

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนในหม้อต้มน้ำร้อนโดยการเผาไหม้ในวัสดุพรุนแบบสลับทิศทางการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงอย่างเป็นจังหวะ

**Mathematical Model of Combustion and Heat Transfer in Boiler
by Reciprocating Combustion of fuel gas in Porous Medium**

จุกฤต ปานขลิบ

หลักสูตรการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม กรุงเทพฯ
10600

Thakrit Panklib

Energy and Environmental Management Program, Graduate School, Siam Technology
College, Bangkok, 10600

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อไอน้ำโดยอาศัยเทคนิคการเผาไหม้แบบ multiphase combustion เทคนิคดังกล่าวกระทำได้โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สในวัสดุพรุน (porous medium) ทนความร้อนที่มีท่อไอน้ำเย็นอยู่ภายใน อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ในวัสดุพรุนยังมีข้อจำกัดที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขที่สำคัญบางประการเกี่ยวกับช่วงการทำงานที่ยังแคบอยู่ กล่าวคือ ความเร็วของไอดีที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้เมื่อต้องการเพิ่มอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าจำกัด ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปจะเกิดการเป่าดับ (Blow off) ของเปลวไฟ และไม่สามารถที่จะเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำๆได้ ปัญหาดังกล่าวแก้ไขได้โดยใช้เทคนิคการสลับทิศทางการไหลของไอดีอย่างเป็นจังหวะแทนการไหลแบบทางเดียว การศึกษาเริ่มโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และแก้สมการโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วการไหลของไอดี เวลาที่ใช้ในการกลับทิศทางการไหลของไอดี ค่า equivalence ratio เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างความร้อนภายในของวัสดุพรุนและค่า net radiative heat flux ที่กระทำต่อผิวท่อไอน้ำ จากการศึกษาพบว่า โดยการควบคุมเวลาที่ใช้ในการสลับวาล์วหรือทิศทางการไหลของไอดีอย่างเหมาะสมนั้นทำให้ระบบสามารถเผาไหม้ไอดีที่มีอัตราการไหลเข้าสู่ระบบสูงๆ ได้โดยไม่ Blow off และสูงกว่าระบบการเผาไหม้แบบไหลทางเดียวมาก ได้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ากรณีการเผาไหม้ที่ไม่มีวัสดุพรุน(มีแต่การพาความร้อนอย่างเดียว) 3 ถึง 5 เท่า ที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน

Keywords: วัสดุพรุน การถ่ายเทความร้อน การเผาไหม้

Abstract

This paper presents the study of heat transfer enhancement to 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 inserted. 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 a porous medium instead of 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 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 condition.

Keywords: Porous Medium, Heat transfer, Combustion

1. บทนำ

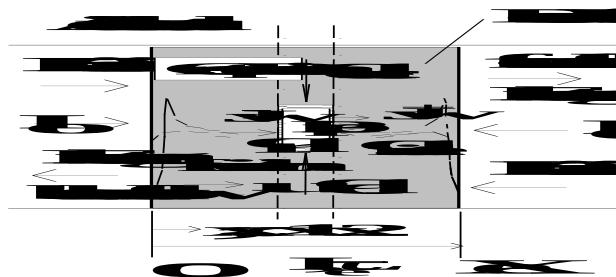
Sumrerng และคณะ (1998) [1] ได้ประสบความสำเร็จในการทดลองเพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นโดยเปลี่ยนเทคนิคการเผาไหม้จาก Single phase combustion (มีแต่สถานะแก๊สล้วน) เป็น Multiphase combustion (มีทั้งสถานะแก๊สและสถานะของแข็งอยู่ร่วมกัน) เทคนิคการเผาไหม้แบบ Multiphase combustion ดังกล่าวกระทำได้โดยการเผาไหม้ในวัสดุพรุน (Porous medium) ทนความร้อนที่มีท่อน้ำเย็นอยู่ภายใน จากผลการทดลองพบว่าพลังงานการแผ่รังสีความร้อนที่แผ่ออกจากวัสดุพรุนสามารถช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นให้เพิ่มมากขึ้น นอกเหนือจากที่ได้รับจากการพาและการนำ ความร้อนทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างมากทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นเปลี่ยนจาก Single mode เป็น Multimode heat transfer นั่นเอง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเผาไหม้ในวัสดุพรุนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขที่สำคัญบางประการเกี่ยวกับช่วงการทำงานที่ยังแคบอยู่เช่น ความเร็วของไอดี (u) ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ยังมีค่าจำกัด ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปจะเกิดการเป่าดับ (Blow off) ของเปลวไฟและระบบยังไม่สามารถที่จะเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำๆได้ ปัญหาดังกล่าวสามารถ

แก้ไขได้โดยใช้เทคนิคการสลับทิศทางการไหลของไอดีอย่างเป็นจังหวะแทนการไหลแบบทางเดียว [2] งานวิจัยนี้จะศึกษาผลจากการสลับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงแก๊สในวัสดุพรุนที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็น

