

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม Optimization of Thermoacoustic Refrigerator using Genetic Algorithm

สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา และ ปุมยศ วัลลิกุล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 0-29132500 ต่อ 8308 Email: sawangtit@hotmail, suwat@kmitnb.ac.th, ppy@kmitnb.ac.th

Sawangtit Srekituwan , Suwat Kuntanapreeda, and Pumyos Vallikul

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Pibulsongkram Rd. Bangsue, Bangkok 10800

Tel. 0-29132500 ext. 8308 Email: sawangtit@hotmail, suwat@kmitnb.ac.th, ppy@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกทำงานด้วยการใช้พลังงานเสียงในการถ่ายโอนความร้อนและไม่ต้องใช้สารทำความเย็นที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในการออกแบบเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก ค่าตัวแปรที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดกระทำได้อย่างยาก เนื่องจากสมการคณิตศาสตร์ของระบบมีความซับซ้อนมาก เขียนอยู่ในรูปของระบบสมการเชิงอนุพันธ์-พีชคณิต (Differential-Algebraic Equation) และไม่สามารถหาเกรเดียนต์ของฟังก์ชันได้โดยง่าย ทำให้จำเป็นต้องใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบที่ไม่ต้องใช้เกรเดียนต์ เช่น Simplex และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งข้อดีของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมคือเป็นการค้นหาค่าตอบทั้งโดเมน ทำให้ได้ค่าคำตอบที่เป็นค่าเหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Global Optimal Solution) ในงานวิจัยนี้ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสแตกของเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก เพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุด ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบ Hofler ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหาค่าตัวแปรที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดตามที่ต้องการ

Abstract

Thermoacoustic refrigerator is working with the acoustic wave that transferred heat and environment friendly fluid.

Thermoacoustic refrigerator's parameter is hardly to design for reaching high performance because mathematical model is complicate. Complicate Differential-Algebraic Equation can't define gradient equation. It's need optimization method that didn't want gradient, such as Simplex method and Genetic Algorithm (GA). The advantage of GA is global search space. Solution from GA are Global Optimal Solution. In this research use GA to find stack's parameter which is main part of the thermoacoustic refrigerator. The objective design is highest performance by stack's parameter. The results compare with Hofler's experiment that results well agree and GA can find the optimal performance of the system.

สัญลักษณ์

a	sound speed
COP	coefficient of performance
COPC	Carnot's coefficient of performance
COPR	coefficient of performance compared to Carnot's
c_p	isobaric heat capacity per unit mass
f	function
\dot{H}	total energy flux
K	thermal conductivity

l	plate half-thickness
P	pressure
s	entropy per unit mass
T	temperature
t	time
w	enthalpy per unit mass
x	position along sound propagation
y	position perpendicular to sound propagation
y_0	plate half gap
β	thermal expansion coefficient
γ	ratio, isobaric to isochoric specific heats
δ	penetration depth
ϵ_s	plate heat capacity ratio
K	thermal diffusivity
μ	dynamic viscosity
ν	kinematic viscosity
ξ	second viscosity
Π	perimeter
ρ	density
ν	viscous stress tensor
σ	Prandtl number
ω	Angular frequency

ตัวห้อย

s	standing, or solid
m	mean
k	thermal
ν	viscous
1	first order
2	second order

1. บทนำ

ปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกเป็นปรากฏการณ์ผสมระหว่างพลังงานเสียงและพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องต้นกำลังและเครื่องทำความเย็นได้ โดยเครื่องต้นกำลังจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลง gradient ของอุณหภูมิให้เกิดเป็นกำลังเสียง ในขณะที่เครื่องทำความเย็นใช้พลังงานเสียงในการเคลื่อนย้ายความร้อนเพื่อทำความเย็น ซึ่งทั้งเครื่องต้นกำลังและเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกนี้มีข้อดีคือ มีอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่จำนวนน้อยชิ้นทำให้มีอายุการใช้งานที่นาน และในส่วนของเครื่องทำความเย็นนั้นไม่ต้องใช้สารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1],[4]

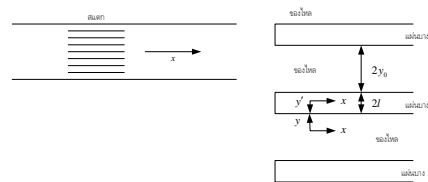
จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำเอาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาใช้ในการออกแบบระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกได้ อีกทั้งค่าที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมสูงสุดที่แท้จริงซึ่งจะทำให้ได้ระบบทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูง

2. สมการออกแบบระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบทำความเย็น [1],[2] เป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์-พีชคณิต ในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ เนื่องจากเป็นปัญหาค่าขอบ (Boundary Value Problem) และใช้ระเบียบวิธีการยิง (Shooting Method) [4],[5] ด้วยวิธีการ Newton Raphson เพื่อหาค่าเริ่มต้นที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ขอบ แล้วใช้ระเบียบวิธีรุงเก-คุดตา (Runge-Kutta Methods) [5],[6]

2.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เน้นไปที่แสดงที่เป็นแผ่นบางที่วางซ้อนกัน และวางขนานไปตามแนวของเสียง โดยกำหนดให้แผ่นบางที่วางมีความหนา $2l$ และระยะห่างระหว่างแผ่น $2y_0$ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ด้านซ้ายภาพรวมของสแตค และด้านขวาภาพขยายของแผ่นบาง [2]

สมการอธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกเป็นสมการหนึ่งมิติที่ใช้ในการอธิบายคลื่นหนึ่งของของไหลที่วิ่งอยู่บนแผ่นบางตามแนวแกน x โดยอธิบายจากสมการควบคุม (governing equation) ประกอบด้วยสมการการเคลื่อนที่ของของไหล [7]

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \left(\xi + \frac{\mu}{3} \right) \nabla (\nabla \cdot v) \tag{1}$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่น v คือความเร็วในแนวแกน y p คือความดัน μ คือความหนืด ν คือความหนืดจลศาสตร์ ξ คือ second viscosity

มีสถานะที่ขอบเขตความเร็วของของไหลที่ระหว่างแผ่นบางกับของไหล $v = 0$

สมการต่อเนื่อง [7]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{2}$$

สมการการถ่ายเทความร้อนของของไหล [7]

$$\rho T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + v \cdot \nabla s \right) = \nabla \cdot (K \nabla T) + (\text{terms quadratic in velocities}) \tag{3}$$

โดยที่ s คือ entropy per unit mass K คือ thermal conductivity และ T คืออุณหภูมิของของไหล

มีสถานะที่ขอบเขตอุณหภูมิที่ของไหลเท่ากับอุณหภูมิที่แผ่นบาง $T = T_s$ และฟลักซ์ความร้อนที่ไหลเข้าสู่ของไหลเท่ากับฟลักซ์ความร้อนที่ไหลเข้าสู่แผ่นบาง $K(\partial T/\partial y) = -K_s(\partial T_s/\partial y)$

สมการการถ่ายเทความร้อนของของแข็ง [2]

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \kappa_s \nabla^2 T_s \quad (4)$$

โดยที่ ρ_s คือความหนาแน่นของแผ่นบาง c_s คือ specific heat per unit mass T_s คืออุณหภูมิที่แผ่นบาง κ_s คือ thermal diffusivity ของแผ่นบาง

มีสถานะที่ขอบเขตอุณหภูมิของแผ่นบางมีค่า T_s

สมการพลังงาน [7]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \epsilon \right) = -\nabla \cdot \left[\rho \left(\frac{1}{2} v^2 + w \right) - K \nabla T - v \cdot \Sigma \right] \quad (5)$$

โดยที่ ϵ คือ internal energy w คือ enthalpy per unit mass Σ คือ viscous stress tensor

กำหนดให้ตัวแปรที่ใช้ประกอบให้เป็นตัวแปรจำนวนเชิงซ้อนที่มีความสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุม ω ในการคำนวณจะคิดเฉพาะส่วนที่เป็นจำนวนจริงเท่านั้นที่ใช้แทนลงในสมการอธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก

$$p = p_m + p_1(x)e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$\rho = \rho_m + \rho_1(x, y)e^{i\omega t} \quad (7)$$

$$v = \hat{x}u_1(x, y)e^{i\omega t} + \hat{y}v_1(x, y)e^{i\omega t} \quad (8)$$

$$T = T_m + T_1(x, y)e^{i\omega t} \quad (9)$$

$$T_s = T_m + T_{s1}(x, y)e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$s = s_m + s_1(x, y)e^{i\omega t} \quad (11)$$

