

การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นภายใต้สภาวะการแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพรุนที่มีการเผาไหม้แบบสลับทิศทางการไหลของไอคืออย่างป็นจังหวะ

Parametric Studies of Heat Transfer to Cooling Water Pipe in Radiation Dominated Heat Transfer with a Cyclic Flow Reversal Combustion in a Porous Medium

ขันติ ปานขลิบ สำเรง จักรใจ

ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถ.ประชาอุทิศ(สุขสวัสดิ์ 48) แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร (662)470-9111 โทรสาร (662)427-9111 E-Mail: isumgjal@cc.kmutt.ac.th

Khanti Panklib, Sumreng Jugjal

Combustion and Engine Research Laboratory (CERL)

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

91 Prachauthit Road (Suksawad 48) Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็น โดยอาศัยเทคนิคการเผาไหม้แบบ multiphase combustion ของเชื้อเพลิงแก๊สในวัสดุพรุน (porous medium) ทนความร้อนที่มีท่อน้ำเย็นฝังอยู่ภายใน อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ในวัสดุพรุนยังมีข้อจำกัดที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขที่สำคัญบางประการเกี่ยวกับช่วงการทำงานที่ยังแคบอยู่ คือความเร็วของไอที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบไหลทางเดียวนั้นมีค่าจำกัด ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปจะเกิดการเป่าดับ (blow off) ของเปลวไฟ และไม่สามารถที่จะเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำๆได้ ปัญหาดังกล่าวแก้ไขได้โดยใช้เทคนิคการสลับทิศทางการไหลของไอคืออย่างป็นจังหวะแทนการไหลแบบทางเดียว การศึกษาเริ่มโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และแก้สมการโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่นความเร็วการไหลของไอ ระยะเวลาที่ใช้ในการกลับทิศทางการไหลของไอคืออย่างป็นจังหวะ ค่า equivalence ratio เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างความร้อนภายในของวัสดุพรุนและค่า net radiative heat flux ที่กระทำต่อผิวท่อน้ำ จากการศึกษาพบว่า โดยการควบคุมเวลาที่ใช้ในการสลับวาล์วหรือทิศทางการไหลของไอคืออย่างเหมาะสมนั้นทำให้ระบบสามารถเผาไหม้ไอที่มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงๆ ได้โดยไม่ blow off และสูงกว่าระบบการเผาไหม้แบบไหลทางเดียวมาก ได้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ากรณีการเผาไหม้ที่ไม่มีวัสดุพรุน(มีแต่การพาความร้อนอย่างเดียว) 3 ถึง 5 เท่า ที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน

Keywords: วัสดุพรุน/การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี/การเผาไหม้

Abstract

This paper presents a study of heat transfer enhancement to a cooling water pipe by using multiphase combustion technique. This can be done by using one way flow combustion (OWFC) in a porous medium at which a water tube is embedded. The OWFC yields higher heat transfer coefficient than the single-phase system. However, The OWFC has a problem concerning a narrow operating range, which has not been solved yet. If supply velocity is higher than a limit value the flame blow-off occurs. This problem can be solved by using a cyclic flow reversal of combustion (CFRC) technique in the porous medium instead of the one way flow combustion. Mathematical model of the combustion system is formulated and solved by a numerical method. Attention was focused on the influence of the dominating parameters, i.e., flow velocity, half period and equivalence ratio on the formation of temperature profiles in the porous body. Results show that by changing the flow direction of the mixture at a regular time interval, the combustion system could be operated at relatively high flow velocity without a flame blow-off when compared with the OWFC system. The yielded heat transfer coefficient for the CFRC system is higher than that of the combustion system without the porous medium by a factor of 3 to 5 at the same operating conditions.

Keywords: Porous Medium / Radiation / Combustion

1. NOMENCLATURE

A_p	=	area of particle [m^2]
b	=	width of the duct [m]
C_p	=	(gas) specific heat at constant pressure [$J kg^{-1} K^{-1}$]
D	=	diffusivity [$m^2 s^{-1}$]
d	=	diameter of the water tube [m]
d_p	=	diameter of equivalent sphere of porous medium [m]
E	=	activation energy [kJ/kmol]
E_n	=	exponential integral function, $n=1, 2, 3$
G_z	=	Grætz number
H	=	dimensionless radiative heat flux [$q_r / 4\sigma T_0^4$]
h, K_w	=	heat transfer coefficient [$W m^{-2} K^{-1}$]
h_0	=	heating value of mixture [$J kg^{-1}$]
q_r	=	radiative heat flux [$W m^{-2}$]
k	=	(water) thermal conductivity [$W m^{-1} K^{-1}$]
L, x	=	length [m]
I	=	Intensity of radiation [W/m^2]
Le	=	Lewis number
Lc	=	heat supply [kW]
n_p	=	number density of particle [m^{-3}]
Nu	=	Nusselt number [$h d / \lambda$ or k]
Pr	=	Prandtl number [$\rho C_p / \lambda$]
R	=	gas constant [kJ/kmol K]
Re	=	Reynolds number [$\rho u d / \mu$]
RR	=	dimensionless rate of reaction
T	=	(gas) temperature [K]
TM	=	dimensionless gas temperature [T_g / T_0]
ΔT_m	=	logarithmic mean temperature difference
TP	=	dimensionless solid temperature [T_s / T_0]
t_{np}	=	half period [s]
t	=	time [s]
u	=	(gas) velocity [$m s^{-1}$]
w	=	reaction rate [$kg m^{-3} s^{-1}$]
Y	=	product mole fraction

1.2 Greek symbols

K	=	absorption coefficient [m^{-1}]
λ	=	(gas) thermal conductivity [$W m^{-1} K^{-1}$]
μ	=	(gas) viscosity [$kg m^{-1} s^{-1}$]
ρ	=	(gas) density [$kg m^{-3}$]
σ	=	Stefan-Boltzmann constant [$W m^{-2} K^{-4}$]
Φ	=	equivalence ratio
τ	=	optical thickness = $K x$
τ'	=	dummy variable of integration