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อที่จะขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้วัสดุพรุนในการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นโดยอาศัยเทคนิคการสลับทิศทางการเผาไหม้ในวัสดุพรุนอย่างเป็นจังหวะ การศึกษากระทำโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ แก้มการโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบไหลทางเดียว (One way flow combustion, OWFC) และระบบไหลสลับทิศทาง (Cyclic flow reversal combustion, CFRC) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่นความเร็วการไหลของไอดี(u) เวลาที่ใช้ในการสลับทิศทางการไหลของไอดีอย่างเป็นจังหวะ (Half period, t_{hp}) และอิทธิพลของค่า Equivalence ratio (Φ) ที่มีต่อโครงสร้างความร้อนภายในของวัสดุพรุน และคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็นในวัสดุพรุน

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 1 เมื่ออากาศผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงหรือ Mixture แล้วไหลผ่านเข้ามาในท่อที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน (Adiabatic duct) ด้วยความเร็วคงที่ และภายในบรรจุวัสดุพรุน (Porous medium) ซึ่งมีความยาว L และมีค่าความหนาเชิงแสง τ_e ภายในวัสดุพรุนจะมีท่อน้ำฝังอยู่ การไหลของไอดีจะถูกกลับทิศทาง อย่างเป็นจังหวะกำหนดเป็น Forward flow และ Backward flow ไอดีจะต้องผสมกันอย่างสมบูรณ์ซึ่งต้องรู้ถึงอุณหภูมิเริ่มต้นและค่า Φ ก่อนเผาไหม้ ไอดีถูกสมมติให้เกิดการเผาไหม้พร้อมปลดปล่อยพลังงานในช่วงความหนาของเปลวไฟนี้ สมมติให้ไม่มีการสูญเสียพลังงานในแนวรัศมีที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีลักษณะรูปทรงกระบอกมีท่อน้ำบรรจุอยู่ภายในจะพิจารณาในระบบ 1 มิติ ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3. สมมติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- 3.1 ไม่คิดการแผ่รังสีของแก๊สเนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับของแข็ง
- 3.2 สมมติให้วัสดุพรุนประกอบไปด้วย Solid particles มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด (Homogeneous)
- 3.3 ให้วัสดุพรุนมีคุณสมบัติเป็นทั้งตัวแผ่รังสี (Emitter) และตัวดูดซับรังสี (Absorber) และไม่คิดผลเนื่องจากการ Scattering
- 3.4 คิดแบบ 1 มิติการแผ่รังสีจะมีทิศทางตามแนวแกน X เท่านั้น
- 3.5 การไหลของ Mixture ที่ผ่านเข้ามายังเตาเผาไหม้จะเป็นแบบ Incompressible และคุณสมบัติของ Mixture มีค่าคงที่
- 3.6 ด้านซ้ายและด้านขวาของวัสดุพรุนได้รับการแผ่รังสีจากบรรยากาศ ซึ่งสมมติว่าเป็นวัตถุดำ ความเข้ม I_0 และ I_e
- 3.7 ท่อนำถูกพิจารณาเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $d \times d$ มีการแผ่รังสีความร้อนเฉพาะพื้นผิวด้านตั้งฉากกับทิศทางการไหลทั้งสองด้านเท่านั้นและการพาความร้อนของแก๊สจะถูกพิจารณาให้เกิดขึ้นเฉพาะที่พื้นผิวด้านที่ขนานกับทิศทางการไหลทั้งสองด้าน [3]

4. Boundary conditions และ Initial conditions

4.1 Boundary conditions

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ไอเดียก่อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ จะต้องทราบค่าอุณหภูมิและค่า Φ ดังนั้นที่ตำแหน่ง $x = 0$ และ $x = L$ จะมีค่า boundary ดังนี้ กรณีไอเดียไหลในทิศทางจากซ้ายไปขวา (Forward flow)

$$\begin{aligned} T_g &= T_0 & \text{เมื่อ } t \geq 0 \text{ sec., } x = 0 \\ \partial T_g / \partial x &= \text{Constant} & \text{เมื่อ } t > 0 \text{ sec., } x = L \\ \partial T_s / \partial x &= \text{Constant} & \text{เมื่อ } t > 0 \text{ sec., } x = 0 \\ \partial T_s / \partial x &= \text{Constant} & \text{เมื่อ } t > 0 \text{ sec., } x = L \end{aligned} \quad (1)$$

การหา $T_g(x = L, t > 0s)$ $T_s(x = L, t > 0s)$ และ $T_s(x = 0, t > 0s)$ จากสมการ (1) จะหาจากการอินทิเกรต Half control volume จากสมการของแก๊สและสมการของของแข็ง สำหรับ Boundary บริเวณทางเข้าและทางออกมีความเข้มของการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมมายังระบบ จะพิจารณาสิ่งแวดล้อมเสมือนเป็นวัตถุดำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง $T_b = T_0 = 303 \text{ K}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} I_0 &= I^+(0) = \sigma T_0^4 / \pi & \text{เมื่อ } t \geq 0, x = 0 \\ I_e &= I^-(L) = \sigma T_0^4 / \pi & \text{เมื่อ } t \geq 0, x = L \end{aligned} \quad (2)$$