ในการหาผลเฉลยได้มาจากการนำสมการการเคลื่อนที่ สมการถ่ายเทความร้อน สมการต่อเนื่อง แล้วทำการอินทิเกรตจากระยะผิวไปยังชั้นขีดผิวของของไหล ที่มีผลมาจากความดันของเสียงที่เปลี่ยนแปลง $p_1(x)$ ตามอุณหภูมิ $T_m(x)$ คุณสมบัติของของไหล และรูปร่างของของแข็งและของไหล แล้วได้สมการคลื่น [2]

$$\left(1 + \frac{(\gamma-1)f_k}{1+\epsilon_s} \right) p_1 + \frac{\rho_m a^2}{\omega^2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1-f_v}{\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \right) - \beta \frac{a^2}{\omega^2} \frac{f_k - f_v}{(1-\sigma)(1+\epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0 \quad (12)$$

โดยที่ γ คือ isobaric to isochoric specific heats ϵ_s คือ plate heat capacity ratio f_k คือ function thermal f_v คือ function viscous σ คือ Prandtl number สมการที่ได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation) สำหรับขนาดของความดันเสียง p_1 ที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน

ส่วนสมการพลังงาน [2] เป็นสมการอันดับสองที่ใช้ในการอธิบายก็ได้มาจากผลของอุณหภูมิ ความดัน คุณสมบัติของของไหล และรูปร่างของของแข็งและของไหลเช่นกัน

$$\begin{aligned} \dot{H}_2 = & \frac{\Pi y_0}{2\omega \rho_m} \text{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} p_1 \left(1 - \tilde{f}_v - \frac{T_m \beta (f_k - f_v)}{(1+\epsilon_s)(1+\sigma)} \right) \right] + \frac{\Pi y_0 c_p}{2\omega^2 \rho_m (1-\sigma)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \\ & \times \text{Im} \left[f_v + \frac{(f_k - f_v)(1+\epsilon_s f_v/f_k)}{(1+\epsilon_s)(1+\sigma)} \right] - \Pi (y_0 K + IK_s) \frac{dT_m}{dx} \end{aligned} \quad (13)$$

และสมการที่กำหนดเพิ่มเติม [2]

$$p_x = \frac{dp_1}{dx} \quad (14)$$

สมการ (12) และ (13) อยู่ในรูปของสมการจำนวนเชิงซ้อน กับสมการ (14) รวมเป็นชุดของห้าสมการของสมการอนุพันธ์ในเทอมตัวแปร x ใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งห้าภายในระบบคือ T_m $\text{Re } p_1$ $\text{Im } p_1$ $\text{Re } p_x$ และ $\text{Im } p_x$ ในการอธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก และใช้ในการออกแบบ

2.2 การหาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น

ในการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ใช้ประสิทธิภาพของระบบ โดยการหาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นได้จาก

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_c}{W} \quad (15)$$

โดย \dot{Q}_c เป็นปริมาณความร้อนด้านเย็นที่ระบบทำความเย็นทำได้ W เป็นกำลังเสียงที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่งภายในระบบ

และเนื่องจากระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกมีการทำงานตามวัฏจักรแบบคาร์โนต์ ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์ได้ว่า

$$\text{COPC} = \frac{T_c}{T_H - T_c} \quad (16)$$

โดย T_c คืออุณหภูมิที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเย็น T_H คืออุณหภูมิที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านร้อน

จากประสิทธิภาพทั้งสองตัวเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการออกแบบ สามารถทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์ [1]

$$\text{COPR} = \frac{\text{COP}}{\text{COPC}} \quad (17)$$

2.3 เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ข้อมูลการออกแบบระบบทำความเย็นของ Hoffer [2,7] มาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และนำผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยในงานวิจัยได้เน้นในส่วนตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบสแตกซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบ และมีข้อมูลในการทำการเปรียบเทียบ