1.3 Superscripts

$+$	=	positive direction
$-$	=	negative direction
n	=	net
∞	=	free stream condition

1.4 Subscripts

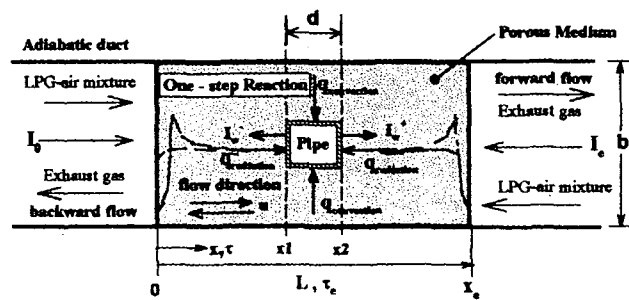
adi	=	adiabatic
b	=	black body
e, d	=	exit plane or downstream
m	=	mean value
max	=	maximum
0, u	=	ambient temperature or inlet plane or upstream
g	=	gas phase
p	=	particle
l	=	left (of water pipe)
r	=	right (of water pipe)
s	=	solid
w	=	wall or water
(T)	=	total (combined mode of heat transfer)
out	=	outlet, outside
in	=	inlet, inside

2. บทนำ

Jugjal และคณะ(1998)[1] ได้ประสบความสำเร็จในการทดลองเพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อนำเย็นโดยเปลี่ยนเทคนิคการเผาไหม้จาก single phase combustion (มีแค่สถานะแก๊สตัว) เป็น multiphase combustion (มีทั้งสถานะแก๊สและสถานะของแข็งอยู่ร่วมกัน) เทคนิคการเผาไหม้แบบ multiphase combustion ดังกล่าวกระทำได้โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สในวัสดุพรุน (porous medium) ทนความร้อนที่มีท่อนำเย็นฝังอยู่ภายใน จากผลการทดลองพบว่าพลังงานการแผ่รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัสดุพรุนสามารถช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อนำเย็นให้เพิ่มมากขึ้นนอกเหนือจากที่ได้รับจากการพาและการนำความร้อนทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างมากทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อนำเย็นเปลี่ยนจาก single mode เป็น multimode heat transfer นั่นเอง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเผาไหม้ในวัสดุพรุนสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขที่สำคัญบางประการเกี่ยวกับช่วงการทำงานที่ยังแคบอยู่เช่น ความเร็วของไอดี (u) ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ยังมีค่าจำกัด ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปจะเกิดการเป่าดับ (blow off) ของเปลวไฟและระบบยังไม่สามารถที่จะเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่างๆได้ ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยใช้เทคนิคการสลับทิศทางการไหลของไอดีอย่างเป็นจังหวะแทนการไหลแบบทางเดียว[2] งานวิจัยนี้จะศึกษาผลจากการสลับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงแก๊สอย่างเป็นจังหวะในวัสดุพรุนที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อที่จะขยายขอบเขตการศึกษาต่อจาก[3] ซึ่งจะพิจารณาเทคนิคการสลับทิศทางการเผาไหม้ในวัสดุพรุน อย่างเป็นจังหวะแทนการเผาไหม้แบบไหลทางเดียว[3] การศึกษากระทำโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และแก้สมการโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบไหลทางเดียว (one way flow combustion, OWFC) และระบบไหลสลับทิศทาง (cyclic flow reversal combustion, CFRC) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่นความเร็วการไหลของไอดี(u) เวลาที่ใช้ในการสลับทิศทางการไหลของไอดี(τ) ว่าเป็นจังหวะ (half period, t_{hp}) และอิทธิพลของค่า equivalence ratio (Φ) ที่มีต่อโครงสร้างความร้อนภายในของวัสดุพรุน และคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อหน้าเป็นในวัสดุพรุน

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 1 อากาศผสมกับก๊าซ LPG (ไอดี) ก่อนแล้วจึงไหลผ่านเข้ามาในท่อที่ไม่มี การสูญเสียความร้อน (adiabatic duct) ด้วยความเร็วคงที่ และภายในบรรจุวัสดุพรุน (porous medium) ซึ่งมีความยาว L และมีค่าความหนาเชิงแสง τe ภายในวัสดุพรุนจะมีท่อหน้าฝังอยู่ในลักษณะขวางกับทิศทางการไหลของไอดี การไหลของไอดีจะถูกสลับทิศทางอย่างเป็นจังหวะ โดยกำหนดเป็น forward flow กรณีไอดีไหลจากซ้ายไปขวา และ backward flow กรณีไอดีไหลจากขวาไปซ้าย ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนสมมติฐานต่างๆ ที่จำเป็นจะแสดงในหัวข้อต่อไป

4. สมมติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- 4.1 ไม่คิดการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซเนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับของแข็ง
- 4.2 สมมติให้วัสดุพรุนประกอบไปด้วย solid particles มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด(homogeneous)
- 4.3 ให้วัสดุพรุนมีคุณสมบัติเป็นทั้งตัวแผ่รังสี(emitter)และตัวดูดซับรังสี(absorber)และไม่คิดผลเนื่องจากการ scattering
- 4.4 พิจารณาการไหลและการแผ่รังสีแบบ 1 มิติ มีทิศทางการตามแนวแกน x เท่านั้น
- 4.5 การไหลของ mixture ที่ผ่านเข้ามายังเตาเผาไหม้จะเป็นแบบ incompressible และคุณสมบัติของ mixture มีค่าคงที่
- 4.6 ด้านซ้ายและด้านขวาของวัสดุพรุนได้รับการแผ่รังสีจากบรรยากาศ ซึ่งสมมติว่าเป็นวัตถุดำ ความเข้ม I₀ และ I₀ ตามลำดับ