4.2 Initial conditions

ใช้คำตอบ (Converged solution) ของกรณีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้โดยยังไม่ใช่ท่อเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ

5. สมการการคำนวณที่สำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากการเผาไหม้จะพิจารณาเป็น One-step first order reaction แบบ Arrhenius ดังนั้นจึงต้องพิจารณาสมการ Species conservation สมการที่เกี่ยวข้องจะถูกเขียนโดยแยกพิจารณาเฉพาะในส่วนที่สำคัญ ดังนี้

5.1 Species equation

$$(0 < x < x_e)$$

$$\rho \frac{\partial y}{\partial t} + \rho u \frac{\partial y}{\partial x} = D \rho \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + W \quad (3)$$

โดยที่ $W = A_p(1 - Y) \exp(-E / RT)$ (4)

5.2 Gas phase equation

$$(x_1 \leq x < x_2)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_o w - h_p n_p A_p (T - T_s) - \frac{2K_w}{(b-d)} (T - T_w) \quad (5)$$

$$(0 \leq x < x_1) \text{ และ } (x_2 \leq x < x_e)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_o w - h_p n_p A_p (T - T_s) \quad (6)$$

5.3 Solid phase equation

$$(0 < x < x_e)$$

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x} + h_p n_p A_p (T_s - T) \quad (7)$$

5.4 Radiative heat flux

$$(0 < x < x_1)$$

$$q_r^+(\tau) = 2\pi [I_0 E_3(\tau) + \int_0^\tau I_b(\tau') E_2(\tau - \tau') d\tau'] \quad (8)$$

$$q_r^-(\tau) = -2\pi \left[\left(1 - \frac{d}{b}\right) I_e E_3(\tau) + \left(1 - \frac{d}{b}\right) \int_{\tau_1}^{\tau_e} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau' \right. \\ \left. + \frac{d}{b} I_w E_3(\tau_1 - \tau) + \int_{\tau}^{\tau_1} I_b(\tau') E_2(\tau' - \tau) d\tau' \right] \quad (9)$$

$$q_r(\tau) = q_r^+(\tau) + q_r^-(\tau) \quad (10)$$

$$I_b = \frac{\sigma T_s^4}{\pi} \quad (11)$$

5.5 Divergent of net radiative heat flux

$$\frac{\partial q_r(\tau)}{\partial x} = -\frac{2\pi}{b} [b I_0 E_2(\tau) + (b-d) I_e E_2(\tau_e - \tau) + d I_w E_2(\tau_1 - \tau) \\ - 2b I_b(\tau) + (b-d) \int_{\tau_1}^{\tau_e} I_b(\tau') E_1(\tau' - \tau) d\tau' \\ + b \int_{\tau}^{\tau_1} I_b(\tau') E_1(\tau' - \tau) d\tau' + d \int_0^{\tau} I_b(\tau') E_1(\tau - \tau') d\tau'] \quad (12)$$

$$I_b = \frac{\sigma T_p^4}{\pi}, \quad E_n(\tau) = \int_0^1 \mu^{n-2} \exp(-\tau/\mu) d\mu \quad (13)$$

6. สมการการที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำเย็น

6.1 Energy balance

$$q = \rho u c_p \Delta T \quad (14)$$

$$q = 2 L K \int_{x_2}^{x_1} (T_m - T_w) dx + 2 L (q^+ - q^- - 2 I_b) \quad (15)$$

$$q = h(4\pi d L) \Delta T_m \quad (16)$$

$$\text{โดยที่} \quad \Delta T_m = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln[(T_{in} - T_w)/(T_{out} - T_w)]} \quad (17)$$

6.2 Nusselt number (Nu_m) เฉลี่ยทางทฤษฎี

จากการพาความร้อนที่บริเวณผิวท่อที่ได้รับเท่านั้น [4]

$$Nu_m = (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{2/3}) Pr^{0.4} (\mu_\infty / \mu_w)^{0.25} \quad (18)$$

6.3 Nusselt number (Nu_{mtotal}) เฉลี่ยโดยรวมของระบบ

จากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่บริเวณผิวท่อที่ได้รับทั้งหมด

