

การศึกษาทดลองเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่ง

อิศเรศ รุชกัลยา

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่ง เพื่อใช้ขับเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยสแตคที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบแผ่นบางซ้อนกัน (slab stack) และใช้อากาศอัดที่ความดัน 10 บาร์ ทำงานที่ความถี่ 50 Hz โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนลง ซึ่งในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ จะทำการวัดอุณหภูมิที่กระจายตัวภายในสแตคและความดันในระบบที่เปลี่ยนแปลง พบว่า เมื่อความดันในระบบเพิ่มขึ้นจาก 5 บาร์ เป็น 10 บาร์ จะทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสั่น (onset temperature) มีค่าลดลง ส่งผลให้เครื่องยนต์เริ่มทำงานเร็วขึ้น ดังนั้นเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกจึงสามารถใช้ได้กับแหล่งพลังงานความร้อนคุณภาพต่ำ เช่น พลังงานเหลือทิ้ง พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น มาใช้ขับเครื่องยนต์ที่ทำงานในสภาวะความดันสูงได้ ส่วนค่าแอมพลิจูดของความดันซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่แกว่งไกวของคลื่น เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ช่วยบ่งบอกถึงค่ากำลังอะคูสติก (acoustic power) ที่ผลิตได้ โดยค่าอัตราส่วนกำลังขับ (drive ratio, $= |p_1|/p_m$) ที่ได้จากเครื่องยนต์นี้มีค่าประมาณ 2.25% และ 3.10% ที่ความดัน 5 บาร์ และ 10 บาร์ ตามลำดับ ซึ่งเพียงพอสำหรับนำไปขับชุดทำความเย็นต่อไป นอกจากนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และผลการเปรียบเทียบก็สอดคล้องกัน

คำสำคัญ : เครื่องยนต์ความร้อน / เทอร์โมอะคูสติก / คลื่นนิ่ง / สแตค / การไหลแบบแกว่งไกว

* Corresponding author E-mail : disares@engr.tu.ac.th

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

Experimental Study on a Standing Wave Thermoacoustic Engine

Isares Dhuchakallaya

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong 1, Khlong Luang, Pathum Thani 12121

Abstract

The aim of this research is to design and construct a standing wave thermoacoustic engine in order to drive a thermoacoustic refrigerator. The slab stack is selected in this work. To minimize the capital cost, the compressed air of 10 bar is employed as working fluid to operate at designed frequency of 50 Hz. The preliminary test to evaluate the performance of this engine is required. The temperature distribution within the stack and the oscillating pressure in the system are measured. As the mean pressure in the system is increased from 5 bar to 10 bar, the onset temperature to oscillate is reduced, resulting to shorter starting-up period. This is possible to utilize low-grade energy sources such as waste heat, solar energy, etc. to operate the thermoacoustic engines at high pressure. The pressure amplitude caused by the oscillating movement of wave is the crucial parameter that indicates the acoustic power generated. The drive ratios ($= |p_1|/p_m$) obtained from this engine are about 2.25% and 3.10% at operating pressures of 5 bar and 10 bar, respectively. This is sufficient to drive the thermoacoustic refrigerator latter on. In addition, the mathematical model is carried out in order to validate the experimental results. The measurement results give good agreement with the simulation results.

Keywords : Heat engine / Thermoacoustic / Standing wave / Stack / Oscillating flow

* Corresponding author E-mail : disares@engr.tu.ac.th
Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

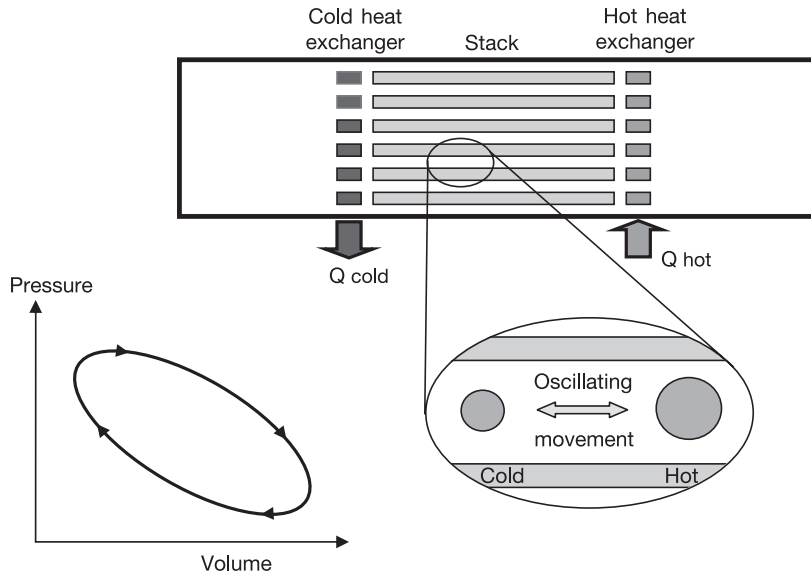
เทอร์โมอะคูสติกเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานคลื่นเสียง (acoustic energy) ซึ่งเกี่ยวพันกับทฤษฎีที่ซับซ้อนของเทอร์โมไดนามิกส์และอะคูสติก [1, 2] โดยการเคลื่อนที่ของสารทำงานในระบบเทอร์โมอะคูสติกเกิดขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิคร่อมตัวกลาง (media) ซึ่งเป็นวัสดุรูพรุนทำให้สารทำงานเคลื่อนที่ในลักษณะแกว่งไกว (oscillation) โดยที่ก่อนมวลของสารทำงานนี้จะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนออกให้กับตัวกลางที่บริเวณความดันสูง และรับความร้อนจากตัวกลางในบริเวณที่ความดันต่ำ ซึ่งสารทำงานนี้จะทำงานไปอย่างต่อเนื่องตามจังหวะการเคลื่อนที่แกว่งไกวของคลื่นความดัน ส่งผลให้มีแอมพลิจูดของคลื่นเสียงสูงขึ้น โดยที่ตัวกลางนี้จะทำหน้าที่เป็นเพียงที่พัก (buffer) ของพลังงานความร้อน ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำตัวกลางควรจะใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำและมีความจุความร้อนสูง เพื่อให้ความร้อนถ่ายเทผ่านทางสารทำงานเท่านั้น โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนไปตามวัสดุตัวกลาง

เมื่อปัญหาสิ่งแวดล้อมเริ่มรุนแรงมากขึ้นในทุกวันนี้ เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก (thermoacoustic engine) จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ โดยจะเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานคลื่นความดันเพื่อใช้ทำความเย็น [3-5] หรือผลิตกระแสไฟฟ้า [6-8] เนื่องจากเครื่องยนต์ดังกล่าว ไม่มีชิ้นส่วนใดที่เคลื่อนไหว ง่ายต่อการสร้าง ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างเหมาะสม และใช้สารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับแหล่งพลังงานคุณภาพต่ำ เช่น พลังงานความร้อนเหลือทิ้ง หรือพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

[9-11] ดังนั้นในทุกวันนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก จึงเพิ่มขึ้นอย่างมาก [12-18] โดยมุ่งเน้นที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ให้สูงขึ้นด้วยการเปลี่ยนสภาวะการทำงาน ลักษณะกายภาพของเครื่องยนต์ และสารทำงานในระบบ

2. หลักการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

กลไกการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิคร่อมตัวกลาง ซึ่งในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่ง จะเรียกว่า สแตก (stack) จะทำให้อ่อนมวลของสารทำงานภายในสแตกเกิดการเคลื่อนที่แกว่งไกว เนื่องจากผลของอะคูสติก (acoustic effect) ในขณะที่อ่อนมวลของก๊าซเคลื่อนที่ไปทางซ้ายซึ่งมีความดันที่สูงกว่า ส่งผลให้ปริมาตรของอ่อนมวลมีขนาดเล็กลง ทำให้อ่อนมวลภายในอ่อนมวลสูงขึ้น ซึ่งมากกว่าอ่อนมวลของแผ่นสแตก ดังนั้นความร้อนจากอ่อนมวลจึงถ่ายเทไปยังแผ่นสแตก ส่งผลให้อ่อนมวลของอ่อนมวลทางด้านซ้ายลดลง ในจังหวะถัดไป อ่อนมวลถูกดันให้เคลื่อนที่มาทางขวา ถอยกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นซึ่งมีความดันที่น้อยกว่า ทำให้ปริมาตรของอ่อนมวลมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อ่อนมวลของอ่อนมวลลดลงต่ำกว่าอ่อนมวลของแผ่นสแตก จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นสแตกไปสู่อ่อนมวล ทำให้อ่อนมวลของอ่อนมวลทางด้านขวาเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ จะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ตามจังหวะการเคลื่อนที่แกว่งไกวของคลื่นความดัน โดยที่มีอ่อนมวลตัวอื่นมาทำหน้าที่ต่อจากจุดนั้น ไปตลอดความยาวของแผ่นสแตก ทั้งทางด้านซ้ายและด้านขวา จะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ ตลอดช่วงความยาวของแผ่นสแตก [1]



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

นอกจากนี้ ในขณะที่ก้อนมวลเคลื่อนที่ มุมของเวกเตอร์ความดันก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยความแตกต่างของมุมระหว่างเวกเตอร์ความดันและความเร็วนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการปรับตัวของอะคูสติกในระบบ (acoustic network) ซึ่งความแตกต่างของมุมนี้ จะเป็นตัวกำหนดชนิดของเครื่องยนต์ระหว่างแบบคลื่นนิ่ง (standing wave) และคลื่นเคลื่อนที่ (travelling wave) โดยเครื่องยนต์แบบคลื่นเคลื่อนที่นี้ เวกเตอร์ความเร็วและเวกเตอร์ความดันจะเคลื่อนที่ด้วยมุมที่เท่ากัน ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างก้อนมวลของสารทำงานและแผ่นรีเจนเนอเรเตอร์ (หรือสแตกในคลื่นนิ่ง แต่มีรัศมีไฮดรอลิกที่เล็กกว่ามาก) ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งพฤติกรรมการทำงานของสารทำงานนี้ จะมีลักษณะคล้ายกับที่เกิดขึ้นในวัฏจักรสเตอร์ลิง [19] จากงานวิจัยของ Backhaus และ Swift [20] กล่าวว่าวัฏจักรเครื่องยนต์ชนิดนี้สามารถเปลี่ยนพลังงานได้สูงถึง 40% ของประสิทธิภาพคาร์โนท์ แต่ในขณะที่เครื่องยนต์แบบคลื่นนิ่งจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าอยู่ที่ประมาณ 20% ของประสิทธิภาพคาร์โนท์ เนื่องจากมุมของเวกเตอร์ความดันจะแตกต่างจากมุมของเวกเตอร์ความเร็วเท่ากับ 90° ซึ่งส่งผลให้กระบวนการอัดตัวและการรับความร้อนเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน และกระบวนการขยายตัวและระบายความร้อนเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน เพื่อให้วัฏจักรดำเนินการได้

