



## การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งสำหรับประยุกต์ใช้งานกับการทำความเย็น

วศิน ชัยโรจน์นิพัฒน์ และ อิศเรศ ชูชกัลยา\*

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทอร์โมอะคูสติก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2564-3001-9 ต่อ 3276 อีเมล: disares@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.03.008

รับเมื่อ 6 มกราคม 2559 ตอรับเมื่อ 31 มีนาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 19 ตุลาคม 2559

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่ง โดยกำลังอะคูสติกที่ผลิตขึ้นจะถูกนำไปใช้ขับเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาค่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตคลื่นแกว่งไกว ได้แก่ พลังงานความร้อนป้อนเข้า ชนิดสารทำงาน และความดันเฉลี่ยภายในระบบ โดยสแตกที่ใช้ในการทดสอบเป็นสแตกแบบตาข่าย ทดสอบภายใต้ความดันของก๊าซฮีเลียมและอาร์กอนในช่วงความดัน 30 ถึง 40 บาร์ และใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวป้อนพลังงานความร้อนเข้าสู่ระบบ จากผลการทดสอบพบว่า แอมพลิจูดของคลื่นแกว่งไกวมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานความร้อนป้อนเข้าและความดันเฉลี่ยของสารทำงานมีค่ามากขึ้น แต่ในขณะที่อุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวมีขนาดลดลง โดยปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์เพียงเล็กน้อย เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นสารทำงานสามารถผลิตกำลังอะคูสติกได้สูงกว่าที่ใช้ก๊าซอาร์กอน ซึ่งเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกนี้สามารถผลิตกำลังอะคูสติกได้สูงสุด 48 วัตต์ ที่พลังงานความร้อนป้อนเข้าสู่ระบบ 751 วัตต์ เทียบเท่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน 6.39% และการเปลี่ยนชนิดของสารทำงานมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ค่อนข้างมาก

**คำสำคัญ:** คลื่นนิ่ง, เครื่องยนต์, เทอร์โมอะคูสติก, สแตกแบบตาข่าย



## Performance Testing of the Standing-wave Thermoacoustic Engine for Refrigeration Applications

Wazin Chairojnipat and Isaes Dhuchakallaya\*

Thermo Acoustic Laboratory (TAL), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0-2564-3001-9 Ext. 3276, E-mail: disares@engr.tu.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.03.008

Received 6 January 2016; Accepted 31 March 2016; Published online: 19 October 2016

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

The objective of this research was to study and test the standing-wave thermoacoustic engine. The acoustic power generated was utilised in driving the thermoacoustic refrigerator later on. This research then focused on the investigation of the parameters that affected the capability of generating oscillating waves, including thermal input energy, working fluid, and mean pressure. The stack used here was the screened stack. The engine was examined under a high pressure range of 30 to 40 bar of helium and argon. An electrical heater was used as the heat source. In the experimental results, when the level of thermal input energy and mean pressure of the system was increased, the pressure amplitudes observed became larger, but the onset temperatures gradually reduced. These parameters had a small effect on the resonant frequency. An engine using helium as a working fluid can provide higher acoustic power compared with the case of argon. This thermoacoustic engine can produce maximum acoustic power up to 48 W at the thermal input energy of 751 W, which is equivalent to the energy conversion efficiency of 6.39%. The type of working fluid also had a significant effect on the resonant frequency of system.

