

การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเคลื่อนที่ สำหรับการประยุกต์ใช้งานของการทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก

อิศเรศ รัชกาลยา¹

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

และ พัชรินทร์ แซ่จัน²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบเคลื่อนที่ที่สร้างในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนความแตกต่างของอุณหภูมิที่เหมาะสมคร่อมวัสดุรูพรุนให้กลายเป็นกำลังอะคูสติกภายในชั้นขอบเขตของแข็งสำหรับการขับเคลื่อนแบบเทอร์โมอะคูสติกต่อไป ซึ่งสารทำงานในที่นี้เป็นก๊าซฮีเลียมที่ความดัน 40 บาร์ และวัสดุรูพรุนที่ใช้เป็นแบบแผ่นบางวางขนานกัน จากการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์นี้สามารถผลิตกำลังอะคูสติกได้สูงถึง 50.9 W และมีแอมพลิจูดความดันเป็น 50 kPa หรือเทียบเท่าอัตราส่วนการขับประมาณ 1.25% และให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงถึง 7.27% ด้วยความถี่รีโซแนนท์ 325 Hz

คำสำคัญ : เครื่องยนต์ความร้อน / เทอร์โมอะคูสติก / เคลื่อนที่ / สแตก / การไหลแบบแกว่งไกว

* Corresponding Author : disares@engr.tu.ac.th

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ห้องปฏิบัติการวิจัยเทอร์โมอะคูสติก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์, ห้องปฏิบัติการวิจัยทางความร้อนและของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

Design and Construction of a Standing Wave Thermoacoustic Engine for the Application of Thermoacoustic Refrigeration

Isares Dhuchakallaya^{1*}

Thammasat University (Rangsit Campus), Amphur Khlongluang, Pathumthani 12120

and Patcharin Saechan²

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

Abstract

The standing wave thermoacoustic engine constructed in this work was to convert a proper temperature gradient across a porous media into an acoustic power within the solid boundaries of the media to subsequently drive the thermoacoustic refrigeration. Here, the working fluid was helium at a mean pressure of 40 bar; the porous media used was a parallel-plate stack. The experimental results showed that this engine could produce the acoustic power of up to 50.9 W with the pressure amplitude of 50 kPa, which is equivalent to the drive ratio of approximately 1.25%, and yielded the efficiency of energy conversion of up to 7.27% with a resonant frequency of 325 Hz.

Keywords : Heat Engine / Thermoacoustics / Standing Wave / Stack / Oscillating Flow

* Corresponding Author : disares@engr.tu.ac.th

¹ Assistant Professor, ThermoAcoustic Laboratory (TAL), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.

² Lecturer, Thermofluid Laboratory, Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Faculty of Engineering.

1. คำนำ

เครื่องทำความเย็นในครัวเรือนปัจจุบันนี้ล้วนแต่ใช้เทคโนโลยีการอัดไอ (vapor compression) ซึ่งระบบดังกล่าวได้ถูกพัฒนาและใช้งานเป็นเวลายาวนาน แต่ระบบการอัดไอดังกล่าวจำเป็นต้องพึ่งพาสารทำงานชนิดไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (HCFC) หรือไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) ซึ่งเป็นสารที่มีผลต่อการทำลายชั้นโอโซนอย่างมาก และก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน ถึงแม้ว่าในปัจจุบันนี้ได้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามนำสารทำงานชนิดอื่นมาใช้แทนก็ตาม แต่ดูเหมือนว่าปัญหาดังกล่าวยังคงมีอยู่ เพียงแต่น้อยลงเท่านั้น [1-3]

ในขณะที่ระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก (thermoacoustic refrigeration) ได้รับความวิจยอย่างต่อเนื่องให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้น ซึ่งจึงอาจเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับระบบทำความเย็นในครัวเรือนในอนาคตได้ โดยระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกจะใช้ก๊าซเฉื่อยที่เกิดขึ้นในธรรมชาติมาเป็นสารทำงาน นั้นหมายความว่าสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสารทำความเย็นชนิด HCFC และ HFC นอกจากนี้ระบบทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกยังไม่มีควมซับซ้อน ทำให้ต้องการการบำรุงรักษาที่ต่ำกว่า จึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกต่ำกว่าเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ

เครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกใช้กำลังอะคูสติก (คลื่นความดัน) ที่เกิดขึ้นภายในสนามการไหล เพื่อขับเคลื่อนความร้อนออกจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปกำลังอะคูสติกถูกผลิตขึ้นโดยอาศัยตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้า-อะคูสติก (electro-acoustic transducer) ซึ่งได้แก่ อัลเทอร์เนเตอร์เชิงเส้น (linear alternator) และ ลำโพง โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะทำให้สารทำงานเกิดการไหลแบบแกว่งไกว (oscillating flow) แต่อุปกรณ์ดังกล่าวต้องการพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน และชิ้นส่วนบางอย่างยังมีการเคลื่อนไหวด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในด้านการบำรุงรักษาและอายุการใช้งานที่สั้นลง

