



การศึกษาเชิงตัวเลขและทดลองลักษณะทางกายภาพของสแตกที่มีผลต่อสมรรถนะ การทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

อิศเรศ รุชกัลยา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทอร์โมอะคูสติก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศูนย์รังสิต

พัชรินทร์ แซ่จัน*

อาจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยทางความร้อนและของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2587-0026 ต่อ 415 อีเมล: patcharin.s@eng.kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 23 เมษายน 2558 ตอรับเมื่อ 8 มิถุนายน 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 28 กรกฎาคม 2558

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.06.002 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสแตกที่มีผลต่อสมรรถนะในการทำความเย็นของระบบ สแตกที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ สแตกแบบแผ่น สแตกแบบท่อ และสแตกแบบตาข่าย นอกจากนี้งานวิจัยยังทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความถี่ของคลื่นเสียง ตำแหน่งการวางของสแตก ขนาดความยาวของสแตก และการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกบเข้ากับสแตก ที่มีผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายด้านทั้งสองของสแตก โดยสแตกที่ทดสอบอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ และใช้ชุดลำโพงเป็นตัวขับ จากผลจากการทดลองพบว่า สแตกแบบตาข่ายสามารถให้ค่าผลต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายด้านทั้งสองของสแตกมากที่สุดประมาณ 27.0°C และอุณหภูมิปลายด้านเย็นต่ำสุดได้ถึง 14.3°C ต่อมาเมื่อนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาติดตั้งเข้ากับปลายด้านร้อนของสแตก พบว่าไม่สามารถช่วยลดอุณหภูมิปลายด้านเย็นของสแตกลงได้ ซึ่งทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความดันลดที่เพิ่มขึ้นในระบบ

คำสำคัญ: การทำความเย็น เทอร์โมอะคูสติก สแตก สมรรถนะการทำความเย็น

การอ้างอิงบทความ: อิศเรศ รุชกัลยา และ พัชรินทร์ แซ่จัน, “การศึกษาเชิงตัวเลขและทดลองลักษณะทางกายภาพของสแตกที่มีผลต่อสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, หน้า 381–392, ก.ย.-ธ.ค. 2558. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2015.06.002>



Numerical and Experimental Study on the Stack Geometry Affecting on the Cooling Performance of the Thermoacoustic Refrigerator

Isares Dhuchakallaya

Assistant Professor, ThermoAcoustic Laboratory (TAL), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Campus, Pathumthani, Thailand

Patcharin Saechan*

Lecturer, ThermoFluid Laboratory, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2587-0026 Ext. 415, E-mail: patcharin.s@eng.kmutnb.ac.th

Received 23 April 2015; Accepted 8 June 2015; Published online: 28 July 2015

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.06.002 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this research is to study and develop the thermoacoustic refrigeration system. The effects of stack geometries on the cooling performance of the system were investigated. The geometries of parallel plate, circular pore and mesh screen stacks were examined. In addition, the effects of sound wave frequency, the position of stack, the length of stack and the heat exchanger attached to the stack on the temperature difference across the ends of stack were also examined. The stacks here were tested under atmospheric pressure and a loudspeaker was used as an acoustic driver. As results, the mesh screen stack can provide the maximum temperature difference across the ends of stack up to 27.0°C, and the minimum cold-end temperature can drop down to 14.3°C. When ambient heat exchanger was installed at the stack's hot-end, the temperature profile at the cold end of the stack cannot be further reduced. Possibly, it might be due to the increased pressure drop in the system.

Keywords: Refrigeration, Thermoacoustic, Stack, Cooling Performance

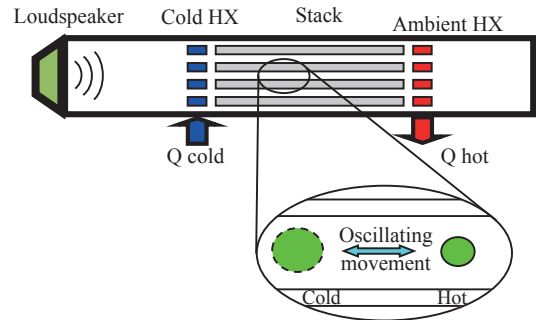
Please cite this article as: I. Dhuchakallaya and P. Saechan, "Numerical and Experimental Study on the Stack Geometry Affecting on the Cooling Performance of the Thermoacoustic Refrigerator," *J. KMUTNB*, Vol. 25, No. 3, pp. 381–392, Sep.–Dec. 2015 (in Thai). <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2015.06.002>

1. บทนำ

“การทำความเย็นแบบอัดไอ” เป็นระบบที่ใช้กันโดยทั่วไปในการทำความเย็นและปรับอากาศในปัจจุบันที่ผ่านสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบนี้เป็นสารประเภท HCFC (Hydrochlorofluorocarbon) หรือสาร HFC (Hydrofluorocarbon) ซึ่งมีผลกระทบต่อการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ และ/หรือก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก นับว่าเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ด้วยเหตุนี้นักวิจัยหลายท่านจึงพยายามศึกษาวิจัยเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยการพัฒนาระบบทำความเย็นรูปแบบใหม่หรือการประยุกต์ใช้สารทำความเย็นชนิดอื่นกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ เช่น HC, CO₂, R32, R410A เป็นต้น แม้ว่าสารทำความเย็นเหล่านี้จะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นของระบบลดลงด้วย [1]–[4]

ระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกเป็นเทคโนโลยีในการทำความเย็นอีกรูปแบบหนึ่งที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมา ระบบนี้จะทำการเปลี่ยนพลังงานคลื่นเสียงจากแหล่งป้อน เช่น ลำโพง เกิดเป็นกระแสวนของอุณหภูมิคร่อมวัฏจักรพูนซึ่งบริเวณอุณหภูมิต่ำที่ปลายด้านเย็นของวัฏจักรพูนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการรับภาระความร้อนได้ เทคโนโลยีนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ระบบมีอุปกรณ์น้อยชิ้น โครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสร้างและซ่อมบำรุง อีกทั้งยังเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการใช้สารทำความเย็นที่เป็นก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม อาร์กอน หรืออากาศอัด [5]

ที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกได้รับการพัฒนาสำหรับการใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น ตู้แช่ไอศกรีม ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ เครื่องแยกของเหลว อุปกรณ์ระบายความร้อนสำหรับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และในกระสวยอวกาศ เป็นต้น [6]–[9] แต่เทคโนโลยีนี้ยังมีขีดจำกัดในด้านประสิทธิภาพ ทำให้ยังไม่สามารถพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ดังนั้นเพื่อส่งเสริมให้สามารถ



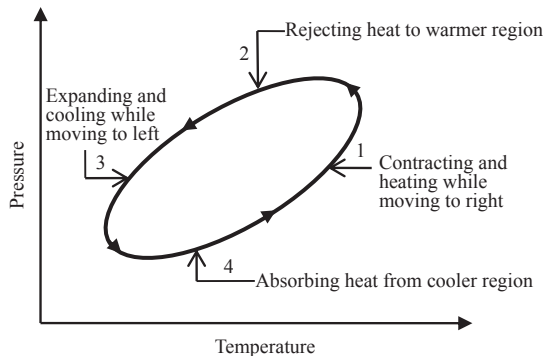
รูปที่ 1 การทำงานของเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก

ใช้งานเทคโนโลยีนี้ได้อย่างจริงจังและพัฒนาเป็นระบบที่สามารถใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมได้ จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้

2. หลักการทำงานของเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก

การทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานที่เป็นก๊าซ (หรือของเหลว) กับของแข็ง ภายในวัฏจักรพูนที่เรียกว่า สแตก (Stack) โดยใช้พลังงานเสียงเป็นตัวขับเคลื่อนทำให้สารทำงานสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านอุณหภูมิต่ำของสแตกไปยังอีกด้านที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้ ลักษณะการเคลื่อนที่อย่างแกว่งไกวของสารทำงาน (ก๊าซ) ภายในชั้นขอบเขตของของแข็ง (แผ่นสแตก) เมื่อได้รับคลื่นเสียงจากลำโพง สามารถแสดงดังในรูปที่ 1

เริ่มต้นจากก่อนมวลของก๊าซเคลื่อนที่ไปทางขวามือ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความดันสูงกว่า ทำให้ปริมาตรของก่อนมวลจะถูกอัดตัวให้เล็กลง ส่งผลให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อก่อนมวลมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของแผ่นสแตก จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากก่อนมวลไปยังแผ่นสแตก ต่อมา ก่อนมวลจะเคลื่อนที่กลับไปทางซ้ายมือซึ่งมีความดันต่ำกว่า ปริมาตรของก่อนมวลจึงขยายใหญ่ขึ้น เป็นผลให้อุณหภูมิลดต่ำลง เมื่ออุณหภูมิของก๊าซต่ำกว่าอุณหภูมิของแผ่นสแตก ความร้อนจะถ่ายเทจากแผ่นสแตกไปยังก่อนมวล



รูปที่ 2 แผนภาพ P-T ของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นวัฏจักรตลอดความยาวของแผ่นสแตททำให้เกิดแก็ร์เดียนของอุณหภูมิคร่อมสแตท โดยมีการถ่ายเทความร้อนจากด้านอุณหภูมิต่ำไปยังด้านที่มีอุณหภูมิสูงได้ ซึ่งการทำความร้อน (Q_{cold}) ทางด้านปลายที่มีอุณหภูมิต่ำสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพความดัน-อุณหภูมิของสารทำงานในเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของก้อนมวลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากหลักการการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก พบว่าสแตทเป็นหัวใจสำคัญของระบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวม นักวิจัยหลายท่าน [10]–[12] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสแตทในรูปแบบต่างๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยซึ่งใช้อากาศภายใต้ความดันบรรยากาศเป็นสารทำงาน

Srikitsuwan [10] และ Kanjanawadee [12] ได้ทำการทดสอบเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก โดยใช้สแตทแบบแผ่น ทำการทดลองที่ความถี่ค่อนข้างสูงประมาณ 330–360 Hz พบว่าวัสดุที่ใช้ทำสแตทที่มีค่าการนำความร้อนยิ่งต่ำ จะทำให้ได้แก็ร์เดียนของอุณหภูมิสูงขึ้น และระยะห่างระหว่างแผ่นสแตทควรมีค่าประมาณ

2.7 เท่าของระยะทะลุทะลวงทางความร้อน (δ_h) โดยงานวิจัยของ Kanjanawadee [12] สามารถสร้างผลต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตทได้สูงถึง 23.5°C แต่ Srikitsuwan [10] สามารถทำได้เพียง 5°C เท่านั้น สำหรับ Sakaguchi และคณะ [11] ใช้สแตทแบบตาข่ายที่ทำมาจากสแตนเลส โดยพบว่าสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดได้เพียง 2.2°C ที่ความถี่ 100 Hz และพบว่าตาข่ายที่มีความละเอียดมากเกินไป จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างกันมีค่าลดลง เนื่องจากความถี่ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าในการทดลองเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งทีปลายด้านเย็นของสแตทมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

