

การส่งเสริมประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นโดยการแผ่รังสีความร้อนจาก การเผาไหม้ในวัสดุพรุน Heat Transfer Enhancement to Cooling Water Pipe by Radiation Dominated Combustion in Porous Medium

กิตติพงษ์ เจาจารย์ก สำเร้ง จักรใจ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ถ.ประชาธิปไตย เขตราชบุรีบูรณะ กรุงเทพฯ 10140

โทร 66(2) 470-9111 โทรสาร 66(2) 427-9111 E-Mail: kitjao@mail.cscoms.com

Kitipong Jaojaruek, Sumremg Jugjai

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King's Mongkut University of Technology Thonburi,

Pacha-u-tid Rd., Ratburana, Bangkok 10140, Thailand

บทคัดย่อ

การศึกษาภายใต้หัวข้อวิจัยนี้ เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแบบหนึ่งมิติ เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นของการเผาไหม้เชื้อเพลิง LPG ภายในเตาเผาไหม้ที่มีวัสดุพรุนอยู่ภายใน โดยจะศึกษาถึง อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นซึ่งจะแสดงในรูปของค่า Nu_m ของผิวท่อน้ำ โดยการหาผลเฉลยด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบอิมพลิต พบว่า การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นโดยการเผาไหม้ภายในวัสดุพรุน มีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีที่ไม่วัสดุพรุนถึง 3.5 - 5 เท่า โดยขึ้นกับพารามิเตอร์ดังนี้ ที่อัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงคงที่ (ϕ) และค่าความหนาเชิงแสง (τ) ของวัสดุพรุนคงที่หนึ่งๆ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงจะทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้สูงขึ้น ตำแหน่งของเปลวไฟอยู่ใกล้ท่อน้ำมากขึ้น ค่า Nu_m เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความหนาเชิงแสงของวัสดุพรุน จะได้ว่าที่ค่าความหนาเชิงแสงสูงๆ โครงสร้างของอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้อุณหภูมิที่บริเวณผิวท่อสูง ซึ่งจะได้อัตรา Nu_m เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า ϕ ในขณะที่ heat input และ τ คงที่ พบว่าที่ ϕ ต่างๆ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้จะต่ำลงด้วย แต่ตำแหน่งเปลวไฟจะอยู่ชิดท่อน้ำมากขึ้น ซึ่งทำให้ได้อัตรา Nu_m ที่ผิวท่อมากขึ้น และเตาสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนผสมบางๆ ได้ หรือมีความสามารถในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Keywords : การถ่ายเทความร้อน/การแผ่รังสี/การเผาไหม้/วัสดุพรุน

Abstract

This studying proposes a one dimensional mathematical model of heat transfer enhancement to cooling water pipe by radiation dominated LPG combustion in a porous medium. The influence of parameters that have effects on heat transfer coefficient at the surface of a cooling water tube (Nu_m) is studied. The implicit finite difference method is used to solve mathematical model. The results show that the heat transfer performance in term of Nu_m are higher than the system without the porous medium by a factor of 3.5-5. The Nu_m depends on combustion characteristic in the porous medium. The highly feeding rate of gas mixture will promote heat transfer coefficient owing to a high combustion temperature and the flame shifting forwards the water pipe. The optical thickness of the porous medium τ has a moderate effect on increasing the heat transfer coefficient when τ is more than 10. Decreasing the equivalence ratio ϕ at a constant heat supply yields an increasing in Nu_m due to a high convective heat transfer and flame shifting forward the water pipe.

Keywords : Heat Transfer/Radiation/Combustion/Porous Medium

1. บทนำ

การนำวัสดุพรุน (porous medium) เข้ามาใช้เพื่อส่งเสริมประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็น[1] เป็นวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมในทางอุตสาหกรรม ข้อดีของการนำวัสดุพรุนมาใช้มีหลาย

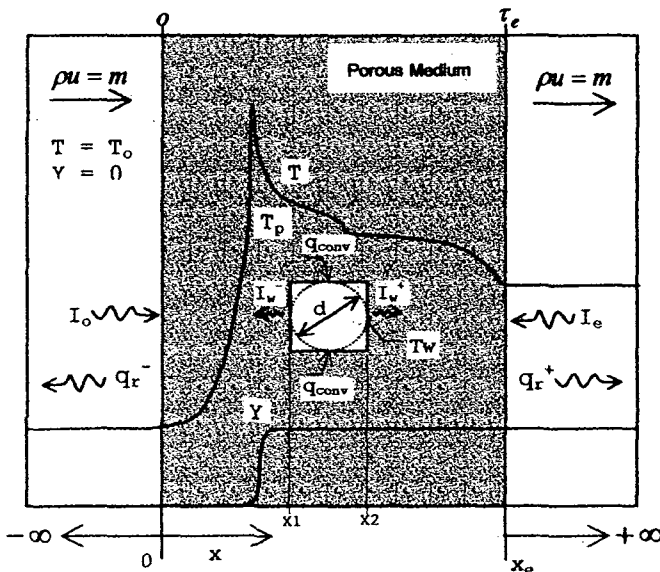
ประการ อาทิ ช่วยให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้หมดจดขึ้น เกิดมลภาวะที่น้อยลง และยังมีความสามารถในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมบางมาก ๆ [2] ได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังช่วยให้ขนาดของเตาเผาสามารถเล็กลงได้ ดังนั้นการสร้างเครื่องมือในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน ที่มีวัสดุพอร์นร่วมอยู่ด้วย ไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือทางด้านปฏิบัติการ หรือเครื่องมือทางด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการที่จะนำวัสดุพอร์นมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ และเกิดประสิทธิภาพอย่างสูงสุด อย่างไรก็ตามแต่การศึกษาด้านทฤษฎีเพื่อเข้าใจปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อไอน้ำในวัสดุพอร์นที่มีการเผาไหม้ยังมีค่อนข้างน้อย และยังไม่ละเอียดพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกับความจริงได้