$$Nu_{\text{total}} = \frac{K \cdot D}{\lambda} \quad (19)$$

6.4 ขั้นตอนในการคำนวณ

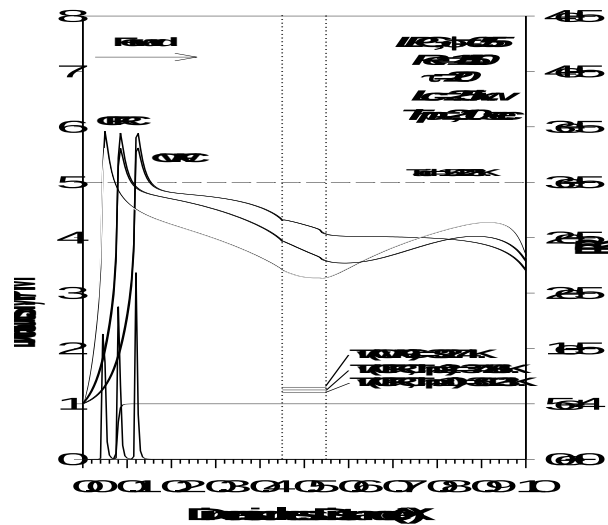
สมการข้างต้นจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการไร้หน่วย และจัดให้อยู่ในรูปสมการ Finite difference แล้วก็ถึงขั้นตอนการแก้สมการ โดยใช้วิธี Implicit finite difference เพื่อหาคำตอบของการกระจายอุณหภูมิของแก๊ส อุณหภูมิของแข็ง ฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) และ Divergence of net radiative heat flux ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การคำนวณจะแบ่งระยะทางออกเป็น 200 Meshes หรือ 201 Nodes ในช่วงของวัสดุพอร์ซเลน พร้อมทั้งสมมติค่าคำตอบ (Unknowns) ให้ครบทุก Node การคำนวณเพื่อหาคำตอบในแต่ละช่วงเวลา (Time step) จะใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative procedure) จนกระทั่งผลลัพธ์ที่คำนวณได้ลู่เข้าหาคำตอบ และผ่านเงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบ (Convergence criterion = 10^{-6}) หลังจากนั้นก็คำนวณหาคำตอบใน Time step ถัดไป โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณใน Time step ครั้งที่แล้ว จะถูกนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการหาคำตอบใน Time step ปัจจุบัน และจะมีขั้นตอนการคำนวณซ้ำเช่นเดิมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนการพิจารณาคำตอบในช่วง Steady state จะใช้เงื่อนไข Steady state criterion ที่มีค่าน้อยกว่า 10^{-4} การพิจารณา Steady state criterion นั้น จะพิจารณาจากโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของไซเคิลก่อนหน้า เปรียบเทียบกับโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของไซเคิลปัจจุบัน โดยถ้ามีความแตกต่างกันน้อยกว่า 10^{-4} ในทุกๆ Node แล้วจะเป็นการเสร็จสิ้นการคำนวณทันที หรือความหมายของ Steady state criterion คือ โครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของไซเคิลก่อนหน้าแตกต่างจากโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของไซเคิลปัจจุบันและโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของไซเคิลปัจจุบันและโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของไซเคิลในขนาดค่าน้อยมากหรือโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของไซเคิลเกือบทับกันสนิทในทุกๆ ไซเคิลนั่นเอง

7. ผลและการวิจารณ์

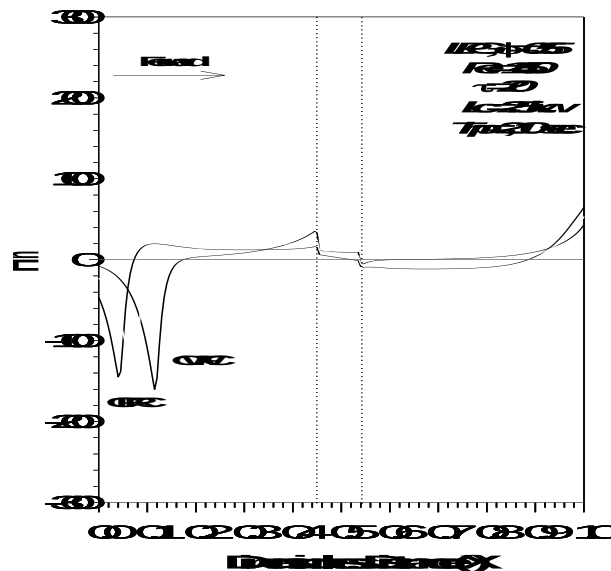
7.1 เปรียบเทียบโครงสร้างทางความร้อนระหว่างระบบ OWFC กับระบบ CFRC

รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางความร้อน เช่นอุณหภูมิของแก๊ส (TM) อุณหภูมิของของแข็ง(TP) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) และอัตราการเกิด Mole fraction ของผลิตภัณฑ์ (YM) ที่มีค่า $\Phi = 0.55$ $\tau = 20$ $Re = 1450$ ระหว่างระบบ OWFC และระบบ CFRC ที่ Half-period (t_{hp}) = 2 และ 10 sec. ทั้งสองระบบจะได้ค่าของ TM กับ TP เหมือนกับระบบการเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์ซเลนทั่วไป กล่าวคือ ไอเดียที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้จะถูกอุ่นให้ร้อนขึ้นก่อนเข้าสู่บริเวณที่เกิดการเผาไหม้ โดยวัสดุพอร์ซเลนสามารถที่จะนำเอาความร้อนที่ได้จากไอเสียมาอุ่นไอดีก่อนเกิดการเผาไหม้ มิโดยการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของวัสดุพอร์ซเลน อุณหภูมิสูงสุดของแก๊ส (TM_{max}) ของ