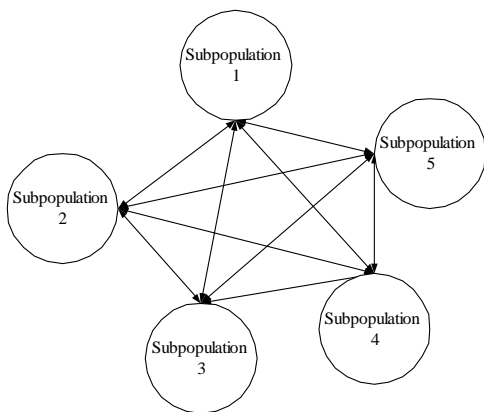
3. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบ Multi-population Genetic Algorithm (MPGA) โดยประชากรจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่ม และในแต่ละกลุ่มดำเนินการตามขั้นตอนเชิงพันธุกรรมแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนเพื่อทำการค้นหาแบบคู่ขนานกัน คือ

1. การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Encoding) โดยการใช้จำนวนจริงต่อกันเป็นโครโมโซม
2. การหาค่าความแข็งแรง (fitness) ของสมาชิกทุกตัวที่ถูกสุ่ม
3. การคัดเลือก (Selection)
4. การสลับสายพันธ์ (Crossover)
5. การกลายพันธ์ (Mutation)
6. การอพยพ (Migration) เป็นแบบไม่กำหนดทิศทาง

ในการเลือก MPGA มาใช้ในการหาคำตอบเนื่องจาก ในการคำนวณหาค่าความแข็งแรงจำเป็นต้องใช้การประมวลผลจำนวนมาก เพื่อความรวดเร็วในการหาคำตอบจึงแบ่งส่วนของแต่ละประชากรออกไปสู่หน่วยประมวลผลแต่ละตัวเพื่อคำนวณหาค่าความแข็งแรงของแต่ละประชากร แล้วจึงนำมารวมกันเป็นกลุ่มแล้วนำไปประมวลผลตามขั้นตอนเชิงพันธุกรรมต่อไป

ในขั้นตอนเชิงพันธุกรรมที่ใช้กันทั่วไป การเข้ารหัสโครโมโซมสำหรับประชากรใหม่ เนื่องจากเป็นปัญหาค่าขอบ ในการสุ่มประชากรใหม่จำเป็นที่จะต้องสอดคล้องกับค่าขอบด้วยเช่นกัน ซึ่งในการสุ่มหาประชากรใหม่ดังกล่าวเพื่อให้ได้คำตอบที่สอดคล้องด้วยต้องใช้เวลาในการค้นหาในแต่ละรอบเป็นเวลานานต่อหนึ่งกลุ่มประชากร ดังนั้นผู้วิจัยได้นำเสนอรูปแบบของการเข้ารหัสโครโมโซมและการแก้ไขโครโมโซมใหม่ เพื่อให้ลดการประมวลผล แต่ยังคงได้คำตอบที่ดีเช่นเดิม



รูปที่ 1 Multi-population Genetic Algorithm

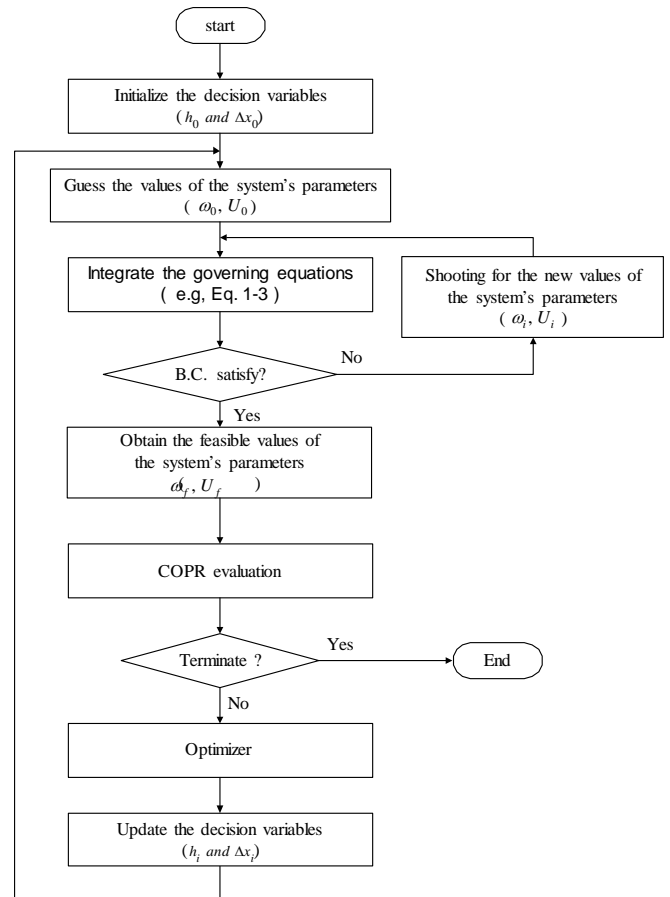
4. วิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมในการออกแบบสแตก

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบทำความเย็นที่อุณหภูมิ 300 K และมีปริมาณความเย็นที่ทำได้ 3 W โดยรูปร่างของระบบทำความเย็นมีลักษณะตามระบบทำความเย็นแบบ Hoffer เพื่อทำการเปรียบเทียบการออกแบบด้วยวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จาก COPR ดังกล่าวข้างต้น ในการออกแบบได้กำหนดให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$J = COPR \quad (18)$$



รูปที่ 2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

4.2 ตัวแปรตัดสินใจ

โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อให้ออกแบบสแตก โดยมีตัวแปรหลักคือ y_0 เป็นระยะห่างระหว่างชั้นของสแตก และ L_s เป็นความยาวของสแตก

$$d = (y_0, L_s) \quad (19)$$

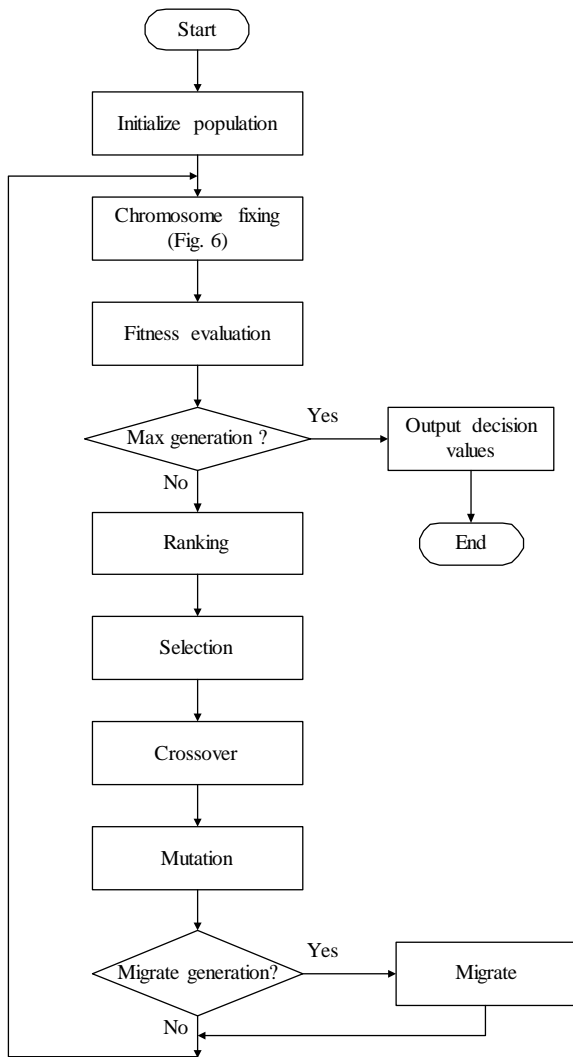
โดยนอกเหนือจากตัวแปรดังกล่าวข้างต้นยังมี W กำลังเสียง และ f เป็นความถี่ที่ใช้ในการทำงานของระบบที่ต้องสัมพันธ์กับตัวแปรตัดสินใจที่ต้องมีประกอบให้ครบถ้วนเนื่องจากเป็นปัญหาค่าขอบ ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการออกแบบ ตามรูปที่ 2 คือต้องใช้เวลาในการหาคำตอบที่สัมพันธ์กับขอบก่อนนำไปใส่ในประชากรใหม่ในรุ่นต่อไป ต้องทำการคำนวณเป็นเวลานานเพื่อให้ได้คำตอบที่อยู่ในขอบเขตที่เป็นไปได้

อีกทั้งการนำเอา W และ f เข้าไปในส่วนของตัวแปรตัดสินใจ ด้วยนั้นทำได้เนื่องจากเป็นดังกล่าวไม่ใช่ตัวแปรในการตัดสินใจ ไม่อยู่ในตัวแปรที่ใช้บอกรูปร่างของสแตก

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมใหม่เพื่อให้การคำนวณหาค่าความแข็งแรงใหม่ เพื่อลดการคำนวณลงแต่ยังคงให้คำตอบที่ถูกต้อง

