การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อนประสิทธิภาพสูงที่มีการเผาไหม้แบบสลับทิศทางการไหลของไอดีในวัสดุพรุน

Numerical Simulation of Super-Adiabatic Heat Engine with Reciprocating Combustion in Porous Media

นันทรัตน์ อินทเอิบ และ สำเริง จักรใจ
ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถ.ประชาอุทิศ(สุขสวัสดิ์ 48) แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพ 10140
โทร (662)470-9128 โทรสาร (662)470-9111 E-Mail: sumrueng.jug@kmutt.ac.th

Nantarat Intaoeb 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

รายงานนี้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อนที่มีการเผาไหม้แบบสลับทิศทางการไหลของไอดีในวัสดุพรุน ระบบประกอบด้วยลูกสูบ 2 อัน และวัสดุพรุนบางอยู่ในทรงกระบอก ลูกสูบอันแรก (Displacer piston) ทำหน้าที่บังคับทิศทางการไหลของไอดีซึ่งมีส่วนผสมเชื้อเพลิง CH_4 กับอากาศ ส่วนลูกสูบอีกอันหนึ่งเป็นลูกสูบกำลัง (Power piston) ทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานกลเพื่อนำไปใช้งาน ลูกสูบทั้งสองจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา (Reciprocating) ของแกสในกระบอกสูบ วัสดุพรุนทำหน้าที่สะสมความร้อนโดยดูดซับพลังงานความร้อนของแกสร้อนไว้ก่อนถูกระบายออกจากกระบอกสูบเพื่อนำไปอุ่นไอดีที่เข้ามาใหม่ในจังหวะต่อไป ก่อให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียสู่ไอดี การคำนวณเป็นแบบหนึ่งมิติ หาผลเฉลยโดยระเบียบวิธีทางตัวเลข ทำให้ได้สภาวะการเผาที่สมบูรณ์มีอุณหภูมิที่สูงกว่าค่าทางทฤษฎี 340 K ในขณะที่อุณหภูมิของไอเสียมีค่าต่ำมากมีความเข้มการเผาไหม้สูง ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าวัฏจักรออตโต 25% ช่วยประหยัดเชื้อเพลิง

Keywords:วัสดุพรุน/เครื่องยนต์ความร้อนประสิทธิภาพสูง/การเผาไหม้

Abstract

This paper studies mathematical model of heat engine with reciprocating combustion in porous media.The system consists of two pistons and a thin porous medium in a cylinder, one being a displacer piston and the other a power piston.These create reciprocating motion of gas in cylinder.The residual combustion gas enthalpy is effectively regenerated to induce enthalpy increase in the mixture (preheat) though the porous medium, which provides heat storage. A one-dimension mathematical model of the system is formulated and solved by numerical method. Due to heat recirculation, the maximum temperature is higher than the theoretical 340 K, the exhaust gas is lower than the theoretical and the thermal efficiency is higher than Otto cycle 25%

Keywords: Porous Media/ Super-Adiabatic Heat Engine/ Combustion

1. NOMENCLATURE

A = frequency factor for combustion [s^{-1}]

A_s = surface area of equivalent sphere [m^2]

C_D = thermal conductivity ratio = λ/λ_s

c_{vs} = solid specific heat at constant volume [$Jkg^{-1}K^{-1}$]

c_v = gas specific heat at constant volume [$Jkg^{-1}K^{-1}$]

D = diffusivity [$m^2 s^{-1}$]

Da = dimensionless permeability = k_{eq}/x_0^2

d_s = diameter of equivalent sphere of solid phase [m]

E = activation energy [kJ/kmol]

h_0 = heating value of mixture [kJ kg^{-1}]

H_0 = dimensionless combustion heat = $h_0/(c_v T_0)$

HR = dimensionless rate of reaction = $(h_0 x_0^2 W)/(c_v T_0 \mu)$

k_{eq} = permeability [m^2]

L = length of connecting rod [m]

L_e = Lewis number = $\lambda/(Dc_v)$

L_s = crank ratio = $2r/x_0$

M = dimensionless area of particle = $(x_0^2 \alpha_s n_s A_s/\lambda)$

n_s = number density of particle [m^{-3}]

p = pressure [N/m^2]

