

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกส ในวัสดุพรุนชนิดสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะ

Numerical Simulation of Thermo-electric Conversion by Cyclic Flow Reversal Combustion in a Porous Medium

บัณฑิต กฤตาคม และ สำเริง จักรใจ

ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนนประชาอุทิศ (สุขสวัสดิ์ 48) แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร (662)470-9128 โทรสาร (662)470-9111 E-mail: sumrueng.jug@kmutt.ac.th

Bundit Krittacom and Sumrerng Jugjai

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

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermo-electric Device) เป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง (direct conversion) ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นการนำเอาปลายของสารกึ่งตัวนำต่างกันสองชนิดมาเชื่อมต่อกัน (Junction) เมื่อจุดเชื่อมทั้งสองข้างถูกกระตุ้นด้วยความร้อน (hot Junction) และความเย็น (cold Junction) จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในระบบ พบว่าหากอุณหภูมิของจุดเชื่อมทั้งสองมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเท่าไร อัตราการผลิตกระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยทั่วไปหากต้องการอุณหภูมิที่แตกต่างกันมากจะต้องให้พลังงานความร้อนสูงแก่จุดเชื่อมร้อน และอาจมีการหล่อเย็นที่จุดเชื่อมเย็น ซึ่งเป็นเรื่องที่ซับซ้อน ยุ่งยาก และต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงเป็นเชื้อเพลิงที่ควรปรับปรุง ด้วยหลักการพื้นฐานนี้จึงได้มีแนวคิดใหม่เพื่อใช้ในการพัฒนาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยอาศัยเทคนิคการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกสในวัสดุพรุน (porous Medium) ทนความร้อน ที่มีการสลับทิศทางการไหลของไอติดอย่างเป็นจังหวะ ระบบดังกล่าวจะมีข้อได้เปรียบกว่าระบบเดิมคือ สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำๆได้และให้อุณหภูมิที่สูง นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างทางความร้อนที่สูงชัน (steep temperature gradient) ที่ปลายทั้งสองด้านของห้องเผาไหม้ก็เหมาะสมกับคุณลักษณะของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ปลายด้านหนึ่งต้องเป็นจุดเชื่อมร้อน (hot Junction) และอีกด้านเป็นจุดเชื่อมเย็น (cold Junction) ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานที่สูงด้วย ในการศึกษานี้ได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยยังไม่พิจารณาการผลิตกระแสไฟฟ้า (วัสดุพรุนไม่เป็น Porous Thermo-electric element, PTE) เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับ การทดลองและศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่จะมีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการสลับทิศทางการไหลของไอติดอย่าง

เป็นจังหวะความหนาของวัสดุพรุน (t_p) ค่า equivalence ratio (Φ) ความเร็วแกส (u) และความหนาเชิงแสงของวัสดุพรุน (T_e) พบว่าเมื่อเพิ่มค่า Φ , u , และ T_e แนวโน้มของ Steep temperature gradient และอุณหภูมิสูงสุด (T_{max}) มีค่าสูงขึ้น ส่วน t_p จะมีผลต่อระบบน้อยมาก แต่เป้าหมายของงานวิจัยนี้ต้องการประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงแกสที่มีความร้อน (Φ) ต่ำ เพื่อจะได้ประหยัดพลังงานดังนั้นหากต้องการกำลังไฟฟ้า (P) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน (η) ที่สูง ควรเพิ่มค่า u และ T_e นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองจะให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

คำสำคัญ : อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก/ การเผาไหม้/ วัสดุพรุน

Abstract

An advanced concept to produce electric power has been present by using thermoelectric device that is joining the end of two difference type of semi-conductor (Junction). The electric power generate when couple junction are activated by high temperature (hot junction) and low temperature (cold junction), it revealed that if temperature difference (hot and cold junction) is high then power generation rate is also high. However, in general thermoelectric device maintaining the temperature at junction is complicate and must use high heating value of fuel when demand high difference temperature.

Since general thermoelectric device has some disadvantage, the new concept of thermoelectric device have been developed by using reciprocating gaseous combustion in porous medium.

The new concept has some attraction such as wide flammability limit, high steep temperature gradient, high maximum temperature, etc. From last two attraction are characteristic appropriate with thermoelectric device because another joint is hot junction and joint is cold junction, as a result that energy conversion efficiency is elevated. This research construct mathematical model that can be compared with experimental result. Furthermore, mathematical model will be used in parametric study to find optimum working condition for generating power. The steep temperature gradient and maximum temperature are increased with optical thickness(τ) equivalence ratio(Φ) and gas velocity (u). Effect of half period(t_{hp}) is negligible. To aim of this research is to apply with low heating value (Φ) which parametric can help to improve generating power (P) and conversion efficiency (η). The result of comparison between mathematical model and experimental show good agreement.