จำเป็นจะต้องหาวงกระบวนการรับและระบายความร้อนให้ช้าลง ด้วยการใส่สแตกซึ่งเป็นตัวกลางที่มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนต่อกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ (รัศมีไฮดรอลิกใหญ่กว่ามาก) ดังนั้นการทำงานของก้อนมวลของสารทำงานจึงมีพฤติกรรมคล้ายกับวัฏจักรเบรียตัน [19] ถึงแม้ว่าเครื่องยนต์แบบคลื่นเคลื่อนที่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบคลื่นนิ่ง แต่การสูญเสียเนื่องจากความดันลดของแบบคลื่นเคลื่อนที่ก็มีค่าสูงกว่ามากเช่นกัน เพราะรัศมีไฮดรอลิกของสแตกจะประมาณ 1.2 เท่าของค่า thermal penetration depth ส่วนรัศมีไฮดรอลิกของรีเจนเนอเรเตอร์จะประมาณ 0.1 เท่าของค่า thermal penetration depth [18] นอกจากนี้ Gedeon และ Rayleigh streaming ก็เป็นปัญหาหลักของเครื่องยนต์แบบคลื่นเคลื่อนที่ซึ่งจะให้มวลของสารทำงานรั่วไหลจากทางด้านร้อนไปสู่ด้านเย็นของรีเจนเนอเรเตอร์โดยไม่ก่อให้เกิดกำลังงาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก [21] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน ส่งผลให้ในการออกแบบเครื่องยนต์แบบคลื่นเคลื่อนที่จึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ ทำให้เครื่องยนต์ชนิดนี้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น จากที่ได้กล่าวมา เครื่องยนต์ความร้อนแบบคลื่นนิ่งจึงมีศักยภาพสูงพอ เมื่อพิจารณาถึงเสถียรภาพของการ

ทำงานและความง่ายต่อการสร้าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นศึกษาเครื่องยนต์ความร้อนแบบคลื่นนิ่ง เพื่อใช้เป็นเครื่องต้นกำลังของคลื่น (prime mover) ที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับใช้ในเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกต่อไปในอนาคต

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ก่อนที่จะดำเนินการสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก จำเป็นต้องมีการออกแบบก่อน โดยทำการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด จากทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้นของ Rott [22] ตัวแปรอะคูสติกสามารถประมาณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$p = p_m + \text{Re}[p_1(x)e^{i\omega t}] \quad (1)$$

$$U = \text{Re}[U_1(x)e^{i\omega t}] \quad (2)$$

$$\frac{dU_1}{dx} = \frac{-i\omega A_{gas}}{\gamma p_m} [1 + (\gamma - 1)f_k] p_1 + \frac{\beta(f_k - f_v)}{(1 - f_v)(1 - \sigma)} \frac{dT_m}{dx} U_1 \quad (6)$$

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{H_2 - \frac{1}{2} \text{Re} \left[p_2 \tilde{U}_1 \left(1 - \frac{f_k \tilde{f}_v}{(1 + \sigma)(1 - \tilde{f}_v)} \right) \right]}{\frac{\rho_m c_p |U_1|^2}{2A_{gas} \omega (1 - \sigma) |1 - f_v|^2} \text{Im} + (f_k + \sigma \tilde{f}_v) - A_{gas} k_{gas} + A_{solid} k_{solid}} \quad (7)$$

เมื่อ H_2 , c_p , γ , k , A , β และ σ คืออัตราการผลิตพลังงาน, ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, ค่าอัตราส่วนความจุความร้อนจำเพาะ, ค่าการนำความร้อน, พื้นที่หน้าตัด, สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน และค่า Prandtl number ตามลำดับ

สำหรับสแตกแบบแผ่นบางซ้อนกัน (slab stack) ฟังก์ชันรูปร่างของความหนืด f_v และฟังก์ชันรูปร่างของการนำความร้อน f_k สามารถหาได้จากสมการ

$$T = T_m + \text{Re}[T_1(x)e^{i\omega t}] \quad (3)$$

และ

$$\rho = \rho_m + \text{Re}[\rho_1(x)e^{i\omega t}] \quad (4)$$

เมื่อ p , U , T และ ρ คือ ความดัน, ความเร็วเชิงปริมาตร (volumetric velocity), อุณหภูมิ และความหนาแน่นของก๊าซ ตามลำดับ ตัวห้อย m และ 1 จะแสดงถึงค่าเฉลี่ย และจำนวนเชิงซ้อนของแอมพลิจูดของค่าแกว่งไกวตามลำดับ ส่วน $\text{Re}[\]$ คือจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน และ ω คือความถี่เชิงมุม

นำค่าตัวแปรอะคูสติกแทนลงในสมการโมเมนตัม สมการความต่อเนื่อง และสมการพลังงาน จะสามารถจัดรูปใหม่ในเทอมของอะคูสติกได้ดังนี้

$$\frac{dp_1}{dx} = \frac{-i\omega \rho_m}{(1 - f_v) A_{gas}} U_1 \quad (5)$$

$$f_v = \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_v]}{(1+i)y_0/\delta_v} \quad (8)$$

