

**การศึกษาลักษณะของสแตกที่มีผลต่อการทำความเย็นของ
เครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก**
**The Effect of Stack Geometry on the Cooling Performance of
Thermoacoustic Refrigerator**

พงศกร จงเพิ่มวัฒนะผล¹, อิศเรศ ฐชกัลยา^{1*}, กฤตภาส ภริมย์พร¹ และ กฤษณะ ปะโกสันตัง¹

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12120

โทร 0-25643001-9 ต่อ 3276 , โทรสาร 0-25643010

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยทำการศึกษาอิทธิพลของลักษณะสแตกที่มีต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก ซึ่ง สแตกที่ศึกษา ได้แก่ สแตกแบบสไปรอล และสแตกแบบทอกลม โดยขนาดความยาวของสแตกซึ่งมีผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันตก คร่อมสแตก และตำแหน่งการวางของสแตกในชุดทดสอบ จะถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้ ในที่นี้ สแตกจะถูกทดสอบภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศของคลื่นนิ่ง และใช้ลำโพงเป็นตัวขับ จากผลการทดลอง พบว่าสแตกแบบสไปรอลจะให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงกว่าแบบทอกลม และเมื่อความยาวของสแตกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตกเพิ่มขึ้นด้วย ผลที่ได้จากการทดลองนี้ จะถูกนำไปใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกให้สูงขึ้นต่อไป

คำหลัก: เครื่องทำความเย็น / เทอร์โมอะคูสติก / สแตก / คลื่นนิ่ง

Abstract

This research aims to design and construction of a cooling thermoacoustic. The effect of stack geometry on the cooling performance of thermoacoustic refrigerator is conducted in this work. The geometries of spiral and circular stacks are investigated. In addition, the length of the stack which directly affects the temperature and pressure drop across the stack, and the position of stack located in the rig are also examined in this study. The stacks here are tested under atmospheric pressure with a standing wave manner. A loud speaker is used as driver to generate the oscillating wave. In the experimental results, the temperature difference across spiral stack is higher than that circular stack. As the length of stack increases, this temperature gradient also increases as well. These preliminary experimental results will be used to improve the cooling efficiency of the thermoacoustic refrigerator in the future.

Keywords: Refrigerator / Thermoacoustics / Stack / Standing wave

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกมีอากาศที่ร้อน ทำให้มนุษย์ได้คิดค้นระบบทำความเย็นขึ้น เพื่อความสะดวกสบายเป็นหลัก และระบบทำความเย็นที่ใช้งานกันอยู่ คือ ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ ซึ่งใช้ระบบทำความเย็นแบบอัดไอกันอย่าง

กว้างขวางทั่วโลก เพราะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพการทำงานดี การทำงานของระบบไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสีย คือ การใช้พลังงานปริมาณมากของเครื่องอัดคอมเพรสเซอร์ และยังส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน หรือที่เรียกกันว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก และเมื่อสารทำความเย็นแตก

ตัวในชั้นบรรยากาศนั้น ยังก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้อีกด้วย จะเห็นได้ว่า สารทำควา มเย็นจำพวกนี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อโลกและสิ่งแวดล้อมอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีการคิดค้นเทคโนโลยีการทำควา มเย็นแบบใหม่ที่จะส่งผลกระทบต่อโลกน้อยที่สุด

เทอร์โมอะคูสติกเป็นเทคโนโลยีใหม่ ซึ่งอยู่ในระหว่างวิจัยและพัฒนา โดยหลักการทำงานจะเปลี่ยนพลังงานเสียงหรือพลังงานกล สลับให้อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถนำไปสร้างเครื่องทำความร้อนหรือทำความเย็นได้ โดยมีจำนวนอุปกรณ์ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ และมีความต้องการพลังงานที่ป้อน ให้ไม่มาก และไม่จำเป็นต้องใช้สารทำความเย็น อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีนี้ยังไม่เป็นที่กว้างขวางมากนัก เพราะประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกยังต่ำสู่ระบบทำความเย็นแบบอัดไอไม่ได้ ทำให้ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกกันอย่างกว้างขวาง

2. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มหาวิทยาลัย Penn State ร่วมกับบริษัท Ben & Jerry [1] ได้ผลิตเครื่องทำความเย็นต้นแบบ ขึ้นเพื่อใช้เป็น ตู้เก็บไอศกรีมเย่หื้อ Ben & Jerry โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดก๊าซที่ปล่อยที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน โดยเครื่องมีขนาดกว้าง 25.4 ซม. สูง 48.3 ซม. สามารถทำความทำความเย็นได้ -24.6°C ที่กำลัง 119 วัตต์

สว่างทิพย์ และคณะ [2] ได้สร้างชุดทดสอบการทำความเย็น โดยใช้ลำโพงขนาด 4 นิ้ว 10 วัตต์ ต่อเข้ากับท่อแก้วยาว 55 ซม. และมีจุกยางอุดหลอดแก้วที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งใช้สแตกแบบสไปรอล พบว่า ปลายของสแตกทั้ง 2 ด้านมีความแตกต่างของอุณหภูมิ 4°C ที่ความถี่ 360 Hz