4.3 การปรับปรุงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ในการปรับปรุงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อให้ลดรอบของการคำนวณ และได้คำตอบที่สอดคล้องกับขอบเขต ได้ทำการปรับปรุงขั้นตอนการเข้ารหัสโครโมโซม เพิ่มขั้นตอนการแก้ไขโครโมโซม และการหาค่าความแข็งแรง ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมที่ถูกปรับปรุง

1 การปรับปรุงการเข้ารหัสโครโมโซม

ในการเข้ารหัสโครโมโซม นอกจากตัวแปรตัดสินใจที่ประกอบในรหัสโครโมโซม ยังรวมไปถึงค่าขอบ คือ W กำลังเสียด และ f ความถี่ จะได้รับรหัสโครโมโซมใหม่คือ

$$(W, f, y_0, L_s) \quad (20)$$

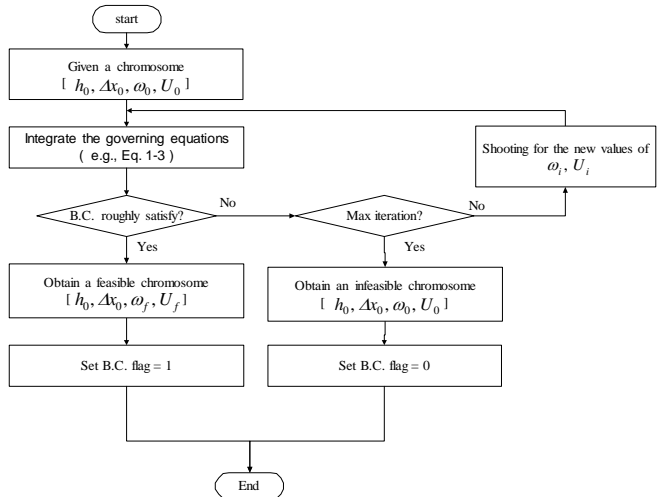
และจำนวนจริงในการเข้ารหัสโครโมโซม เพื่อรองรับการแก้ไขโครโมโซม

2 การแก้ไขโครโมโซม

ในการแก้ไขรหัสโครโมโซม เพื่อให้สอดคล้องกับค่าขอบ ได้ทำการปรับปรุงขั้นตอนการใช้ระเบียบวิธีการยิง โดยกำหนดจำนวนรอบให้กับระเบียบวิธีการยิง เพื่อให้การคำนวณมีจำนวนรอบลดลง และกำหนดเงื่อนไขอย่างหยาบให้กับการตัดสินใจให้ค่าน้ำหนักสำหรับความแข็งแรง โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่ปลายด้านเย็นต่ออุณหภูมิที่ปลายด้านร้อนเป็นเงื่อนไขอย่างหยาบเพื่อใช้ในการให้ค่าน้ำหนัก

$$\frac{T_c}{T_h} < 1$$

โดยหากเป็นไปตามเงื่อนไข $w = 1$ ส่วนในกรณีอื่น $w = 0$ ตามรูป 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการแก้ไขโครโมโซม

3. การหาค่าความแข็งแรง

จากเงื่อนไขอย่างหยาบเพื่อใช้ในการให้ค่าน้ำหนัก ได้เพิ่มตัวแปรของ W_{end} กำลังเสียด และ $\dot{H}_{2,end}$ พลังงาน ที่ปลายสุดตามความยาวของระบบทำความเย็น เพิ่มในฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$J = COPR - W_{end} - \dot{H}_{2,end} \quad (21)$$

เนื่องจากผลเฉลยที่ได้ที่ยังไม่สอดคล้องกับค่าขอบ มี W_{end} และ $\dot{H}_{2,end}$ ที่มากแต่เมื่อผ่านแต่ละรุ่นไปค่าทั้งสองจะมีแนวโน้มลดลง ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นไปตามที่ต้องการตาม (18)

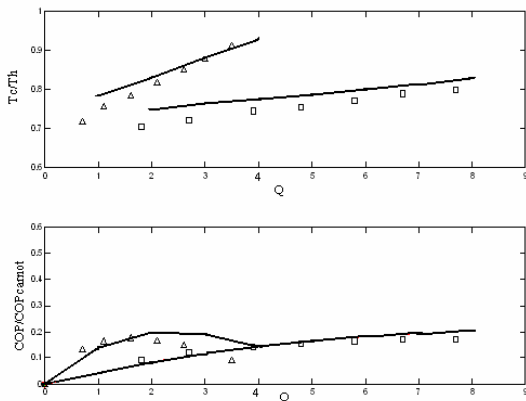
ส่วนตัวแปรสำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกกำหนดตามตารางที่