P = dimensionless pressure = p/p_0

r = crank radius [m]

R = universal gas constant [kJ/kmol K]

Re = Reynolds number = $(\rho_0 \omega r x_0)/\mu$

Rh = dimensionless density = ρ/ρ_0

T = gas temperature [K]

T_s = solid temperature [K]

TM_{ad} = dimensionless adiabatic flame temperature = T_{ad}/T_0

$TM_{ad,comp}$ = dimensionless adiabatic compression flame temperature = $T_{ad,comp}/T_0$

TM = dimensionless gas temperature = T/T_0

TP = dimensionless solid temperature = T_s/T_0

t = time [s]

u = gas velocity [$m\ s^{-1}$]

U = dimensionless gas velocity = u/u_0

v = volume [m^3]

v_0 = volume of porous meia [m^3]

V = dimensionless volume = v/v_0

W = reaction rate [$kg\ m^{-3} s^{-1}$]

x = distance [m]

x_0 = length of porous meia [m]

X = dimensionless distance = x/x_0

Y = product mole fraction

Greek symbols

λ = gas thermal conductivity [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]

λ_s = ratio of connecting rod to crank radius = L/r

μ = gas viscosity [$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$]

ρ = gas density [$kg\ m^{-3}$]

α_s = heat transfer coefficient [W/m^2 K]

Γ = thermal capacity ratio = $(\rho_s c_{vs})/(\rho c_v)$

ω = angular velocity [rad/s]

φ = phase relation angle [degree]

η_{th} = thermal efficiency

η_R = Regenerator efficiency

θ_C = crank angle of displacer piston [degree]

θ_3 = temperature ratio = T_0/T_{max}

ε = compression ratio

Superscripts

\+ = positive direction

\- = negative direction

Subscripts

max = maximum

min = minimum

0 = inlet

g = gas phase

s = solid phase

2. บทนำ

การเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานกลโดยอาศัยแนวความคิดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engine)[1] รูปที่1เครื่องยนต์ประกอบด้วยลูกสูบ 2 ลูกคือ Displacer Piston และ Power Piston ภายในบรรจุสารทำงาน (Working gas) มี Regenerator เป็นโครงถักทำจากเส้นลวดอยู่กลางกระบอกสูบ ทำหน้าที่รับความร้อนจากสารทำงานและถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงาน มี Heater เป็นตัวให้ความร้อนทางด้านซ้ายและ Cooler เป็นตัวระบายความร้อนทางด้านขวา ระบบ Crank piston mechanism ทำให้ลูกสูบทั้งสองเกิดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเป็นการสร้างจังหวะการไหลของ Working gas ในกระบอกสูบ Bellcrank และ Lever arm เป็นตัวทำให้ลูกสูบทั้งสอง เคลื่อนที่สัมพันธ์กันโดยมี Rocker เป็นตัวควบคุมมุมเฟส(Relation phase angle) ของ Displacer Piston และ Power Piston เครื่องยนต์มีการทำงานดังรูปที่ 4(a) และ 4(b)

1 ⟶ 2 เป็นกระบวนการ Constant temperature compression (heat rejection to external sink) Displacer Piston เคลื่อนที่ไปทางซ้ายในขณะที่ Power Piston อยู่นิ่งชั่วขณะทำให้แกสถูกดันไปทางซ้ายทำให้ความดันสูงขึ้นด้วยกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Isothermal process) โดยมี Cooler เป็นตัวระบายความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการอัด ควบคุมให้อุณหภูมิแกสคงที่

2 ⟶ 3 เป็นกระบวนการ Constant volume regeneration (internal heat transfer from regenerator back to the working fluid) Displacer piston และ Power piston เคลื่อนที่ไปทางซ้ายพร้อมกันด้วยกระบวนการ

ปริมาตรคงที่ แกสจะได้รับความร้อนจาก Regenerator ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น

3 ⟶ 4 เป็นกระบวนการ Constant temperature expansion (heat addition from external source) แกสร้อนขยายตัวดัน Power piston เคลื่อนที่ไปทางซ้าย ขณะที่ Displacer Piston ยังอยู่กับที่ ด้วยกระบวนการอุณหภูมิคงที่โดยมี Heater เป็นตัวให้ความร้อน ควบคุมให้อุณหภูมิแกสคงที่จนกระทั่งแกสขยายตัวสูงสุด