การศึกษาด้านการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อไอน้ำในเตาเผาไหม้ที่มีวัสดุพอร์นอยู่ภายในนี้ จะเป็นการศึกษาด้านคณิตศาสตร์ การถ่ายเทความร้อนทางทฤษฎีในเตาเผาไหม้ ซึ่งพิจารณาเป็น 1 มิติ (one dimensional mathematical model) ทั้งในแง่การไหล และการแผ่รังสี ส่วนการเผาไหม้ในนี้พิจารณาเป็นแบบ single step global reaction แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ จะใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาวามิเตอร์หรือตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบเตา และเลือกใช้วัสดุพอร์นเพื่อให้เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด โดยดำเนินการแก้สมการด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) ตามวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบอิมพลิสิต (implicit finite difference method)

2. สมการและแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์

(Governing equation and analytical model)

แบบจำลอง 1 มิติ ที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นไปตามรูปที่ 1 เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าจากทางด้านซ้ายของรูป เข้าไปเผาไหม้ภายในบริเวณวัสดุพอร์น ($x=0 - x=x_0$) โดยวัสดุพอร์นจะมีความยาว x_0 ตามแกน x ซึ่งเป็นทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง หรือมีความหนาแน่นเชิงแสงรวม τ_0 ภายในวัสดุพอร์น จะมีท่อไอน้ำเย็นกลมขวางอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง และทอดยาวตามแนวอีกเข้าไปตลอดพื้นที่ตัดขวาง



รูปที่ 1 แบบจำลอง 1 มิติ ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ของวัสดุพอร์น และเพื่อให้เป็นไปได้อย่างง่ายต่อการพิจารณาแบบ 1 มิติ ท่อน้ำกลมจะถูกแทนด้วยท่อน้ำสี่เหลี่ยมจัตุรัส d [3] (hydraulic diameter เท่ากันกับท่อน้ำกลม) โดยผิวที่ด้านบนและล่างได้รับความร้อนเนื่องมาจากการพา (convection) เพียงอย่างเดียว ในขณะที่ผิวที่ด้านซ้ายและขวาได้รับความร้อนเนื่องมาจากการแผ่รังสี (radiation) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น [3] เชื้อเพลิงอุณหภูมิ T_0 ที่ $x = -\infty$ ซึ่งจะถูก preheat เล็กน้อยจากการนำความร้อนของแก๊ส และไหลเข้าไปในวัสดุพอร์นด้วยอัตรา $\rho u = m$ ซึ่งคงที่ตลอดภายในวัสดุพอร์น และที่ทั้ง 2 ฝั่งของวัสดุพอร์น เปิดสู่สิ่งแวดล้อมที่พิจารณาให้เป็น พื้นผิววัตถุดำ (black body surface) อุณหภูมิ T_0 ซึ่งแผ่รังสี I_0 และ I_s ตกกระทบเข้ามาภายในในระบบ ในขณะที่ระบบสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี $q_r(0)$ และ $q_r(x_e)$ ออกไปสู่สิ่งแวดล้อม

ระบบจะถูกพิจารณาภายใต้ข้อสมมติฐานต่อไปนี้ (i) แก๊สเชื้อเพลิงพิจารณาเป็นวัตถุที่ไม่เข้าร่วมในกิจกรรมการแผ่รังสี (non-radiating) (ii) วัสดุพอร์นประกอบด้วยเม็ดกลมของแข็งขนาดคงที่ และกระจายอย่างสม่ำเสมอ ตลอดทั่วทั้งวัสดุพอร์น (iii) วัสดุพอร์นพิจารณาเป็นวัตถุที่เข้าร่วมในกิจกรรมการแผ่รังสีตลอดทั้งเนื้อ โดยไม่คิดการ scattering และเป็นได้ทั้งตัวแผ่รังสี และตัวรับรังสีในเวลาเดียวกัน (iv) ค่าคุณสมบัติต่างๆ ทางฟิสิกส์ (physical properties) ภายในระบบถือว่าคงที่ (v) วัสดุพอร์นเป็นวัตถุที่ไม่ได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (non-catalytic) (vi) ปฏิกิริยาการเผาไหม้ พิจารณาเป็น irreversible single step first order isomerization global reaction, $R \rightarrow P$ (vii) ค่า Lewis Number (Le) มีค่าเท่ากับ 1 (viii) ค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (convective heat transfer coefficient) ที่ผิวที่ด้านในและด้านนอกมีค่าคงที่ ในขณะที่ผิวที่บางมากจนไม่คิดอิทธิพลของการนำความร้อน (heat conduction) และอุณหภูมิที่ผิวที่ของท่อที่โดยตลอด T_w (ix) ค่า สปสของการดูดกลืนรังสี (absorptivity) ที่ผิวที่หน้ามีค่าเป็น 1 (x) ไม่มีการคิดการสูญเสียความร้อนที่ผิวที่ด้านนอกของเตา

โดยสมมติฐานข้างต้นดังกล่าว สมการสมดุลพลังงาน (energy balance equation) ของระบบสถานะแก๊สและของแข็ง สมการสมดุลมวล (continuity equation) สำหรับ species แสดงโดยลำดับดังต่อไปนี้

2.1 Energy conservation equations

ที่ $0 \leq x < x_1$ และ $x_2 < x \leq x_0$
สมการของสถานะแก๊สเป็นดังนี้

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_0 w - h_p n_p A_p (T - T_0) \quad (2.1)$$

ที่ $x_1 \leq x \leq x_2$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_0 w - h_p n_p A_p (T - T_0) - \frac{2K_w}{(b-d)} (T - T_w) \quad (2.2)$$

สมการของสถานะของแข็งที่ $0 \leq X \leq X_0$ เป็นดังนี้

$$\rho_s c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial q_r}{\partial x} + h_p n_p A_p (T_s - T) \quad (2.3)$$