จากงานวิจัยดังกล่าว พบว่ามีการใช้สแตทแบบแผ่นหรือแบบตาข่ายเท่านั้น ยังไม่พบว่ามี การทดสอบรูปร่างของสแตทรูปแบบอื่นมาเปรียบเทียบ ซึ่งสมรรถนะในการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือรูปร่างของสแตทแล้ว แต่ยังขึ้นอยู่กับรัศมีไฮดรอลิก (r_h) ของสแตทด้วย ด้วยเหตุผลเหล่านี้งานวิจัยนี้จะทำการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะในการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกโดยใช้สแตทแบบต่างๆ ได้แก่ แบบแผ่น แบบท่อกลม และแบบตาข่าย โดยออกแบบให้มีรัศมีไฮดรอลิกเท่ากัน โดยผลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม DeltaEC [13] นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งที่ปลายด้านร้อนของสแตทเพื่อระบายความร้อนออกจากระบบ โดยคาดว่าจะมีผลทำให้อุณหภูมิปลายด้านเย็นของสแตทลดต่ำลงได้อีก ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้นของ Rott [14] ความดันความเร็วเชิงปริมาตร อุณหภูมิ และความหนาแน่นของก๊าซสามารถประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

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

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

เมื่อตัวห้อย m และ 1 คือค่าเฉลี่ย และจำนวนเชิงซ้อนของค่าแอมพลิจูด เมื่อนำตัวแปรอะคูสติกข้างต้นแทนลงในสมการโมเมนตัม ความต่อเนื่อง และพลังงานจะได้

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

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

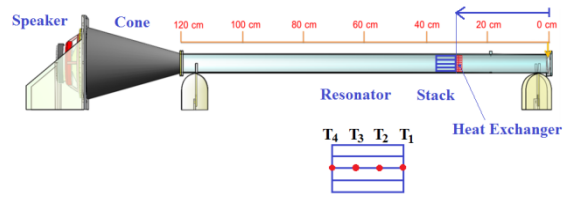
$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{\dot{H}_2 - \frac{1}{2} \text{Re} \left[p_1 \tilde{U}_1 \left(1 - \frac{f_k - \tilde{f}_v}{(1+\sigma)(1-\tilde{f}_v)} \right) \right]}{\frac{\rho_m c_p |U_1|^2}{2A_{gas}\omega(1-\sigma)|1-f_v|^2} \text{Im}(f_k + \sigma\tilde{f}_v) - A_{gas}k_{gas} + A_{solid}k_{solid}} \quad (7)$$

เมื่อ $\text{Re}[\]$ และ $\text{Im}[\]$ คือจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของจำนวนเชิงซ้อน ซึ่ง c_p, γ, k, A, β และ σ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าอัตราส่วนความจุความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน พื้นที่หน้าตัดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน และตัวเลข Prandtl ตามลำดับ ω คือความถี่เชิงมุม และ \dot{H}_2 เป็นอัตราการไหลของพลังงานรวม

สำหรับกำลังอะคูสติก (\dot{E}_2) ที่เปลี่ยนแปลงภายในระบบ สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\partial \dot{E}_2}{\partial x} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[U_1 \frac{\partial p_1}{\partial x} + p_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} \right] \quad (8)$$

เนื่องจากตัวแปร p_1 และ U_1 เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นชุดสมการข้างต้นจึงประกอบด้วยตัวแปร $\text{Re}[p_1]$,

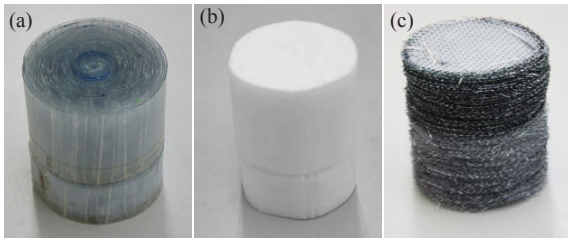


รูปที่ 3 ชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในสแตก

$\text{Im}[p_1]$, $\text{Re}[U_1]$, $\text{Im}[U_1]$, และ T_m เพื่อต้องการหาผลเฉลยของตัวแปรดังกล่าวที่เปลี่ยนไปตามระยะทาง dx จึงต้องอินทิเกรตสมการที่ (5)–(7) โดยจำเป็นต้องมี 5 เงื่อนไขขอบเขตที่ปลายด้านหนึ่งของส่วนย่อยนั้นๆ โดยเงื่อนไขขอบเขตจะเป็น ส่วนจำนวนจริงและจินตภาพของความดัน ส่วนจำนวนจริงและจินตภาพของความเร็ว และอุณหภูมิเฉลี่ย เมื่อเงื่อนไขขอบเขตถูกกำหนดไว้ที่ปลายเริ่มต้นของส่วนย่อยแรกแล้ว ก็สามารถหาผลเฉลยของ $\text{Re}[p_1]$, $\text{Im}[p_1]$, $\text{Re}[U_1]$, $\text{Im}[U_1]$ และ T_m ที่ปลายอีกด้านของส่วนย่อยนั้นได้ และค่าผลเฉลยดังกล่าวก็จะกลายเป็นเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นของการคำนวณในส่วนย่อยถัดมาอย่างต่อเนื่อง โดยในการอินทิเกรตจะใช้วิธี Newton-Raphson และ Runge Kutta อันดับสี่ ซึ่งถ้าผลเฉลยที่ได้ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดไว้ จะต้องมีการคำนวณซ้ำ โดยปรับค่าตัวแปรที่คำนวณแล้วในส่วนย่อยที่ผ่านมา แล้วคำนวณซ้ำใหม่จนกว่าจะได้ผลเฉลยที่ถูกต้อง และสอดคล้องกับทุกเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งต้องอาศัยระเบียบวิธีการยิง (Shooting Method) ซึ่งรายละเอียดของการคำนวณสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จาก [13]