4 ⟶ 1 เป็นกระบวนการ Constant volume regeneration *(internal heat transfer from the working fluid to regenerator)* Power Piston และ Displacer Piston เคลื่อนที่ไปทางขวาพร้อมกันด้วยกระบวนการปริมาตรคงที่ เพื่อดันแกสร้อนไปทางขวาผ่าน Regenerator แกสร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับ Regenerator ทำให้แกสอุณหภูมิต่ำลงเป็นการครบวงจรการทำงาน ข้อดีคือเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าวัฏจักรออตโต และวัฏจักรดีเซล (ซึ่งเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายใน) เสียงเบา มีอายุการใช้งานนาน เกิดมลพิษต่ำแต่มีข้อเสียคือไม่สามารถให้กำลังงานได้ทันทีทันใด เพราะเป็นเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายนอก (External Combustion Engine) เครื่องยนต์มีความซับซ้อนมากต้องการความรู้ทางเทคนิคสูง และราคาแพง ซึ่งแตกต่างจากเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายใน *(Internal Combustion Engine)* เพราะเมื่อมีการสันดาปความร้อนที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนเป็นพลังงานกลให้กับลูกสูบเพื่อนำไปใช้งานได้ทันที อีกทั้งเครื่องยนต์สันดาปภายในก็ไม่ซับซ้อนมากนัก

เทคโนโลยีการเผาไหม้ในวัสดุพรุน (Porous Media)[2] ได้รับการศึกษาอย่างจริงจังและเข้าใจอย่างกระจ่างชัดกล่าวคือเป็นการเผาไหม้แบบ 2 สถานะ คือมีสถานะของแข็ง(Solid phase) ซึ่งก็คือวัสดุพรุนและสถานะแกส (Gas phase) เนื่องจากวัสดุพรุนดังกล่าวมีลักษณะที่เด่นคือมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมีค่าการแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีความร้อน(Emissivity and Absorptivity) ที่สูงกว่าสถานะแกสมาก ปรากฏการณ์การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และการถ่ายเทความร้อนในเปลวไฟจะแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับการเผาไหม้แบบ *Single phase* เพราะไม่เพียงแต่ขึ้นกับการนำความร้อนเท่านั้นแต่จะมีการแผ่รังสีจากวัสดุพรุนเข้ามาช่วยเสริมอีกด้วย ดังนั้นจึงทำให้เกิดสภาวะการเผาไหม้ที่เรียกว่า "Excess Enthalpy Combustion" หรือ "Super Adiabatic Combustion" กล่าวคือให้อุณหภูมิเปลวไฟที่สูงกว่าค่าทางทฤษฎีถึง 13 เท่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงและประหยัดเชื้อเพลิงกว่าการเผาไหม้แบบ Single phase ทั้งนี้เพราะวัสดุพรุนนั้นนอกจากจะทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้แล้วยังทำหน้าที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาเดียวกันอีกด้วย ก่อให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในระบบจากไอเสียสู่ไอดีอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ J.G. Hoffmann[3] ยังได้ศึกษาการเผาไหม้ในวัสดุพรุนที่มีการสลับทิศทางการไหลของไอดีอย่างเป็นจังหวะ พบว่าสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำและมีค่าความเร็วของแกสสูงๆได้