โดยสมการของ heat-flux และ divergence of radiative heat-flux จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตาม พื้นที่ตัดขวางของวัสดุพหุหน้าที่ไม่เท่ากันตามช่วงของ X และขอยกตัวอย่างเมื่อ X อยู่ในช่วง $0 \leq X < X_1$ ซึ่งเป็นดังนี้

$$q_r^+(x) = 2\pi [I_0 E_3(x) + \int_0^x I_b(\tau) E_2(x-\tau) d\tau] \quad (2.4)$$

$$q_r^-(x) = -2\pi \left[(1 - \frac{d}{b}) I_c E_3(x) + (1 - \frac{d}{b}) \int_{\tau_1}^x I_b(\tau) E_2(x-\tau) d\tau \right. \\ \left. + \frac{d}{b} I_w E_3(\tau_1 - x) + \int_{\tau_1}^{\tau_2} I_b(\tau) E_2(x-\tau) d\tau \right] \quad (2.5)$$

$$q_r(x) = q_r^+(x) + q_r^-(x) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial q_r(x)}{\partial x} = -\frac{2\pi k}{b} [b I_0 E_2(x) + (b-d) I_c E_2(x-\tau) + d I_w E_2(\tau_1 - x) \\ - 2b I_b(x) + (b-d) \int_{\tau_1}^x I_b(\tau) E_1(x-\tau) d\tau \\ + b \int_{\tau_1}^{\tau_2} I_b(\tau) E_1(x-\tau) d\tau + b \int_0^{\tau_1} I_b(\tau) E_1(x-\tau) d\tau] \quad (2.7)$$

โดยที่ $I_b(x) = \frac{\sigma T_s^4}{\pi}$, $E_n(x) = \int_0^1 \mu^{n-2} \exp(-x/\mu) d\mu$

และสมการที่ผิวของท่อเป็น

$$\dot{m}_w C_{pw} \Delta T_{low} = 2K_w b \int_{x_1}^{x_2} (T - T_w) dx + bd [q_r^+(x_1) - q_r^-(x_2) - 2I_w] \quad (2.8)$$

โดยที่เทอม $bd [q_r^+(x_1) - q_r^-(x_2) - 2I_w]$ คือปริมาณความร้อนที่ท่อได้รับจากการแผ่รังสี ค่า ΔT_{low} คือ ผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกของท่อ ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ 10 K และค่า K_w คือสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (convective heat transfer coefficient) ที่ผิวของท่อ น้ำ ซึ่งคำนวณจาก empirical formula [4] ดังนี้

$$(Nu_m)_{out} = \frac{h_m d}{k} = (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{2/3}) Pr^{0.4} (\mu_\infty / \mu_{wall})^{0.25} \quad (2.9)$$

$K_w = h_m$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมเฉลี่ยที่คิดรวมอิทธิพลจากการแผ่รังสียังท่อ $Nu(T)$ หาได้จาก

$$Nu(T) = \frac{h_m(T) d}{k} \quad \text{โดยที่ } h_m(T) \text{ มาจาก}$$

$$h_m(T) = \frac{\dot{m}_w C_{pw} \Delta T_{low}}{4b \int_{x_1}^{x_2} (T - T_w) dx} \quad (2.10)$$

สมการที่ผิวท่อด้านในเป็น

$$\dot{m}_w C_{pw} \Delta T_{low} = 4bd h_{wm} \Delta T_m \quad (2.11)$$

โดยที่ $\Delta T_m = \frac{(T_{in} - T_{out})}{\ln[(T_{in} - T_w)/(T_{out} - T_w)]}$ และค่า h_{wm} คือค่า

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวด้านในของท่อ ซึ่งคำนวณจาก empirical formula [4] ดังนี้

$$(Nu_w)_{in} = 3.66 + \frac{0.0668 Gz}{1 + 0.04 (Gz)^{2/3}} \quad (2.12)$$

โดยที่ $Gz = \frac{Re \cdot Pr}{L/d}$, $h_{wm} = \frac{k (Nu_w)_{in}}{d}$ เมื่อ $L = b$

2.2 Species conservation equations

ที่ $0 \leq X \leq X_0$

$$\rho \frac{\partial Y}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y}{\partial x} = D_p \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + \omega \quad (2.13)$$

โดยที่สมการของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบ single step global reaction ตาม Arrhenius form [5]

$$w = A_p (1 - Y) \exp(-E/RT) \quad (2.14)$$

2.3 Boundary condition

$T = T_0$ ที่ $x = -\infty$, $Y = 0$ ที่ $x = 0$

$\partial T / \partial x = 0$ ที่ $x = xe$

และมีการคิดอิทธิพลของการนำความร้อน (heat conduction) ของแก๊สออกไปที่ $-\infty < x < 0$ ตามสมการ

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.15)$$

โดยที่ h_0 , h_p , n_p , A_p , A , E , R , b , d และ $E_a(x)$ หมายถึง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (heating value) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรอบๆ เม็ดกลม จำนวนความหนาแน่นของเม็ดกลม พื้นที่ผิวของเม็ดกลม frequency factor ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา activation energy gas constant ขนาดด้านของพื้นที่ตัดขวางของเตา เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และ exponential integral function of n^{th} order ตามลำดับ

สมการข้างต้นจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการไร้มิติ และจัดรูปให้เป็น difference equation ตามการประมาณโดยวิธี implicit finite difference method และทำการแก้สมการด้วยการ programming บนภาษา Fortran (MS Fortran Power Station 3.0) หากค่า unknown ที่ประกอบด้วย T , T_w , Y , T_w , \dot{m}_w (อุณหภูมิของแก๊ส อุณหภูมิของของแข็ง mass fraction ของสารผลิตภัณฑ์) อุณหภูมิที่ผิวท่อ และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในท่อ หรือ TM , TP , Y , TW , MW สำหรับตัวแปรไร้มิติตามลำดับ โดยวิธีสมมติค่าคำตอบและทำการเปรียบเทียบ

เทียบกับค่าที่คำนวณได้ การสมมติจะดำเนินการไปเรื่อยๆ (iteration) จนค่าที่สมมติและค่าที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกันไม่มากกว่าค่า convergence criterion ในขณะที่จำนวน node เป็น 200 และกำหนดให้ convergence criterion = 1.0×10^{-5} การตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณจะทำโดยการทำ global energy balance และ local energy balance (น้อยกว่า 5%)