4. อุปกรณ์การทดลอง

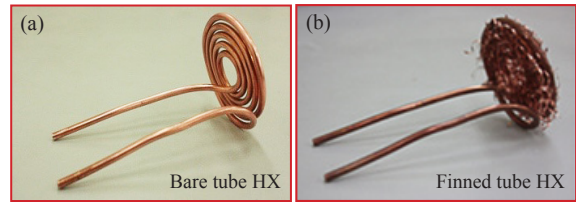
ชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยลำโพงขนาด 8 นิ้ว 120 วัตต์ ท่อลดขนาดจากขนาด 18 ซม. เป็น 5.4 ซม. ท่อรีไซเคิลหรือท่อตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 ซม. ยาว 120 ซม. สแตกและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสแตกถูกวัดโดยใช้



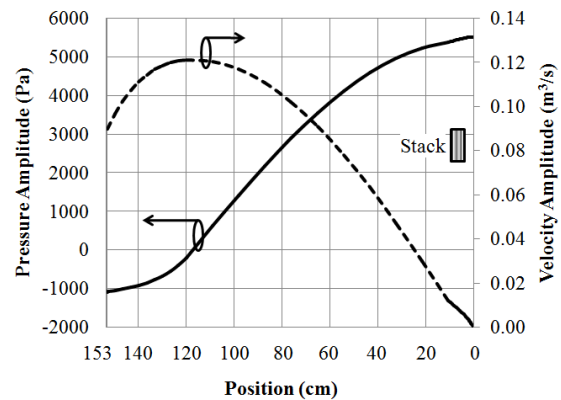
รูปที่ 4 สแตกที่ใช้ทดสอบ: (a) แบบแผ่น (b) แบบท่อ และ (c) แบบตาข่าย

เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 4 เส้น (T_1 - T_4) ติดตั้งด้วยระยะห่างที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนตำแหน่งการติดตั้งสแตกภายในท่อรีไซเคิลจะทำการวัดจากตำแหน่งอ้างอิงเสมอ ซึ่งคือปลายปิดของท่อรีไซเคิล (ปลายด้านขวา) สารทำงานที่ใช้ในระบบเป็นอากาศที่ความดันบรรยากาศ โดยในการทดลองหนึ่งๆ จะแปรเปลี่ยนความถี่ที่ป้อนให้กับลำโพง ซึ่งอยู่ในช่วง 60–100 Hz นับว่าเป็นช่วงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับชุดทดสอบนี้ หากใช้ความถี่สูงขึ้น สแตกที่ใช้ในระบบต้องมีช่องว่างระหว่างแผ่นสแตกที่น้อยลง และมีผลทำให้เกิดความดันลดที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการสำหรับระบบ

ในการทดลอง จะทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างและความยาวของสแตก และรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งติดกับปลายด้านร้อนของสแตกที่มีผลต่อสมรรถนะการทำความเย็นของระบบ โดยจะศึกษาในรูปของผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของสแตก เนื่องจากค่าดังกล่าวแปรผันโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของระบบ สแตกที่ใช้ในการทดสอบนี้ทำมาจากพลาสติกทั้งหมด เนื่องจากพลาสติกให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูง [12] โดยรูปร่างของสแตกมี 3 แบบคือแบบแผ่น แบบท่อ และแบบตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยทั้ง 3 แบบนี้มีค่ารัศมีไฮดรอลิกที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 0.45 มม. (~ 1.45 เท่าของ δ_c) ซึ่งแต่ละแบบจะทำการทดสอบด้วยความยาวที่แตกต่างกันคือ 3, 5, 8 และ 11 ซม. ตามลำดับ



รูปที่ 5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ทดสอบ: (a) แบบท่อเปลือย และ (b) แบบท่อติดครีป



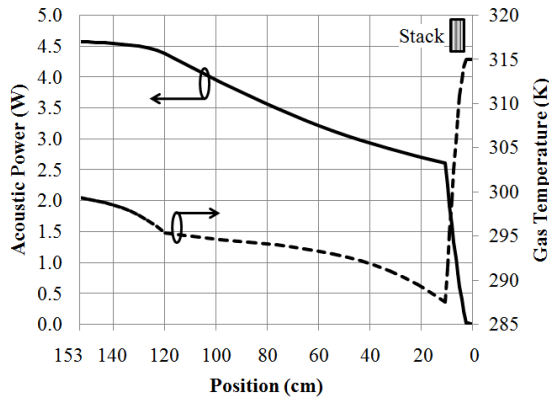
รูปที่ 6 แอมพลิจูดของความดันและความเร็วเชิงปริมาตรที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ความถี่ 75 Hz

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบอย่างง่าย โดยใช้ท่อทองแดงขนาด 1/8 นิ้ว นำมาขดเป็นวงกลม แล้วให้น้ำไหลภายในท่อเพื่อระบายความร้อนจากสารทำงานที่ไหลอยู่ภายนอก โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ทดสอบมีลักษณะแตกต่างกัน 2 รูปแบบคือแบบท่อเปลือย และแบบท่อติดครีป ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยแบบท่อติดครีปจะใช้ฝอยทองแดงมาพันรอบท่อเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน

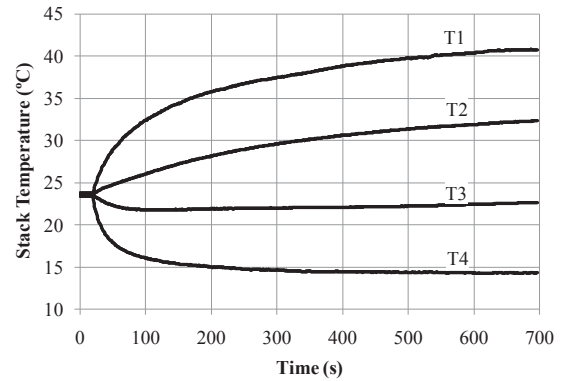
5. ผลการทดลองและอภิปรายผล

5.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 6 แสดงผลลัพธ์ของแอมพลิจูดความดันและแอมพลิจูดความเร็วเชิงปริมาตร ซึ่งที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม DeltaEC