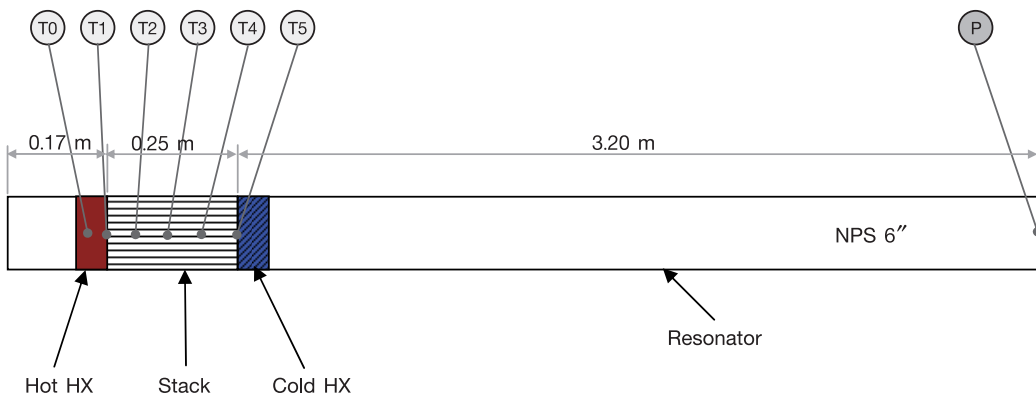
$$f_k = \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_k]}{(1+i)y_0/\delta_k} \quad (9)$$

เมื่อ $2y_0$ จะมีค่าเท่ากับ ระยะห่างระหว่างแผ่นบาง และ i หมายถึงส่วนของจำนวนจินตภาพ ส่วน $\delta_v = \sqrt{2\mu/\omega\rho}$ และ $\delta_k = \sqrt{2k/\omega\rho c_p}$ คือค่า viscous penetration depth และ thermal penetration depth

ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงระยะที่โมเมนต์และความร้อนสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในหนึ่งรอบของการเคลื่อนที่ สำหรับสแตกที่มีรูปร่างอื่น ก็จะมีรูปแบบสมการ f_v และ f_k แตกต่างกันไป ซึ่งสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก Ward และคณะ [2]

สำหรับกำลังงานที่ได้เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกนี้เรียกว่า กำลังอะคูสติก (acoustic power) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการนี้

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[p_1 \tilde{U}_1] = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\tilde{p}_1 U_1] \quad (10)$$



รูปที่ 2 แผนผังของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความดัน

4. อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องยนต์ความร้อนเทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 2 สารทำงานที่ใช้ในที่นี้เลือกอากาศอัดเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำมาก เมื่อเทียบกับก๊าซฮีเลียม ถึงแม้ว่า จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลงประมาณ 46% [23] เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านร้อน จะเลือกใช้ขดลวดไฟฟ้า เนื่องจากง่ายต่อการควบคุม ส่วนอีกด้านจะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบบนแผ่นชนิดไหลขวางกัน โดยใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน ส่วนสแตกจะเลือกใช้แผ่นสแตนเลสหนา 0.3 มม. มาวางซ้อนกันซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่น 0.5 มม. การกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน สแตกถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 5 จุด และอีกหนึ่งจุดวัดที่อุณหภูมิของขดลวดไฟฟ้า ส่วนข้อมูลการเปลี่ยนแปลง

เมื่อ \sim จะแสดงถึง ค่าคอนจูเกตของจำนวนเชิงซ้อน

อินทิเกรตสมการอนุพันธ์ที่ (5)-(7) เพื่อหาผลเฉลยของ p_1 , U_1 และ T_m ที่เปลี่ยนแปลงตาม x โดยใช้วิธี Newton-Raphson และ Rung Kutta การคำนวณจะแบ่งระบบออกเป็นส่วนย่อย แล้วกำหนดค่าเริ่มต้นของชั้นส่วนย่อยแรก ซึ่งคำตอบที่ได้จากชั้นส่วนย่อยแรก จะเป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณในชั้นส่วนย่อยถัดไป อย่างต่อเนื่อง ถ้าผลเฉลยที่ได้ไม่สอดคล้องกับค่าขอบที่กำหนด ก็จะมีการคำนวณซ้ำต่อไป โดยในที่นี้จะเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ DeltaEC [2] มาช่วยในการคำนวณ

ความดันในระบบถูกวัดโดยใช้ piezoelectric pressure transducer ของ PCB PIEZOTRONICS รุ่น 122A22 ซึ่งมีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของความดัน

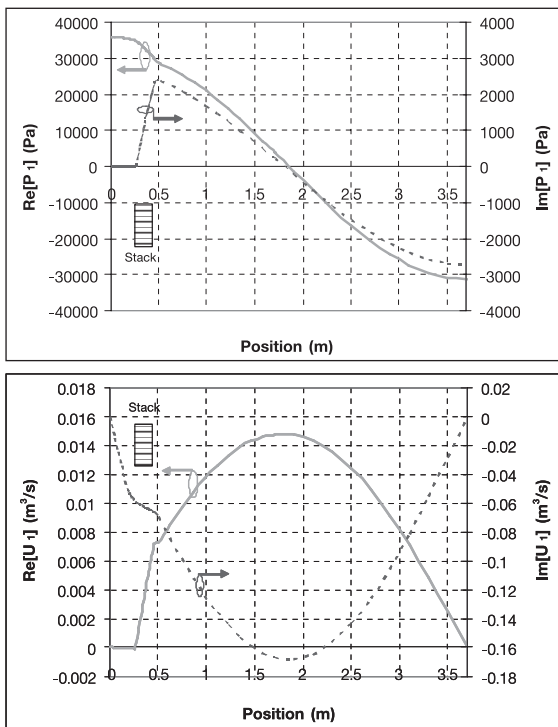
5. ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในเบื้องต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกสร้างขึ้น เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่ง ที่เหมาะสมที่สุด (optimisation) โดยใช้อากาศอัดที่ความดัน 10 บาร์เป็นสารทำงาน ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองดังแสดงต่อไปนี้