3. ผลและการวิจารณ์ผล

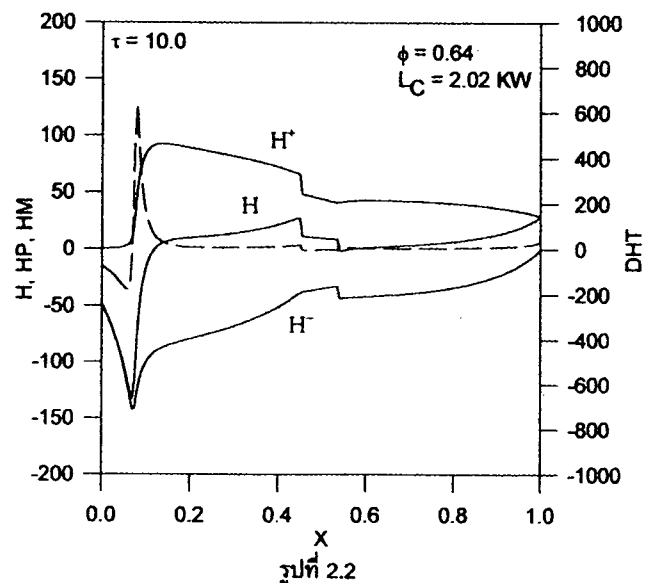
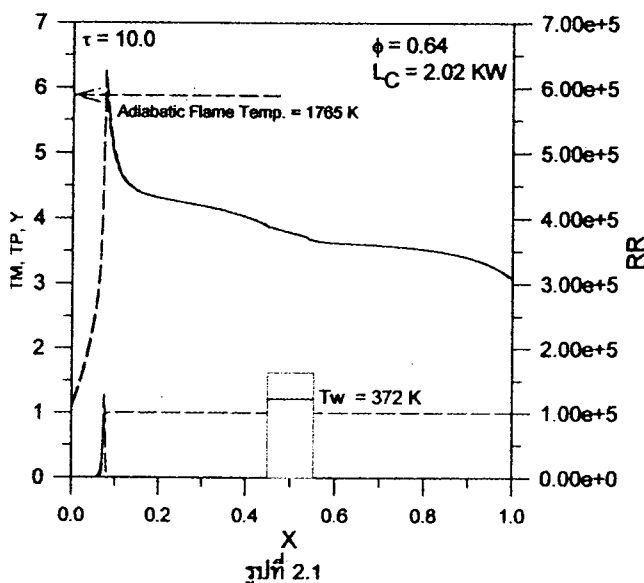
3.1 โครงสร้างทางความร้อน

รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างทางอุณหภูมิและการแผ่รังสี โดยทั่วไปของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพอร์น โดยแกน X อยู่ในทิศทางเดียวกับการไหลของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้ามาทางด้านซ้ายของรูป และเป็นแกนที่แสดงระยะทางไว้หน่วยจากขอบเริ่มต้นของวัสดุพอร์น ($X=0$) ไปยังขอบสิ้นสุดอีกด้านหนึ่งของวัสดุพอร์น ($X=1$) ในขณะที่แกน Y จะแสดงปริมาณของอุณหภูมิไว้หน่วยทั้งในส่วนของแก๊ส(TM) และของแข็ง(TP), ปริมาณอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง(RR), อัตราส่วนมวล(mass fraction) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้(Y) และ heat-flux โดยมีท่อน้ำวางขวางอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางของวัสดุพอร์น ในกรณีนี้การเผาไหม้เกิดขึ้นที่บริเวณครึ่งหน้าของวัสดุพอร์น สังเกตได้จากที่บริเวณยอดแหลมของอุณหภูมิ คือตำแหน่งเปลวไฟ เมื่อการเผาไหม้เกิดขึ้นความร้อนส่วนหนึ่งที่ได้จากการเผาไหม้ในแก๊สเฟส จะถูกถ่ายเทให้กับของแข็ง(วัสดุพอร์น)โดยการพา ของแข็งได้รับความร้อนจะส่งผ่านความร้อนโดยการนำและการแผ่รังสี ออกไปทั้งทางฝั่ง up-stream(ด้านหน้าเปลวไฟ) และฝั่ง down-stream(ด้านหลังเปลวไฟ) ของแข็งในส่วน up-stream ที่ได้รับความร้อนดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนส่วนหนึ่งให้กับเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้ามา ดังนั้นเชื้อเพลิงจะได้รับพลังงานส่วนหนึ่งไว้ ก่อนที่จะวิ่งเข้าไปเผาไหม้ที่บริเวณ combustion zone ซึ่งจะช่วยให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดีและหมดจดขึ้น เนื่องจากถูก preheat มาก่อนที่บริเวณ up-stream นี้อุณหภูมิของของแข็งจะสูงกว่าอุณหภูมิของแก๊สอันเนื่องมาจากกลไกดังกล่าว ในส่วนของ down-stream แก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะวิ่งผ่านท่อน้ำเย็นที่วางขวางอยู่ และถ่ายเทความร้อน