ตารางที่ 1 ตัวแปรของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Parameter	Value
Population size	200
Subpopulation size	40
Real chromosome length	4
Crossover probability	1
Mutation probability	0.14
Migration probability	0.2
Number of generations between migration	20
Number of generations	40

5. ผลลัพธ์ในการออกแบบ

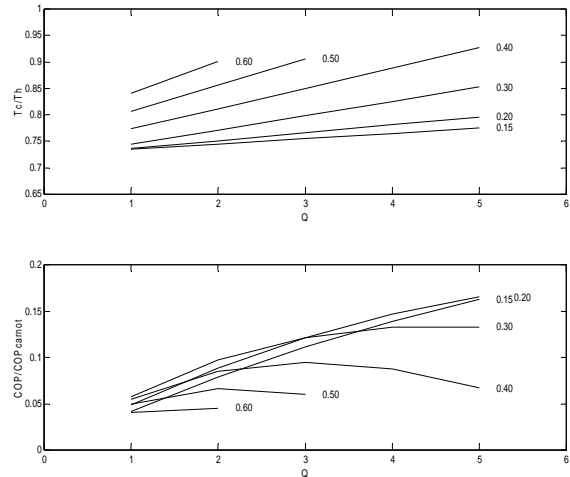
จากผลการคำนวณตามข้อมูลการออกแบบระบบทำความเย็นของ Hofler เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองตามรูปที่ 5 พบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงเป็นที่น่าพอใจ โดยเส้นตรงเป็นผลจากการคำนวณ ส่วนรูปสามเหลี่ยมเป็นผลการทดลองเมื่อให้ความดันในการทำงานมีค่า 0.015 ของความดันเฉลี่ยภายในระบบ [7] $p_1 = 0.015p_m$ และรูปสี่เหลี่ยม $p_1 = 0.03p_m$



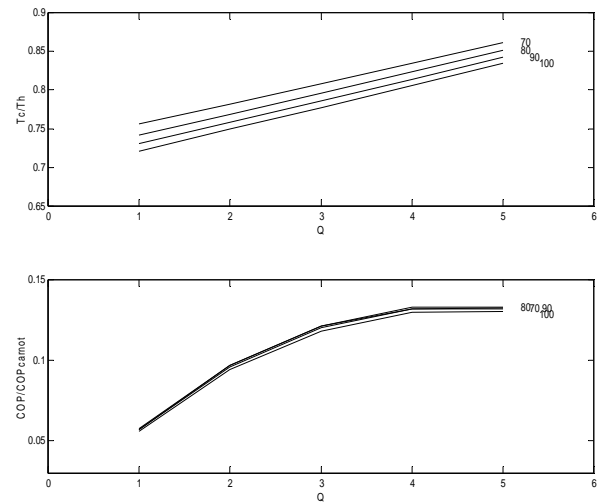
รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลอง กับผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบ Hofler

เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างของชั้นของสแตก และความยาวของสแตก ปริมาณความเย็นที่สามารถถ่ายเทได้จาก 1-5 W ได้นำผลการคำนวณมาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และอัตราส่วนอุณหภูมิต้านเย็นต่ออุณหภูมิต้านร้อน เพื่อแสดงให้เห็นผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรข้างต้น ตามรูปที่ 6, 7

เมื่อนำเอาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาหาค่าตัวแปรที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพระบบสูงสุดได้ผลการคำนวณ ตามรูปที่ 8, 9 และตารางที่ 2

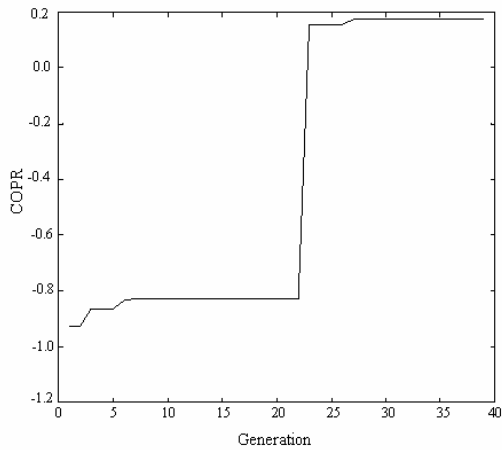


รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ และอุณหภูมิกับระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกที่ระยะ 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 มม. ตามลำดับ