**Keywords:** Standing-wave, Engine, Thermoacoustic, Screened Stack

## 1. บทนำ

ปัจจุบันอุณหภูมิทั่วโลกสูงขึ้น มนุษย์จึงคิดค้นระบบทำความเย็นเพื่อความสะอาดสบาย ระบบทำความเย็นแบบอัดไอจึงเกิดขึ้น ซึ่งใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั่วโลก เพราะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี การทำงานของระบบไม่ซับซ้อน แต่ยังมีจุดด้อยตรงที่ระบบต้องทำให้สารทำความเย็นมีความดันสูง ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและอีกเหตุผลคือ เทคโนโลยีแบบอัดไอต้องใช้สารทำความเย็นเพื่อช่วยในการอัดตัวและแลกเปลี่ยนความร้อนโดยสารจำพวก HCFC เช่น R-22 ที่มีส่วนประกอบของคลอรีน เมื่อลอยขึ้นไปยังชั้นโอโซนและได้รับความร้อนก็แตกตัวทำปฏิกิริยากับโอโซน ทำให้ชั้นโอโซนเบาบางและทำให้รังสีคลื่นสั้น เช่น รังสียูวีจากดวงอาทิตย์ผ่านทะลุตรงเข้าสู่พื้นผิวของโลกโดยไม่มีชั้นโอโซนกั้นไว้ จึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก อันตรายอีกประการจากสารทำความเย็นคือ มีสภาพเป็นพิษ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและระยะเวลาที่ผสมอยู่กับอากาศ และคุณสมบัติไวไฟก่อให้เกิดการระเบิดได้ [1], [2] โดยเห็นได้ว่าสารทำความเย็นแบบเก่าจำพวกนี้ เป็นอันตรายและก่อให้เกิดผลกระทบต่อโลกและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก จึงเป็นที่มาสำหรับทำการวิจัยนี้ เพื่อมองหาเทคโนโลยีทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีทางเลือก โดยอาศัยหลักการแปลงพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปพลังงานคลื่นความดัน โดยคลื่นความดันที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคสามารถนำไปใช้ขับเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติคได้ เช่น ตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศ [3]–[5] โดยสารทำงานที่ใช้ในระบบเทอร์โมอะคูสติค ได้แก่ ก๊าซฮีเลียม ก๊าซอาร์กอน ก๊าซไนโตรเจน และสารในตระกูลก๊าซเฉื่อย เป็นต้น หรือแม้แต่อากาศก็สามารถใช้เป็นสารทำงานได้ ซึ่งเห็นได้ว่าสารทำงานดังกล่าวเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยได้มีนักวิจัยหลายท่าน [6]–[9] พยายามศึกษาหาสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด เช่น ก๊าซอาร์กอน ก๊าซฮีเลียม ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซผสมที่มีความดันต่างๆ

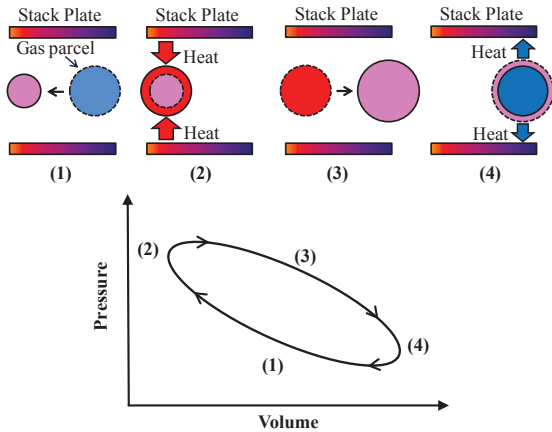
สำหรับแต่ละการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งได้ผลลัพธ์ไปในแนวทางที่สอดคล้องกันคือ สารทำงานที่ดีควรมีค่าการนำความร้อนสูง มีค่าความจุความร้อนต่ำ และค่าตัวเลข Prandtl ต่ำ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ดีในการผลิตกำลังอะคูสติค

ดังนั้นเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติคจึงเป็นเทคโนโลยีสะอาดที่ควรจะนำมาทดแทนเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ ซึ่งใช้สารทำงานที่เป็นอันตรายทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมด้วย โดยการนำเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติคมาใช้งานจะต้องอาศัยเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคสำหรับผลิตคลื่นแกว่งไกว ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

เนื่องจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคไม่มีชิ้นส่วนใดที่เคลื่อนไหว ง่ายต่อการบำรุงรักษา ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เหมาะสม และยังสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานคุณภาพต่ำ เช่น พลังงานเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น [10], [11] จากจุดเด่นดังกล่าวส่งผลให้งานวิจัยเทอร์โมอะคูสติคเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยนี้ก็เป็นส่วนหนึ่งที่จะพัฒนาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ความดันเฉลี่ยภายในระบบและสารทำงานว่ามีผลอย่างไรต่อสมรรถนะในการทำงาน แล้วนำผลที่ได้ไปปรับปรุงพัฒนาเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคเพื่อใช้ขับเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติคต่อไป

หลักการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติคเริ่มต้นจากเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติครับพลังงานจากแหล่งความร้อนสูงเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้ปลายทั้งสองด้านของวัสดูรูปทรงแทงหรือสแตก (Stack) มีอุณหภูมิแตกต่างกัน สารทำงานภายในสแตกจะเริ่มเกิดการแกว่งไกว เนื่องจากกระบวนการขยายตัว-อัดตัวของก้อนมวลสารทำงานร่วมกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างก้อนมวลสารทำงานและแผ่นสแตกดังแสดงในรูปที่ 1

ในขั้นตอนที่ 1 ก้อนมวลสารทำงานเคลื่อนที่ไปด้านซ้ายซึ่งมีความดันที่สูงกว่า จึงทำให้ปริมาตรสารทำงานมีขนาดเล็กลง ขั้นตอนที่ 2 ในบริเวณดังกล่าวแผ่นสแตก