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาการศึกษานี้จึงได้พยายามประยุกต์ใช้การเผาไหม้ในวัสดุพรุนแบบสลับทิศทางการไหลของแกสอย่างเป็นจังหวะกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดย Hanamura[4] เพื่อแก้ไขจุดอ่อนโดยเปลี่ยนจากการสันดาปภายนอกเป็นสันดาปภายในโดยทำการปรับแต่งเครื่องยนต์สเตอร์ลิง รูปที่2โดยติดตั้งวัสดุพรุน (Porous Media) แทนชุด Regenerator ไม่ใช้สารทำงาน เพิ่ม Intake เพื่อเป็นทางเข้าของไอดีซึ่งมีส่วนผสมเชื้อเพลิง CH_4 กับอากาศ และเพิ่ม Outtake เพื่อเป็นทางระบายไอเสียออกจากกระบอกสูบกลไกการเคลื่อนที่ยังคงเหมือนเดิมโดยมีลูกสูบ 2 อันเป็นตัวทำให้เกิดการสลับทิศทางการไหลของแกสในกระบอกสูบผ่านวัสดุพรุนที่ติดตั้งอยู่ภายในกระบอกสูบ วัสดุพรุนทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้และตัวแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงถึง 58 % โดยไม่พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงความดันของแกสที่ไหลผ่านวัสดุพรุน คือกำหนดให้ความดันคงที่ (Pressure uniform) ในแต่ละ Crank angle งานวิจัยนี้ทำการศึกษาต่อจาก[4] โดยพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงความดันของแกสทุกตำแหน่งในกระบอกสูบที่ *Crank angle* ต่างๆ ซึ่งเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณสามารถคาดการณ์ได้ว่าจะทำให้ได้เครื่องยนต์ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก ในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองเครื่องยนต์ให้อยู่ใน รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วแก้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาโครงสร้างทางความร้อนของระบบ เช่น อุณหภูมิของแกส อุณหภูมิของแข็ง ความเร็วของแกส ความดันของแกส ความหนาแน่นของแกส และ Product mole fraction เพื่อทราบและเข้าใจถึงปรากฏการณ์และอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ คือเมื่อมีการอุ่นไอดี จะได้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นในขณะที่เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนเท่าเดิม ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สูงขึ้น อีกทั้งอุณหภูมิของแกสไอเสียที่ออกต่ำลง

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปที่3 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ความร้อนประสิทธิภาพสูง ขั้นตอนการทำงานเริ่มต้นจากจังหวะที่ 1 Displacer Pistonเคลื่อนที่ไปทางขวาทำให้ไอดีถูกดูดเข้ามาในกระบอกสูบและเป็นการไล่ไอเสียออกไปในเวลาพร้อมกัน จังหวะที่ 2 Displacer Piston เคลื่อนที่ไปทางซ้าย ขณะที่ Power Piston อยู่นิ่งชั่วขณะทำให้ไอดีถูกดันไปทางซ้ายเพื่อรับความร้อนจากวัสดุพรุนที่ร้อน จังหวะที่ 3 ไอดีเกิด Ignition ตามด้วยการเผาไหม้ในวัสดุพรุน เกิดการขยายตัวของแกส ความดันสูงขึ้นและดัน Power Piston ไปทางซ้ายขณะที่ Displacer Piston อยู่นิ่งชั่วขณะ จังหวะที่ 4 แกสขยายตัวสูงสุด *Displacer Piston* ยังอยู่กับที่ จังหวะที่ 5 Power Piston และ Displacer Piston เคลื่อนที่ไปทางขวาพร้อมกัน เพื่อดันไอเสียร้อนผ่านวัสดุพรุน วัสดุพรุนจะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนของแกสไอเสียร้อนก่อนถูกระบายออกจากกระบอกสูบเพื่อการอุ่นไอดีในจังหวะต่อไปทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพก่อนการเผาไหม้เป็นการครบวงจรการทำงาน สมมุติฐานหลักที่ใช้พิจารณาการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในทิศทางเดียว ลูกสูบทั้งสองเคลื่อนที่ด้วยระบบ Crank-Piston Mechanism วัสดุพรุนประกอบด้วยของแข็งเนื้อเดียวกันและมีช่องว่างของอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ การเผาไหม้จะพิจารณาเป็น One-step first order reaction แบบ Arrhenius คุณสมบัติเชิงฟิสิกส์คงที่ ยกเว้นความหนาแน่นของแกส วัสดุพรุนไม่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับการถ่ายเทมวล (Lewis number = 1) ผิวของ Power Piston เป็นฉนวน ส่วนผิวของ Displacer Piston มีอุณหภูมิ T_0 ไม่พิจารณาการแผ่รังสีของวัสดุพรุน