4.7 ท่อน้ำกลมจะวางขวางในทิศทางตั้งฉากกับการไหล และถูกพิจารณาเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส d [3] (hydraulic diameter เท่ากับท่อน้ำกลม) เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาแบบ 1 มิติ โดยพื้นผิวด้านนอกทางด้านซ้ายและขวาจะได้รับความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี(radiation)เพียงอย่างเดียว ส่วนด้านบนและล่างจะได้รับความร้อนเนื่องจากการพา(convection)เท่านั้น

4.8 สมมติให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นแบบ single step global reaction (reaction → product + heat) แบบ Arrhenius

4.9 คุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ มีค่าคงที่

5. สมการการคำนวณที่สำคัญของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากการเผาไหม้จะพิจารณาเป็น one-step first order reaction แบบ Arrhenius สมการสมดุลพลังงาน(energy equation) และสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมีค่าต่อไปนี้

5.1 Species equation

ที่ $0 \leq x \leq x_0$

$$\rho \frac{\partial Y}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y}{\partial x} = D_p \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + w \quad (1)$$

โดยที่ อัตราการเกิดปฏิกิริยา single step global reaction แบบ Arrhenius

$$w = A_p(1 - Y) \exp(-E/RT) \quad (2)$$

5.2 Gas phase equation

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

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_o w - h_p n_p A_p (T - T_s) \quad (3)$$

ที่ $x_1 \leq x \leq x_2$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_o w - h_p n_p A_p (T - T_s) - \frac{2K_w}{(b-d)} (T - T_w) \quad (4)$$

5.3 Solid phase equation

ที่ $0 \leq x \leq x_0$

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r^n}{\partial x} + h_p n_p A_p (T_s - T) \quad (5)$$

5.4 Radiative heat flux and Divergent of net radiative heat flux

จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่หน้าตัดของวัสดุพรุนตาม รูปที่ 1 ดังนี้

ที่ $0 \leq x < x_1$

$$q_r^+(x) = 2 \pi [I_o E_3(\tau) + \int_0^x I_b(\tau) E_2(\tau - x) d\tau] \quad (6)$$

$$q_r^-(\tau) = -2\pi\left(1 - \frac{d}{b}\right)I_0 E_3(\tau_e - \tau) + \left(1 - \frac{d}{b}\right) \int_b^{\tau_e} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau' + \frac{d}{b} I_w E_3(\tau_1 - \tau) + \int_b^{\tau_1} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau' \quad (7)$$

$$\frac{\partial q_r^-(\tau)}{\partial x} = -\frac{2\pi\kappa}{b} [bI_0 E_2(\tau) + (b-d)I_e E_2(\tau_e - \tau) + dI_w E_2(\tau_1 - \tau) - 2bI_b(\tau) + (b-d) \int_b^{\tau_e} I_b(\tau') E_1(\tau' - \tau) d\tau' + b \int_b^{\tau_1} I_b(\tau') E_1(\tau' - \tau) d\tau' + b \int_0^{\tau} I_b(\tau') E_1(\tau - \tau') d\tau'] \quad (8)$$

ที่ $x_1 \leq x \leq x_2$

$$q_r^+(\tau) = 2\pi\left(1 - \frac{d}{b}\right) [I_0 E_3(\tau) + \int_0^{\tau} I_b(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau'] \quad (9)$$

$$q_r^-(\tau) = -2\pi\left(1 - \frac{d}{b}\right) [I_e E_3(\tau_e - \tau) + \int_b^{\tau_e} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau'] \quad (10)$$

$$\frac{\partial q_r^-(\tau)}{\partial x} = -2\pi\kappa\left(1 - \frac{d}{b}\right) [I_0 E_2(\tau) + I_e E_2(\tau_e - \tau) - 2I_b(\tau) + \int_0^{\tau_e} I_b(\tau') E_1(\tau - \tau') d\tau'] \quad (11)$$

ที่ $x_2 < x \leq x_0$

$$q_r^+(\tau) = 2\pi\left(1 - \frac{d}{b}\right) [I_0 E_3(\tau) + \left(1 - \frac{d}{b}\right) \int_b^{\tau_2} I_b(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau' + \frac{d}{b} I_w E_3(\tau - \tau_2) + \int_b^{\tau_2} I_b(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau'] \quad (12)$$

$$q_r^-(\tau) = -2\pi [I_e E_3(\tau_e - \tau) + \int_b^{\tau_e} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau'] \quad (13)$$

$$\frac{\partial q_r^+(\tau)}{\partial x} = -\frac{2\pi\kappa}{b} [(b-d)I_0 E_2(\tau) + bI_e E_2(\tau_e - \tau) + dI_w E_2(\tau - \tau_2) - 2bI_b(\tau) + (b-d) \int_b^{\tau_2} I_b(\tau') E_1(\tau - \tau') d\tau' + b \int_b^{\tau_e} I_b(\tau') E_1(\tau - \tau') d\tau' + b \int_{\tau_2}^{\tau} I_b(\tau') E_1(\tau - \tau') d\tau'] \quad (14)$$

โดยที่ $q_r^+(\tau) = q_r^+(\tau) + q_r^-(\tau)$ (15)

$$I_b(\tau) = \frac{\sigma T_s^4}{\pi} \quad (16)$$

$$E_n(\tau) = \int_0^1 \mu^{n-2} \exp(-\tau/\mu) d\mu \quad (17)$$

6. สมการการที่เกี่ยวกับของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อหน้าเย็น

6.1 สมการที่ผิวด้านนอกของท่อหน้า

$$\dot{m}_w C_{pw} \Delta T_w = 2K_w b \int_{x_1}^{x_2} (T - T_w) dx + bd[q_r^+(x_1) - q_r^-(x_2) - 2I_w] \quad (18)$$