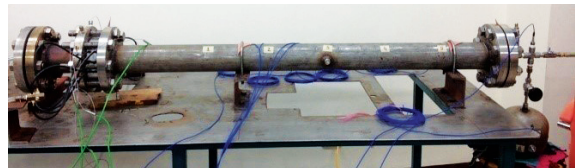
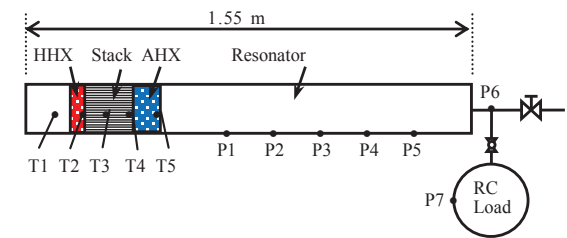
รูปที่ 1 วัฏจักรการทำงานของสารทำงานภายในสแต็ก

มีอุณหภูมิที่สูงกว่าจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ก้อนมวล ส่งผลให้ก้อนมวลสารทำงานเกิดการขยายตัวขึ้นขั้นตอนที่ 3 ก้อนมวลสารทำงานเคลื่อนที่ไปด้านขวามือซึ่งในบริเวณดังกล่าวมีความดันต่ำกว่า สารทำงานจึงเกิดการขยายตัว ขั้นตอนที่ 4 ก้อนมวลสารทำงานซึ่งมีอุณหภูมิภายในสูงกว่าอุณหภูมิแผ่นสแต็ก จึงทำการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แผ่นสแต็กและทำให้ก้อนมวลมีขนาดเล็กกลง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีพฤติกรรมคล้ายกับวัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton Cycle) [12]–[14]

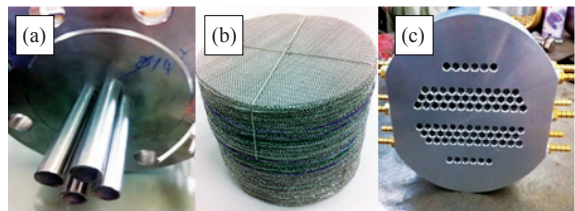
โดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างก้อนมวลสารทำงานและแผ่นสแต็กเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันตลอดแนวความยาวแผ่นสแต็ก ซึ่งการถ่ายเทความร้อนนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานความร้อนบางส่วนกลายเป็นพลังงานคลื่นแกว่งไกวในรูปของกำลังอะคูสติก

## 2. อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูง (HHX) ที่ทำมาจากแท่งฮีทเตอร์ 4 แท่งต่อแบบขนาน มีความต้านทานรวม 25 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 3(a) ทำหน้าที่เป็นตัวให้ความร้อนแก่ระบบ สแต็กแบบตาข่ายทำจากสแตนเลส Mesh 40 ลวดเบอร์ 35 นำมาตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. แล้วนำมา



รูปที่ 2 เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก และตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันและอุณหภูมิ



รูปที่ 3 (a) ฮีทเตอร์ไฟฟ้า (b) สแต็กแบบตาข่าย และ (c) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิแวดล้อม

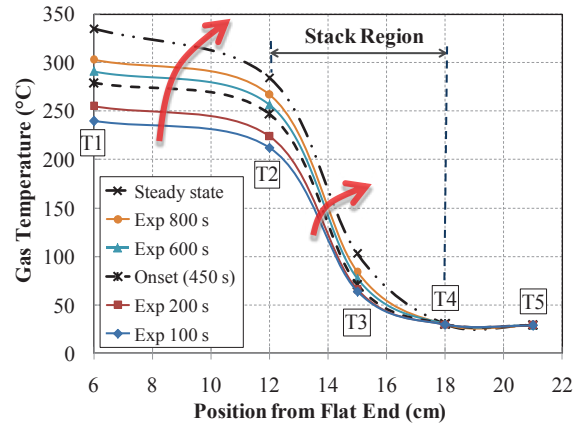
ซ้อนกันหนา 6 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3(b) ทำหน้าที่เป็นตัวผลิตคลื่นแกว่งไกว เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิแวดล้อม (AHX) ซึ่งเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกันที่ทำมาจากแท่งอะลูมิเนียม โดยมีน้ำเป็นตัวระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3(c) ทำหน้าที่ระบายความร้อนส่วนเกินออกจากระบบ และท่อรีโซเนเตอร์ซึ่งทำมาจากท่อสแตนเลส SCH 40 ขนาด 3 นิ้ว