Keyword : Thermoelectric Device/ combustion/ porous

1.NOMENCLATURE

A	=	frequency factor for reaction kinetics	[s ⁻¹]
C _p	=	specific heat at constant pressure	[kJ/kgK]
D	=	diffusivity	[m ² /s]
E	=	activation energy	[kJ/kmol]
E _n	=	exponential integral functions of n-th order	
h ₀	=	combustion heat	[kJ/kg]
h _p	=	heat transfer coefficient around a particle	[W/m ² K]
I _b	=	blackbody radiation intensity	[w/m ²]
I ₀ , I _o	=	incident radiation intensity	[W/m ²]
j	=	current density	[A/m ²]
m	=	electric resistance ratio (R/r)	
n _p	=	number density of particle	[m ⁻³]
P	=	electric power	[w/m ³]
q'	=	radiation flux	[W/m ²]
R	=	external specific electric resistance	[Ω m]
RR	=	reaction rate	
Re	=	Reynolds number	
r	=	internal specific electric resistance	[Ω m]
T	=	temperature	[K]
T _{CS}	=	temperature at hot junction	[K]
T _{HS}	=	temperature at cold junction	[K]
t _{hp}	=	half cycle	[s]
u	=	gas velocity	[m/s]
W	=	reaction rate	[kg/m ³ s]

x	=	coordinate	[m]
x ₀	=	length of thermoelectric device	[m]
Y	=	product mole fraction	

Greek Symbols

α	=	Seebeck coefficient	[V/K]
η	=	conversion efficiency	
κ	=	absorption coefficient	[m ⁻¹]
λ	=	(gas)thermal conductivity	[W/mK]
μ	=	(gas)viscosity	[kg/mK]
ρ	=	(gas)density	[kg/m ³]
σ	=	stefan-boltzmann constant	[W/m ² K]
Φ	=	equivalence ratio	
τ	=	optical thickness = κx	
τ'	=	dummy variable of integration	

Subscripts

C	=	cold junction
e	=	exit
H	=	hot junction
max	=	maximum
o	=	initial state, inlet
p	=	particle
s	=	porous medium

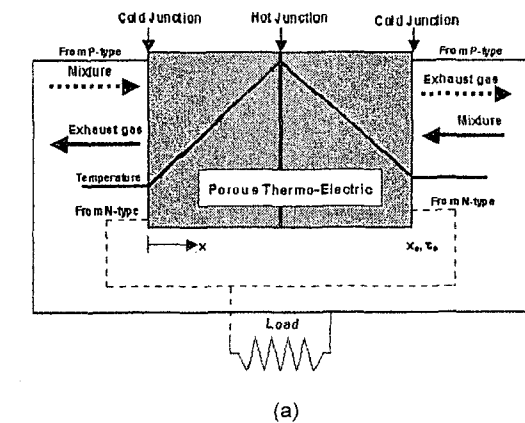
2.บทนำ

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สในวัสดุพรุน(Porous medium) ทนความร้อน ที่มีการสลับทิศทางการไหลของไอได้อย่างเป็นจังหวะนั้น[1,2,3] เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงและส่งเสริมการประหยัดพลังงาน อาศัยหลักการหมุนเวียนความร้อนโดยการนำความร้อนจากไอเสียมาสู่ไอดี เพื่อเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ กล่าวคือ เมื่อไอดีไหลเข้าสู่ระบบ(จังหวะไหลจากซ้ายไปขวา) ด้วยลักษณะเด่นของวัสดุพรุนคือการเผาไหม้แบบนี้จะเป็นแบบสองสถานะ(multiphase) ประกอบด้วยสถานะของแข็ง(Solid phase) คือวัสดุพรุนและสถานะแก๊ส(Gas phase) ซึ่งวัสดุพรุนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีค่าการแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีความร้อน(Emissivity and absorptivity)ที่สูงกว่าสถานะแก๊สมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี(Chemical reaction) และการถ่ายเทความร้อน(Heat transfer) ได้สูงกว่าการเผาไหม้ในสถานะแก๊สทั่วไป ซึ่งอุณหภูมิไอเสียด้านขาออก(Downstream)ก็มีค่าสูงด้วย ดังนั้นเมื่อมีการสลับทิศทางการไหล(จังหวะไหลจากขวามาซ้าย) ไอดีที่เข้ามาใหม่ก็จะรับความร้อนจากวัสดุพรุนที่กักเก็บไว้ในจังหวะที่แล้ว (Downstream จากจังหวะการไหลไอดีที่แล้วจะเป็น Upstream ของการไหลจังหวะใหม่ที่มีการสลับทิศทาง) ไอดีจะถูก Preheat ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เมื่อเกิดการเผาไหม้อุณหภูมิของเปลวไฟจึงมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิทางทฤษฎี(Adiabatic temperature)หรือกรณีไม่มีวัสดุพรุนมาก ดังนั้นหากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สในวัสดุพรุนที่มีการสลับทิศทางการไหลของไอได้อย่าง