นอกจากนี้ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้า-อะคูสติกข้างต้นยังมีข้อจำกัดทางด้านสภาพการใช้งานและความถี่ของคลื่นความดัน กล่าวคือ ลำโพงไม่สามารถใช้ผลิตคลื่นความดันในสภาพความดันสูงได้ เนื่องจากขีดจำกัดทางด้านวัสดุ

ที่ใช้ทำลำโพง ในขณะที่อัลเทอร์เนเตอร์สามารถใช้งานที่ความดันสูงได้ เนื่องจากมีลักษณะที่คล้ายกับระบบออสซิลเลเตอร์ที่มีขีดจำกัดที่ว่า ไม่สามารถทำงานด้วยความถี่สูงได้ รวมทั้งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูงด้วย

ดังนั้นเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการผลิตคลื่นความดันเพื่อป้อนให้กับเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก โดยเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกสามารถตอบสนองต่อความต้องการได้ทั้งทางด้านสภาพความดันและความถี่ของสารทำงานได้ดีกว่าอัลเทอร์เนเตอร์เชิงเส้นและลำโพง นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบที่เด่นชัดมากคือ ในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกยังไม่มีชิ้นส่วนใดที่เคลื่อนไหว จึงเป็นผลให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

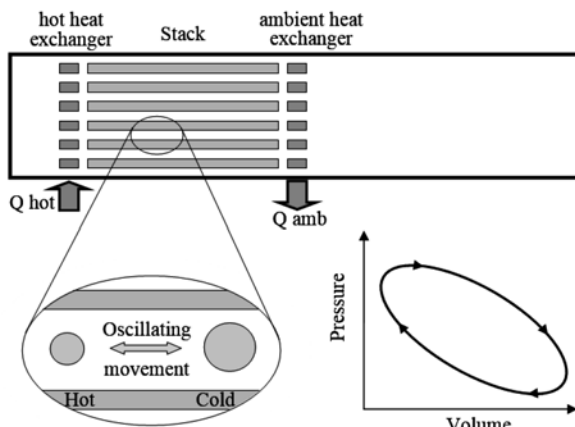
จากข้อได้เปรียบของระบบเทอร์โมอะคูสติกที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นแรงผลักดันให้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกเพิ่มขึ้นอย่างมาก [4-11] โดยต่างก็มุ่งเน้นที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นด้วยการเปลี่ยนสภาวะการทำงานลักษณะทางกายภาพของเครื่องยนต์ สารทำงานในระบบลักษณะการต่อประสานของเครื่องยนต์ เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาต่อยอดมาจาก Dhuchakallaya [11] ซึ่งใช้อากาศอัดเป็นสารทำงาน แต่เนื่องจากคุณสมบัติเชิงเทอร์โมอะคูสติกของก๊าซฮีเลียมที่ความดันสูงจะให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่สูงกว่าอากาศอัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบขึ้นมาใหม่ โดยเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่สร้างขึ้นใหม่นั้นต้องสามารถทำงานที่ความดันสูงและให้ประสิทธิภาพสูง เพื่อใช้เป็นเครื่องต้นกำลังในการผลิตคลื่นความดันสำหรับขับเคลื่อนเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งเป็นงานวิจัยถัดมาในอนาคต โดยเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกนี้อาจจะถูกติดตั้งเพิ่มในลักษณะการทำงานแบบคลื่นนิ่ง [12], หรือแบบคลื่นเคลื่อนที่ [13] หรือแบบ pulse tube [14] ก็ได้ ซึ่งรายละเอียดไม่ขอกล่าวในที่นี้

2. ทฤษฎี

เทอร์โมอะคูสติกเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานคลื่นเสียง ซึ่งกลไกการทำงานแสดงในรูปที่ 1 เมื่อเกิดความแตกต่าง

ของอุณหภูมิคร่อมวัสดุพรุนที่เรียกว่า สแตก (stack) ซึ่งวางอยู่ระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิต่ำและแหล่งอุณหภูมิสูง จะทำให้อ่อนมวลของสารทำงานภายในแผ่นสแตกเกิดการเคลื่อนที่แบบแกว่งไกว อันเนื่องมาจากผลของอะคูสติก (acoustic effect)