เซ็นเซอร์วัดความดันแบบ Piezoelectric ยี่ห้อ PCB PIEZOTRONICS รุ่น 122A22 ได้ถูกติดตั้งตลอดแนวความยาวท่อรีโซเนเตอร์ (P1–P5) ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อวัดแอมพลิจูดความดันของระบบและกำลังอะคูสติกที่ผลิตได้ซึ่งเซ็นเซอร์แต่ละตัวถูกวางห่างเท่าๆ กันคือ 20 ซม. นอกจากนี้ยังมีเซ็นเซอร์วัดความร้อน P6, P7 สำหรับใช้วัดกำลังอะคูสติกในชุด RC Load ด้วย

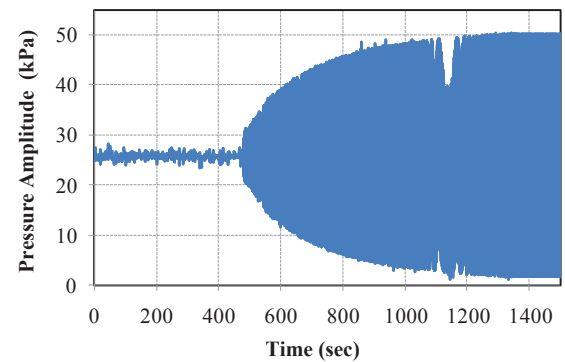
นอกจากนี้ในการทดลองยังได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสแตก โดยทำการวัดอุณหภูมิตามจุดตลอดแนวความยาวสแตกด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 5 เส้น (T1-T5) ดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากผลต่างอุณหภูมิส่งผลต่อการเริ่มต้นแกว่งไกวของระบบ สำหรับสารทำงานภายในระบบเลือกใช้เป็นก๊าซฮีเลียมและก๊าซอาร์กอน โดยการทดลองแต่ละครั้งจะแปรเปลี่ยนความดันเฉลี่ยภายในระบบอยู่ระหว่าง 30-40 บาร์ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแหล่งอุณหภูมิสูงอยู่ระหว่าง 530 ถึง 750 วัตต์ ซึ่งควบคุมโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับในการทดสอบนี้ อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ แอมพลิจูดความดัน และมุมเฟสที่เกี่ยวข้องจะถูกเก็บรวบรวมผ่านอุปกรณ์บันทึกข้อมูลความไวสูงและออสซิลโลสโคปเพื่อใช้คำนวณหาอุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวและกำลังอะคูสติกที่เครื่องยนต์ผลิตได้

### 3. ผลการทดลอง

การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกที่ตำแหน่งต่างๆ วัดค่าโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล 5 จุดที่ติดตั้งรอบบริเวณสแตกดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อทำการเปิดฮีตเตอร์อุณหภูมิ T1 และ T2 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางสแตก T3 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วน T4 และ T5 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งวินาทีที่ 450 การแกว่งไกวเริ่มเกิดขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่สอดคล้องนี้เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกว (Onset Temperature) โดยอุณหภูมิที่กึ่งกลางสแตก T3 จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อมีการแกว่งไกวสารทำงานจะพาความร้อนจากบริเวณฮีตเตอร์ (ก่อนมวลอุณหภูมิสูง) เข้าสู่สแตก ซึ่งการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนโหมดจากการนำความร้อนไปเป็นการพาความร้อน หลังจากนั้นอุณหภูมิ T1, T2 และ T3 ก็เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะคงตัว แต่อุณหภูมิสแตกปลายด้านเย็น T4 และอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ T5 มีค่าค่อนข้างคงที่เท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม เนื่องจากความร้อนส่วนเกินที่ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นแกว่งไกวตามวัฏจักรการทำงานของ



รูปที่ 4 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสแตกที่ความดัน 40 บาร์ของก๊าซฮีเลียมในช่วงเวลาต่างๆ

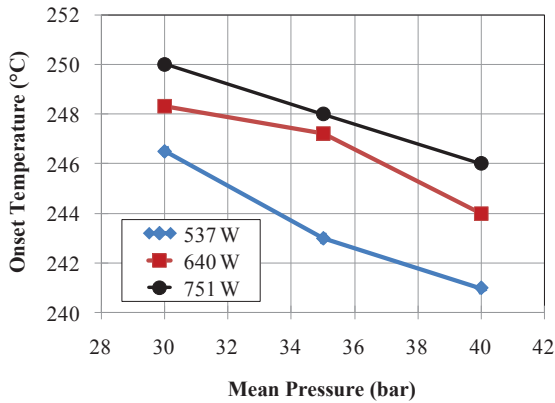


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดความดัน P5 ที่ความดัน 40 บาร์ของก๊าซฮีเลียมในช่วงเวลาต่างๆ