ทั้งสองระบบจะใกล้เคียงกันมาก การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของระบบ CFRC ที่ทำค่า Half-period (t_{hp}) จะขึ้นอยู่กับค่า t_{hp} ที่ใช้ เช่น ถ้า t_{hp} มีค่าเท่ากับ 2 sec. เปลวไฟจะเกิดขึ้นบริเวณทางเข้าของวัสดุพอรูน (Upstream region) และค่าอุณหภูมิ



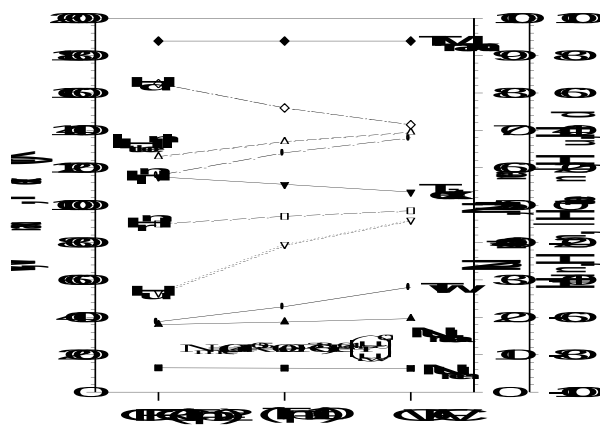
รูปที่ 2 โครงสร้างทางความร้อนของระบบ OWFC และ CFRC



รูปที่ 3 แสดง H^1 ของระบบ OWFC และ CFRC

บริเวณท่อน้ำจะต่ำกว่าของระบบ OWFC มาก แต่เมื่อเพิ่ม t_{hp} เป็น 10 sec. เปลวไฟจะเลื่อนเข้าไปในวัสดุพอรูนลึกขึ้นและเข้าใกล้ระบบ 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 จะอยู่ใกล้ทางเข้าของวัสดุพูนมากกว่าและเกิดการสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีที่ทางเข้าและทางออกมากกว่าระบบ OWFC ดังแสดงในรูปที่ 3 แต่ระบบ CFRC ยังให้ค่า Nu_{mtotal} ที่ใกล้เคียงกับระบบ OWFC ดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งๆที่อุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณท่อหน้าของระบบ CFRC ต่ำกว่าของระบบ OWFC นั้นแสดงให้เห็นว่าระบบ CFRC มีคุณสมบัติที่ไม่ด้อยไปกว่าระบบ OWFC เลย ซึ่งถ้าทำให้เปลวไฟขยับลึกเข้าไปในวัสดุพูนมากขึ้น โดยการเพิ่มความเร็วของไอดีหรือลดค่า Φ เพื่อให้การสูญเสียที่ทางเข้าและทางออกลดลง ย่อมแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของระบบ CFRC จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าระบบ OWFC จะได้รับอิทธิพลการแผ่รังสีความร้อนทางด้านซ้ายของท่อหน้ามากกว่าแต่ในระบบ CFRC จะทดแทนด้วยการรับการแผ่รังสีความร้อนทางด้านขวา ของท่อก่อให้เกิดการชดเชย H_{tube}^n ทำให้ทั้งสองระบบมีค่า Nu_{mtotal} ที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4

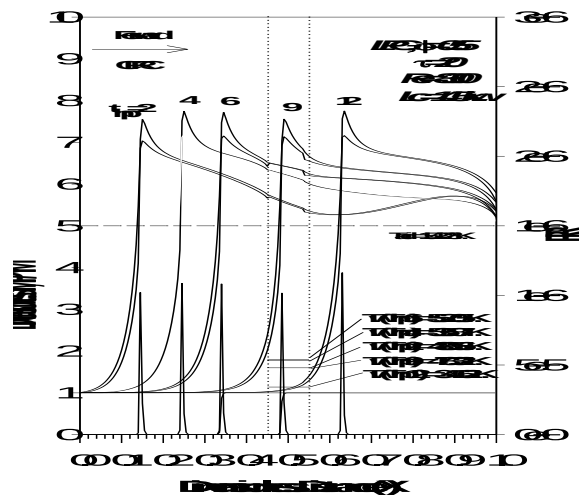


รูปที่ 4 เปรียบเทียบสมรรถนะโดยรวมของทั้งสองระบบ

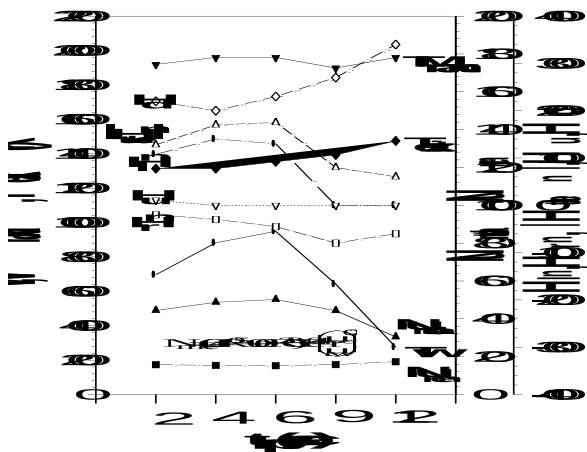
7.2 อิทธิพลของค่า Half-period (t_{hp})