รูปที่ 7 กำลังอะคูสติกและอุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งต่างๆ ในชุดทดสอบที่ความถี่ 75 Hz



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในสแตก (สแตกแบบตาข่ายยาว 8 ซม. ความถี่ 75 Hz)

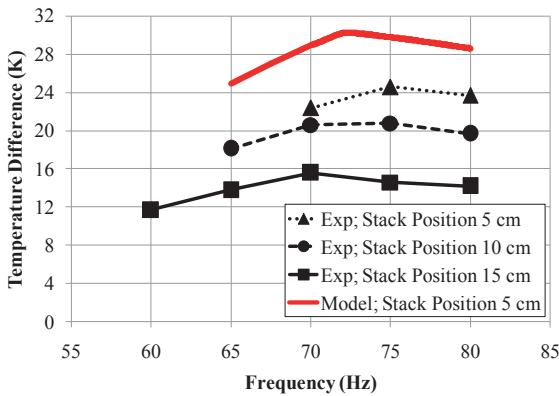
จะเห็นได้ว่า ความเร็วเชิงปริมาตรมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ปลายปิดของท่อรีโซเนเตอร์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความดันมีค่าสูงสุด เนื่องจากคลื่นที่ได้จากลำโพงมีการแกว่งไกว ดังนั้นความเร็วเชิงปริมาตรที่ตำแหน่งลำโพงจึงไม่เท่ากับศูนย์ ความดันและความเร็วเชิงปริมาตรมีเฟสแตกต่างกัน 90° หรือความเร็วสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับความดันมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของคลื่นนิ่ง

ที่บริเวณสแตก แอมพลิจูดความดันมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสแตกอยู่ในตำแหน่งที่ขวางการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งส่งผลให้แอมพลิจูดความเร็วเชิงปริมาตรเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย กำลังอะคูสติกและอุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถแสดงดังในรูปที่ 7 เมื่อลำโพงผลิตกำลังอะคูสติกและส่งไปภายในท่อรีโซเนเตอร์ กำลังอะคูสติกจะมีค่าลดลงตามความยาวท่อ และสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่า ในท่อลดมีการสูญเสียกำลังอะคูสติกน้อยกว่าในท่อตรงหรือท่อรีโซเนเตอร์ค่อนข้างมาก ส่วนกำลังอะคูสติกที่เหลือจะถูกใช้ไปในสแตก เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนจากปลายด้านเย็นไปยังปลายด้านร้อนของสแตก โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ผลของเทอร์โมอะคูสติก (Thermoacoustic Effect) ซึ่งทำให้เกิดกระแสวนของอุณหภูมิที่รวมปลายทั้งสองข้างของสแตก

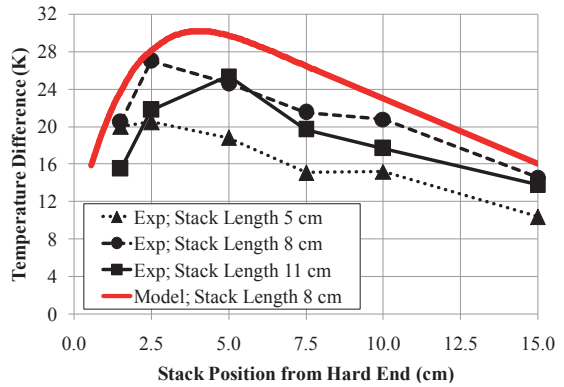
5.2 ผลการทดลองและผลการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสารทำงานภายในสแตกที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ เมื่อทดลองด้วยสแตกแบบตาข่าย ยาว 8 ซม. ที่ความถี่ 75 Hz สามารถแสดงได้ในรูปที่ 8 หลังจาก que ลำโพงปล่อยคลื่นเสียงให้กับระบบ สารทำงานภายในสแตกจะเกิดการเคลื่อนที่และถ่ายเทความร้อนเกิดผลของเทอร์โมอะคูสติกขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเกิดกระแสวนของอุณหภูมิขึ้นที่ปลายทั้งสองข้างของสแตก ซึ่งปลายของสแตกด้านที่ติดลำโพง (ปลายด้านเย็น: T_4) จะมีอุณหภูมิลดลง ส่วนปลายอีกด้าน (ปลายด้านร้อน: T_1) จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 400 วินาที อุณหภูมิปลายด้านเย็นจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว แต่อุณหภูมิปลายด้านร้อนยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีการระบายความร้อนออก จึงทำให้เกิดการสะสมของความร้อนขึ้นที่ปลายด้านนี้

นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของสารทำงานภายในสแตกค่อนข้างสม่ำเสมอซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าระบบนี้ไม่มีการเกิด Streaming หรือการไหลวนของมวลก๊าซร้อน ซึ่งอิทธิพลของปรากฏการณ์นี้จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงอย่างมาก เนื่องจากการสูญเสีย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และผลต่างอุณหภูมิของสแตกแบบตาข่าย ยาว 8 ซม. ที่ตำแหน่งสแตกต่างๆ เปรียบเทียบกับแบบจำลอง DeltaEC



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งสแตกและผลต่างอุณหภูมิของสแตกแบบตาข่าย ที่ความยาวสแตกต่างๆ เปรียบเทียบกับแบบจำลอง DeltaEC