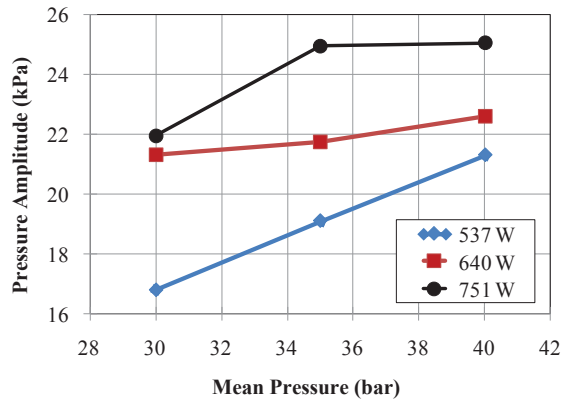
เทอร์โมอะคูสติกได้ถูกระบายออกผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิแวดล้อม

ในขณะที่เริ่มต้นแกว่งไกว แอมพลิจูดของความดัน P5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความดันสูงสุด ได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน หลังจากนั้นแอมพลิจูดก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะคงตัวดังแสดงในรูปที่ 5 โดยได้ค่าแอมพลิจูดความดันสูงสุดประมาณ 25 kPa

พิจารณาอิทธิพลของความดันเฉลี่ยและพลังงานความร้อนป้อนเข้าที่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อระบบมีความดันเฉลี่ยของสารทำงาน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวและความดันเฉลี่ยของก๊าซฮีเลียมที่ระดับต่างๆ ของพลังงานความร้อนป้อนเข้า



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเฉลี่ยของก๊าซฮีเลียมและแอมพลิจูดความดันที่ระดับต่างๆ ของพลังงานความร้อนป้อนเข้า

เพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวมีค่าลดลง ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวสามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ [13]

$$\nabla T_{crit} = (\omega A |p_1|) / (\rho c_p |U_1|) \quad (1)$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงของความดันและอัตราการไหลเชิงปริมาตรสามารถหาได้จากสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมดังนี้

$$\frac{dp_1}{dx} = -\frac{i\omega\rho_m}{A_{gas}(1-f_v)}U_1 \quad (2)$$

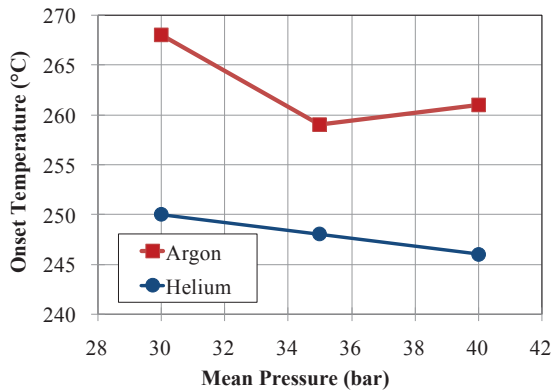
$$\frac{dU_1}{dx} = -Yp_1 + gU_1 \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } Y = \frac{i\omega A_{gas}}{a^2 \rho_m} \left[ 1 + \frac{(\gamma-1)f_\kappa}{1+\epsilon_s} \right] \quad (4)$$

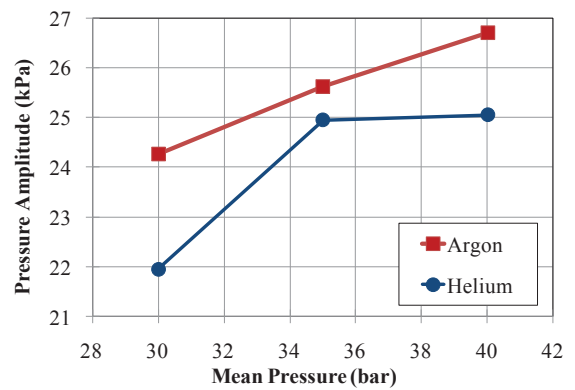
$$\text{และ } g = \frac{\beta(f_\kappa - f_v)}{(1-f_v)(1-\sigma)(1+\epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \quad (5)$$

เนื่องจากในรูปที่ 6 ความดันเฉลี่ยแปรผันตรงกับความหนาแน่นของก๊าซ ( $\rho$ ) และแอมพลิจูดความดัน ( $|p_1|$ ) นอกจากนี้แอมพลิจูดความเร็ว ( $|U_1|$ ) ยังแปรผันตามแอมพลิจูดความดันด้วยดังแสดงในสมการที่ (2) ดังนั้นจึงเป็นผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวมีค่าลดลงที่ความดันเฉลี่ยสูงๆ โดยอุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวลดลงประมาณ 9–14% ของการเพิ่มความดันเฉลี่ยทุก 5 บาร์ นอกจากนี้ ถ้าระบบยังมีพลังงานความร้อนป้อนเข้าเพิ่มมากขึ้น ก็ยังเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวขึ้น ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะระดับของพลังงานความร้อนป้อนเข้าแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิของขดลวดฮีตเตอร์

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบมีความดันเฉลี่ยของสารทำงานสูงขึ้น แอมพลิจูดความดันที่ระบบสามารถผลิตได้ก็จะเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะความหนาแน่นของก๊าซที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ที่ระดับความดันเฉลี่ยใดๆ เมื่อพลังงานความร้อนป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นส่งผลให้แอมพลิจูดความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นแอมพลิจูดความเร็วก็จะเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในสมการที่ (3) ซึ่งส่งผลโดยตรงให้แอมพลิจูดความดันมีขนาดใหญ่มากขึ้น จึงอาจจะกล่าวได้ว่าแอมพลิจูดความดันแปรผันตามอุณหภูมิของสารทำงาน



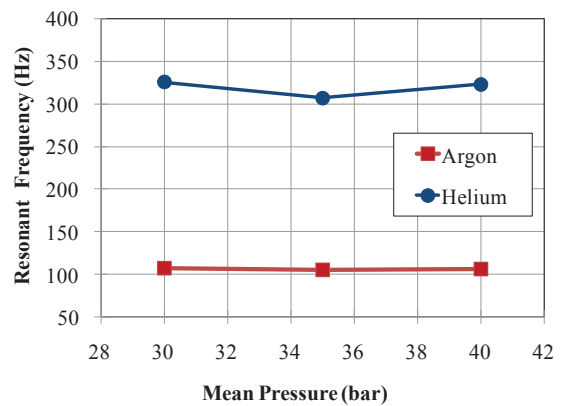
**รูปที่ 8** อุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวของระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมและก๊าซอาร์กอนเป็นสารทำงานภายใต้ความดันเฉลี่ยต่างๆ ที่ระดับพลังงานความร้อนป้อนเข้า 751 W



**รูปที่ 9** แอมพลิจูดความดันของระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมและก๊าซอาร์กอนเป็นสารทำงานภายใต้ความดันเฉลี่ยต่างๆ ที่ระดับพลังงานความร้อนป้อนเข้า 751 W

เมื่อเปลี่ยนสารทำงานจากก๊าซฮีเลียมมาเป็นก๊าซอาร์กอนดังแสดงในรูปที่ 8 ปรากฏว่า ระบบที่ใช้ก๊าซอาร์กอนต้องการอุณหภูมิในการเริ่มต้นแกว่งไวกสูงกว่าของระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมในทุกะดับพลังงานป้อนเข้า เนื่องจากระยะทะลุลงทางความร้อน (Thermal Penetration Depth,  $\delta_k = \sqrt{2k/\omega\rho c_p}$ ) ของก๊าซฮีเลียมมีค่าสูงกว่า จึงทำให้ระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมสามารถแปลงพลังงานความร้อนไปเป็นกำลังอะคูสติกได้ดีกว่า ซึ่งส่งผลให้ต้องการอุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไวกที่ต่ำกว่า ด้วยเหตุนี้ระบบที่ใช้ก๊าซอาร์กอนจึงทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้คลื่นแกว่งไวกที่เกิดขึ้นมีแอมพลิจูดความดันที่สูงกว่าของกรณีที่ใช้ก๊าซฮีเลียมดังแสดงในรูปที่ 9 เนื่องจากแอมพลิจูดความดันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของระบบ

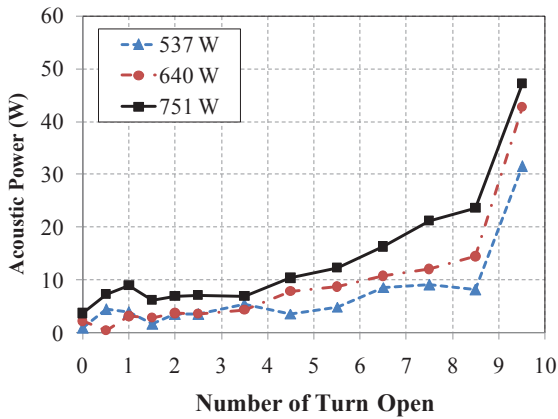
ความถี่รีโซแนนท์ของระบบมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกและชนิดของสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายใน จากการทดลองพบว่าความถี่ของระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นสารทำงานมีค่าประมาณ 325 Hz แต่ในขณะที่ระบบที่ใช้อาร์กอนสามารถวัดค่าได้เพียง 107 Hz ดังแสดงในรูปที่ 10 และค่าความถี่รีโซแนนท์ที่วัดได้นี้ค่อนข้างจะคงที่ (เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย) เนื่องจากอุณหภูมิในบริเวณปลายสแตงด้านร้อนที่