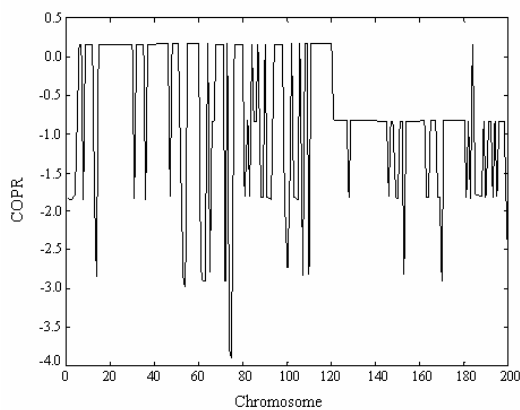


รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ และอุณหภูมิกับความยาวของสแตก มีความยาว 70, 80, 90, 100 มม. ตามลำดับ

ผลของการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบวิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้เลือกเอาผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบ Hofler มาเปรียบเทียบ โดยเมื่อกำหนดข้อจำกัดในการทำงาน (Operating Constraints) เช่นเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพจากการทดลองของ Hofler ได้ $COPR = 0.160$ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแล้วพบว่าได้ค่าประสิทธิภาพเหมาะสมสูงสุดที่แท้จริงได้จากการออกแบบสแตกคือ $COPR = 0.175$



รูป 8 แสดง COPR ที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่น



รูป 9 แสดง COPR ของแต่ละกลุ่มประชากร

ตารางที่ 2 สรุปผลการออกแบบ.

Parameter	Value	Unit
P_m	1000000	[Pa]
P_1	30000	[Pa]
U_m	0	[m ³ /s]
U_1	0.000347	[m ³ /s]
Frequency	499.9483323	[Hz]
COP	0.57637136	
COPC	3.28787226	
COPR	0.17530224	
T_c	230.5719781	[K]
T_h	300.7	[K]
T_c / T_h	0.7667841	
P_a / P_m	0.03	
Acoustic Power	5.20497758	[Watt]
Q_h	7.08802162	[Watt]
Q_c	3	[Watt]
h	0.3382469	[mm]
Δx	76.59516117	[mm]
W_{BCE}	0.00043996	[Watt]
E_{BCE}	0	[Watt]

6. สรุปและงานวิจัยในอนาคต

จากผลการวิจัยพบว่ารูปแบบของการปรับปรุง MPGA ทำให้ลดจำนวนรุ่นของประชากร และปริมาณการคำนวณลงได้อย่างมาก และยังได้ผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเช่นเดิม ในส่วนของการศึกษาเพิ่มเติมในการออกแบบต้องเพิ่มตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพิ่มในตัวแปรตัดสินใจ เช่น ระยะการวางสแตก รูปร่างของสแตก ชุดอุปกรณ์ ถ่ายเทความร้อน คุณสมบัติของไหลในระบบ รูปร่างของชุดทดลอง เป็นต้น ซึ่งจะดำเนินการศึกษาต่อไปในอนาคต

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G.W. Swift. Thermoacoustic engines. J. Acoust. Soc. Am., 84, October 1988
- [2] T.J. Hofler, "Thermalization refrigerator design and performance", Ph.D. dissertation, Physics Department, University of California at San Diego, 1986
- [3] สว่างทิตย์ ศรีกิจสุวรรณ, สุวัฒน์ กุลชนปรีดา และ ปุยมศ วัลลิกุล, 2547. การออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] G.W. Swift. Thermoacoustics: a unifying perspective for some engines and refrigerators. <http://www.lanl.gov/thermoacoustics/Book/index.html>.
- [5] S.C. Chapra and R.P. Canale. "Numerical Methods for Engineers: with software and programming applications". McGraw-Hill, New York, 2003.
- [6] J. Kiusalass. "Numerical Methods in Engineering with MATLAB". Cambridge University Press, New York, 2005.
- [7] Bill Ward and Greg Swift. "Design Environment for Low-Amplitude ThermoAcoustic Engines" <http://www.lanl.gov/thermoacoustics/>