Yu และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่า δ_v / r_h ของสแตกใน เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก ที่มีผลต่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ พบว่า ถ้าค่าอัตราส่วนของ δ_v / r_h ของสแตก มีค่าอยู่ระหว่าง 3-5 จะให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ สูงที่สุด โดยที่ δ_v คือ viscous penetration depth และ r_h คือ ค่ารัศมีไฮดรอลิก

Sakaguchi และคณะ [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดตาข่าย (mesh) ที่นำมาทำสแตกที่มีผลต่ออุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่า ที่ค่า mesh เท่ากับ 10, 20 และ 40 สามารถลด อุณหภูมิ ได้สูงสุด 1.4, 2.2 และ 2°C ตามลำดับ ที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดเสียง 1.74, 1.70 และ 1.66 เมตร ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้ mesh ที่ละเอียดเกินไป จะส่งผลให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากความดันลดคร่อมสแตกที่สูงเกินไป นอกจากนี้ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดอุณหภูมิที่แตกต่างกันสูงสุด จะมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดเสียงมากยิ่งขึ้น เมื่อ mesh ละเอียดมากยิ่งขึ้น

ภาวิชัย และ เกรียงไกร [5] ได้ทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน ภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยใช้สแตกแบบสไปรอล และมีลำโพงเป็นแหล่งกำเนิดเสียงแบบคลื่นนิ่งในท่อยาว 25 ซม. พบว่า สามารถสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิ คร่อมสแตก ได้สูงถึง 23.5°C ที่ความถี่ 331 Hz ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า การทดลองส่วนใหญ่ใช้สแตกแบบสไปรอล ทั้งนี้ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ประการ อาทิเช่น ลักษณะรูปร่าง ของสแตก, รัศมีไฮดรอลิก (r_h) แต่ยังไม่ค่อยมีใครนำสแตกแบบอื่น มาทำการเปรียบเทียบกัน จึงเป็นที่มาของการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ที่จะทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของสแตกแบบสไปรอล (Spiral Stack) และสแตกแบบทอกลม (Circular Stack) มาเปรียบเทียบกับ รวมถึงขนาดความยาวของสแตก ซึ่งมีผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิ นอกจากนี้ ตำแหน่งการวางของสแตก และค่าความถี่ที่ใช้ในชุดทดสอบก็จะถูก พิจารณาในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจะถูกเปรียบเทียบกับแบบจำลอง deltaEC ของ Ward และคณะ [6] ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

3. ระเบียบวิธีวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลอง deltaEC ของ Ward และคณะ [6] จะอ้างอิงมาจากทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้นของ Rott [7] โดยตัวแปรอะคูสติกสามารถประมาณได้ จากสมการดังต่อไปนี้

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

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

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

และ

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

เมื่อ p คือ ความดัน

U คือ ความเร็วเชิงปริมาตร (Volumetric Velocity)

T คือ อุณหภูมิ

ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซ

ตัวห้อย m และ 1 จะแสดงถึงค่าเฉลี่ย และจำนวนเชิงซ้อนของแอมพลิจูดของค่าแอมพลิจูด ส่วน $\text{Re}[-]$ คือ จำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน และ ω คือ ค่าความถี่เชิงมุม

นำค่าตัวแปรอะคูสติกแทนลงในสมการโมเมนตัม สมการความต่อเนื่อง และสมการพลังงาน จะสามารถจัดรูปใหม่ในเทอมของอะคูสติกได้ดังนี้

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

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

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

เมื่อ $\dot{H}_2$ คือ อัตราการไหลของพลังงาน

c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

γ คือ ค่าอัตราส่วนความจุความร้อนจำเพาะ

k คือ ค่าการนำความร้อน

A คือ พื้นที่หน้าตัด

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน

σ คือ ค่า Prandtl number

สำหรับสแตกแบบสไปรอล ฟังก์ชันรูปร่างของความหนืด f_v และฟังก์ชันรูปร่างของการนำความร้อน f_k สามารถหาได้จากสมการ

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

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

เมื่อ $2y_0$ จะมีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างแผ่นบาง และ i หมายถึง ส่วนของจำนวนจินตภาพ ส่วน $\delta_v = \sqrt{2\mu/\omega\rho_m}$ และ $\delta_k = \sqrt{2k/\omega\rho_m c_p}$ คือ ค่า viscous penetration depth และ thermal penetration depth ซึ่งค่าเหล่านี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงระยะที่โมเมนตัม และความร้อนสามารถเคลื่อนที่ไปได้ ในหนึ่งรอบของการเคลื่อนที่

สำหรับสแตกแบบท่อกลม ฟังก์ชัน f_v และฟังก์ชัน f_k สามารถคำนวณได้จาก

$$f_v = \frac{2J_1[(i-1)r_0/\delta_v]}{(i-1)(r_0/\delta_v)J_0[(i-1)r_0/\delta_v]} \quad (10)$$

$$f_k = \frac{2J_1[(i-1)r_0/\delta_k]}{(i-1)(r_0/\delta_k)J_0[(i-1)r_0/\delta_k]} \quad (11)$$