กำลังอะคูสติกที่ไม่ก่อให้เกิดงานขึ้น แต่โดยทั่วไปปัญหาที่มักเกิดขึ้นในระบบเทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นเคลื่อนที่

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของสแตก โดยทำการทดสอบด้วยสแตกแบบตาข่ายยาว 8 ซม. เมื่อวางสแตกที่ตำแหน่งต่างกัน จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งการวางสแตกค่าหนึ่งๆ จะได้รับความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ความถี่เดียวเท่านั้น

Swift [15] ได้แนะนำวรัศมีไฮดรอลิก (r_h) ที่เหมาะสมของสแตกมีความสัมพันธ์กับระยะทะลุทางความร้อน (Thermal Penetration Depth: δ_k) หรือระยะที่ความร้อนสามารถถ่ายเทผ่านตัวกลางช่วงเวลานึง โดย r_h ที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง δ_k ถึง $2\delta_k$ ซึ่งจากนิยามของค่า $\delta_k = \sqrt{k/\pi f \rho_m c_p}$ ดังนั้นค่าความถี่ (f) จึงมีค่าแปรผกผันกับค่า r_h เมื่อเพิ่มความถี่ในระบบโดยที่ค่า r_h ของสแตกคงที่ จะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ช่วงความถี่หนึ่งเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 9

จากการทดลองยังพบอีกว่าผลต่างของอุณหภูมิยังมีค่ามากขึ้น เมื่อสแตกถูกวางอยู่ใกล้กับปลายปิดของท่อรีโซเนเตอร์ และที่ความถี่ประมาณ 75 Hz จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิมากที่สุด ดังนั้นในการทดลองหลังจากนี้จะทำการทดลองที่ความถี่ที่เหมาะสมคือ 75 Hz

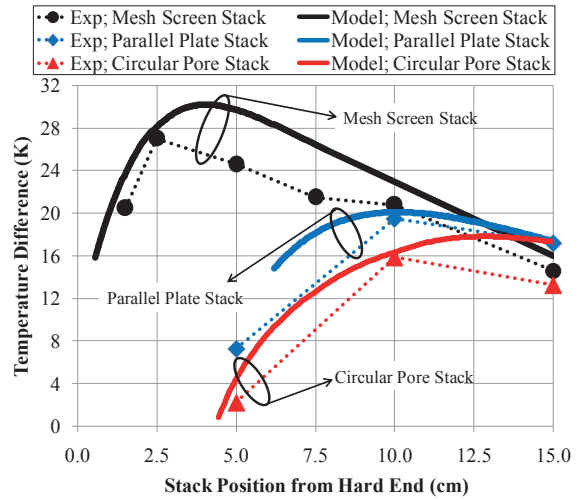
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม DeltaEC ก็ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน โดยความถี่ที่ให้ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดจากการคำนวณมีค่าประมาณ 72.5 Hz

รูปที่ 10 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณจากโปรแกรม DeltaEC แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของสแตกและความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของสแตกเมื่อใช้สแตกแบบตาข่ายที่มีความยาวแตกต่างกัน พบว่าเมื่อติดตั้งสแตกเข้าใกล้กับปลายปิดของท่อมากขึ้น จะทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด จากนั้นหากเลื่อนตำแหน่งของสแตกห่างจากปลายปิดของท่อมากขึ้น จะมีผลทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมียุ่ค่าลดลง ซึ่งแนวโน้มที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยโปรแกรม DeltaEC ทั้งนี้เนื่องจากที่ตำแหน่งใกล้ปลายปิดของท่อ แอมพลิจูดความดันจะเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความเร็วมีค่าลดลงตามธรรมชาติของคลื่นนิ่งดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นกำลังอะคูสติก ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างความดันและความเร็วดังแสดงในสมการที่ (8) จึงมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่างกึ่งกลางท่อและปลายปิดของท่อ หากวางสแตกในตำแหน่งที่มีกำลังอะคูสติกสูงสุด ก็มีผลทำให้ผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของสแตกมีค่ามากที่สุดด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อความยาวของสแตกเพิ่มขึ้น ผลต่างของอุณหภูมิก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความยาวที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ระบบสามารถใช้กำลังอะคูสติคในการทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิได้สูงขึ้น แต่ถ้าหากความยาวของสแตกมากเกินไป จะมีผลทำให้ผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างมีค่าลดลง เนื่องจากกำลังอะคูสติคมีค่าลดลงจากความดันลดที่เพิ่มสูงขึ้นตามความยาวที่มากขึ้นนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DeltaEC จะเห็นได้ว่า ผลที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ซึ่งตำแหน่งของสแตกที่เหมาะสมจากการคำนวณคือ 4 ซม. เมื่อวัดจากปลายปิดของท่อ อีกทั้ง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อสแตกถูกวางไว้ใกล้กับปลายปิดของท่อมากเกินไป

จากผลการทดลองในรูปที่ 9 และ 10 พบว่าสแตกที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบในระบบนี้ ซึ่งได้สมรรถนะในการทำความเย็นสูงสุด คือสแตกแบบตาข่าย ความยาว 8 ซม. และวางห่างจากปลายปิดของท่อเท่ากับ 2.5 ซม. ตามลำดับ ภายใต้การทำงานที่ความถี่ 75 Hz