**รูปที่ 10** ความถี่รีโซแนนท์ของระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมและก๊าซอาร์กอนภายใต้ความดันเฉลี่ยต่างๆ ที่ระดับพลังงานความร้อนป้อนเข้า 751 W

แตกต่างกัน โดยความถี่ของระบบที่ใช้ฮีเลียมมีค่ามากกว่าอาร์กอนเป็นเพราะว่า ก๊าซฮีเลียมมีความเร็วเสียงมากกว่าก๊าซอาร์กอนประมาณ 3 เท่า จึงทำให้มีค่าความถี่รีโซแนนท์ของระบบสูงกว่าประมาณ 3 เท่าเช่นกัน

นอกเหนือจากนี้ ผลการทดลองที่แสดงมาข้างต้นยังได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของงานวิจัยอื่นที่ผ่านมามี โดยผลการทดลองในรูปที่ 7, 9 และ 10 มี



**รูปที่ 11** การเปลี่ยนแปลงของกำลังอะคูสติกที่วัดได้จากวิธี Two-Microphone ตามจำนวนรอบการเปิดของวาล์วที่ระดับต่างๆ ของพลังงานความร้อนป้อนเข้า

ลักษณะแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการวิจัยของ [7]–[9] ซึ่งได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกโดยใช้สารทำงานชนิดต่างๆ ที่มีความดันเฉลี่ยแตกต่างกันไปนั้นแสดงให้เห็นว่า ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือสูง

กำลังอะคูสติกที่ผลิตได้เป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการแปลงพลังงานของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกในที่นี้ใช้วิธี Two-Microphone [15] ของเซ็นเซอร์วัดความดันคู่ P4–P5 ในการวัดกำลังอะคูสติก ซึ่งสามารถประมาณได้จากสมการ

$$\dot{E}_2 = \frac{A}{2\omega\rho_m \Delta x} |p_A| |p_B| \sin \theta_{AB} \quad (6)$$

เมื่อ  $\theta_{AB}$  คือมุมที่แตกต่างระหว่างสัญญาณความดันแกว่งไกวทั้งสอง โดยในการวัดได้ทำการเพิ่มภาระอะคูสติกโดยอาศัยการเปิดวาล์วในชุด RC Load โดยผลการวัดกำลังอะคูสติกของระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดแสดงในรูปที่ 11

เมื่อจำนวนรอบการเปิดวาล์วเพิ่มขึ้น กำลังอะคูสติกมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นที่น่าสังเกตว่า มีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ของกำลังอะคูสติกในช่วงท้ายๆ ของการเปิดวาล์ว เนื่องจากคุณลักษณะพื้นที่ช่องเปิดของวาล์วที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนรอบการเปิด และเมื่อระดับพลังงานความร้อนป้อนเข้าเพิ่มสูงขึ้น กำลังอะคูสติกที่ผลิตได้ก็เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแอมพลิจูดความดันมีขนาดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในที่นี้ได้กำลังอะคูสติกสูงสุดเท่ากับ 48 W เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเปิดวาล์วสุดท้ายที่ระดับพลังงานความร้อนป้อนเข้าสู่ระบบ 751 วัตต์ ซึ่งเทียบเท่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเป็น 6.39%

### 5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะการทำงานที่แตกต่างกันของเครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งที่มีผลต่อการผลิตคลื่นแกว่งไกว โดยสารทำงานที่ใช้เป็นก๊าซฮีเลียมและก๊าซอาร์กอน จากการทดลองพบว่าความดันเฉลี่ยภายในระบบที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แอมพลิจูดความดันที่ผลิตได้มีค่าสูงขึ้นและอุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกวของระบบจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความดันเฉลี่ยภายในระบบ

สารทำงานที่แตกต่างกันที่ใช้ในระบบส่งผลต่อการผลิตคลื่นแกว่งไกว ซึ่งระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมเริ่มต้นแกว่งไกวที่อุณหภูมิต่ำกว่าระบบที่ใช้ก๊าซอาร์กอน เนื่องจากก๊าซฮีเลียมมีคุณสมบัติในการแปลงพลังงานความร้อนไปเป็นกำลังอะคูสติกได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ระบบที่ใช้ก๊าซอาร์กอนมีค่าแอมพลิจูดความดันที่สูงกว่าและความถี่เรโซแนนซ์ของระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมมีค่ามากกว่ากรณีของก๊าซอาร์กอนประมาณ 3 เท่า โดยกำลังอะคูสติกที่เครื่องยนต์แบบนั้นสามารถผลิตได้มีค่าสูงถึง 48 วัตต์ ซึ่งเป็นที่น่าพึงพอใจและสามารถนำไปต่อยอดเพื่อใช้ขับเคลื่อนเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกในงานวิจัยต่อไปได้

### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้ “ทุนสนับสนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปี 2559





### รายการสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่หน้าตัด, $m^2$
$c_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $J/kg \cdot K$
$E_2$	กำลังอะคูสติค, $W$
$f$	ความถี่, $Hz$
$k$	ค่าการนำความร้อน, $W/m \cdot K$
$p_1$	ความดัน, $Pa$
$T$	อุณหภูมิ, $K, ^\circ C$
$T_{crit}$	อุณหภูมิเริ่มต้นแกว่งไกว, $K, ^\circ C$
$t$	เวลา, $s$
$U_1$	อัตราการไหลเชิงปริมาตร, $m^3/s$
$\nabla$	ผลต่าง
$\delta_k$	ระยะทะลุทะลวงทางความร้อน, $m$
$\mu$	ความหนืดไดนามิกส์, $kg/m \cdot s$
$\theta_{AB}$	มุมที่แตกต่างระหว่างสัญญาณทั้งสอง
$\rho$	ความหนาแน่นของก๊าซ, $kg/m^3$
$\sigma$	ตัวเลข Prandtl
$\omega$	ความถี่เชิงมุม, $s^{-1}$
	แอมพลิจูด

### เอกสารอ้างอิง

- [1] J. T. McMullan, "Refrigeration and the environment-issues and strategies for the future," *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, pp. 89–99, 2002.
- [2] I. Sarbu, "A review on substitution strategy of non-ecological refrigerants from vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump systems," *International Journal of Refrigeration*, vol. 46, pp. 123–141, 2014.
- [3] P. Saechan, H. Kang, X. Mao, and A. J. Jaworski, "Thermoacoustic refrigerator driven by a combustion-powered thermoacoustic engine –demonstrator of device for rural areas of developing countries," in *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, U.K., July 2013.
- [4] I. Dhuchakallaya and P. Saechan, "Numerical and experimental study on the stack geometry affecting on the cooling performance of the thermoacoustic refrigerator," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 25, pp. 381–392, 2015.
- [5] N. M. Hariharan, P. Sivashanmugam, and S. Kasthuriengan, "Experimental investigation of a thermoacoustic refrigerator driven by a standing wave twin thermoacoustic prime mover," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, pp. 2420–2425, 2013.
- [6] H. Ke, Y. He, Y. Liu, and F. Cui, "Mixture working gases in thermoacoustic engines for different applications," *International Journal of Thermophysics*, vol. 33, pp. 1143–1163, 2012.
- [7] D. H. Li, Y. Y. Chen, E. C. Luo, and Z. H. Wu, "Study of a liquid-piston traveling-wave thermoacoustic heat engine with different working gases," *Energy*, vol. 74, pp. 158–163, 2014.
- [8] S. Kalra, K. P. Desai, H. B. Naik, and M. D. Atrey, "Theoretical study on standing wave thermoacoustic engine," *Physics Procedia*, vol. 67, pp. 456–461, 2015.
- [9] M. Chen and Y. L. Ju, "Effect of difference working gases on the performance of a small thermoacoustic Stirling engine," *International Journal of Refrigeration*, vol. 51, pp. 41–51, 2015.
- [10] Z. Yang, Y. Zhuo, E. Luo, and Z. Yuan, "Travelling –wave thermoacoustic high-temperature heat pump for industrial waste heat recovery," *Energy*,



- vol. 77, pp. 397–402, 2014.
- [11] C. Shen, Y. He, Y. Li, H. Ke, D. Zhang, and Y. Liu, “Performance of solar powered thermoacoustic engine at different tilted angles,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 2745–2756, 2009.
- [12] G. W. Swift, “Thermoacoustic engines,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 84, pp. 1145–1180, 1988.
- [13] G. W. Swift, *Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators*, Acoustical Society of America, New York: American Institute of Physics Press, 2002.
- [14] P. H. Ceperley, “A pistonless Stirling engine- The traveling wave heat engine,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 66, pp. 1508–1513, 1979.
- [15] A. M. Fusco, W. C. Ward, and G. W. Swift, “Two-sensor power measurements in lossy ducts,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, pp. 2229–2235, 1992.