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า คลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกนี้ มีลักษณะคลื่นครึ่งลูก

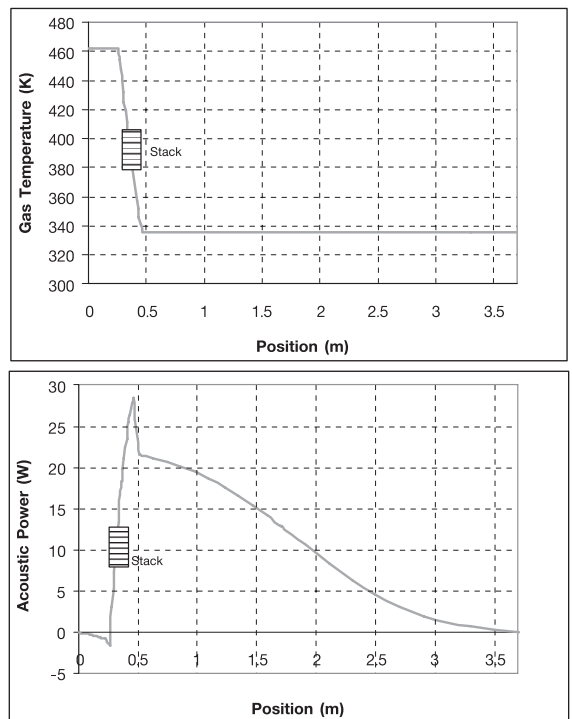
(half wave) โดยจุดบัพของความถี่เชิงปริมาตรจะอยู่ที่ปลายทั้งสองด้าน ส่วนจุดบัพของความดันจะอยู่ประมาณกึ่งกลางท่อ นอกจากนี้ค่า $Re[p_r]$ จะมีค่ามากกว่าค่า $Im[p_r]$ ค่อนข้างมาก ในทำนองตรงกันข้าม ค่า $Im[U_r]$ จะมีค่ามากกว่าค่า $Re[U_r]$ ค่อนข้างมาก นั่นหมายความว่า ความแตกต่างของมุมระหว่างเวกเตอร์ความดัน และเวกเตอร์ความเร็วเชิงปริมาตรมีค่าประมาณ 90° ซึ่งเป็นพฤติกรรมของคลื่นนิ่ง นอกจากนี้ที่น่าสนใจคือ ในสแตกซึ่งมีรูพรุนจำนวนมากจะก่อให้เกิดความดันตกคร่อมสูง ส่งผลให้แอมพลิจูดความเร็วเชิงปริมาตรลดลง แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมโดยรวมของคลื่นนิ่งยังคงไม่เปลี่ยนแปลงมาก



รูปที่ 3 แอมพลิจูดของความดันและความเร็วเชิงปริมาตรที่ตำแหน่งต่างๆ ในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งที่ความดัน 10 บาร์

พิจารณาในรูปที่ 4 เริ่มต้นอากาศจะถูกทำให้ร้อนด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จนมีอุณหภูมิสูงถึง 462 K ซึ่งในส่วนนี้กำลังอะคูสติกจะลดลง เนื่องจากการสูญเสียจากความหนืด หลังจากนั้น อุณหภูมิของอากาศ

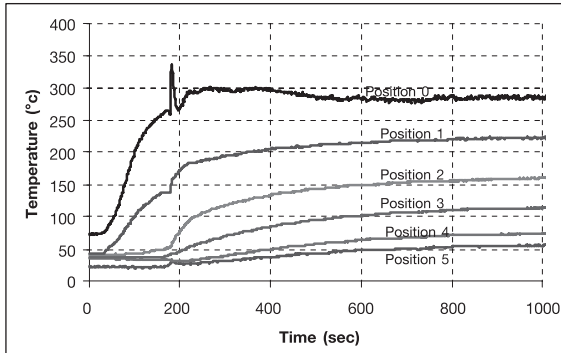
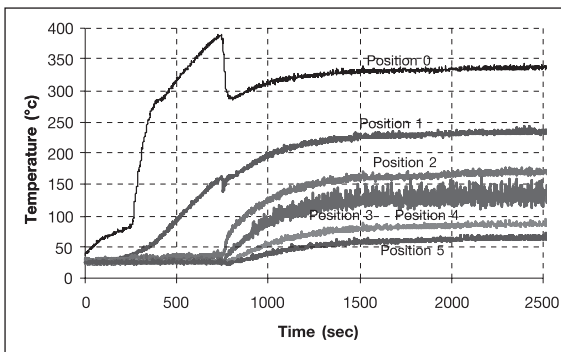
จะลดลงอย่างรวดเร็วภายในสแตก ด้วยปรากฏการณ์อะคูสติก (acoustic phenomena) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แกว่งไกวและผลิตกำลังอะคูสติกออกมา (คำนวณได้จากสมการที่ (10)) ส่วนพลังงานที่เหลือจะถูกระบายออกจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอีกตัวหนึ่งที่อุณหภูมิ 300 K โดยกำลังอะคูสติกบางส่วนจะสูญเสียไปเนื่องจากความหนืดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลังจากนั้นอุณหภูมิอากาศภายในรีไซเคิลเตอร์จะคงที่ เนื่องจากพิจารณาว่า ไม่มีการถ่ายเทความร้อนใดๆ แต่กำลังอะคูสติกจะสูญเสียไปกับแรงเสียดทานเนื่องจากความเร็วเชิงปริมาตรที่สูง จนกระทั่งกลายเป็นศูนย์ที่ปลายอีกด้านของเครื่องยนต์ เพื่อรักษาสมดุลย์ของอะคูสติกในระบบ ถ้าเครื่องยนต์ไม่มีการสูญเสียความร้อน กำลังอะคูสติกที่ผลิตได้จะเท่ากับผลต่างของความร้อนที่ป้อนเข้า และระบายออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยของสารทำงานและกำลังอะคูสติกที่กระจายตัวในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งที่ความดัน 10 บาร์