โดยที่เทอม $bd[q_r^+(x_1) - q_r^-(x_2) - 2I_w] = (q_r^+)_{mbe}$ คือปริมาณความร้อนที่ท่อหน้าได้รับจากการแผ่รังสี ค่า ΔT_w คือ ผลต่างอุณหภูมิหน้าเข้าและออกของท่อหน้า ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ $10^\circ K$ และค่า K_w คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective heat transfer coefficient) ที่ผิวนอกของท่อหน้า ซึ่งคำนวณจาก empirical formula [4] ดังนี้

$$(Nu_m)_{out} = \frac{(h_m)_{out} \cdot d}{\lambda} = (0.4Re^{0.5} + 0.06Re^{2/3}) Pr^{0.4} (\mu_\infty/\mu_w)^{0.25} \quad (19)$$

โดย $K_w = (h_m)_{out}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คิดอิทธิพลจากการแผ่รังสีมายังท่อแล้ว (combined mode of heat transfer) $Nu(T)$ หาได้จาก

$$Nu(T) = \frac{h(T) d}{\lambda} \quad \text{โดยที่ } h(T) \text{ มาจาก} \quad (20)$$

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

6.2 สมการที่ผิวท่อด้านใน

$$\dot{m}_w C_{pw} \Delta T_w = 2bd(h_m)_{in} \Delta T_m \quad (21)$$

$$\text{โดยที่ } \Delta T_m = \frac{(T_{in} - T_{out})}{\ln[(T_{in} - T_w)/(T_{out} - T_w)]} \quad (22)$$

และค่า $(h_m)_{in}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวด้านในของท่อ ซึ่งคำนวณจาก empirical formula [4] ดังนี้

$$(Nu_m)_{in} = 3.66 + \frac{0.0668Gz}{1 + 0.04(Gz)^{2/3}} \quad (23)$$

$$\text{โดยที่ } Gz = \frac{(Re \cdot Pr)_{in}}{L/d}, \quad (h_m)_{in} = \frac{k \cdot (Nu_m)_{in}}{d} \quad \text{เมื่อ } L = b \quad (24)$$

7. Boundary conditions และ Initial conditions

7.1 Boundary conditions

กรณีไอดีไหลในทิศทางจากซ้ายไปขวา (forward flow)

$$\begin{aligned} T_0 &= T_0 \quad \text{เมื่อ } t \geq 0, \quad x = 0 \\ \partial T_0 / \partial x &= \text{constant} \quad \text{เมื่อ } t > 0, \quad x = L \end{aligned} \quad (25)$$

การหา $T_0(x=L, t > 0s)$ และ $T_0(x=0, t > 0s)$ จะหาได้จาก การอินทิเกรต half control volume จากสมการของของแข็ง สำหรับ boundary บริเวณทางเข้าและทางออกมีความเข้มของการแผ่รังสีจาก ลังแนวล้อมมายังระบบ จะพิจารณาลังแนวล้อมเดิมเป็นวัตถุดำที่มี อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง $T_0 = T_0 = 303 \text{ K}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} I_0 &= i'(0) = \sigma T_0^4 / \pi \quad \text{เมื่อ } t \geq 0, \quad x = 0 \\ I_0 &= i'(L) = \sigma T_0^4 / \pi \quad \text{เมื่อ } t \geq 0, \quad x = L \end{aligned} \quad (26)$$

7.2 Initial conditions

ใช้ค่าตอบ (converged solution) กรณีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้โดยยังไม่ใส่ท่อน้ำเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ

7.3 ขั้นตอนในการคำนวณ

สมการข้างต้นจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการไร้หน่วย และจัดให้อยู่ในรูปสมการ finite difference แล้วแก้สมการ โดยใช้วิธี implicit finite difference เพื่อหาค่าตอบของการกระจายอุณหภูมิของก๊าซ(T) อุณหภูมิของแข็ง(T_0) product mole fraction ของผลิตภัณฑ์(Y) อุณหภูมิที่ผิวท่อน้ำ(T_w) และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในท่อน้ำ (\dot{m}_w) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

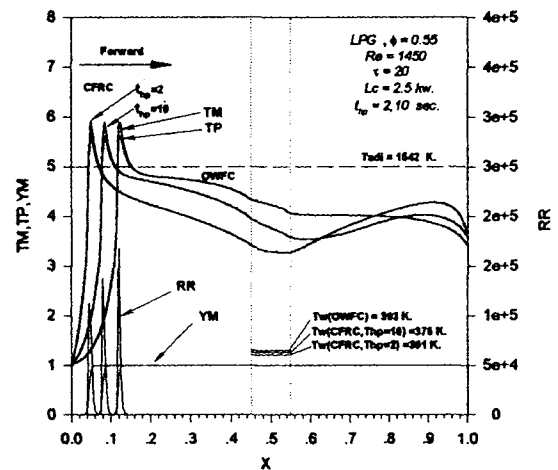
การคำนวณจะแบ่งระยะทางออกเป็น 200 meshes ในช่วงของ วัสดุพอร์ซัน การคำนวณเพื่อหาค่าตอบในแต่ละช่วงเวลา (time step) จะใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (iterative procedure) จนกระทั่งผลลัพธ์ที่คำนวณ ได้ลู่เข้าหาค่าตอบโดยมี convergence criterion = 10^{-6} และ steady state criterion = 10^{-4} (โครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่ เวลาสุดท้ายของไซเคิลก่อนหน้า เปรียบเทียบกับโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายเช่นเดียวกันของไซเคิลปัจจุบัน ในทิศทางไหลเดียวกัน โดยถ้ามีความแตกต่างกันน้อยกว่า 10^{-4} ใน