โดยกลไกการทำงานเป็นไปตามวัฏจักรดังนี้ เมื่ออ่อนมวลของก๊าซเคลื่อนที่ไปทางซ้าย ซึ่งมีความดันที่สูงกว่า จะส่งผลให้ปริมาตรของก้อนมวลมีขนาดเล็กลง และก้อนมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ก็ยังต่ำกว่าอุณหภูมิของแผ่นสแตก ดังนั้นความร้อนจากแผ่นสแตกจึงถ่ายเทไปยังก้อนมวล ส่งผลให้อุณหภูมิของก้อนมวลทางด้านซ้ายเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนถัดมา ก้อนมวลถูกผลักให้เคลื่อนไปทางขวา ถอยกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นซึ่งมีความดันที่น้อยกว่า จะทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และอุณหภูมิมิมีค่าลดลง แต่ก็ยังสูงกว่าอุณหภูมิของแผ่นสแตก จึงทำให้ความร้อนถ่ายเทจากก้อนมวลไปยังแผ่นสแตก ซึ่งเป็นผลให้อุณหภูมิลดลง โดยขั้นตอนเหล่านี้จะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ตามจังหวะการแกว่งไกวของคลื่นความดัน



รูปที่ 1 กลไกการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

จากกลไกการทำงานข้างต้น แผ่นสแตกจึงทำหน้าที่เป็นแค่เพียงที่พักของพลังงานความร้อน ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำแผ่นสแตกจึงควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำและมีความจุความร้อนที่สูง เพื่อให้ความร้อนถ่ายเทผ่านทางสารทำงานเท่านั้น โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนไปตามวัสดุแผ่นสแตก และในขณะที่ถ่ายเทความร้อน แผ่นสแตกจะมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างคงที่

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้นของ Rott [15] สามารถแสดงสมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์มวล และสมการอนุรักษ์พลังงานในเทอมของตัวแปรอะคูสติกได้ดังนี้

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

$$\frac{dU_1}{dx} = -\frac{i\omega A_{gas}}{\rho_m a^2} \left[1 + \frac{(\gamma-1)f_k}{1+\epsilon_s} \right] p_1 + \frac{\beta(f_k-f_v)}{(1-f_v)(1-\sigma)(1+\epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} U_1 \tag{2}$$

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{\dot{H}_2 - \frac{1}{2} \text{Re} \left[p_1 \bar{U}_1 \left(1 - \frac{T_m \beta (f_k - \bar{f}_v)}{(1+\epsilon_s)(1-\sigma)(1-\bar{f}_v)} \right) \right]}{\frac{\rho_m c_p |U_1|^2}{2A_{gas}\omega(1-\sigma)|1-f_v|^2} \text{Im} \left(\bar{f}_v + \frac{(f_k - \bar{f}_v)(1+\epsilon_s f_v / f_k)}{(1+\epsilon_s)(1+\sigma)} \right) - A_{gas} k - A_{gas} k_s} \tag{3}$$

เมื่อ p , U , T และ ρ คือความดัน ความเร็วเชิงปริมาตร อุณหภูมิ และความหนาแน่นของสารทำงาน โดยตัวห้อย m และ 1 แสดงถึงค่าเฉลี่ยและจำนวนเชิงซ้อนของแอมพลิจูดของตัวแปรอะคูสติก ส่วน $\text{Re}[\]$ และ $\text{Im}[\]$ คือจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของจำนวนเชิงซ้อน ซึ่ง c_p , γ , k , A , β และ σ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ, ค่าอัตราส่วนความจุความร้อนจำเพาะ, ค่าการนำความร้อน, พื้นที่หน้าตัด, สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน และตัวเลข Prandtl ตามลำดับ ω คือความถี่เชิงมุม และ \dot{H}_2 เป็นอัตราการไหลของพลังงานรวม

สำหรับสแตกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแผ่นบางขนานกัน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง โดยมีฟังก์ชันรูปร่างทางความหนืด f_v , ฟังก์ชันรูปร่างทางความร้อน f_k และอัตราส่วนความจุความร้อน ϵ_s ตามสมการต่อไปนี้

$$f_k = \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_k]}{(1+i)y_0/\delta_k} \tag{4}$$

$$f_v = \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_v]}{(1+i)y_0/\delta_v} \tag{5}$$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{k \rho_m c_p}{k_s \rho_s c_s} \right)^{1/2} \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_k]}{(1+i)l_0/\delta_s} \quad (6)$$