ถือว่าวัสดุพรุนมีความหนาเชิงแสงสูงมากพิจารณาการไหลแบบมีความหนืด

4. สมการของระบบ (เฉพาะในวัสดุพรุน)

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0 \qquad (1)$$

Momentum equation

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t} + \rho u\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\mu}{k_{eq}}u \qquad (2)$$

$$k_{eq} = \frac{1}{3\pi d_s n_s} \qquad (3)$$

Gas phase energy conservation equation

$$\rho c_v\frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_v u\frac{\partial T}{\partial x} = \lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \alpha_s n_s A_s (T - T_s) - \frac{\partial (Pu)}{\partial x} + h_0 W \qquad (4)$$

Solid phase energy conservation equation

$$\rho_s c_{vs}\frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \alpha_s n_s A_s (T - T_s) \qquad (5)$$

Species equation

$$\rho\frac{\partial Y}{\partial t} + \rho u\frac{\partial Y}{\partial x} = D\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + W \qquad (6)$$

Ideal gas equation

$$p = \rho RT \qquad (7)$$

ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยา W หาได้จาก

$$W = A\rho(1 - Y)\exp(-E/RT) \qquad (8)$$

Displacement equation

$$x = \frac{x_\theta}{2} + r\left\{1 + \cos\theta_c - \lambda_p\left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta_c}{\lambda_p^2}}\right)\right\} \qquad (9)$$

5. Boundary conditions และ Initial conditions

5.1 Boundary conditions

ที่ผิว displacer piston $T = T_0, Y = 0$ (10)

ที่ผิว power piston $\frac{\partial T}{\partial} = 0, \frac{\partial Y}{\partial} = 0$ (11)

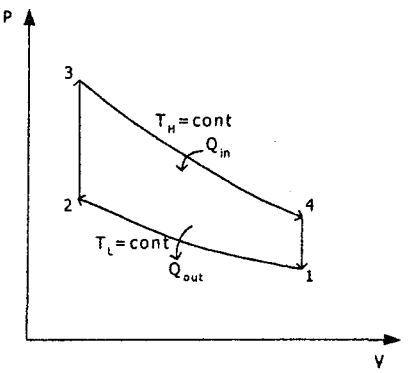
5.2 Initial conditions

ใช้ผลการคำนวณจาก [4] เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ

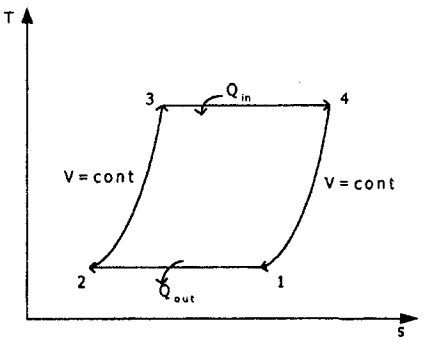
5.3 Method of solution

สมการข้างต้นจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการไร้หน่วย และจัดให้อยู่ในรูปสมการ finite-difference แล้วแก้สมการ โดยใช้วิธี implicit finite difference เพื่อหาคำตอบของความหนาแน่น(ρ) ความเร็ว(u) การกระจายอุณหภูมิของก๊าซ(T) อุณหภูมิของของแข็ง(T_s) product mole fraction ของผลิตภัณฑ์(Y) และความดัน(p)