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของช่วงเวลาในการกลับทิศทางการไหลของไอดี (t_{hp}) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางความร้อน เช่น TM TP RR และ YM โดยจะพิจารณาทิศทางการไหลของไอดีจากซ้ายไปขวา ที่ $\Phi = 0.55$ $\tau = 20$ $Re = 8300$ เมื่อ t_{hp} เพิ่มขึ้นเปลวไฟจะเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในวัสดุพูนไ้ ต้มากขึ้น (เลื่อนตัวจากซ้ายไปขวา) อุณหภูมิของโครงสร้างทางความร้อนช่วงกลางวัสดุพูนหรือบริเวณท่อหน้าจะสูงขึ้นเช่นกัน ขณะที่ TM_{max} ก่อนข้างจะคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงไปกับ t_{hp} มากนัก ยกเว้นในกรณีที่ t_{hp} น้อยๆ จะพบว่า TM_{max} จะมีค่าต่ำเล็กน้อย เนื่องจาก H_u ที่สูญเสียออกจากระบบบริเวณด้านซ้าย และกรณีที่ $t_{hp} = 9$ sec. โครงสร้างทางความร้อน หรือบริเวณ Reaction zone จะเลื่อนตำแหน่งไปอยู่บริเวณกลางท่อหน้า พลังงานความร้อนบางส่วนถูกถ่ายเทไปยังท่อหน้าทำให้ อุณหภูมิในช่วงการเผาไหม้ลดต่ำลง ซึ่งส่งผลให้ TM_{max} ช่วงนั้นจะลดต่ำลงตามไปด้วย แต่เมื่อเพิ่ม

$t_{hp} = 12$ sec. ตำแหน่ง Reaction zone จะขยับไปอยู่บริเวณหลังท่อน้ำและ TM_{max} จะกลับสูงขึ้นมาอีกครั้งพร้อมกับอุณหภูมิขาออกที่สูง ขณะที่เปลวไฟเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในวัสดุพอร์ซเลนใกล้ท่อน้ำมากขึ้นตามการเพิ่มค่า t_{hp} การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเข้าสู่ ท่อน้ำทั้งทางด้านซ้ายและทางด้านขวา จะเพิ่มขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6 ยกเว้นกรณี $t_{hp} = 9$ และ 12 sec. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เปลวไฟอยู่บริเวณท่อน้ำ และทางด้าน Downstream ของท่อน้ำตามลำดับการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีไปยังท่อน้ำจะเกิดขึ้นเฉพาะทางด้านขวาของท่อน้ำเท่านั้น (H_r^n มีค่าเป็นลบ) ทำให้ค่า Nu_{mtotal} ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6



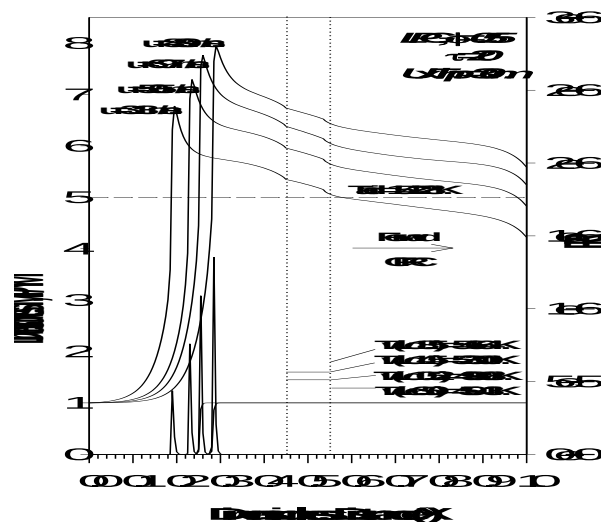
รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของค่า t_{hp} ต่อโครงสร้างทางความร้อน



รูปที่ 6 สมรรถนะโดยรวมเมื่อ t_{hp} เปลี่ยนแปลง

7.3 อิทธิพลของค่าความเร็วในการไหลของไอดี (u)