เมื่อ $2y_0$ และ $2l_0$ คือระยะห่างระหว่างแผ่นและความหนาของแผ่น โดย $\delta_v = \sqrt{2\mu/\omega\rho}$ และ $\delta_k = \sqrt{2k/\omega\rho c_p}$ คือค่าระยะทะลุทะลวงทางความหนืด และทางความร้อนตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงระยะที่โมเมนตัมและความร้อนจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในหนึ่งรอบของการแกว่งไกว

สำหรับกำลังอะคูสติค (\dot{E}_2) ที่เปลี่ยนแปลงภายในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติค เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของความดันและความเร็วเชิงปริมาตรของก้อนมวลสารทำงานภายในระบบ สามารถแสดงได้จากสมการ

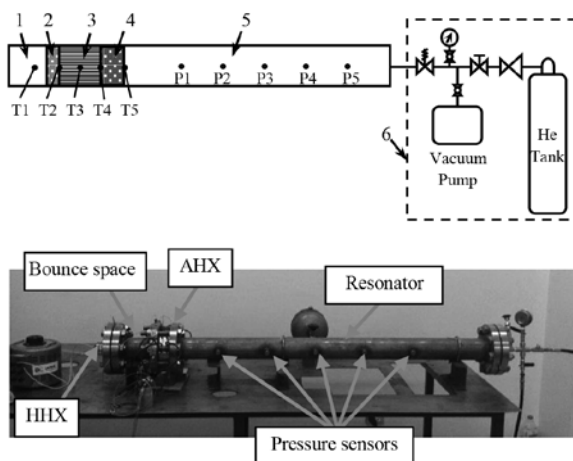
$$\frac{\partial \dot{E}_2}{\partial x} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[U_1 \frac{\partial p_1}{\partial x} + p_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} \right] \quad (7)$$

อินทิเกรตสมการอนุพันธ์ที่ (1)-(3) เพื่อหาผลเฉลยของ p_r , U_1 และ T_m ที่เปลี่ยนแปลงตาม dx โดยใช้วิธี Newton-Raphson และ Rung Kutta การคำนวณจะแบ่งระบบออกเป็นส่วย่อย แล้วกำหนดค่าเริ่มต้นของชิ้นส่วนย่อยแรก ซึ่งคำตอบที่ได้จากชิ้นส่วนย่อยแรก จะเป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณในชิ้นส่วนย่อยถัดไป อย่างเป็นต่อเนื่อง โดยในที่นี้จะใช้โปรแกรม DeltaEC [16] ช่วยในการคำนวณ

4. อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องยนต์ความร้อนเทอร์โมอะคูสติคแบบเคลื่อนที่ซึ่งในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2 สารทำงานที่ใช้คือก๊าซฮีเลียมที่ความดัน 40 บาร์ โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิสูงใช้ขดลวดไฟฟ้า และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิแวดล้อมเป็นแบบไหลขวางกัน ซึ่งทำมาจากแท่งอลูมิเนียมขนาด 145 มม. ยาว 40 มม. โดยมีช่องสำหรับให้สารทำงานไหลผ่านขนาด 5 มม. จำนวน 84 รูตามแนวแกนท่อ และมีช่องน้ำไหลระบายความร้อนขนาด 7 มม. จำนวน 6 ท่อในทิศตั้งฉาก สำหรับสแตกทำมาจากแผ่นสแตนเลสหนา 0.3 มม. นำมาวางซ้อนกันโดยมีระยะห่างระหว่างแผ่น 0.3 มม. และมีความยาว 60 มม. ถูกวางไว้ในท่อสแตนเลส 304L SCH 40S ขนาด 3 นิ้ว

การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชุดทดสอบถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 5 จุด (T_1 - T_5) และข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความดันภายในระบบถูกวัดด้วย piezoelectric pressure transducer ของ PCB PIEZOTRONICS รุ่น 113B28 จำนวน 5 ตัว (P_1 - P_5) ซึ่งอยู่ห่างเป็นระยะเท่ากันคือ 20 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยสัญญาณเหล่านี้ถูกต่อผ่าน signal conditioner และถูกบันทึกโดยอุปกรณ์บันทึกข้อมูลความไวสูง



รูปที่ 2 แผนภาพและรูปถ่ายของชุดทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคแบบเคลื่อนที่

- (1) ปริมาตรสะท้อนกลับ, (2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิสูง, (3) สแตก, (4) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิแวดล้อม, (5) เทอร์โมเซนเซอร์ และ (6) หน่วยป้อนก๊าซฮีเลียม