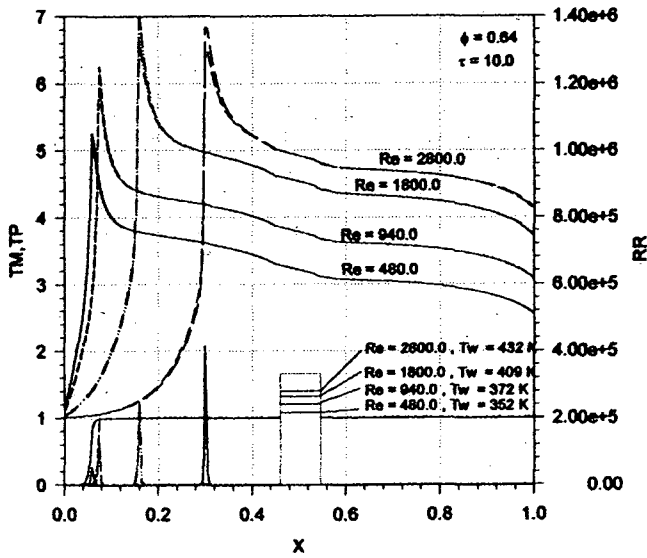
ส่วนหนึ่งให้กับท่อน้ำโดยการพาความร้อน มีผลทำให้อุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณนี้ตกลงเล็กน้อย นอกจากนี้ท่อน้ำยังได้รับความร้อนอีกส่วนหนึ่งจากการแผ่รังสีความร้อน ของของแข็งทั้งในตำแหน่ง x_1 และ x_2 ซึ่งจะทำให้ท่อน้ำได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ข้อสังเกตจุดหนึ่งก็คือปริมาณ heat-flux ที่บริเวณท่อน้ำ ($x_2 - x_1$) จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ตัดขวางของวัสดุพอร์นในบริเวณช่วงนี้ลดลง เนื่องจากถูกแทนที่ด้วยท่อน้ำ จึงทำให้ปริมาณการแผ่รังสี รังสีในช่วงนี้ลดลงตามไปด้วย จากกลไกการถ่ายเทความร้อนข้างต้นดังกล่าว จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำ ซึ่งถูกวัดออกมาในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมเฉลี่ย (Mean Nusselt Number, Nu_m) โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อ Nu_m ประกอบด้วย อัตราการป้อนเชื้อเพลิง ค่า optical thickness (τ) ของวัสดุพอร์น และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ

3.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

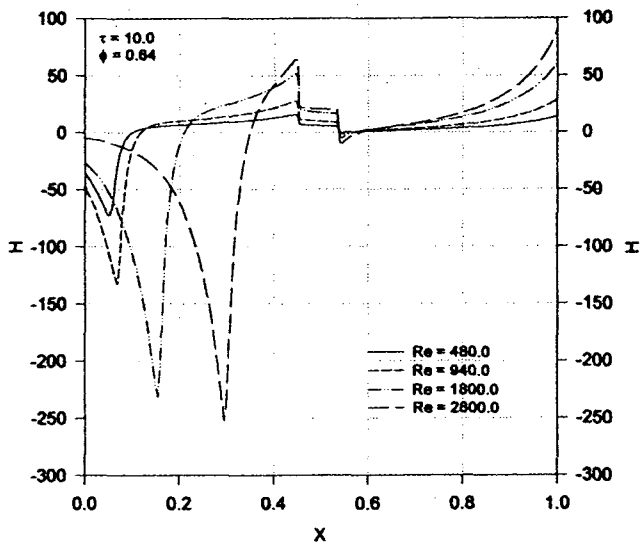
รูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงอิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิง หรือ Re ที่มีผลต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ และทางกาแผ่รังสีความร้อน (heat-flux, H) ที่เกิดขึ้นในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิง LPG ที่ $\phi = 0.64$ $\tau = 10$ จะเห็นว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้น อุณหภูมิของเปลวไฟ(flame) และ H ที่กระทำต่อผิวท่อน้ำทั้งสองฝั่งจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนต่อกัน และเปลวไฟจะขยับลึกเข้าไปใกล้ท่อน้ำยิ่งขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ Re สูงๆแสดงถึงความเร็วของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้ามาจะสูงตามไปด้วย (ที่ ϕ คงที่) จึงเกิดการผลักดันให้เปลวไฟขยับลึกเข้าไปด้านในวัสดุพอร์นมากขึ้น ประกอบกับปริมาณค่าความร้อนป้อนของเชื้อเพลิง(heat input) ที่มากขึ้นตามอัตราเร็วนี้ จะทำให้เกิดการเผาไหม้ในอัตราที่มากขึ้น ซึ่งทำให้ได้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากค่าอัตราการเผาไหม้(RR) จะมากขึ้นสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตอยู่จุดหนึ่ง ที่เปลวไฟอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้ท่อน้ำมากๆ ดังกรณีนี้ที่ Re ประมาณ 2800 เปลวไฟจะมีอุณหภูมิตกลงเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเปลวไฟอยู่ใกล้ท่อน้ำเย็น ซึ่งเสมือนเป็นแหล่งดูดซับความร้อน(heat sink) ท่อน้ำจะดูดซับความร้อนจากเปลวไฟที่อยู่ใกล้ๆ ได้ดีกว่าเปลวไฟที่อยู่ไกลออกไป สำหรับ



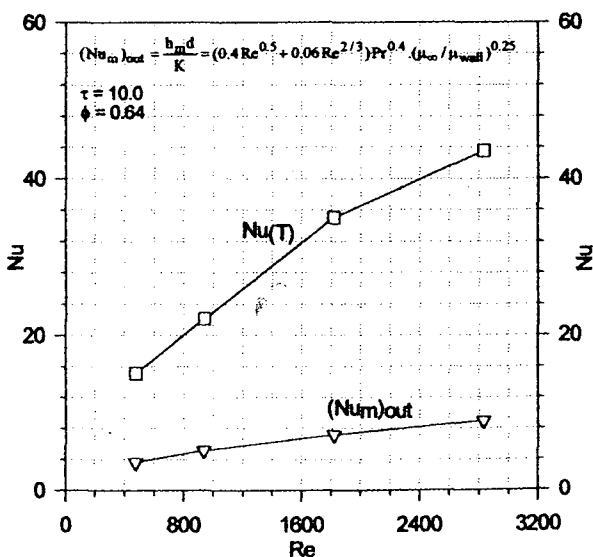
รูปที่ 2 โครงสร้างอุณหภูมิและheatflux ภายในเตา , 2.1 แสดงโครงสร้างทางอุณหภูมิ , 2.2 แสดงโครงสร้าง heatflux และ divergence



รูปที่ 3.1 แสดงอิทธิพลของ Re ที่มีผลต่อโครงสร้างอุณหภูมิ



รูปที่ 3.2 แสดงอิทธิพลของ Re ที่มีผลต่อโครงสร้างการแผ่รังสี



รูปที่ 3.3 แสดงอิทธิพลของ Re ที่มีผลต่อค่า Nu

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แสดง ในรูปของ Nu_m ตามรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าเพิ่มขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับกลไกดังกล่าว