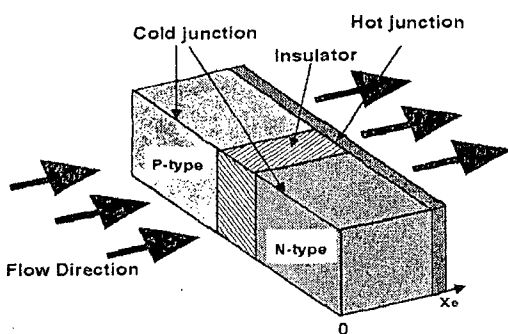
เป็นจึงหะต้องการอุณหภูมิสูงสุด(T_{max})เท่ากับทางทฤษฎี(ไม่มีวัสดุพูน) ก็ทำได้โดยการลดค่าความร้อนเชื้อเพลิง(Φ)ที่เข้าสู่ระบบลง ซึ่งจะนำไปสู่การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำและประหยัดเชื้อเพลิงอีกด้วย

จากเหตุผลดังกล่าวได้ประยุกต์การเผาไหม้เชื้อเพลิงแกสในวัสดุพูนที่มีการสลับทิศทางการไหลของไอติดอย่างเป็นจึงหะใช้กับการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง(Direct conversion)[4,5] พิจารณาให้วัสดุพูนเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก(Thermo electric device)[6] ซึ่งจะทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน(Conversion efficiency, η) การศึกษากระทำโดยจำลองเตาเผาไหม้ให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วแก้สมการคณิตศาสตร์เพื่อหาโครงสร้างทางความร้อนของระบบ เช่น อุณหภูมิแกส อัตราการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น เพื่อนำไปหาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า และ η อันจะเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเพื่อการออกแบบและสร้างใช้งานจริงต่อไป

3.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



(a)



(b)

รูปที่ 1 (a) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (b) Porous Thermo electric element (PTE)

รูปที่ 1a แสดงแบบเตาเผาไหม้ ภายในบรรจุวัสดุพูนซึ่งจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกพิจารณาเป็นอิลเมนต์เล็กๆ(รูป 1b) ต่อกันแบบอนุกรมอยู่เป็นจำนวนมากมาย และมีภาระทางไฟฟ้า(Load) มารับแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าอยู่ภายนอกห้องเผาไหม้ การทำงานของระบบคือ เมื่อไอดี(อากาศ+LPG) ไหลผ่านเข้ามาในห้องเผาไหม้ที่มีความยาว Xe และมีความหนาแน่นเชิงแสง τ_e โดยการไหลของไอดีจะถูกสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจึงหะพร้อมกับเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณตรงกลางของวัสดุพูน พบว่าบริเวณดังกล่าววัสดุพูนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเป็นที่ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดด้วย จึงกำหนดให้บริเวณตรงกลางของห้องเผาไหม้เป็นจุดเชื่อมร้อน(Hot junction) และด้านขอบทั้ง 2 ด้านเป็นจุดเชื่อมเย็น(Cold junction) ซึ่งลักษณะโครงสร้างทางความร้อนและกลไกการทำงานของเตาเผาไหม้แบบนี้จะส่งเสริมประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน(Conversion efficiency)ให้ดียิ่งขึ้น

สมมติฐานหลักของแบบจำลองนี้มีดังนี้

- พิจารณาการไหลและการแผ่รังสีเป็นแบบ 1 มิติ มีทิศทางตามแนวแกน x การไหลเป็นแบบ incompressible และความดันคงที่
- ไม่คิดการแผ่รังสีความร้อนของแกสเนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับของแข็ง
- ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นแบบ one-step first order reaction (Reactant $\rightarrow$ Product+heat) แบบ Arrhenius
- วัสดุพูนทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่า Porous Thermo Electric (PTE) และอิลเมนต์เล็กๆต่อกันแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันสูงๆ
- คุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ มีค่าคงที่

4.สมการที่ใช้ในการคำนวณ

จากสมมติฐานหลัก การเผาไหม้เป็น One-step first order reaction แบบ Arrhenius ดังนั้นจะมีความ Species conservation และสมการสมดุลพลังงาน(Energy equation)ของทั้งแกสและของแข็ง (วัสดุพูน) ในการคำนวณหาคำตอบ ดังแสดงต่อไปนี้

Species equation

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

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

Gas phase energy equation

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - h_p n_p A_p (T - T_s) + h_0 W \quad (3)$$

Solid phase energy equation

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\partial q'}{\partial x} + h_p n_p A_p (T - T_s) + j^2 r \quad (4)$$

เทอมสุดท้าย $j^2 r$ คือ Joule heat ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนในรูปเชิงไฟฟ้าที่เกิดใน Porous thermoelectric element

Divergence of net radiative heat flux

$$\frac{\partial q'(\tau)}{\partial x} = -2\pi K \left[I_0 E_2(\tau) + I_0 E_2(\tau_0 - \tau) - 2I_b(\tau) + \int_0^{\tau_0} I_b(\tau') E_1(|\tau - \tau'|) d\tau' \right] \quad (5)$$

$$I_0(\tau) = \frac{\sigma_b T_s^4(\tau)}{\pi} \quad (6)$$

$$E(\tau) = \int_0^1 \mu^{n-2} \exp\left(-\frac{\tau}{\mu}\right) d\mu \quad (7)$$