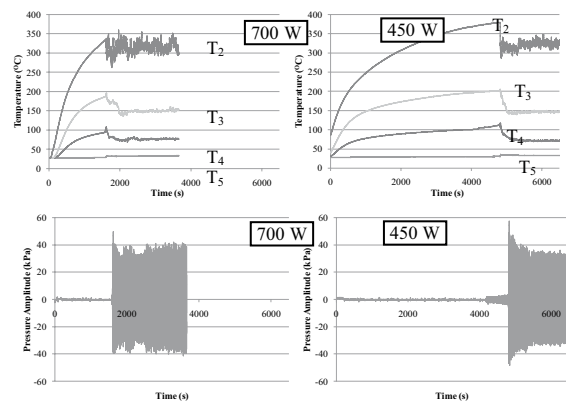
5. ผลการทดลองและวิจารณ์

เมื่อก๊าซฮีเลียมถูกอัดเข้าไปในชุดทดสอบ ความร้อนจึงถูกป้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิสูง โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าป้อนด้วยหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า ส่วนน้ำที่ใช้ระบายความร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิแวดล้อมถูกควบคุมให้มีอัตราการไหลคงที่ โดยในที่นี้ทำการศึกษาอิทธิพลของความดันภายในระบบและกำลังไฟฟ้าป้อนที่มีผลต่อพฤติกรรมอะคูสติคในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคแบบเคลื่อนที่

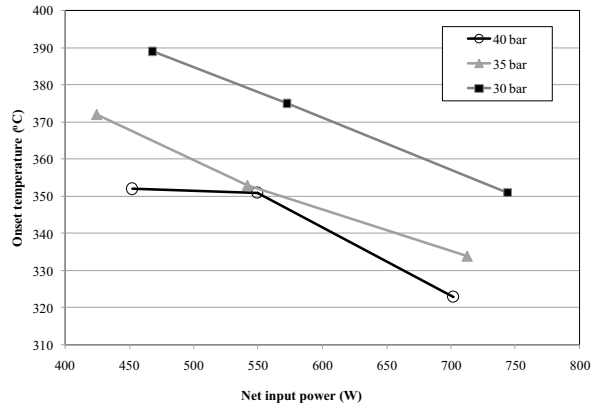
จากรูปที่ 3 พบว่า เมื่อให้ความร้อนกับระบบ อุณหภูมิภายในสแตก (T_2 - T_4) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิเทอร์โมเซนเซอร์ (T_5) ค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อ

อุณหภูมิปลายด้านร้อนของสแตกสูงถึง 323°C (ในกรณี 700 W) จะเกิดการแกว่งไกวและมีคลื่นเสียงผลิตออกมา ซึ่งอุณหภูมิจุดนี้เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มต้นการแกว่งไกว (onset temperature) ทันทีที่เกิดคลื่นเสียง อุณหภูมิปลายด้านร้อนของสแตกลดลงอย่างรวดเร็ว แต่อุณหภูมิภายในสแตก (T_3 และ T_4) จะเพิ่มขึ้นมาก ทั้งนี้เพราะความร้อนจากฝั่งขดลวดไฟฟ้าถูกพาไปยังปลายอีกด้านของสแตกจากการแกว่งไกว และแอมพลิจูดของความดันจะกระชากขึ้นสูงมากทันที แล้วจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อจากนั้นอุณหภูมิและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบจะค่อยๆ ปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยสัญญาณความดันที่อ่านได้จาก oscilloscope มีลักษณะเป็นคลื่น sine ความถี่ประมาณ 325 Hz

สำหรับกรณีกำลังไฟฟ้าป้อน 450 W โดยรวมแล้วมีลักษณะคล้ายกับกรณีของ 700 W แต่เนื่องจากมีอัตราการป้อนพลังงานความร้อนที่ต่ำกว่า จึงส่งผลให้เกร็ดเดียนของอุณหภูมิคร่อมสแตกมีค่าน้อยกว่า ดังนั้นเวลาที่ใช้เพื่อให้เครื่องยนต์เริ่มทำงานจึงยาวนานกว่า โดยความแตกต่างหนึ่งที่สังเกตได้คือ ในกรณีของ 450 W มีการแกว่งไกวขนาดเล็กเกิดขึ้นในช่วงวินาทีที่ 4200-4800 ก่อนที่จะเกิดการแกว่งไกวขนาดใหญ่ตามมา และมีเฉพาะตำแหน่งอุณหภูมิ T_4 เท่านั้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลานี้ (เพิ่มขึ้น) นั่นหมายความว่า การแกว่งไกวขนาดเล็กเกิดขึ้นบนบางส่วนของพื้นผิวสแตก (บริเวณใกล้ปลายด้านเย็น) เนื่องจากเกร็ดเดียนของอุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวที่สูงพอแต่ยังไม่เพียงพอต่อการแกว่งไกวตลอดความยาวของสแตก