5.2 ผลการทดลอง

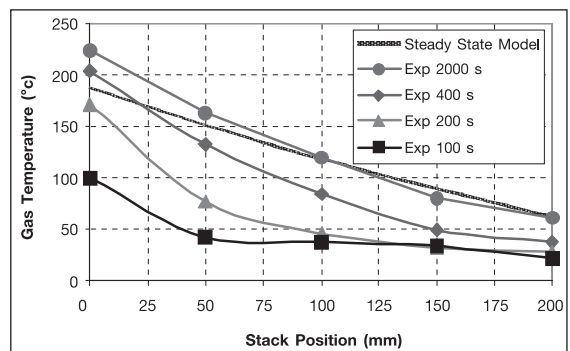
ในการทดลอง อากาศจะถูกอัดเข้าไปในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคแบบคลื่นนิ่ง แล้วจึงป้อนความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูง ซึ่งในที่นี้จะใช้ขดลวดไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อนแทน ด้วยกำลังไฟฟ้า 2,000 วัตต์ ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิต่ำ จะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกัน โดยมีน้ำเป็นสารระบายความร้อน ในที่นี้จะศึกษาเฉพาะผลของความดันอากาศ ที่มีต่อพฤติกรรมของอะคูสติคในเครื่องยนต์แบบคลื่นนิ่งเท่านั้น



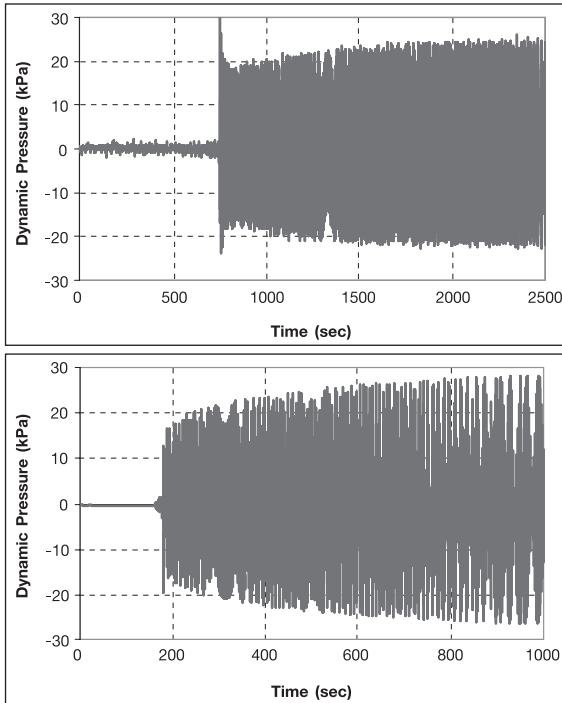
รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในสแตกที่ความดัน 5 บาร์ (ด้านบน) และ 10 บาร์ (ด้านล่าง)

ในรูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในสแตกที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติค โดยทำการเปรียบเทียบกันที่ความดัน 5 บาร์และ 10 บาร์ ที่การทดลองความดัน 5 บาร์ ทันทีที่ขดลวดไฟฟ้าทำงาน อุณหภูมิ T_0 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของขดลวดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตามมาด้วยอุณหภูมิ T_1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิปลายของสแตกด้านร้อน

ที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก นั่นหมายความว่า มีปริมาณความร้อนน้อยที่ส่งผ่าน สแตกด้วยการนำความร้อนตามแนวแกน เมื่ออุณหภูมิปลายของ สแตกด้านร้อนสูงถึง 160°C จะเริ่มมีการสั่นและผลิตคลื่นเสียงออกมา ซึ่งเราเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิเริ่มต้นการสั่น (onset temperature) ทันทีที่มีการผลิตคลื่นออกมา อุณหภูมิของขดลวดไฟฟ้า จะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิภายในสแตก จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน เนื่องจากความร้อนจากฝั่งขดลวดไฟฟ้าจะถูกถ่ายเท มายังด้านตรงกันข้ามของสแตกด้วยการพา ตามหลักการของอะคูสติคดังได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ หลังจากนั้น อุณหภูมิภายในสแตกก็ค่อยๆ ปรับตัวเพิ่มขึ้นตามสภาวะไหลในระบบ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ ส่วนในกรณีที่ความดัน 10 บาร์นั้น กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึง 2,000 วัตต์ ซึ่งแตกต่างจากกรณีความดัน 5 บาร์ ที่ป้อนกำลังไฟฟ้าคงที่ตลอด เพื่อลดความเสี่ยง ต่อการเสียหายของขดลวดไฟฟ้า ในการสั่นช่วงแรก โดยรวมแล้ว ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสแตกจะคล้ายกับที่ความดัน 5 บาร์ แต่จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสั่นที่ต่ำกว่าคือ 136°C ส่งผลให้เวลาที่ใช้เพื่อให้เครื่องยนต์เริ่มทำงานสั้นลง นอกจากนี้ อุณหภูมิที่แตกต่างคร่อมสแตก ($T_1 - T_5$) ก็มีค่าลดลงด้วย ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูง ที่จะนำแหล่งพลังงานความร้อนคุณภาพต่ำ (มีอุณหภูมิน้อยกว่า 250°C) มาใช้กับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคที่ทำงานในสภาวะความดันสูงได้



