ้นจากสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล

(E_1 และ E_2) ในช่วง $0 < \tau < 1.5$ พบว่ามีความแตกต่างกันพอสมควร แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด R^2 สำหรับค่า E_1 และ E_2 คือ 0.802 และ 0.807 ตามลำดับ ซึ่งยังคงมีค่าใกล้เคียงกับ 1 จึงถือว่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

2) โครงสร้างทางอุณหภูมิ (T) จะมีแนวโน้มลดลงตามความหนาของชั้นวัสดุพูน (y) โดย T ที่คำนวณได้จากสมการเชิงเส้นจะมีค่าสูงกว่าสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล และมีค่าความแตกต่างสูงสุดประมาณ 27°C

3) ค่าการแผ่รังสีตกกระทบ (G) จะมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลงตามความเข้มข้นหรืออุณหภูมิภายในชั้นวัสดุพูน (y) โดย G ที่คำนวณได้จากสมการเชิงเส้นจะมีค่าสูงกว่าสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล-อินทิกรัล ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 23 %

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความวิจัยนี้ขอขอบคุณ คุณดาว นามจะโปะ, คุณสิรินทรา หิรัญภูวนาถ และ คุณนิภาพร ปั่นพรมราช นักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และ สถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับการระดมแนวคิดในการแก้ปัญหาของสมการ RTE และความช่วยเหลือในการจัดพิมพ์ต้นฉบับ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ozisik, M.N. (1990). *Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Conduction*, McGraw-Hill, New York.
- [2] Modest, M.F. (2003). *Radiative Heat Transfer*, 2nd edition, ISBN: 0-12-503163-7, Academic Press (Elsevier Science), California.
- [3] Vafai, K. (2005). *Handbook of porous media*, 2nd edition, ISBN: 0-8247-8886-9, Taylor and Franscis, New York.

CST-189

- [4] สำเร็จ จักรใจ (2547). *การเผาไหม้*, ISBN: 9741328885, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- [5] บัณฑิต กฤตาคม (2554). หัวพันไฟอุตสาหกรรม และการประยุกต์ใช้วัสดุพูนในหัวพันไฟ, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสยาม*, 12(1), หน้า 76 – 87
- [6] Viskanta, R., Mruyama, S. and Aihara, T. (1990). Analysis of an active high-temperature thermal insulation system, *International Journal Heat and Fluid Flow*, vol. 11(3), pp. 196 – 203.
- [7] Kamiuto, K., Iwamoto, M. and Nagumo, Y. (1993). Combined conduction and correlated-radiation heat transfer in packed bed, *Journal of Thermophysics Heat Transfer*, vol. 7(3), pp. 496 – 501.
- [8] Krittacom, B. and Kamiuto, K. (2007). Improvement of the P_1 approximation in radiative transfer, *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 1 (1), pp. 63 - 74.
- [9] Stoecker, W.F. (1989). *Design of Thermal Systems*, 3rd edition, ISBN: 0-07-061620-5, McGraw-Hill, New York.