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวางของสแตกและความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากโปรแกรม DeltaEC เมื่อใช้สแตกรูปร่างแตกต่างกัน แต่รัศมีไฮดรอลิกและความยาวเท่ากัน จะเห็นได้ว่าสแตกแบบตาข่ายสามารถสร้างผลต่างอุณหภูมิได้สูงสุด รองลงมาคือสแตกแบบแผ่น และแบบท่อ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความไม่ต่อเนื่องของวัสดุตามแนวแกนท่อที่ใช้ทำสแตกแบบตาข่าย จึงมีผลทำให้การนำความร้อนผ่านเนื้อวัสดุของสแตกเกิดขึ้นได้น้อย การสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศจึงต่ำด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับสแตกแบบแผ่นและแบบท่อ จะเห็นได้ว่าทั้งสองแบบมีความต่อเนื่องของวัสดุตลอดแนวความยาวของสแตกมากกว่า โดยสแตกแบบตาข่ายสามารถสร้างผลต่างของอุณหภูมิได้สูงถึง 27.0°C ในขณะที่สแตกแบบแผ่นและแบบท่อสามารถทำได้เพียง 19.5°C และ 15.9°C ตามลำดับ นอกจากนี้

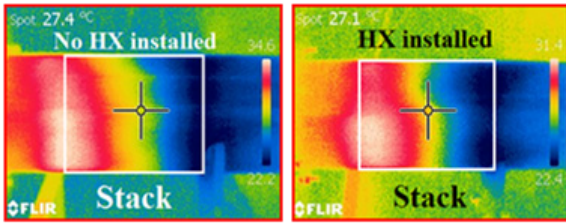


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งสแตกและผลต่างอุณหภูมิของสแตกแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับแบบจำลอง DeltaEC

ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ DeltaEC ก็สามารถทำนายผลต่างอุณหภูมิของสแตกแบบแผ่นและแบบท่อได้สอดคล้องกัน โดยตำแหน่งการวางสแตกที่เหมาะสมก็แตกต่างกันไปตามชนิดของสแตก โดยผลการคำนวณมีคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองไม่มากนัก

นอกจากนี้จากผลการทดลองในรูปที่ 8 ยังพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิปลายด้านร้อน (T_1) มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่า หากลดการสะสมของความร้อนหรือมีการระบายความร้อนออกที่ปลายด้านนี้ตลอดเวลา จะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของสแตกมีค่าเพิ่มขึ้นหรือส่งผลให้อุณหภูมิปลายด้านเย็น (T_4) ลดลงด้วย ดังนั้นต่อมาจึงทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นที่ปลายด้านร้อนของสแตกขึ้น โดยรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 12 แสดงภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด FLIR ซึ่งนำเสนอการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน สแตกเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยกรอบสี่เหลี่ยมสีขาวแสดงถึงขอบของสแตก



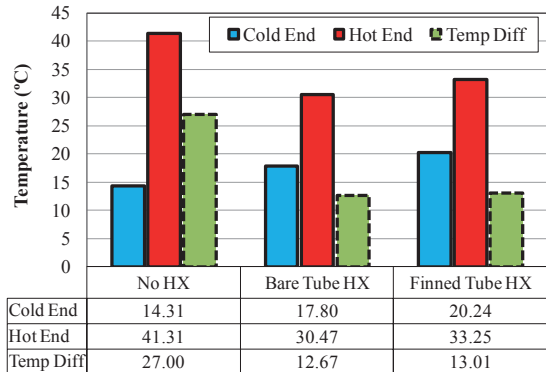
รูปที่ 12 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด FLIR แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสแตก

พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนภายในสแตกมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอจากปลายด้านร้อน (T_1 : สีแดง) ไปปลายด้านเย็น (T_4 : สีน้ำเงิน) ซึ่งอุณหภูมิ T_1 มีค่าลดลงตามหลังจากติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยลดลงจาก 34.6°C เป็น 31.4°C แต่อุณหภูมิ T_4 มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยจาก 22.2°C เป็น 22.4°C

ต่อมาได้ทำการเปลี่ยนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยติดตั้งครีบบีบซึ่งทำมาจากฝอยทองแดงให้กับท่อเปลือยดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งคาดว่าจะสามารถช่วยการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของสแตกมีค่ามากขึ้น

รูปที่ 13 แสดงผลจากการทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิและผลต่างที่ปลายทั้งสองข้างของสแตก ก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ ผลการทดลองที่ได้แสดงผลลัพธ์ตรงข้ามกับสมมติฐานข้างต้น นั่นคืออุณหภูมิทั้งปลายด้านร้อน (T_1) และอุณหภูมิปลายด้านเย็น (T_4) รวมทั้งผลต่างของอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีครีบบีบมีค่าสูงกว่ากรณีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลือย แสดงว่าครีบบีบที่ติดตั้งเพิ่มขึ้นนี้ไม่ส่งผลให้การระบายความร้อนที่ปลายของสแตกมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีผลให้สมรรถนะในการทำความเย็นของระบบลดลงด้วย

โดยรวมจะเห็นได้ว่า การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบที่ปลายด้านร้อนของสแตก มีผลทำให้อุณหภูมิตั้งแต่ปลายด้านร้อนมีค่าลดลงอย่างชัดเจน แต่



รูปที่ 13 ผลการเปรียบเทียบความสามารถในการทำความเย็น เมื่อทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติมที่ปลายด้านร้อนของสแตก

กลับทำให้อุณหภูมิที่ปลายด้านเย็นมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งเครื่องแลกเปลี่ยนแบบมีครีบบีบยังมีผลทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากอุณหภูมิปลายด้านร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีของแบบท่อเปลือย หากพิจารณาสมรรถนะในการทำความเย็นของระบบพบว่า การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของสแตกมีค่าลดลง

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถอธิบายได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงปริมาตรและความดันลด นั่นคือความเร็วเชิงปริมาตรของสารทำงานจะมีค่าลดลงเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มในระบบ ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง DeltaEC ที่ว่า เมื่อความต้านทานการไหลเพิ่มสูงขึ้น แอมพลิจูดของความดันและความเร็วเชิงปริมาตรมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้เทอร์ติแยของอุณหภูมิและกำลังอะคูสติคมีค่าลดลงด้วย อีกทั้งเมื่อทำการติดตั้งครีบบีบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็ยิ่งทำให้ความดันลดของระบบเพิ่มสูงขึ้น กำลังอะคูสติคที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนจึงน้อยลง และอุณหภูมิทางด้านเย็นของสแตกจึงมีค่าสูงขึ้น