รูปที่ 6 การพัฒนาของอุณหภูมิที่กระจายตัวในสแตกที่ความดัน 10 บาร์

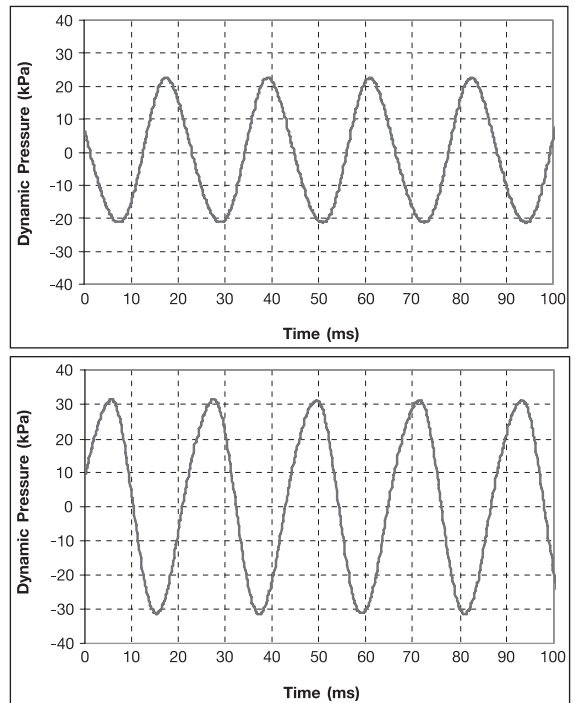


รูปที่ 7 สัญญาณที่บันทึกได้จาก pressure sensor ที่ความดัน 5 บาร์ (ด้านบน) และ 10 บาร์ (ด้านล่าง)

เมื่อพิจารณาถึง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในสแตกในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่า ในช่วงเริ่มต้นของการสันจะมีเพียงบริเวณที่ใกล้ปลายด้านร้อน ที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่า แอมพลิจูดการสันยังไม่สูงมาก จึงยังไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดแนวของสแตก และเมื่อเวลาผ่านไป การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสแตก จะมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากคลื่นสามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดความยาวของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก และเมื่อนำผลการคำนวณจากแบบจำลอง มาเปรียบเทียบกับ จะเห็นได้ว่า มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันมากในบริเวณที่ใกล้กับขดลวดความร้อน ซึ่งความแตกต่างนี้ อาจะเกิดมาจากอุณหภูมิของขดลวดไฟฟ้าซึ่งสูงประมาณ 550°C ถูกดึงเข้ามาโดยการพาความร้อน

นอกเหนือจากอุณหภูมิแล้ว ค่าแอมพลิจูดของความดัน ก็เป็นข้อมูลอีกอย่างที่สำคัญในการบ่งบอก

ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก โดยปกติแล้วจะนิยมแสดงในรูปของอัตราส่วนกำลังขับ (drive ratio, $DR = |p_r|/p_m$) เนื่องจากกำลังอะคูสติกที่ได้จากเครื่องยนต์ จะนำไปใช้ขับเครื่องทำความเย็น (refrigerator) หรือขับ linear alternator เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า จากรูปที่ 7 จะเห็นว่า ทันทีที่เกิดการสัน แอมพลิจูดของความดันจะกระชากขึ้นสูงมาก แล้วลดลงทันที หลังจากนั้นค่าแอมพลิจูดของความดันจะค่อยๆ ปรับตัวเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยสัญญาณความดันที่อ่านได้จาก oscilloscope ที่สภาวะคงตัวนั้น มีลักษณะเป็นคลื่น sine ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งมีความถี่ประมาณ 50 Hz ตามที่ได้ออกแบบไว้ อัตราส่วนกำลังขับมีค่าประมาณ 2.25% และ 3.10% ที่ความดัน 5 บาร์ และ 10 บาร์ ตามลำดับ ซึ่งแอมพลิจูดความดันที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ก็มีค่าที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างไว้ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 8 สัญญาณความดันที่ได้จาก oscilloscope ที่สภาวะคงตัว ที่ความดัน 5 บาร์ (ด้านบน) และ 10 บาร์ (ด้านล่าง)