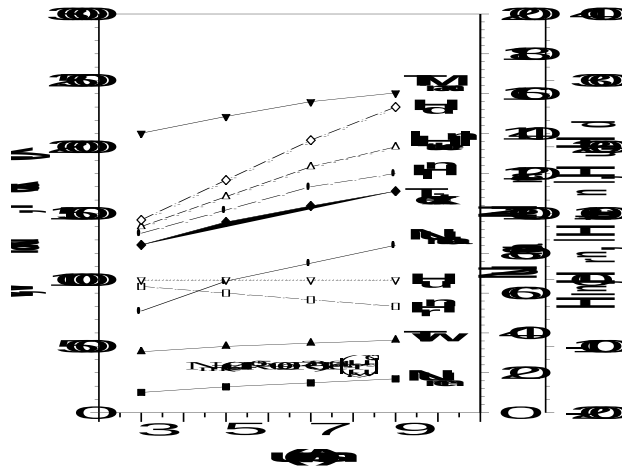
รูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความเร็ว (u) ของไอดีที่ไหลเข้าสู่ระบบ CFRC ขณะที่ระบบ OWFC ไม่สามารถกระทำได้อีก เนื่องจากเกิดการ Blow-off เสียก่อน ที่ $\Phi = 0.55$, $\tau = 20$ โดยให้ค่า $\text{Const} = t_{\text{hp}} \times u_{\text{max}}$ มีค่าเท่ากับ 30 m. เพื่อลดอิทธิพลแทรกซ้อนอันเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของเปลวไฟทำให้สามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า u โดยไม่มีอิทธิพลจากการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง จากการเพิ่ม u ของระบบซึ่งมีความหมายว่าเป็นการเพิ่ม Heat supply (Lc) นั้นเอง จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) จะเพิ่มขึ้นขณะเดียวกันกับ TM_{max} อุณหภูมิของโครงสร้างความร้อนภายในวัสดุพอร์ซเลนที่ท่อหน้า และอุณหภูมิของของไอเสียที่ออกจากระบบก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อหน้า T_w มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย จากรูปที่ 8 เห็นได้ว่า Net radiative heat flux ที่มีปริมาณสูงขึ้นตาม u ของระบบที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณท่อหน้า $|H_{\text{tube}}^{\text{net}}|$ ที่ได้รับจากทั้งสองข้างจะเพิ่มขึ้นตาม u อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของความเร็ว u ต่อโครงสร้างทางความร้อน

ทาง upstream ปริมาณ H_u ที่สูญเสียออกจากระบบบริเวณด้านซ้ายจะน้อย เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งโครงสร้างทางความร้อนให้เกิดขึ้นในตำแหน่งที่เหมาะสมลึกลงไปในวัสดุพอร์ซเลน แต่ทางด้านขวาจะมี H_d ที่สูญเสียออกจากระบบสูงกว่าเนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่มีค่ามากขึ้น และรูปที่ 8 ยังแสดงสมรรถนะ การถ่ายเทความร้อนสู่ท่อหน้าเย็นเมื่อเพิ่ม u พบว่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนรวม (Nu_{total}) ของระบบจะสูงขึ้นตามปริมาณ u ที่เพิ่มเข้าไปในระบบ ทำให้ทราบถึงสมรรถนะในการทำงานมีประสิทธิภาพของระบบ CFRC ในการทำงานที่ช่วงความเร็ว ไอดีที่สูงๆ ที่ระบบ OWFC ไม่สามารถกระทำได้อีก ซึ่งช่วงการทำงานจะกว้างแตกต่างจากระบบ OWFC ที่มีช่วงการ

ทำงานที่แคบกว่า ดังนั้นถ้าทั้งสองระบบมีเตาเผาไหม้ขนาดที่เท่ากัน จะพบว่าระบบ CFRC สามารถที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิงในปริมาณมากๆ และให้ Combustion intensity (kW/m^3) ออกมาได้มากกว่าระบบ OWFC แต่ก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการเลือกค่า t_{hp} ให้เหมาะสมกับช่วง u ที่จะนำไปใช้งานด้วย



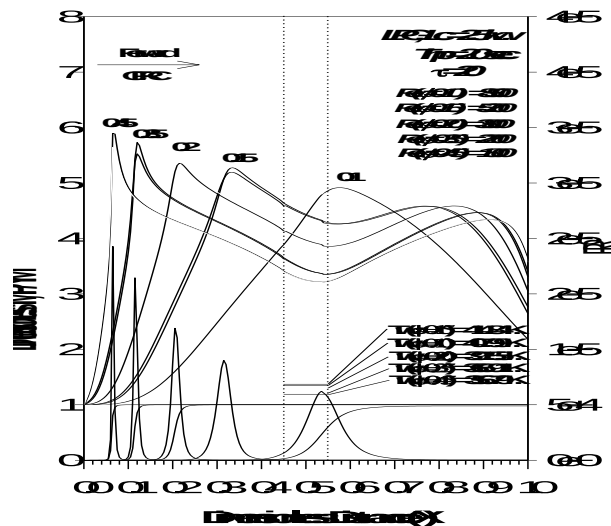
รูปที่ 8 สมรรถนะโดยรวมเมื่อความเร็ว u เปลี่ยนแปลง

7.4 อิทธิพลของค่า Equivalence ratio (Φ)