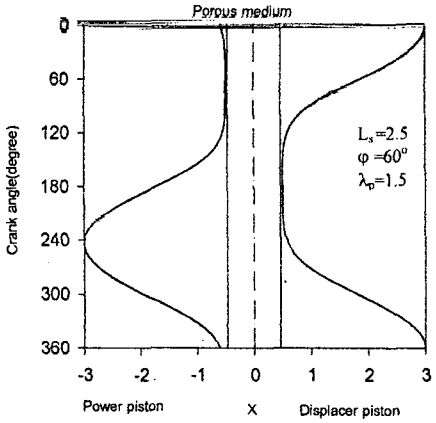
การคำนวณเริ่มจากหยุดเวลาที่ crank angle (θ_c) =0 องศา หาค่าตำแหน่ง Displacer piston และ Power piston จากรูปที่ 5 แบ่งระยะทางจากผิว Displacer piston ถึงผิว Power piston ออกเป็น 100 meshes นำ Initial conditions [4] มาเป็นค่าเริ่มต้น คำนวณค่าจากขวาไปซ้าย (Forward) หาค่าความหนาแน่น(ρ) ความเร็ว(u) การกระจายอุณหภูมิของแกส(T) อุณหภูมิของของแข็ง(T_s) product mole fraction ของผลิตภัณฑ์(Y) ความดัน(p) โดยวิธีการคำนวณซ้ำ (iterative procedure) จนกระทั่งผลลัพธ์ที่คำนวณได้ลู่เข้าหาคำตอบโดยมี convergence criterion = 10^{-5} จากนั้นทำการเลื่อนเวลาไปที่ crank angle (θ_c) =1 องศา หยุดเวลาไว้หาค่าตำแหน่ง Displacer piston และ Power piston จากรูปที่ 5 คำนวณหาผลลัพธ์โดยใช้ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จาก crank angle (θ_c) =0 องศา เป็นค่าเริ่มต้น ทำการคำนวณจากขวาไปซ้าย (Forward) ทีละ 1 องศา จนถึง 240 องศา หลังจากนั้นที่ crank angle (θ_c) =241 องศา จากรูปที่ 5 พบว่า Power piston และ Displacer piston เคลื่อนที่ไปทางขวา ดันแกสร้อนให้ไหลจากซ้ายไปขวา การคำนวณจึงต้องคิดจากซ้ายไปขวา (Backward) โดยใช้ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จาก crank angle(θ_c) =240 องศา เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณที่crank angle พิจารณาอยู่จนกระทั่งครบ 360 องศา (1 รอบ)



รูปที่ 4(a) P-V diagram ของ Stirling cycle



รูปที่ 4(b) T-s diagram ของ Stirling cycle



รูปที่ 5 ตำแหน่งของ Displace rและ Power piston ที่Crank angle ต่างๆ

6. ผลและการวิจารณ์

รูปที่ 6 แสดงความหนาแน่น(Rh) ความเร็ว(U) การกระจายอุณหภูมิของก๊าซ(T M) อุณหภูมิของของแข็ง(TM) product mole fraction ของผลิตภัณฑ์(Y) ความดัน(P) อัตราการเกิดปฏิกิริยา(HR) ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย ที่ Crank angle(θ_c) =0 60 120 180 240 และ 300 องศา ตามลำดับ โดยใช้ค่าจากตารางที่ 1รูปที่6(a) θ_c = 0 องศา Displacer piston อยู่ที่ตำแหน่ง X=3 (Bottom dead center) Power piston อยู่ ใกล้กับวัสดุพรุน เป็นจังหวะอัดไอดีเข้ากระบอกสูบ พร้อมๆกับไล่ไอเสียออกจากกระบอกสูบอย่างทันทีทันใด U=0 นั่นคือแกสกำลังจะเปลี่ยนทิศทางการไหลจากขวาไปซ้าย ไอดีจะไหลเข้าแทนที่ไอเสีย แต่ค่า Y ยังมีค่าเป็น 1 ที่บริเวณใกล้กับ Power piston เนื่องจากยังมีไอเสียตกค้างอยู่ในกระบอกสูบ อุณหภูมิแกสเท่ากับ T_o (TM=0) (b) Displacer piston เคลื่อนที่ไปทางซ้ายในขณะที่ Power piston อยู่กับที่ (Top dead center) เป็นการอัดไอดีโดยมีช่วงการอัดตั้งแต่ Crank angle(θ_c) =0 องศา ถึง 60 องศา P สูงขึ้นทำให้ TM สูงขึ้นด้วย ไอดีจะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายค่า U จึงเป็นลบ (c) Displacer piston และ Power piston เคลื่อนที่ไปทางซ้ายพร้อมกันบังคับให้แกสร้อนไหลผ่านวัสดุพรุนเพื่อรับความร้อนเป็นการอุ่นไอดีและเผาไหม้ในขณะเดียวกันP สูงขึ้น TM จะสูงขึ้นไม่มากนักเนื่องจากพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการเพิ่มความดันให้สูงขึ้นเพื่อก่อให้เกิดงานต่อไป (d) เป็นจังหวะเผาไหม้และขยายตัวของแกสร้อน Displacer piston อยู่ติดวัสดุพรุน(Top dead center)Power piston เคลื่อนที่ไปทางซ้าย ด้วยความเร็วสูง เนื่องจากแกสร้อนความดันสูงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จะสูงกว่าค่าอุณหภูมิทางทฤษฎี (T_{ad}) [ภาคผนวก ข] และค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีกรณีที่มีการอัด ($T_{ad,comp}$) [ภาคผนวก ช] (e) Power piston เคลื่อนที่ถึง(Bottom dead center) เป็นการ ขยายตัวสูงสุด จากนั้นทั้ง Power piston และ Displacer piston เคลื่อนที่ไปทางขวาพร้อมกัน ดันไอเสียอุณหภูมิสูงให้เคลื่อนที่ผ่านวัสดุพรุน U มีค่าเป็นบวกแสดงถึงแกสเคลื่อนที่ไปทางขวาผ่านวัสดุพรุน (f) วัสดุพรุนดูดซับความร้อนของแกสร้อนทำให้อุณหภูมิไอเสียที่ออกต่ำลง ลูกสูบทั้งสองจะเคลื่อนที่ดันไอเสียผ่านวัสดุพรุนจนกระทั่ง 360 องศา เป็นการครบรอบจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์เพราะทั้ง Displacer piston และ Power piston ต่างก็เคลื่อนที่ไปได้ 360 องศาเท่ากัน