เมื่อพิจารณาการผลิตกระแสไฟฟ้า[3,4,5] โดยทั่วไปจะได้จากสมการ

$$j = \frac{\alpha(T_{HS} - T_{CS})}{r x_0 (1+m)} \quad (8)$$

$$P = j^2 R = \frac{m \alpha^2 \sigma}{r(1+m)} \cdot (T_{HS} - T_{CS}) \cdot \frac{(T_{HS} - T_{CS})}{x_0} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P}{h_0 W x_0} \quad (10)$$

5. Boundary condition และ Initial condition

5.1 Boundary condition

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 4 และพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ตำแหน่งจุดเชื่อม(Junction)ร่วมด้วย ซึ่งความร้อนที่กระทำกับจุดเชื่อมนี้เรียกว่า Peltier heat [5]จะได้

ที่ตำแหน่ง Cold Junction ($X = 0, X_0$)

$$\rho_s C_{ps} \int \frac{\partial T_s}{\partial t} dx = \lambda_s \int \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} dx - \int \frac{\partial q'}{\partial x} dx + h_p n_p A_p \int (T - T_s) + j r \int dx + j \alpha T_{CS} \quad (11)$$

ที่ตำแหน่ง Hot Junction ($X = X_0/2$)

$$\rho_s C_{ps} \int \frac{\partial T_s}{\partial t} dx = \lambda_s \int \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} dx - \int \frac{\partial q'}{\partial x} dx + h_p n_p A_p \int (T - T_s) + j^2 r \int dx - j \alpha T_{HS} \quad (12)$$

5.2 Initial condition

ใช้ผลการทดลองที่ได้จากการเผาไหม้กรณียังไม่ใส่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณหาคำตอบ

6. วิธีการคำนวณ

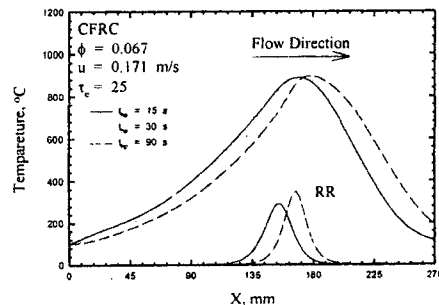
สมการข้างต้นจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการไร้มิติและจัดให้อยู่ในรูปสมการ Finite difference แล้วแก้สมการโดยใช้วิธี Implicit finite difference เพื่อหาคำตอบของการกระจายอุณหภูมิของแก๊ส อุณหภูมิของแข็ง สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์(Product mole fraction, Y) อุณหภูมิสูงสุด

การคำนวณจะแบ่งระยะทางออกเป็น 100 meshes ในช่วงของวัสดุพอร์ การคำนวณเพื่อหาคำตอบในแต่ละช่วง(time step) จะใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (iteration procedure) จนกระทั่งผลลัพธ์ที่คำนวณได้เข้าสู่หาคำตอบโดยมี Convergence criterion = 10^{-6} และ Steady state criterion = 10^{-5} (โครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของไซเคิลก่อนหน้าเปรียบเทียบกับโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายเช่นเดียวกันของไซเคิลปัจจุบันในทิศทางการไหลเดียวกันโดยมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 10^{-4} ในทุก node point แล้วจะเป็นการเสร็จสิ้นการคำนวณและได้คำตอบ) หลังจากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการทำ Global energy balance และ local energy balance ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ Global energy balance อยู่ในช่วง 0.2-0.5 %

7. ผลและวิจารณ์

ในการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ควบคู่กับการทดสอบโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ โดยเบื้องต้นนี้ยังไม่มีผลการผลิตกระแสไฟฟ้า กล่าวคือยังไม่ได้พิจารณาให้วัสดุพอร์เป็น PTE ดังแสดงต่อไปนี้

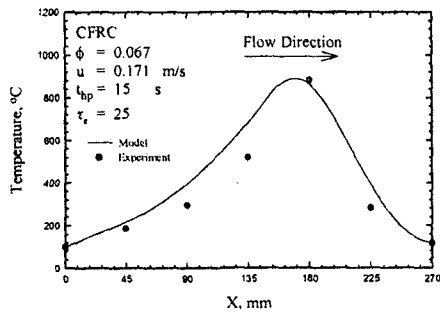
7.1 อิทธิพลของค่าช่วงเวลาสลับทิศทางการไหลของไอดี (t_{hp})



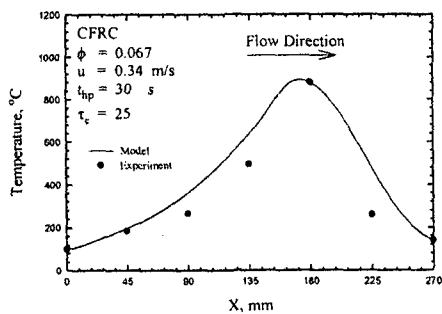
รูปที่ 2 อิทธิพลของ t_{hp} ต่อโครงสร้างทางความร้อน

รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของช่วงเวลาในการสลับทิศทางการไหลของไอดี (t_{hp}) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางความร้อนที่ท้าย half period ได้แก่ โครงสร้างอุณหภูมิ (T) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) ที่สภาวะ $\Phi = 0.067$ $T_e = 25$ และ $u = 0.171$ m/s พบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิจะมี

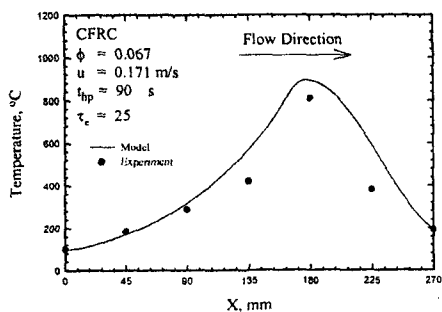
รูปร่างเป็นรูปสามเหลี่ยม ทุกค่า t_{hp} เมื่อเพิ่มค่า t_{hp} ขึ้น โครงสร้างอุณหภูมิ RR จะเคลื่อนตัวลึกเข้าไปในวัสดุพูนมากขึ้น T_{max} ก็เลื่อนตำแหน่งตามไปด้วยและมีค่าใกล้เคียงกันไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง แต่อุณหภูมิที่ด้านขาออก(Downstream)จะมีค่าสูงขึ้นซึ่งโครงสร้างทางความร้อนที่เป็นแบบนี้ เนื่องมาจากเมื่อ t_{hp} มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ Flame มีเวลาเคลื่อนตัวเข้าไปในวัสดุพูนมาก และค่าการสูญเสียความร้อนที่ มาจากการแผ่รังสีบริเวณ Upstream ลดลง ทำให้บริเวณ Downstream เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างทางความร้อน จะเห็นได้ว่า T_{max} และ Temperature gradient ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ดังนั้น คาดว่า t_{hp} จึงมีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าน้อย



(a)



(b)

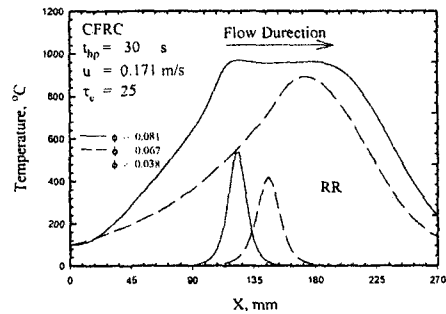


(c)

รูปที่ 3 เปรียบเทียบอิทธิพลของ t_{hp} ระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (a) 15 s (b) 30 s (c) 90 s

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง จะพบว่าผลที่ได้ทั้ง 3 กรณีจะให้แนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่ผลการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าสูงกว่าการทดลองเนื่องจากในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบเป็นแบบ Adiabatic แต่ในการทดลองมีการสูญเสียความร้อนเนื่องมาจาก การนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน

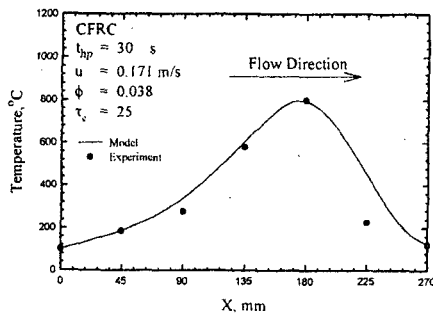
7.2 อิทธิพลค่า Equivalence ratio (Φ)



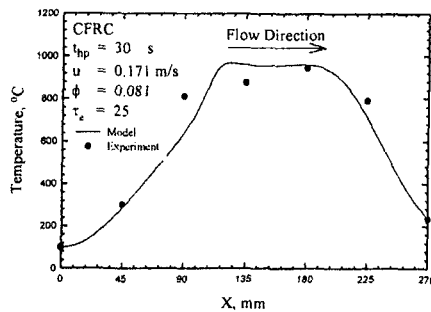
รูปที่ 4 อิทธิพลของค่า Equivalence ratio (Φ) ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อน