ทุกๆ node point แล้วจะเป็นการเสร็จสิ้นการคำนวณและได้ค่าตอบ) หลังจากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการทำ global energy balance และ local energy balance ซึ่ง error จากการคำนวณ global energy balance อยู่ในช่วง 0.2 – 3.0 %

8. ผลและการวิจารณ์

8.1 เปรียบเทียบโครงสร้างทางความร้อนระหว่างระบบ OWFC กับ CFRC

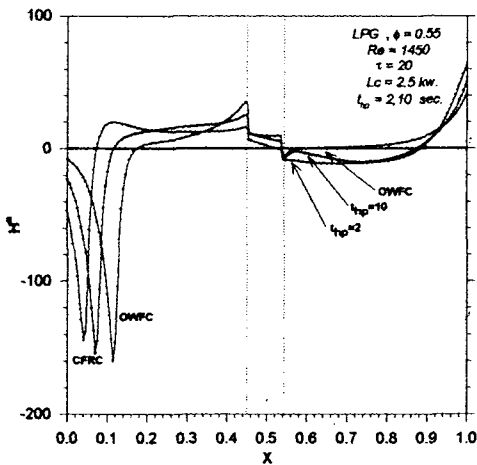
รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางความร้อน เช่น อุณหภูมิของก๊าซ(TM) อุณหภูมิของของแข็ง(TP) อัตราการเกิดปฏิกิริยา(RR) และอัตราการเกิด mole fraction ของผลิตภัณฑ์(YM)



รูปที่ 2 โครงสร้างทางความร้อนระบบ OWFC และ CFRC

ที่ค่า $\Phi = 0.55$ $\tau = 20$ $Re = 1450$ ระหว่างระบบ OWFC และระบบ CFRC ที่ half-period (t_{hp}) = 2 และ 10 sec. ทั้งสองระบบจะได้ค่าของ TM กับ TP เหมือนกับระบบการเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์ซันทั่วไป กล่าวคือ ไอเดียที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้จะถูกอุ่นให้ร้อนขึ้นก่อนเข้าสู่บริเวณที่เกิดการเผาไหม้ โดยวัสดุพอร์ซันสามารถที่จะนำเอาความร้อนที่ได้จากไอเสียมาอุ่นไอเดียก่อนเกิดการเผาไหม้โดยการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของวัสดุพอร์ซัน อุณหภูมิสูงสุดของก๊าซ(TM_{max}) ของทั้งสองระบบจะใกล้เคียงกันมาก การกระจายอุณหภูมิความหนาแน่นของระบบ CFRC ที่ทำยค่า half-period (t_{hp}) จะขึ้นอยู่กับค่า t_{hp} ที่ใช้ เช่น ถ้า t_{hp} มีค่าเท่ากับ 2 sec. เปลวไฟจะเกิดขึ้นบริเวณทางเข้าของวัสดุพอร์ซัน(upstream region) และค่าอุณหภูมิบริเวณท่อน้ำจะต่ำกว่าของระบบ OWFC มาก แต่เมื่อเพิ่ม t_{hp} เป็น 10 sec. เปลวไฟจะเลื่อนเข้าไปในวัสดุพอร์ซันลึกขึ้นและเข้าไปใกล้ระบบ OWFC พร้อมกับอุณหภูมิบริเวณท่อน้ำจะมีค่าสูงขึ้น ถ้าเพิ่ม t_{hp} ให้สูงมากขึ้นไปอีกระบบ CFRC จะลู่เข้าสู่ระบบ OWFC และทั้งสองระบบจะให้โครงสร้างทางความร้อนที่คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตามที่ $t_{hp} = 10$ sec. ระบบ CFRC จะให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้(TM_{max}) ใกล้เคียงกับของระบบ OWFC มาก แม้ว่าเปลวไฟของระบบ CFRC จะอยู่ใกล้ทางเข้าของวัสดุพอร์ซันมากกว่าและเกิดการสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีที่ทางเข้าและทาง

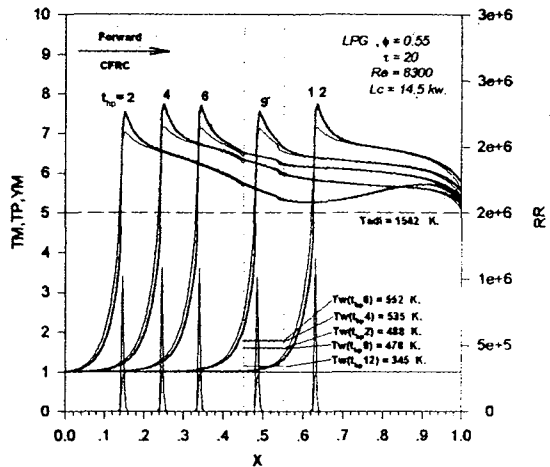
ออกมากกว่าระบบ OWFC ดังแสดงในรูปที่ 3 แต่ระบบ CFRC ยังให้ค่า Nu_m ที่ใกล้เคียงกับระบบ OWFC ดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งๆที่อุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณท่อน้ำของระบบ CFRC ต่ำกว่าของระบบ OWFC นั้นแสดงให้เห็นว่าระบบ CFRC มีคุณสมบัติที่ไม่ค่อยไปกว่าระบบ OWFC ซึ่งถ้าหากว่าทำให้เปลวไฟขยับลึกเข้าไปในวัสดุพูนมากขึ้นไปอีก โดยการเพิ่มความเร็วของไอหรือลดค่า Φ เพื่อให้การสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีที่ทางเข้าและทางออกลดลง ระบบ CFRC ย่อมมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าอย่างแน่นอน จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าระบบ OWFC จะได้รับอิทธิพลการแผ่รังสีความร้อนทางด้านซ้ายของท่อน้ำมากกว่า แต่ในระบบ CFRC จะทดแทนด้วยการรับการแผ่รังสีความร้อนทางด้านขวา ของท่อก่อให้เกิดการชดเชย H_{sub}^i ทำให้ทั้งสองระบบมีค่า Nu_m ที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4 ถ้าเพิ่ม Re ให้มากกว่า 1500 แล้ว ระบบ OWFC ไม่สามารถทำงานได้ เพราะเกิด blow off เสียก่อน จึงเป็นข้อจำกัดของระบบ OWFC เมื่อเทียบกับระบบ CFRC เนื่องจากสามารถทำงานได้ในช่วงการไหลของไอที่กว้างกว่า ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