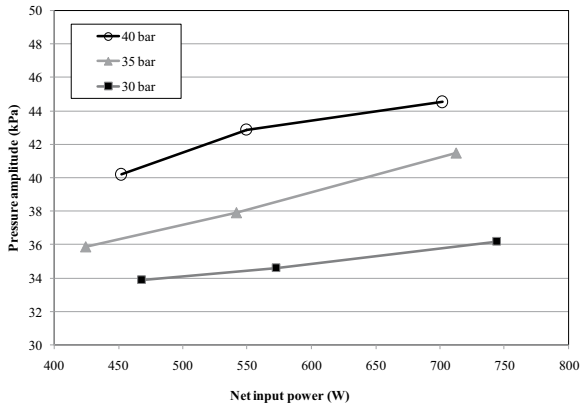
รูปที่ 3 การพัฒนาตัวของอุณหภูมิและแอมพลิจูด ความดัน P_5 ที่กำลังไฟฟ้าป้อน 450 และ 700 W ที่ความดันฮีเลียม 35 บาร์



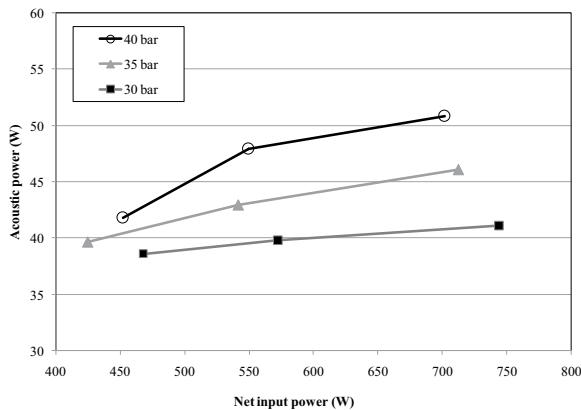
รูปที่ 4 อุณหภูมิเริ่มต้นการแกว่งไกว ที่ความดันฮีเลียมและกำลังไฟฟ้าป้อนระดับต่างๆ

ที่ความดันใดๆ เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าป้อนให้กับระบบ อุณหภูมิเริ่มต้นการแกว่งไกวจะลดลงอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าป้อนที่ต่ำจะใช้เวลาในการเพิ่มระดับอุณหภูมิปลายด้านร้อนของสแตกเป็นผลให้ความร้อนบางส่วนถ่ายเทไปยังปลายด้านเย็นของสแตกด้วยการนำความร้อน ทำให้ปลายด้านเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ ความดันฮีเลียมที่ลดลงมีผลให้ระดับของอุณหภูมิเริ่มต้นการแกว่งไกวเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากค่าระยะทะลุทะลวงทางความหนืดมีค่าสูงขึ้น จึงเป็นผลให้ความเสียดทานของสแตกมีค่าสูงขึ้นตามความดันที่ลดลง

ในรูปที่ 5 และ 6 ที่สภาวะคงตัว เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดแอมพลิจูดของความดันและกำลังอะคูสติคมีค่ามากขึ้น เนื่องจากกำลังอะคูสติคเป็นผลคูณของความดันและความเร็วเชิงปริมาตรตามสมการที่ (7) นอกจากนี้ เมื่อความดันเฉลี่ยของระบบที่เพิ่มขึ้นก็ให้ผลลัพธ์ในลักษณะเดียวกัน เนื่องกันความหนาแน่นของก๊าซฮีเลียมมีค่ามากขึ้นตามความดัน จึงเป็นผลให้แอมพลิจูดความดันเพิ่มขึ้นดังแสดงในสมการที่ (1) โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับของ Dhuchakallaya [11] แต่มีค่าที่สูงกว่า



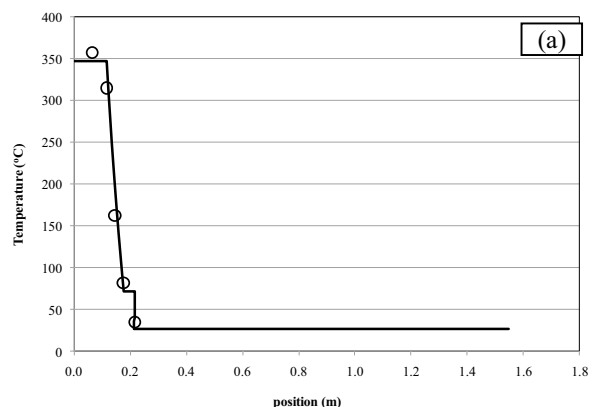
รูปที่ 5 แอมพลิจูดความดันที่ตำแหน่ง P_5 ที่ความดันฮีเลียมและกำลังไฟฟ้าป้อนระดับต่างๆ