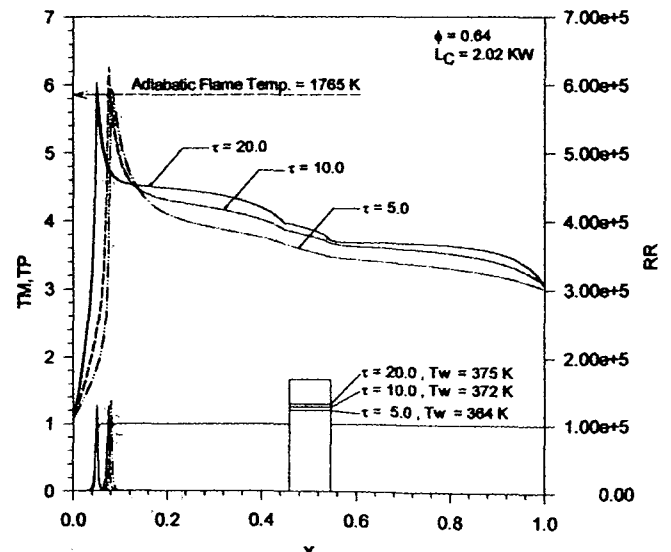
3.3 อิทธิพลของความหนาเชิงแสง (Optical Thickness, τ)

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงอิทธิพลของ τ ที่มีต่อโครงสร้างของอุณหภูมิ และการแผ่รังสี ของการเผาไหม้ที่ $L_c = 2.02$ KW $\phi = 0.64$ จะเห็นว่าที่ τ สูงๆ เช่น $\tau = 20$ เปลวไฟจะเลื่อนมาอยู่ใกล้ทางเข้าวัสดุพอร์ (หรือห่างจากท่อเข้ามามากขึ้น) พร้อมกับอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่ $\tau = 5$ และ 10 เนื่องจากการสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีออกสู่ภายนอกที่ทางเข้า แต่ที่อุณหภูมิของแก๊สบริเวณใกล้ท่อจะสูงกว่ากรณี τ ต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของความเป็น radiation shield ที่ดีของวัสดุพอร์ที่มีค่า τ สูงๆนั่นเอง จึงทำให้อุณหภูมิหลังเปลวไฟค่อนข้างจะราบเรียบยกตัวสูงไม่ตกลงเร็วเหมือนกับที่ τ ต่างๆ ดังนั้นค่า H รวมทั้งการทำต่อผิวท่อทั้งสองด้านในกรณี τ สูง โดยเฉพาะที่ผิวท่อด้านขวา จึงมีค่ามากกว่าในกรณี τ ต่ำ ส่งผลให้ค่า Nu_m มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า τ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 อย่างไรก็ตามค่า Nu_m มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตาม τ ไม่มากนัก

3.4 อิทธิพลของ Equivalence Ratio (ϕ)

รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงอิทธิพลของค่า ϕ ที่ L_c คงที่เท่ากับ 2.02 KW พบว่า เมื่อค่า ϕ ลดลง โครงสร้างของอุณหภูมิมีแนวโน้มลดต่ำลง เปลวไฟขยับลึกเข้าไปใกล้ท่อเข้ามามากขึ้น และอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ลดลง ในขณะที่ค่า Nu_m เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 5.3 ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากที่ค่า ϕ ต่ำกว่า การป้อนเชื้อเพลิงจะต้องเร็วขึ้นเพื่อให้ได้การเผาไหม้เกิดขึ้นที่ 2.02 KW คงที่ เท่ากับที่ค่า ϕ สูงๆ ดังนั้นอัตราเร็วของเชื้อเพลิงที่มากขึ้นนี้จะมีผลในการผลักดันเปลวไฟ ให้ขยับลึกเข้าไปใกล้ท่อเข้ามามากขึ้น เพื่อชดเชยอุณหภูมิที่ลดต่ำลง จึงทำให้ Nu_m สูงขึ้นแม้ว่าค่า H แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า ϕ

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ และค่า Nu_m ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ $L_c = 2.02$ KW ที่ค่า τ ต่างๆ ซึ่งที่ค่า τ ใดๆ จะได้



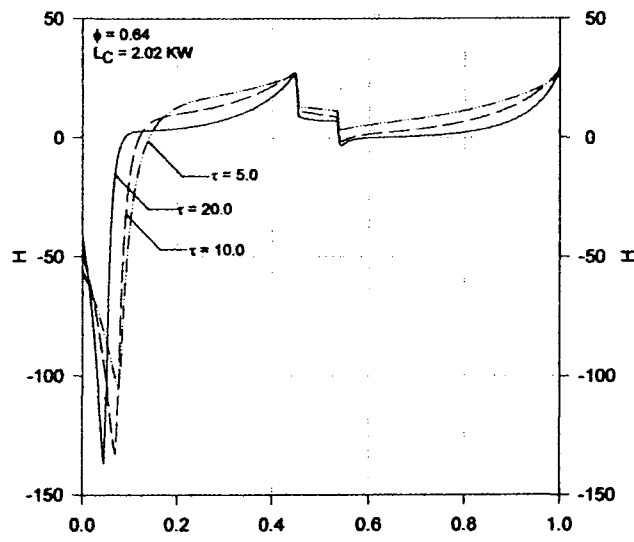
รูปที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของ τ ที่มีผลต่อโครงสร้างอุณหภูมิ