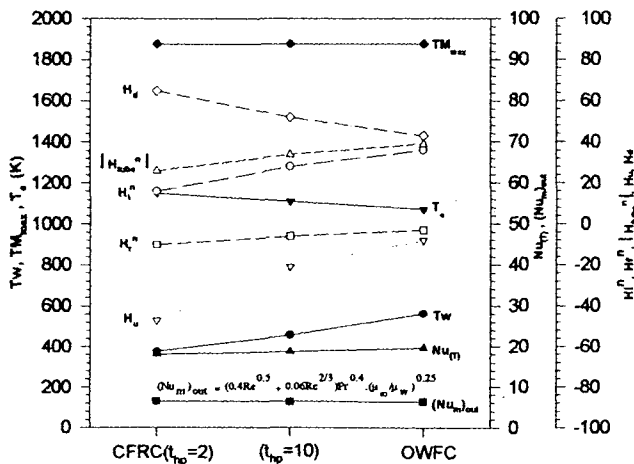
รูปที่ 3 แสดง H^i ของระบบ OWFC และ CFRC

8.2 อิทธิพลของค่า Half period (t_{hp})

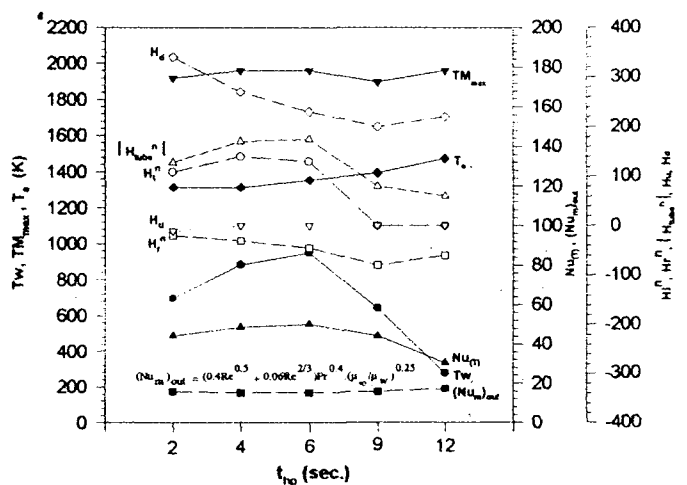
รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของช่วงเวลาในการกลับทิศทางการไหลของไอ (t_{hp}) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางความร้อน เช่น TM TP RR และ YM โดยจะพิจารณาเฉพาะทิศทางการไหลของไอจากซ้ายไปขวา ที่ $\Phi = 0.55$ $\tau = 20$ $Re = 8300$ เมื่อ t_{hp} เพิ่มขึ้นเปลวไฟจะเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในวัสดุพูนได้มากขึ้น(เลื่อนตัวจากซ้ายไปขวา) อุณหภูมิของโครงสร้างทางความร้อนช่วงกลางวัสดุพูนหรือบริเวณท่อน้ำจะสูงขึ้นเช่นกัน ขณะที่ TM_{max} (ดูรูปที่ 6) ก่อนข้างจะคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงไปกับ t_{hp} มากนัก ยกเว้นในกรณีที่ t_{hp} น้อยๆ จะพบว่า TM_{max} จะมีค่าต่ำเล็กน้อย เนื่องจาก H_{sub}^i ที่สูญเสียออกจากระบบบริเวณด้านซ้าย และกรณีที่ $t_{hp} = 9$ sec. โครงสร้างทางความร้อน หรือบริเวณ reaction zone จะเลื่อนตำแหน่งไปอยู่บริเวณกลางท่อน้ำ พลังงานความร้อนบางส่วนถูกถ่ายเทไปยังท่อน้ำจึงทำให้อุณหภูมิในช่วงการเผาไหม้ลดต่ำลง ส่งผลให้ TM_{max} ช่วงนั้นจะลดต่ำลงตามไปด้วยแต่เมื่อเพิ่ม $t_{hp} = 12$ sec. ตำแหน่ง reaction zone จะขยับไปอยู่บริเวณหลังท่อน้ำและ TM_{max} จะกลับสูงขึ้นมาอีกครั้งพร้อมกับอุณหภูมิของอากาศที่สูง ขณะที่เปลวไฟ



รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของค่า t_{hp}



รูปที่ 4 เปรียบเทียบสมรรถนะโดยรวมของทั้งสองระบบ

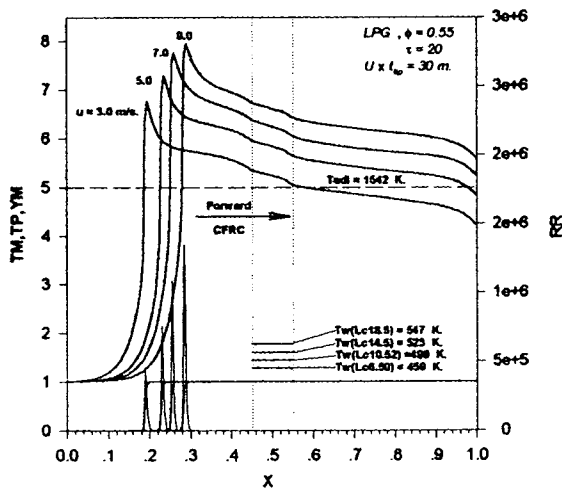


รูปที่ 6 สมรรถนะโดยรวมเมื่อ t_{hp} เปลี่ยนแปลง

เคลื่อนที่ลึกเข้าไปในวัสดุพอร์ซเลนที่มากขึ้นตามการเพิ่มค่า t_{hp} การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเข้าสู่ท่อทั้งทางด้านซ้ายและทางด้านขวา จะเพิ่มขึ้นตามค่า t_{hp} ดังแสดงในรูปที่ 6 จนกระทั่ง $t_{hp} = 9$ และ 12 sec. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เปลวไฟอยู่บริเวณท่อน้ำ และทางด้าน downstream ของท่อน้ำตามลำดับการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีไปยังท่อน้ำจะเกิดขึ้นเฉพาะทางด้านขวาของท่อน้ำเท่านั้น (H_u'' มีค่าเป็นลบ) ทำให้ค่า $Nu_{(T)}$ ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6

8.3 อิทธิพลของค่าความเร็วในการไหลของไอดี(u)

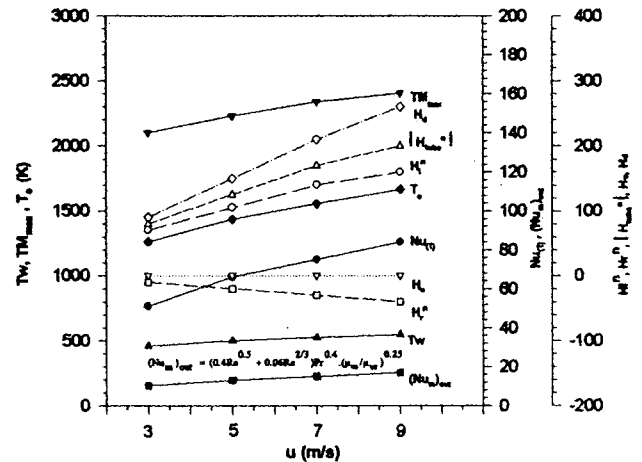
รูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความเร็ว(u) ของไอดีที่ไหลเข้าสู่ระบบ CFRC ขณะที่ระบบ OWFC ไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากเกิดการ blow-off เสียก่อน ที่ $\Phi = 0.55$, $\tau = 20$ โดยที่ผลคูณของ t_{hp} กับความเร็วในการไหลของไอดี ($t_{hp} \cdot u_{max}$) มีค่าเท่ากับ 30 m. เพื่อลดอิทธิพลแทรกซ้อนอันเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของเปลวไฟทำให้สามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า u ได้โดยไม่มีอิทธิพลจากการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องจากการเพิ่ม u ของระบบซึ่งมีความหมายว่าเป็นการเพิ่ม heat supply (Lc) นั้นเอง จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) จะเพิ่มขึ้นขณะเดียวกันกับ TM_{max} (ดูรูปที่ 8 ประกอบ) อุณหภูมิของโครงสร้างความร้อนภายในวัสดุพอร์ซเลนบริเวณท่อน้ำ และอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากระบบก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของค่า u ต่อโครงสร้างทางความร้อน

ซึ่งส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อน้ำ T_w มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย จากรูปที่ 8 เห็นได้ว่า $|H_{u,loc}''|$ จะเพิ่มขึ้นตาม u อย่างเห็นได้ชัด ทาง upstream ปริมาณ H_u ที่สูญเสียออกจากระบบบริเวณด้านซ้ายจะน้อยเนื่องจากตำแหน่งโครงสร้างทางความร้อนเกิดขึ้นในตำแหน่งที่เหมาะสมลึกเข้าไปในวัสดุพอร์ซเลน แต่ทางด้านขวามี H_u ที่สูญเสียออกจากระบบสูงกว่าเนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่มีค่ามากขึ้นและรูปที่ 8 ยังแสดงสมรรถนะ การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็น พบว่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนรวม($Nu_{(T)}$) ของระบบจะสูงขึ้นตามปริมาณ u ที่เพิ่มเข้าไปในระบบ ทำให้ทราบถึงสมรรถนะการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

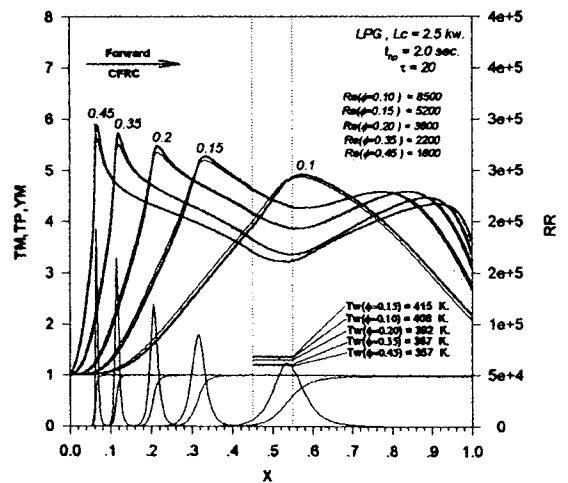
ภาพของระบบ CFRC ในการทำงานที่ช่วงความเร็วไอดีสูงๆ ซึ่งระบบ OWFC ไม่สามารถกระทำได้ ดังนั้นถ้าทั้งสองระบบมีเคาเผาไหม้ขนาดที่เท่ากัน จะพบว่าระบบ CFRC สามารถที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิงในปริมาณมากๆ และให้ combustion intensity (kW/m^3) สูงกว่าระบบ OWFC แต่ก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการเลือกค่า t_{hp} ให้เหมาะสมกับช่วง u ที่จะนำไปใช้งานด้วย



รูปที่ 8 สมรรถนะโดยรวมเมื่อความเร็ว u เปลี่ยนแปลง

8.4 อิทธิพลของค่า Equivalence ratio(Φ)