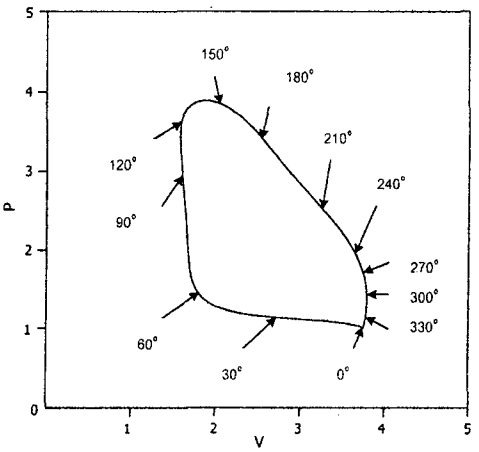
รูปที่ 7 แสดง P-V Diagram ที่ Crank angle(θ_c) ต่างๆ θ_c =0 องศา ถึง 60 องศา เป็นช่วงการอัด P สูงขึ้น V ลดลง θ_c=60 องศา ถึง 120 องศา เป็นช่วงการอุ่นไอดีและเผาไหม้ในขณะเดียวกัน P สูงขึ้นมาก V คงที่ θ_c=120 องศา ถึง 240 องศา เป็นช่วงการเผาไหม้และแกสขยายตัว P ลดลง V เพิ่มขึ้น θ_c=240 องศา ถึง 360 องศา แกสร้อนเมื่อไหลผ่านวัสดุพรุนด้วย V คงที่ จะถูกดูดซับความร้อน P ลดลง ครบการทำงาน 1 รอบ

รูปที่ 8 แสดงค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงที่ทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ จากกราฟเครื่องยนต์สามารถทำงานที่สภาวะ Lean ได้ คือใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำเครื่องยนต์สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงและทำงานจนครบวงจรได้โดยการคำนวณสังเกตจาก HR TM ยังคงมีแนวโน้มเหมือนเดิม มีค่าเทียบเท่ากับการเพิ่มอุณหภูมิทางทฤษฎีกรณีที่มีการอัด ($T_{ad,comp}$) 199 K และมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณของ Hanamura [4]