ค่า Nu_m มีแนวโน้มสอดคล้องกัน กล่าวคือที่ ϕ เดียวกัน ถ้า τ ค่า Nu_m จะต่ำด้วย เนื่องจากที่ τ สูงๆ อุณหภูมิที่ราบเรียบ และมีค่าสูงบริเวณตอนกลางของวัสดุพูนเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่ τ ต่ำๆ กล่าวคือ โครงสร้างของอุณหภูมิโดยรวมอยู่ในระดับที่ยกตัวสูงกว่า ปริมาณความร้อนที่ได้รับการส่งเสริมจากการแผ่รังสีจึงดีกว่าด้วย แต่ที่ ϕ ต่ำๆ ลงมาประมาณ 0.55 ค่าแหล่งเปลวไฟที่แตกต่างกัน จะเริ่มมีอิทธิพลต่อการแผ่รังสี จนทำให้ค่า Nu_m ของ $\tau = 10$ มีค่าสูงกว่าที่ $\tau = 15$ (เพราะที่ τ น้อยๆ เปลวไฟจะอยู่ใกล้ท่อในมากกว่าที่ τ มากๆ ซึ่งที่ τ มาก energy recirculation จะเกิดขึ้นได้ดีกว่า เปลวไฟจะอยู่ในตำแหน่งใกล้ทางเข้ามากกว่า จึงสูญเสียความร้อนมากกว่า) มีข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งก็คือที่ค่า τ สูงมากๆ จนเกินไป เช่น ค่า $\tau = 20$ ค่า Nu_m กลับไม่ได้มากขึ้นตามมามากมาย สาเหตุเนื่องจากการเพิ่มค่า τ ให้สูงขึ้น ไม่ได้หมายถึงความร้อนที่ของแข็งได้รับจากแก๊สจะมากขึ้นเป็นทวีคูณตามมาด้วย นั่นหมายถึง ปริมาณรังสีที่ของแข็งสามารถจะแผ่ออกไปก็ไม่ได้มากขึ้นนัก และปริมาณรังสีที่จะแผ่ออกไปถึงท่อหน้าจะยัง

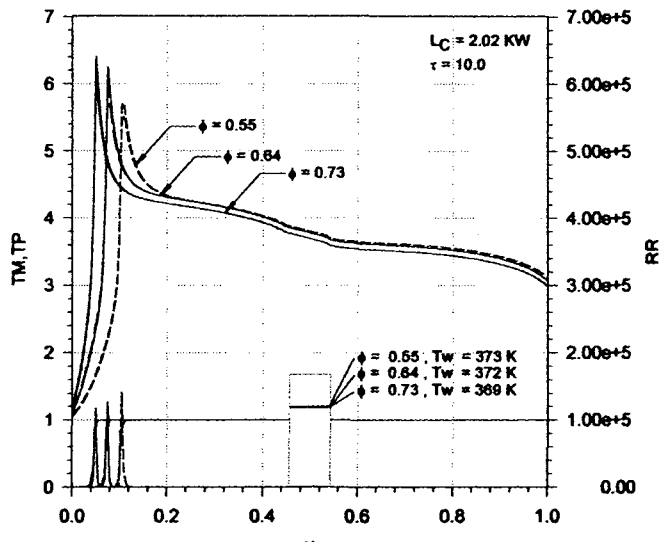
มีแนวโน้มลดลงอีกด้วย เนื่องจากการสูญเสียพลังงานของรังสีให้กับของแข็งระหว่างทางของที่ค่า τ สูงกว่าจะมีมากกว่าที่ค่า τ ต่ำกว่า

4. สรุปผล

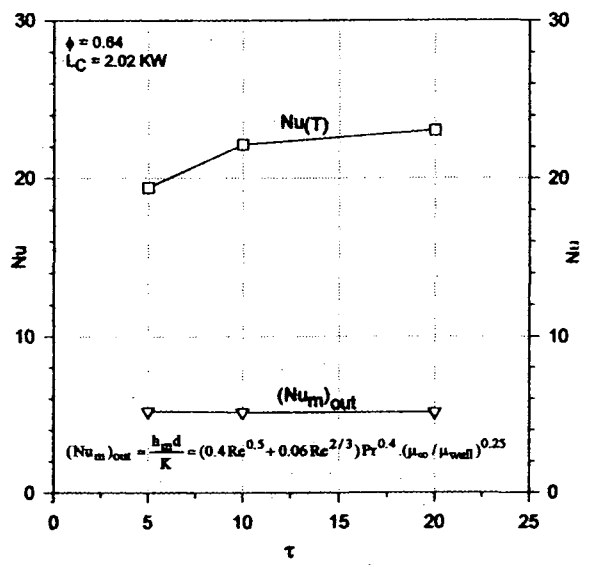
การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่มีวัสดุพูน จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นกว่าเมื่อไม่มีวัสดุพูน (การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเกิดขึ้นจากการพาเกือบทั้งหมด) ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก โดยคิดเป็นค่า Nu_m ที่เพิ่มขึ้นจากการพาอย่างเดียว ซึ่งมากกว่าประมาณ 3.5 - 5 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการควบคุมการเผาไหม้ หรือตำแหน่งเปลวไฟให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม และเลือกใช้วัสดุพูนที่มีค่า τ ที่เหมาะสม ความผลที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น อีกทั้งวัสดุพูนที่ได้เข้าไปในระบบยังช่วยให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดีที่ ϕ ค่อนข้างต่ำ (0.5 หรือต่ำกว่า) ซึ่งหมายถึงเตาที่มีวัสดุพูนติดตั้งไว้ภายในจะมีความสามารถในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำได้



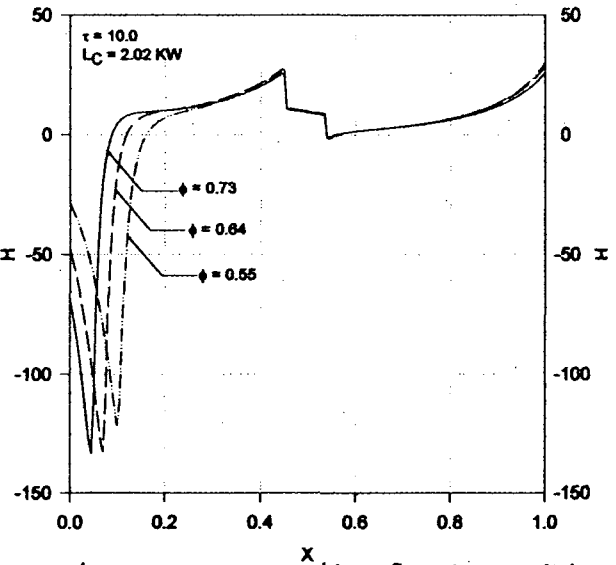
รูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลของ τ ที่มีผลต่อโครงสร้างการแผ่รังสี