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของค่า Equivalence ratio (Φ) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางความร้อนได้แก่โครงสร้างอุณหภูมิ (T) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) ที่สภาวะ $t_{hp} = 30$ s $\tau_c = 25$ และ $u = 0.171$ m/s พบว่าเมื่อค่า Φ ลดลงลักษณะโครงสร้างทางอุณหภูมิจะเปลี่ยนจากสี่เหลี่ยมคางหมูที่มี Temperature Gradient สูงชันลดต่ำลงเป็นรูปสามเหลี่ยม และมี T_{max} ลดลงนอกจากนี้ RR ก็มีค่าลดลงไปด้วยโครงสร้างทางความร้อนที่เป็นลักษณะแบบนี้เนื่องมาจากค่า Φ มีค่าน้อยจึงปล่อยพลังงานความร้อน ที่อยู่ในเชื้อเพลิงน้อยเมื่อเกิดการเผาไหม้ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงต่ำ ทำให้ตำแหน่งของ Flame เกิดลึกเข้าไปในตัววัสดุพูน และโครงสร้างอุณหภูมิจะค่อยๆ แคลงส่งผลให้ temperature gradient มีค่าลดลง ซึ่งจะเป็นการลดการสูญเสียความร้อนที่ด้าน Upstream และ Downstream เพื่อให้โครงสร้างความร้อนของระบบเสถียร จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่า Φ จะมีผลต่อการเพิ่มค่า T_{max} และ temperature gradient อย่างมาก อันจะเป็นผลดีต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของ Φ ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง จะพบว่าผลที่ได้ทั้ง 2 กรณี ให้แนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่ผลการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าสูงกว่าการทดลอง ดังแสดงเหตุผลในรูปที่ 3 (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบ Adiabatic การทดลองมีการสูญเสียความร้อน)



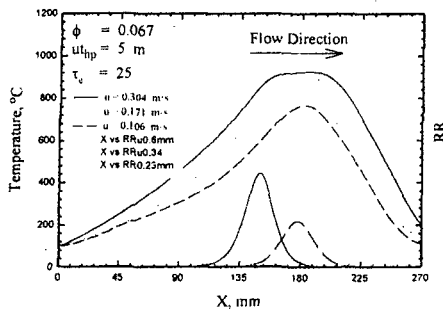
(a)



(b)

รูปที่ 5 เปรียบเทียบอิทธิพลของ Φ ระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (a) $\Phi = 0.081$ (b) $\Phi = 0.038$

7.3 อิทธิพลค่า Gas Velocity (u)

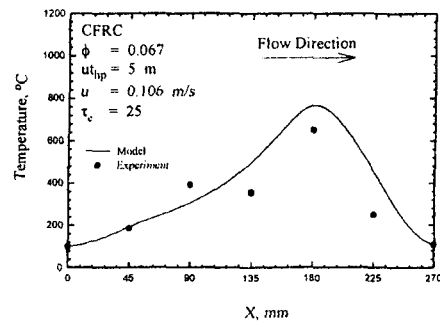


รูปที่ 6 อิทธิพลของค่า Gas Velocity (u) ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อน

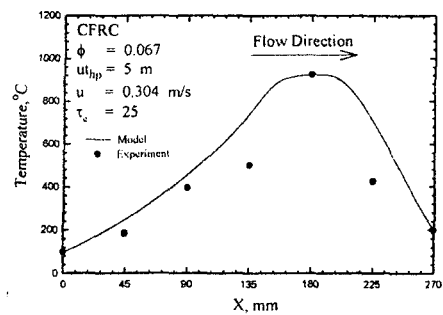
รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของค่า Velocity (u) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางความร้อน ได้แก่ โครงสร้างอุณหภูมิ (T) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) ที่สภาวะ $\Phi = 0.067$ $\tau_c = 25$ และกำหนดให้ $u_{hp} = 5$ m พบว่าเมื่อเพิ่มค่า u ลักษณะโครงสร้างทางอุณหภูมิจะมีแนวโน้มเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเด่นชัดขึ้น temperature gradient และ T_{max} ก็สูงขึ้น ส่วน RR เคลื่อนตัวเข้าไปในวัสดุพูนและมีค่าเพิ่มขึ้นตาม T_{max} ลักษณะโครงสร้างทางความร้อนที่เป็นเช่นนี้เพราะ u ก็คือค่า heat supply ดังนั้นเมื่อเพิ่มค่า u ทำให้ heat supply เข้าสู่ระบบมากขึ้นส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่า u จะมีผลต่อการเพิ่ม T_{max} และ

temperature gradient อย่างมาก อันจะเป็นประโยชน์ต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของ u ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง จะพบว่าผลที่ได้ทั้ง 2 กรณี ให้แนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่ผลการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าสูงกว่าการทดลอง ดังแสดงเหตุผลในรูปที่ 3 (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบ Adiabatic การทดลองมีการสูญเสียความร้อน) พิจารณาการทดลองจะพบว่าที่ u สูงๆ (รูปที่ 7b) ลักษณะโครงสร้างอุณหภูมิจะคลาดเคลื่อนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพราะในการทดลองจะไม่เห็นเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูเด่นชัด เนื่องจากการทดลองตำแหน่งวัดอุณหภูมิห่างเกินไป



(a)



(b)

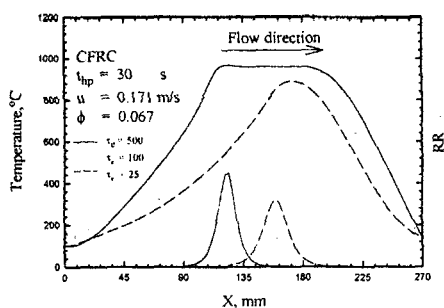
รูปที่ 7 เปรียบเทียบอิทธิพลของ Velocity (u) ระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (a) $u = 0.304$ m/s (b) $u = 0.106$ m/s