6. สรุป

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อใช้เป็นเครื่องต้นกำลังของคลื่น (prime mover) สำหรับใช้ในเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก ต่อไปในอนาคต โดยในเบื้องต้น เครื่องยนต์ที่ถูกออกแบบไว้ ตามหลักของสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (optimisation) ได้ถูกดัดแปลงบางส่วนในขณะสร้างเครื่อง เนื่องจากขีดจำกัดของวัสดุและกระบวนการผลิต จึงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลดลง นอกจากนี้ การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ จึงจำเป็นก่อนที่จะนำระบบทำความเย็นมาต่อพ่วง ซึ่งผลการทดลองที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็มีความใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แอมพลิจูดของความดันซึ่งตัวแปรหลักที่บ่งบอกถึงค่ากำลังอะคูสติกที่ผลิตได้ โดยอัตราส่วนกำลังขับที่ได้จากเครื่องยนต์นี้ ก็เป็นที่น่าพอใจสำหรับการนำไปขับเคลื่อนทำความเย็น ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ต่อเนื่องในลำดับถัดไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ Prof. Dr. Artur J. Jaworski แห่งมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ ประเทศสหราชอาณาจักร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำวิจัยระยะสั้น และขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่เปิดโอกาสให้ไปทำวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. Swift, G.W., 2002, Thermoacoustics: a Unifying Perspective for some Engines and Refrigerators, Acoustical Society of America through the American Institute of Physics.
2. Ward, B., Clark, J., and Swift, G.W., 2008, Design Environment for Low-Amplitude ThermoAcoustic Energy Conversion program, USA, Los Alamos National Laboratory, New Mexico.
3. Tu, Q., Gusev, V., Bruneau, M., Zhang, C., Zhao, L., and Guo, F., 2006, "Experimental and Theoretical Investigation on Frequency Characteristic of Loudspeaker-driven Thermoacoustic

Refrigerator," *Cryogenics*, Vol. 45, pp. 739-746.

4. Nsofor, E.C. and Ali, A., 2009, "Experimental Study on the Performance of the Thermoacoustic Refrigerating System," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2672-2679.
5. Sakamoto, S. and Watanabe, Y., 2004, "The Experimental Studies of Thermoacoustic Cooler," *Ultrasonics*, Vol. 42, pp. 53-56.
6. Backhaus, S., Tward, E., and Petach, M., 2004, "Traveling-wave Thermoacoustic Electric Generator," *Applied Physics Letters*, Vol. 85, pp. 1085-1087.
7. Yu, Z., Saechan, P., and Jaworski, A.J., 2011, "A Method of Characterising Performance of Audio Loudspeakers for Linear Alternator Applications in Low-cost Thermoacoustic Electricity Generators," *Applied Acoustics*, Vol. 72, pp. 260-267.
8. Saha, C.R., Riley, P.H., Paul, J., Yu, Z., Jaworski, A.J., and Johnson, C.M., 2012, "Halbach Array Linear Alternator for Thermo-acoustic Engine," *Sensors and Actuators*, Vol. (In Press), pp.
9. Adef, J.A. and Hofler, T.J., 2000, "Design and Construction of a Solar Powered Thermoacoustically Driven Thermoacoustic Refrigerator," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 107, pp. 37-42.
10. Gardner, D.L. and Howard, C.Q., 2009, "Waste-heat-driven Thermoacoustic Engine and Refrigerator" in *Proceedings of ACOUSTICS*, Adelaide, Australia.
11. De Blok, K., 2008, "Low Operating Temperature Integral Thermoacoustic Devices for Solar Cooling and Waste Heat Recovery," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 123, pp. 3541-3541.
12. Zhou, S.L. and Matsubara, Y., 1998, "Experimental Research of Thermoacoustic Prime

Mover," *Cryogenics*, Vol. 38, pp. 813–822.

13. Chen, G.B. and Jin, T., 1999, "*Experimental Investigation on the Onset and Damping Behavior of the Oscillation in a Thermoacoustic Prime Mover*," *Cryogenics*, Vol. 39, pp. 843–846.

14. Dai, W., Luo, E.C., and Yu, G.Y., 2006, "*A Simple Method to Determine the Frequency of Engine included Thermoacoustic Systems*," *Cryogenics*, Vol. 46, pp. 804–808.

15. Tang, K., Huang, Z.J., Jin, T., and Chen, G.B., 2009, "*Influence of Acoustic Pressure Amplifier Dimensions on the Performance of a Standing-wave Thermoacoustic System*," *Applied Thermal Engineering* Vol. 29, pp. 956–960.

16. Yu, G.Y., Dai, W., and Luo, E.C., 2010, "*CFD Simulation of a 300Hz Thermoacoustic Standing Wave Engine*," *Cryogenics*, Vol. 50, pp. 615–622.

17. Abduljalil, A.S., Yu, Z., and Jaworski, A.J., 2011, "*Design and Experimental Validation of Looped-tube Thermoacoustic Engine*," *Journal of Thermal Science*, Vol. 20, pp. 423–429.

18. Hu, Z.J., Li, Z.Y., Li, Q., and Li, Q., 2010,

"*Evaluation of Thermal Efficiency and Energy Conversion of Thermoacoustic Stirling Engines*," *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 802–812.

19. Ceperley, P.H., 1979, "*A Pistonless Stirling Engine—the Travelling Wave Heat Engine*," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 66, pp. 1508–1513.

20. Backhaus, S. and Swift, G.W., 2000, "*A Thermoacoustic Stirling Heat Engine: Detailed Study*," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 107, pp. 3148–3166.

21. Gedeon, D., 1997, "*DC Gas Flows in Stirling and Pulse Tube Cryocoolers*" *Cryocooler*, Vol. 9, pp. 385–392.

22. Rott, N., 1975, "*Thermally Driven Acoustic Oscillations, Part III: Second-order Heat Flux*," *Journal of Applied Mathematics and Physics ZAMP*, Vol. 26, pp. 43–49.

23. Dhuchakallaya, I., 2012, "*Thermoacoustic Refrigeration*," *Thai Science and Technology Journal*, Vol. 19. (In Press).