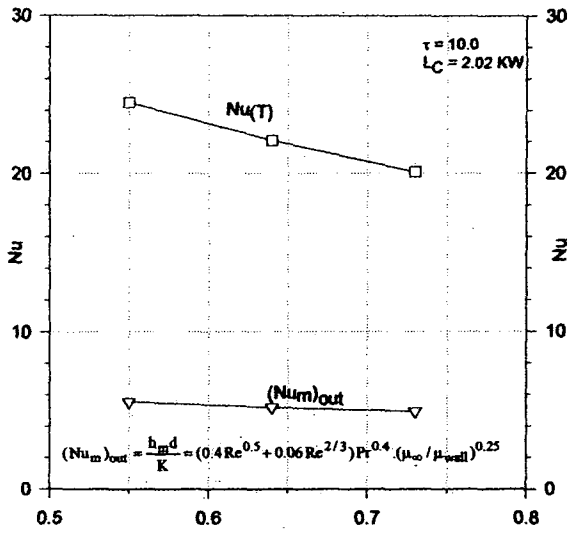
รูปที่ 5.1 แสดงอิทธิพลของ ϕ ที่มีผลต่อโครงสร้างอุณหภูมิ



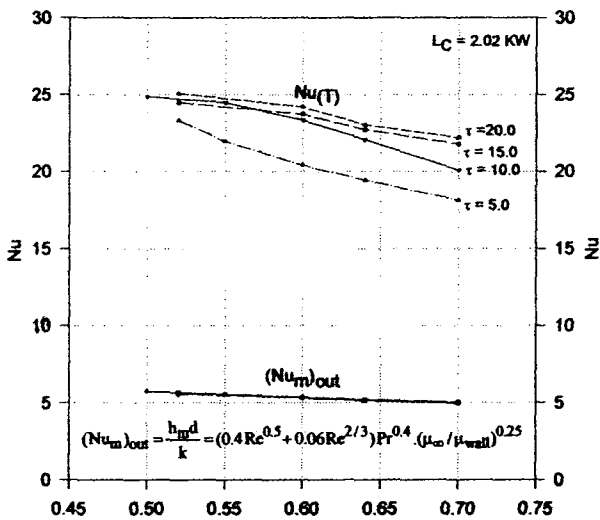
รูปที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของ τ ที่มีผลต่อค่า Nu



รูปที่ 5.2 แสดงอิทธิพลของ ϕ ที่มีผลต่อโครงสร้างการแผ่รังสี



รูปที่ 5.3 แสดงอิทธิพลของ ϕ ที่มีผลต่อค่า Nu



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu - ϕ ที่ τ ต่างๆ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sumreng Jugjai, Surachai Sanitjai, Sontipee Aimmanee and Tinakorn Boonprasert, "Heat Transfer Enhancement to Cooling Water Pipe by a Surface Combustor Heater Equipped with a Convection-Radiation Converter", RERIC International Energy Journal Vol. 20 No.2 Dec. 1998, pp. 92-95
- [2] J. R. Howell, M. J. Hall and J. L. Eltzey, "Combustion of Hydrocarbon Fuels within Porous Inert Media", Prog. Energy Combustion Sci. Vol. 22 1996, pp. 121-122
- [3] R. Echigo, K. Hanamura, Y. Yoshizawa and T. Tomimura, "Radiative Heat Transfer Enhancement to a Water Tube by Combustion Gases in Porous Media", pp. 705-706

- [4] M.Necati ÖZİŞİK "HEAT TRANSFER A BASIC APPROACH" ,McGraw-Hill, New York, International Edition 1985 , pp. 307, 375
- [5] Stephen R. Turns, "AN INTRODUCTION TO COMBUSTION CONCEPT AND APPLICATION" ,McGraw-Hill, New York, International Edition 1996 , pp. 100

6. Nomenclature

- A_p = particle surface area (m^2)
- b = duct width (m)
- c_p = specific heat (gas) at constant pressure ($\frac{J}{kg.K}$)
- D = diffusivity (m^2/s)
- d = water tube diameter (m)
- E = activation energy (kJ/kmol)
- Gz = Graetz number
- H = dimensionless of radiative heat flux
- h_o = heating value of mixture (J/kg)
- h, K_w = heat transfer coefficient ($W/m^2.K$)
- I = radiation intensity ($\frac{W}{m^2}$)
- k = thermal conductivity ($W/m^2.K$)
- L_c = heat supply (KW)
- M = dimensionless of water mass flow rate
- \dot{m}_w = water mass flow rate (kg/s)
- Pr = Prandtl number, $\frac{\rho c_p}{\lambda}$
- q_r = radiative heat flux ($\frac{W}{m^2}$)
- RR = dimensionless reaction
- T = gas temperature (K)
- T_s = solid temperature (K)
- TM = dimensionless gas temperature (T/T_o)
- ΔT_m = logarithmic mean temperature difference
- TP = dimensionless solid temperature (T_s/T_o)
- TW = dimensionless water tube temperature at outside surface (K)
- u = mixture velocity (m/s)
- W = reaction rate ($kg/m^3.s$)
- x = geometrical coordinate system (m)
- Y = product mass fraction

7. Greek symbol

- κ = absorptivity coefficient (1/m)
- λ = thermal conductivity ($\frac{W}{m^2.K}$)
- μ = viscosity ($\frac{Kg}{m.s}$)
- ρ = density ($\frac{Kg}{m^3}$)

σ = Stefan-Boltzmann constant ($\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$)

ϕ = equivalence ratio

τ = optical thickness = κx

τ' = dummy variable of integration

7. Superscripts

+ = positive direction

- = negative direction

8. Subscripts

b = black body

e = exit plane

0 = entry plane

m = mean value

s = solid

p = particle

w,(w) = water

(T) = total

i = in

out = outlet, outside

in = inlet, inside