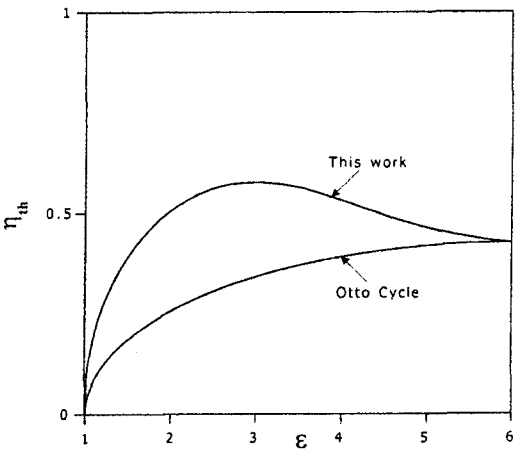
รูปที่ 9 แสดงประสิทธิภาพทางความร้อน (η_{th}) [ภาคผนวก ก] ของเครื่องยนต์ความร้อนประสิทธิภาพสูง ในช่วง Compression ratio (ε) ต่ำ ค่า η_{th} จะสูงกว่า Otto cycle เนื่องจากอิทธิของการอุ่นไอดีจากวัสดุพรุนทำให้ได้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น η_{th} จึงสูงขึ้น เมื่อเพิ่ม ε อิทธิของการอุ่นไอดีจากวัสดุพรุนมีผลน้อย (ดูกราฟรูปที่ 2.ก ในภาคผนวก) แต่อิทธิจากการอัดมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ η_{th} มีค่าเท่ากับ Otto cycle

ตารางที่ 1 ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

Parameter	Value
C_D	1
Da	10^{-3}
E	130 kJ/mol
H_0	1.7
Le	1
L_s	2.5
M	160000
r	2.5 cm.
Re	2000
T_0	300 K
X_0	2.0 cm.
Length of cylinder	12 cm.
Γ	3000
φ	60 องศา
λ_p	1.5



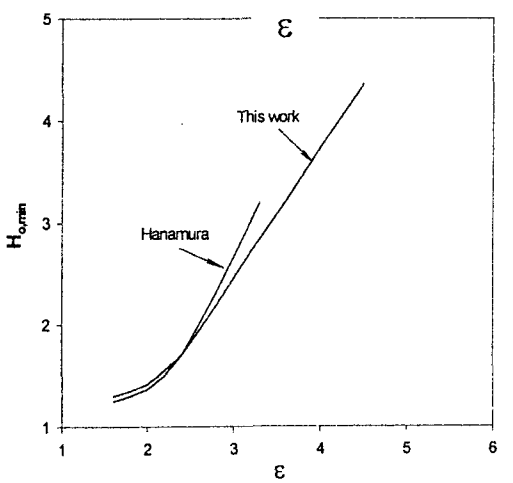
รูปที่ 7 P-V Diagram ที่ Crank angle ต่างๆ



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพทางความร้อน

7. สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ความร้อนประสิทธิภาพสูงที่มีการเผาไหม้แบบสลับทิศทางในวัสดุพรุน ได้สภาวะการเผาที่สมบูรณ์มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าอุณหภูมิทางทฤษฎี (T_{ad}) 340 K และค่าอุณหภูมิทางทฤษฎีกรณีที่มีการอัด ($T_{ad,comp}$) 210 K ในขณะที่อุณหภูมิของไอเสียมีค่าต่ำมากมีความเข้มการเผาไหม้สูง ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าวัฏจักรออตโต 25% ในช่วง Compression ratio (ε) =3 และเมื่อ Compression ratio (ε) เพิ่มขึ้นก็จะมีประสิทธิภาพเท่ากับวัฏจักรออตโต



รูปที่ 8 ค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์สามารถทำงานได้

รูปที่ 8 ค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์สามารถทำงานได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Issiki, N.,1988,4th International Conference on string Engines,pp.99-104

[2] Hanamura, K., Echigo, R. and Zhdanok, S.A.,1993,"Superadiabatic Combustion in a Porous Medium," International Journal Heat and Mass Transfer, Vol.36,No.13, pp.3201-3209.

[3] J.G. Hoffmann, R. Echigo, Shigeru Tada and H.Yoshida "Analytical study on flammable limits of reciprocating superadiabatic combustion in porous mediaProceeding,"8th **International Symposium on Transport Phenomena in Combustion**,SanFrancisco,CA,1995,Vol.2,pp. 1430-1440

[4] Hanamura, K., Miyairi, Y,1997," Reciprocating Heat Engine with Super-adiabatic Combustion in Porous Media," Transport Phenomena in combustion, Vol.1, pp.701-710