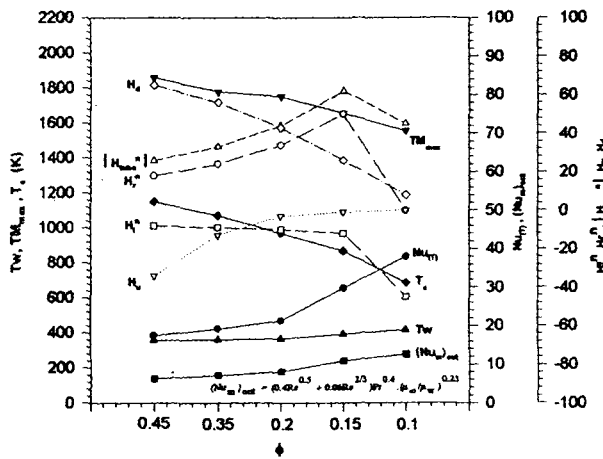
รูปที่ 9 แสดงอิทธิพลของค่า Φ ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อนของระบบในรูป อุณหภูมิของก๊าซ (TM) อุณหภูมิของของแข็ง(TP) อัตราการเกิดปฏิกิริยา(RR) อัตราการเกิด Mole fraction ของผลิตภัณฑ์(YM) ที่ $\tau = 20$ $t_{hp} = 2$ sec. โดยให้ Lc คงที่เท่ากับ 2.5 kW.



รูปที่ 9 แสดงอิทธิพลของค่า Φ ต่อโครงสร้างทางความร้อน

ค่า Φ ถูกลดลงจาก 0.45 ถึง 0.1 โดยการเพิ่มอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงให้เจือจางมากขึ้นก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (ค่าพลังงานความร้อนของส่วนผสมจะต่ำลง) ดังนั้นเมื่อ Φ มีค่าลดลงขณะที่ Lc คงที่ ความเร็วของไอดีที่เข้าสู่ระบบจะต้องเพิ่มขึ้น ทำให้เปลวไฟเคลื่อนที่ลึก

เข้าไปในตัววัสดุพอร์ซเซิลที่ร้อนน้ำมากขึ้นพร้อมกับการลดลงของ TM_{max} การกระจายอุณหภูมิมีลักษณะเป็นแอ่ง เว้าตรงกลางบริเวณท่อหน้าเนื่องจากอิทธิพลของท่อหน้า และจะมีค่าที่ Φ สูงๆ ค่าอุณหภูมิบริเวณนี้จะมีค่าสูงขึ้นตามค่า Φ ที่ลดลง จนกระทั่งการกระจายอุณหภูมิเปลี่ยนจากแอ่งเว้าตรง เป็นนูนขึ้น จนมีลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยม ที่ $\Phi = 0.1$ และให้ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นใกล้กับผิวด้านขวามือของท่อหน้า ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสู่อ่อน้ำสูงขึ้น ดังเห็นได้จากกราฟเพิ่มขึ้นของค่า $Nu_{(T)}$ ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นว่าแม้ TM_{max} ของโครงสร้างทางความร้อนจะลดลงตาม Φ แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม($Nu_{(T)}$) จะเพิ่มขึ้นเมื่อโครงสร้างของทางความร้อนมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปคล้ายรูปสามเหลี่ยมและพบว่าระบบ CFRC ที่ $\tau = 20$ $t_{hp} = 2$ sec. และ $L_c = 2.5$ kW. สามารถที่จะเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าเจือจาง (lean) มากๆ ได้ โดยมีค่า $\Phi = 0.095$ หรือค่าพลังงานความร้อน (h_0) = 281.48 kJ/kg.



รูปที่ 10 สมรรถนะโดยรวมเมื่อ Φ เปลี่ยนแปลง

จึงพอสรุปได้ว่าระบบ CFRC จะทำงานได้ดีที่ Re สูงๆ และค่า Φ ต่ำๆ แต่ก็ขึ้นอยู่กับเลือกใช้ค่า t_{hp} และ Re ที่เหมาะสมด้วย

9. สรุป

ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่อ่อน้ำเย็น โดยอาศัยเทคนิคการเผาไหม้แบบ multiphase combustion ร่วมกับการสลับทิศทางการไหลของไอคืออย่างเป็นจังหวะ(CFRC) แทนการไหลแบบทางเดียว(OWFC) ทำให้ขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้นกว่าเดิม สามารถเพิ่มอุณหภูมิห้องเผาไหม้ได้มากกว่าระบบ CFRC สามารถทำงานที่ความเร็วการไหลของไอที่สูงๆ และค่า Φ ต่ำๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งระบบ OWFC ไม่สามารถทำได้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทำงานที่สูงกว่า การประยุกต์ใช้วัสดุพอร์ซเซิลเพื่อส่งเสริมการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนสู่อ่อน้ำเย็น โดยเทคนิคดังกล่าวจึงนับว่าเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อไปประยุกต์ใช้ให้

เกิดประโยชน์ ในด้านอุตสาหกรรม เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) หรือ หม้อกำเนิดไอน้ำ(boiler) ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไปในอนาคต

10.เอกสารอ้างอิง

- [1] Jugjai, S., et al, "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, pp. 91-105, December, 1998.
- [2] Jugjai, S., et al, "Multimode Heat Transfer in Cyclic Flow Reversal Combustion in a Porous Medium" International Journal of Energy Research, Vol. 23, No. 3, pp. 183-206, 1999
- [3] R. Echigo, K. Hanamura, Y. Yoshizawa and T. Tomimura, "Radiative Heat Transfer Enhancement to a Water Tube by Combustion Gases in Porous Media" ,The Collection Paper of Ryozyo Echigo, Vol.2, pp.1-99
- [4] Ozisik, M. Necati. 1985: "Heat Transfer A Basic Approach", McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 307,375