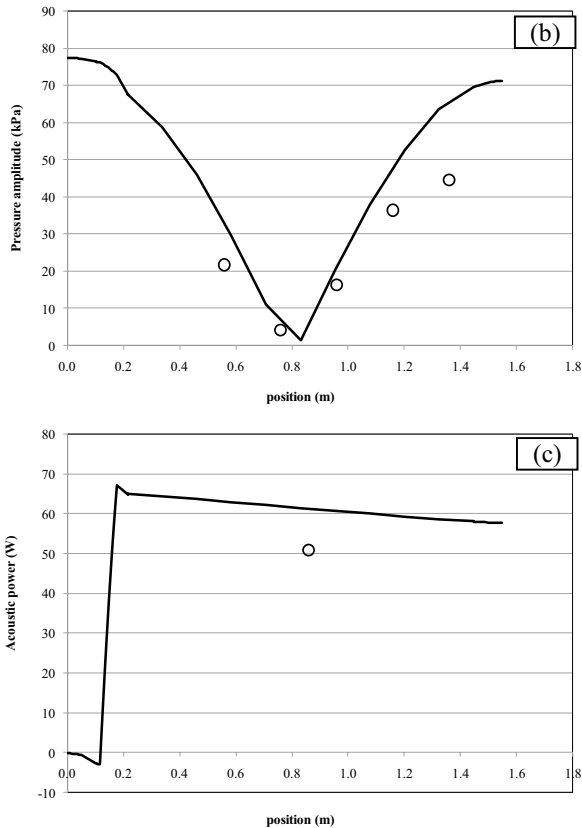
รูปที่ 6 กำลังอะคูสติกที่ความดันฮีเลียมและกำลังไฟฟ้าป้อนระดับต่างๆ

จากผลการทำนายของแบบจำลองในรูปที่ 7 สารทำงานได้รับความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิสูงที่ปลายด้านร้อนของสแตก และที่ปลายอีกด้านถูกระบายความร้อนออกด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิแวดล้อม ภายในสแตกเกิดเกรเดียนของอุณหภูมิขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7(a) ทำให้เกิดการแกว่งไกวและกำลังอะคูสติก โดยในทุกชั้นส่วนของระบบ จะมีการสูญเสียกำลังอะคูสติกบางส่วนไปเนื่องจากความหนืด โดยคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นในระบบมีลักษณะเป็นคลื่นนิ่งครึ่งลูก กล่าวคือ มีตำแหน่งปฏิบัพของความดันที่ปลายทั้งสองด้านของระบบดังแสดงในรูปที่ 7(b)

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิปลายด้านร้อนของสแตก (T_2) มีค่าต่ำกว่าผลจากแบบจำลองประมาณ 27°C ซึ่งความแตกต่างของเกรเดียนอุณหภูมิทำให้แอมพลิจูดความดัน และกำลังอะคูสติกที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าผลจากการทำนายของแบบจำลอง ซึ่งคาดว่า ผลต่างของอุณหภูมินี้เป็นสาเหตุหลักของความคลาดเคลื่อนของแอมพลิจูดความดันและกำลังอะคูสติก แต่อย่างไรก็ตาม แอมพลิจูดความดันที่วัดได้ก็มีลักษณะคล้ายกับผลการทำนาย เพียงแต่มีค่าสูงสุดที่ต่ำกว่า โดยมีแอมพลิจูดความดันเท่ากับ 50 kPa หรือเทียบเท่าอัตราส่วนการขับ (p/p_m) ประมาณ 1.25% สำหรับการวัดกำลังอะคูสติกในที่นี้ใช้วิธีเซ็นเซอร์สองตัว [17] ซึ่งอาศัยสัญญาณความดัน P_1 และ P_4 โดยสามารถผลิตกำลังอะคูสติกได้ 50.9 W ซึ่งเทียบเท่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเป็น 7.27% จากงานวิจัยของ Backhaus และ Swift [18] ได้รายงานไว้ว่า เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงสุดไม่เกิน 18% แต่อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ก็ยังคงสูงกว่าของ Dhuchakallaya [11] ซึ่งได้ค่าประมาณ 3% เนื่องจากใช้อากาศอัดที่ความดันต่ำกว่า นอกจากนี้ ปัจจัยหลักที่คาดว่าทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ไม่สูงเท่าที่ควร อาจเกิดจากพื้นที่ผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิสูงที่น้อยเกินไป และอยู่ห่างจากปลายด้านร้อนของสแตกค่อนข้างมาก