ซึ่งหากวัดด้วยระยะที่ถี่กว่านี้จะเห็นค่าอุณหภูมิอื่นๆ ที่จะแสดงโครงสร้างทางความร้อนเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูก็ได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตามอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่วัดได้ก็มีค่าและแนวโน้มใกล้เคียงกันเป็นอย่างดี

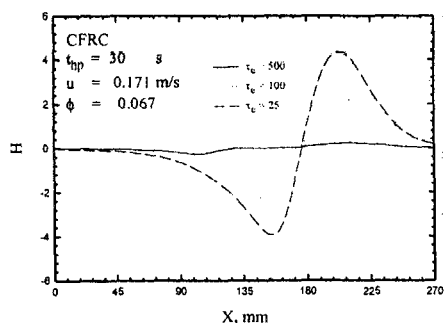
7.4 อิทธิพลของค่าความหนาแข็งแสง (τ_c)

รูปที่ 8a แสดงอิทธิพลของค่าความหนาแข็งแสง (τ_c) ที่มีผลต่อโครงสร้างทางความร้อน ได้แก่ โครงสร้างอุณหภูมิ (T, T_{max}) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (RR) ที่สภาวะ $\Phi = 0.067$ $t_{hp} = 30$ s และ $u = 0.171$ m/s ในการเปลี่ยนแปลงค่า τ_c จะเปลี่ยนแปลงค่า Absorption Coefficient (K) .ให้ความยาวเตาคงที่ (X_0) คงที่ พบว่าเมื่อ τ_c มีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะโครงสร้างอุณหภูมิจะเปลี่ยนไปคือ ที่ τ_c ต่ำๆจะมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยม เมื่อเพิ่ม τ_c สูงขึ้นจะค่อยๆเปลี่ยนรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม

คงหม โดย Temperature gradient ทั้งด้าน Upstream และ Downstream จะสูงขึ้นและ T_{max} สูงขึ้นตาม τ_c ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งโครงสร้างทางความร้อนที่เกิดขึ้นแบบนี้เนื่องมาจาก เมื่อ τ_c มีค่ามากจะมีคุณสมบัติในการกั้นรั่วความร้อนให้อยู่ภายในตัววัสดุพูนได้มากกว่า τ_c มีค่าน้อย ดังนั้นความเข้มในการแผ่รังสีไปยังบริเวณใกล้เคียงจึงมีค่าน้อยมากตลอดเนื้อวัสดุพูนที่ τ_c มีค่าสูงๆ(ดูรูปที่ 8b ประกอบ)ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อ τ_c มีค่าน้อยลงระบบจะพยายามลดการสูญเสียความร้อนเนื่องมาจากการแผ่รังสีบริเวณ Upstream และ Downstream ให้มีค่าน้อยๆเพื่อให้โครงสร้างทางความร้อนของระบบเสถียร โดยเปลวไฟจะต้องขยับมาอยู่บริเวณกลางเตามากขึ้น



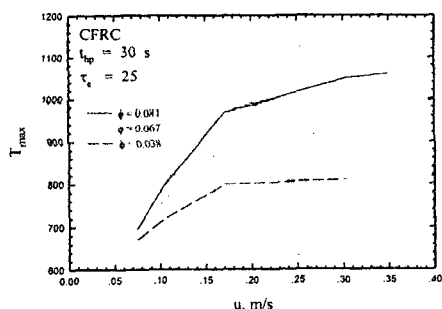
(a)



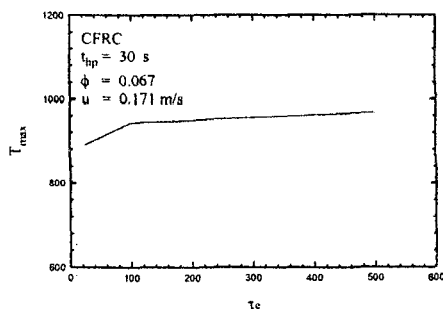
(b)

รูปที่ 8 อิทธิพลของค่าความหนาเชิงแสง (Optical thickness, τ_c) ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อน (a) โครงสร้างอุณหภูมิและ RR (b) Heat flux

7.5 อิทธิพลตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่า T_{max}

รูปที่ 9 อิทธิพลของค่า u ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุด (T_{max})

รูปที่ 9 แสดงอิทธิพลของค่า u ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุด ที่สภาวะ $t_{hp} = 30$ s และ $\tau_c = 25$ หากพิจารณาที่ $\Phi = 0.038$ จะได้ว่า เมื่อ u เพิ่มขึ้นแนวโน้มของ T_{max} จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อถึง $u = 0.171$ m/s T_{max} จะไม่ค่อยเพิ่มขึ้นมากนัก และเมื่อพิจารณาที่ Φ ที่สูงขึ้นพบว่ายิ่งเพิ่มขึ้นไปเท่าไร T_{max} ก็ยิ่งสูงขึ้นด้วย เนื่องจากระบบได้รับพลังงานความร้อนที่สูงจากอิทธิพลของ Φ และได้รับ Heat Supply จากอิทธิพลของ u ช่วยส่งเสริมกัน ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้ T_{max} สูงตามไปด้วยนั่นเอง