จะเห็นได้ว่าในระบบเทอร์โมอะคูสติคมีแอมพลิจูดความดันไม่สูงมากพอ การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เพิ่มในระบบ จะส่งผลเสียมากกว่าผลดี ดังนั้นในการทำวิจัยขั้นต่อไป ผู้วิจัยจะทำการเปลี่ยนลำโพงที่สามารถสร้างแอมพลิจูดความดันได้มากกว่าลำโพงที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อที่จะสามารถศึกษาผลกระทบของการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับใช้ระบายความร้อนที่สะสมภายในระบบได้ ซึ่งคาดว่าจะช่วยปรับปรุงสมรรถนะของการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกได้ อีกทั้งจะมีการวัดกำลังอะคูสติกในระบบเพิ่มเติม เพื่อที่จะสามารถยืนยันการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นข้างต้นด้วย

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงลักษณะของสแตกที่มีผลต่อความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกแบบคลื่นนิ่งที่ใช้ลำโพงเป็นตัวขับภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยเปรียบเทียบสมรรถนะการทำความเย็นของระบบในรูปของความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของสแตกเมื่อใช้สแตกรูปร่างแตกต่างกัน ได้แก่ สแตกแบบแผ่น สแตกแบบท่อ และสแตกแบบตาข่าย ที่มีรัศมีไฮดรอลิกเท่ากัน จากผลการทดลองพบว่า ที่ความถี่ 75 Hz สแตกแบบตาข่ายซึ่งวางห่างจากปลายปิดของท่อเป็นระยะ 2.5 ซม. ให้ผลต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตกมากที่สุดประมาณ 27.0°C และสามารถสร้างอุณหภูมิลายด้านเย็นได้ถึง 14.3°C

นอกจากนี้การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายด้านร้อนของสแตกไม่ได้มีส่วนช่วยให้สมรรถนะการทำความเย็นเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าจะเกิดจากความดันลดที่สูงมากเกินไป เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดความดันของระบบ หากมีการใช้ลำโพงที่สามารถสร้างแอมพลิจูดความดันได้สูงขึ้น คาดว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการทำความเย็นของระบบได้

นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง DeltaEC พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าสอดคล้องกัน โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอด เพื่อปรับปรุงระบบ

ทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกให้มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นต่อไปได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายเขมินท์ สิงห์สุด และนางสาวเบญจมาศ สว่างวรรณวงศ์ ที่ช่วยรวบรวมข้อมูลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Palm, "Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems – A review," *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, pp. 552–563, 2008.
- [2] L. Cecchinato, M. Chiarello, and M. Corradi, "Design and experimental analysis of a carbon dioxide transcritical chiller for commercial refrigeration," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 2095–2101, 2010.
- [3] M. Bortolini, M. Gamberi, R. Gamberini, A. Graziani, F. Lolli, and A. Regattieri, "Retrofitting of R404a commercial refrigeration systems using R410a and R407f refrigerants," *International Journal of Refrigeration*, 2015 (in Press).
- [4] 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.
- [5] P. Saechan, Z. Yu, and A. J. Jaworski, "Design and experimental evaluation of a travelling wave thermoacoustic cooler driven by a standing wave thermoacoustic engine," in *Proc. 19th International Congress on Sound and Vibration*, Vilnius, Lithuania, 2012.
- [6] S. L. Garrett, J. A. Adefe, and T. J. Hofler, "Thermoacoustic Refrigerator for space



- Applications,” *Journal of Thermophysics and Heat Treansfer*, vol. 7, 1993.
- [7] M. E. Poese, W. M. Robert, and S. L. Garret, “Thermoacoustic refrigeration for ice cream sales,” *Journal of Acoustic Society of American*, vol. 107, pp. 2480–2486, 2004.
- [8] J. Ren, E. Luo, L. Zhang, J. Hu, and W. Dai, “A high-efficiency traveling-wave thermoacoustic refrigerator for cryogenic cooling operation: thermodynamic design and preliminary experiment,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1434, pp. 343–350, 2012.
- [9] S. Ballister and D. McKelvey, “Shipboard electronics thermoacoustic cooler,” *Journal of Acoustic Society of America*, vol. 98, pp. 3540, 1995.
- [10] S. Srikituwan, “Optimal design of thermoacoustic cooling system using genetic algorithms,” Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut’s Insitutute of Technology North Bangkok, 2007.
- [11] A. Sakaguchi, S.I. Sakamoto, Y. Tsuji, and Y. Watanabe, “Energy conversion efficiency improvement of a thermoacoustic cooling system -The influence of a lamination mesh on cooling effect,” in *Acoustics 08*, Paris, 2008.
- [12] P. Kanjanawadee, “Performance Improvement of a Thermoacoustic Refrigerator using a Spiral Stack,” Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Kasetsart University, 2009.
- [13] B. Ward, J. Clark, and G. W. Swift, “Design Environment for Low-Amplitude Thermoacoustic Energy Conversion,” DELTAEC version 6.2: Users Guide, Los Alamos National Laboratory, 2008,
- [14] N. Rott, “Damped and Thermally Driven Acoustic Oscillations in Wide and Narrow Tubes,” *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, vol. 20, pp. 230–243, 1969.
- [15] G. W. Swift, “Thermoacoustic Engines,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 84, pp. 1145–1180, 1988.