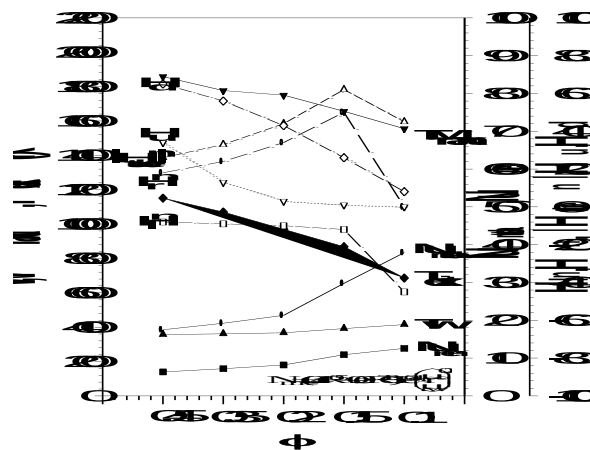
รูปที่ 9 แสดงอิทธิพลของค่า Φ ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อนของระบบในรูป อุณหภูมิของแก๊ส (TM) อุณหภูมิของของแข็ง (TP) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) อัตราการเกิด Mole fraction ของผลิตภัณฑ์ (YM) ที่ $\tau = 20$, $t_{hp} = 2$ sec. โดยให้ L_c คงที่เท่ากับ 2.5 kW . ค่า Φ ถูก ลดลงจาก 0.45 ถึง 0.1 โดยการเพิ่มอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงให้เจือจางมากขึ้นก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (ค่าพลังงานความร้อนของส่วนผสมจะต่ำลง) ดังนั้นเมื่อ Φ มีค่าลดลงที่ L_c คงที่ ความเร็วของไอดีที่เข้าสู่ระบบจะเพิ่มขึ้น ทำให้เปลวไฟเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในตัววัสดุพอร์ซเลนเข้าใกล้ท่อให้น้ำมากขึ้น พร้อมกับการลดลงของ TM_{max} การกระจายอุณหภูมิมีลักษณะเป็นแอ่ง เว้าลงตรงกลางเนื่องจากอิทธิพลของท่อน้ำ และจะมีค่าต่ำที่ Φ สูงๆ ค่าอุณหภูมินี้จะมีค่าสูงขึ้นตามค่า Φ ที่ลดลง จนกระทั่งการกระจายอุณหภูมิเปลี่ยนจากแอ่งเว้าลง เป็นนูนขึ้น จนมีลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยม

ที่ $\Phi = 0.1$ และให้ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นใกล้กับผิวด้านขวามือของท่อ น้ำ ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อให้น้ำสูงขึ้น ดังเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่า Nu_{total} ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม้ TM_{max} ของโครงสร้างทางความร้อนจะลดลงตาม Φ แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Nu_{total}) จะเพิ่มขึ้นเมื่อโครงสร้างของทางความร้อนมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป คล้ายรูปสามเหลี่ยมและพบว่าระบบ CFRC ที่ $\tau = 20$, $t_{hp} = 2$ sec. และ $L_c = 2.5 \text{ kW}$. สามารถที่

จะเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าเจือจาง (Lean) มากๆ ได้ โดยมีค่า $\Phi = 0.095$ หรือค่าพลังงานความร้อน (h_0) = 281.48 kJ/kg. จึงพอสรุปได้ว่าระบบ CFRC จะทำงานได้ดีที่ Re สูงๆ และค่า Φ ต่ำๆ แต่ก็ขึ้นอยู่กับเลือกใช้ค่า t_{hp} และ Re ที่เหมาะสมด้วย



รูปที่ 9 แสดงอิทธิพลของค่า Φ ต่อโครงสร้างทางความร้อน



รูปที่ 10 สมรรถนะโดยรวมเมื่อ Φ เปลี่ยนแปลง

8. สรุป

จากผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้เราทราบถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ CFRC ที่เหนือกว่าระบบ OWFC ซึ่งเทคนิคการสลับทิศทางการไหลของไอดีอย่างเป็นจังหวะสามารถขยายขอบเขตในการใช้งานให้กว้างขึ้นได้เป็นอย่างมาก และทำงานได้ดีที่ความเร็วการไหลของไอดีสูงๆ และค่า Φ ต่ำๆ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทำงานที่สูงขึ้น จากการ

ประยุกต์ใช้วัสดุพูน ในการส่งเสริมการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนสู่ท่อน้ำ ซึ่งนับว่าเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้และถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ ในด้านอุตสาหกรรม เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) หรือ หม้อไอน้ำ(Boiler) ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไปในอนาคต

9. 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*, to appear in Vol. 23, No. 3, 1999 which will be out on 10th March 1999 as paper ref. No. ER463.
- [3] Echigo, R., et al., Radiative Heat Transfer Enhancement to a water tube by Combustion Gases in Porous Media, Department of Mechanical Engineering Tokyo Institute of Technology, T.Tomimura Research Institute of Industrial Science Kyushu University.
- [4] Ozisik, M. Necati. 1985: "Heat Transfer", McGraw-Hill Book Company, New York.
- [5] ฐกฤต ปานชลธิบ . การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพูน : วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงานและสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 หน้า 4