รูปที่ 7 ผลการทำนายแอมพลิจูดความดัน, อุณหภูมิสารทำงาน และกำลังอะคูสติกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ของระบบเทียบกับผลการทดลอง ที่สภาวะความดันฮีเลียม 40 บาร์, กำลังไฟฟ้าป้อน 700 W



รูปที่ 7 ผลการทำนายแอมพลิจูดความดัน, อุณหภูมิสารทำงาน และกำลังอะคูสติกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ของระบบเทียบกับผลการทดลอง ที่สภาวะความดันฮีเลียม 40 บาร์, กำลังไฟฟ้าป้อน 700 W

6. สรุป

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งนี้ถูกออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อใช้ผลิตคลื่นสำหรับขับเคลื่อนเครื่องยนต์แบบเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งจะถูกสร้างขึ้นในอนาคต โดยความดันภายในระบบที่สูงขึ้น และกำลังไฟฟ้าป้อนที่มากขึ้น จะยิ่งช่วยเพิ่มแอมพลิจูดความดัน และกำลังอะคูสติก นอกจากนี้ ผลการทดลองที่ได้ยังถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งให้ผลการเปรียบเทียบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยความแตกต่างในการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและแบบจำลอง น่าจะเกิดมาจากอุณหภูมิปลายด้านร้อนของการทดลองที่ต่ำกว่าของแบบจำลอง

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คณะกรรมการส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย จากเงินกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปี 2555

8. เอกสารอ้างอิง

1. Bolaji, B.O. and Huan, Z., 2013, "Ozone Depletion and Global Warming: Case for the Use of Natural Refrigerant –a Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, pp. 49-54.
2. Sarbu, I., 2014, "A Review on Substitution Strategy of Non-ecological Refrigerants from Vapour Compression-based Refrigeration, Air-conditioning and Heat Pump Systems", *International Journal of Refrigeration*, 46, pp. 123-141.
3. McLinden, M. O., Kazakov, A. F., Brown, J. S. and Domanski, P.A., 2014, "A Thermodynamic Analysis of Refrigerants: Possibilities and Tradeoffs for Low-GWP Refrigerants", *International Journal of Refrigeration*, 38, pp. 80-92.
4. Zhou, S.L. and Matsubara, Y., 1998, "Experimental Research of Thermoacoustic Prime Mover", *Cryogenics*, 38, pp. 813-822.
5. Chen, G.B. and Jin, T., 1999, "Experimental Investigation on the Onset and Damping Behavior of the Oscillation in a Thermoacoustic Prime Mover", *Cryogenics*, 39, pp. 843-846.
6. Dai, W., Luo, E.C. and Yu, G.Y., 2006, "A Simple Method to Determine the Frequency of Engine included Thermoacoustic Systems", *Cryogenics*, 46, pp. 804-808.
7. 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*, 29, pp. 956-960.

8. Yu, G. Y., Dai, W. and Luo, E. C., 2010, "CFD Simulation of a 300Hz Thermoacoustic Standing Wave Engine", *Cryogenics*, 50, pp. 615-622.
9. Abduljalil, A. S., Yu, Z. and Jaworski, A. J., 2011, "Design and Experimental Validation of Looped-tube Thermoacoustic Engine", *Journal of Thermal Science*, 20, pp. 423-429.
10. 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*, 51, pp. 802-812.
11. Dhuchakallaya, I., 2012, "Experimental Study on a Standing Wave Thermoacoustic Engine", *KMUTT Research and Development Journal*, 35, pp. 323-333.
12. Kang, H., Zhou, G. and Li, Q., 2010, "Heat driven thermoacoustic cooler based on traveling-standing wave", *Energy Conversion and Management*, 51, pp. 2103-2108.
13. Tijani, M.E.H. and Spoelstra, S., 2008, "Study of a coaxial thermoacoustic-Stirling cooler", *Cryogenics*, 48, pp. 77-82.
14. Boroujerdi, A.A. and Ziabasharhagh, M., 2014, "Investigation of a high frequency pulse tube cryocooler driven by a standing wave thermoacoustic engine", *Energy Conversion and Management*, 86, pp. 194-203.
15. Rott, N., 1975, "Thermally Driven Acoustic Oscillations, Part III: Second-order Heat Flux", *Journal of Applied Mathematics and Physics ZAMP*, 26, pp. 43-49.
16. Ward, B., Clark, J. and Swift, G. W., *Design Environment for Low-Amplitude ThermoAcoustic Energy Conversion program*. USA: Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 2008.
17. Fusco, A. M., Ward, W. C. and Swift, G. W., 1992, "Two-sensor power measurements in lossy ducts", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91, pp. 2229-2235.
18. Backhaus, S. and Swift, G. W., 2000, "A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107, pp. 3148-3166.