รูปที่ 10 อิทธิพลของค่า τ_c ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุด (T_{max})

รูปที่ 10 แสดงอิทธิพลของค่า τ_c ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุด ที่สภาวะ $t_{hp} = 30$ s $\Phi = 0.067$ และ $u = 0.171$ m/s จะได้ว่าเมื่อเพิ่ม τ_c ขึ้นจะพิจารณาเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกคือจาก $\tau_c = 25$ ถึง 100 พบว่า T_{max} จะเพิ่มขึ้นตามอย่างมาก (ประมาณ 200°C) แต่เมื่อเพิ่มค่า τ_c (ช่วงที่สอง)ต่อไป แนวโน้มของ T_{max} เปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากไม่ว่าจะเพิ่มค่า τ_c ขึ้นอีกเท่าไรค่าอุณหภูมิสูงสุดก็ไม่สูงขึ้นนัก แสดงถึงค่าความหนาเชิงแสง (τ_c) ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 100

8.สรุปผลการทดลอง

ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการศึกษากาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกสในวัสดุพูนชนิดสลับทิศทางการไหลของไอได้อย่างเป็นจังหวะเพื่อใช้หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น จะมีข้อดีที่น่าสนใจคือ

1. หากพิจารณาจากสมการ (9) พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญคือ T_{HS} ซึ่งหากทำให้ตำแหน่งของ Hot Junction เกิดขึ้นที่ T_{max} จะทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าได้กำลังสูงสุด ดังนั้นจากการคำนวณ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ T_{max} ได้แก่ τ_c , Φ และ u ส่วนค่า t_{hp} เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2. ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ต้องการประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงแกสที่มีค่าความร้อน (Φ) ต่างๆ ดังนั้นที่ Φ ต่างๆหากจะทำให้ P สูงๆควรจะพัฒนาระบบโดยการเพิ่ม u ดังแสดงที่ $\Phi = 0.067$, $u = 0.106$ m/s จะมี $T_{max} = 768.5^\circ\text{C}$ แต่เมื่อเพิ่ม $u = 0.171$ m/s จะได้ $T_{max} = 896.2^\circ\text{C}$ หรือทำการเพิ่มค่า τ_c (เปลี่ยนชนิดวัสดุพูน) ที่ $\tau_c = 25$, $u = 0.171$ จะมี $T_{max} = 896.2^\circ\text{C}$ แต่เมื่อเพิ่ม $\tau_c = 100$ จะได้ $T_{max} = 950.4^\circ\text{C}$ ดังนั้นแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์นี้ ตัวแปรที่เหมาะสมแก่การปรับปรุงเพื่อเพิ่มค่า P คือ u และ Te

3. การคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี

ดังนั้นหากจะนำไปพัฒนาเพื่อวิเคราะห์กรณีที่มีภาระทางไฟฟ้า (ผลิตกระแสไฟฟ้า)ต่อไป ก็น่าจะเป็นประโยชน์ต่อการสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการผลิตที่ดีที่สุด ซึ่งจะได้พัฒนาต่อไปอีกในอนาคตอันใกล้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hoffmann, J.G., Echigo, R., Yoshida, H., and TADA, S. 1997, "Experimental Study on Combustion in Porous Media With a Reciprocating Flow System", The Collection Paper of Ryoze Echigo, Vol.2, 1-181, 1997
- [2] Hanamura, K., Echigo, R., and Zhdanok, S. 1993, "Superadiabatic combustion in porous medium", The Collection Papers of Ryoze Echigo, Vol. 2, 1-145, 1993
- [3] Hoffmann, J.G., Echigo, R., Yoshida, H., and TADA, S. 1997, "Analytical Study on Flammable Limits of Reciprocating Superadiabatic Combustion in Porous Media", The Collection Paper of Ryoze Echigo, Vol.2, 1-174, 1997
- [4] Echigo, R., Hanamura, K., Yoshida, H., Koda, M., and Tawata, K. 1992, "Sophisticated Thermoelectric Conversion Devices of Porous Materials by Superadiabatic Combustion of Reciprocating Flow and Advanced Power Generation System", The Collection Papers of Ryoze Echigo, Vol. 2, 1-139, 1992
- [5] Echigo, R., Tawata, K., Yoshida, H., and Tada, S. 1995, "Effective Heating/Cooling Method for Porous Thermoelectric Device in Reciprocating Flow Combustion System", The Collection Papers of Ryoze Echigo, Vol. 2, 1-159, 1995
- [6] Echigo, R., Hanamura, K., Yoshida, H., Koda, M., and Tawata, K. 1994, "An Advanced Thermoelectric Generation Concept base on Steep Temperature Gradient yielded by Combustion in Porous Thermoelectric Elements", The Collection Papers of Ryoze Echigo, Vol. 2, 1-151, 1994