เมื่อ $2r_0$ จะมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดเล็กๆที่อยู่ภายในสแตกแบบท่อ ส่วน J_0 คือ ค่าอนุพันธ์อันดับ 0 ของฟังก์ชัน Bessel และ J_1 คือ ค่าอนุพันธ์อันดับ 1 ของฟังก์ชัน Bessel

อินทิเกรตสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (7) เพื่อหาผลเฉลยของ p_1 , U_1 และ T_m ที่เปลี่ยนแปลงตาม ระยะ dx โดยใช้วิธีของ Newton-Raphson และ Rung Kutta โดยการคำนวณจะแบ่งระบบออกเป็นช่วงย่อย ๆ ซึ่งคำตอบที่ได้จากขั้นส่วนย่อยแรกจะเป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณขั้นส่วนย่อยถัดไปอย่างต่อเนื่อง ถ้าผลเฉลยที่ได้ไม่สอดคล้องกับค่าขอบที่กำหนดก็จะมีการคำนวณซ้ำ อีกโดยการคำนวณนี้ จะ เลือกใช้แบบจำลอง DeltaEC มาช่วย

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

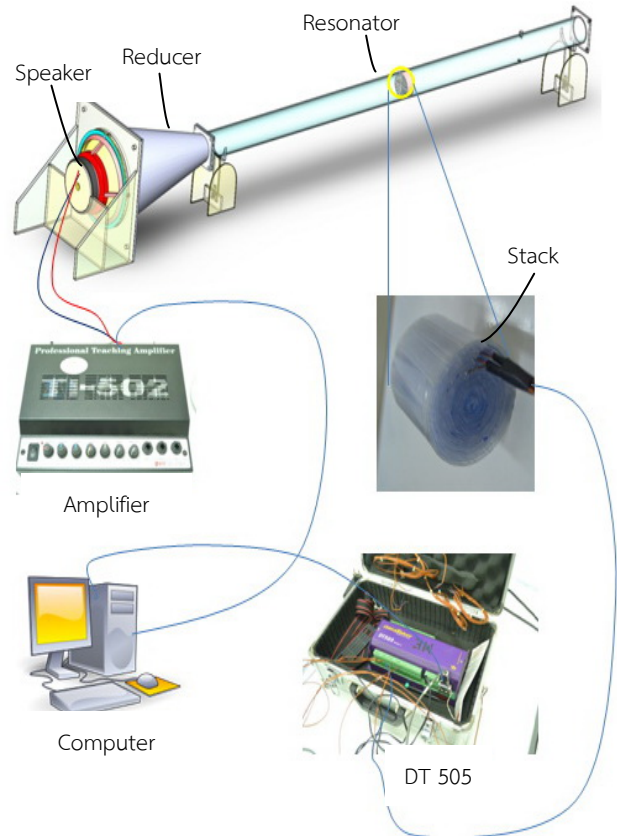
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาลักษณะของสแต็กที่มีผลต่อการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย ลำโพงขนาด 8 นิ้ว 120 วัตต์, ท่อลดขนาดจาก 18 ซม. เป็น 5.4 ซม. ยาว 33 ซม., ท่อรีโซเนเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 ซม. ยาว 120 ซม., Amplifier, สแต็กทำจากพลาสติกใส ขนาด 3, 5 และ 8 เซนติเมตร, Data Taker DT 505 และ คอมพิวเตอร์

ในการทดลองจะใช้ สายเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K จำนวน 4 เส้น วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสแต็ก โดยสแต็กจะถูกติดตั้งในเครื่องทำความเย็นที่ระยะเริ่มต้น 20 ซม. ห่างจากปลายท่อ จากนั้นจึงทำการปล่อยคลื่นความถี่คงที่ และ เก็บค่าอุณหภูมิโดยเครื่อง Data Taker ทำการวัดจนกว่าอุณหภูมิจะคงที่ หลังจากนั้น ทำการทดลองซ้ำแบบเดิม โดยการเปลี่ยนระยะการวางสแต็กจากเดิม 20 ซม. เป็น 40, 60, 80 และ 100 ซม. ตามลำดับ และทำการเพิ่มความถี่จาก 60 Hz จนถึง 100 Hz โดยสแต็กที่ใช้ทดสอบมีความยาว 3, 5 และ 8 ซม. ตามลำดับ และ ชนิดของสแต็ก ที่ใช้ในการเปรียบเทียบได้แก่ แบบ สไปรอล และ แบบท่อ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2

4. ผลและการวิจารณ์ผล

4.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลอง

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า คลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นใน ชุดทดสอบนี้ มีความยาวคลื่นน้อยกว่าครึ่งลูกคลื่น โดยจุดบัพของความเร็วเชิงปริมาตรจะอยู่ที่ปลายปิด ส่วนด้านลำโพงซึ่งเคลื่อนไหวแกว่งไกว จะมี ความเร็วเชิงปริมาตรไม่เท่ากับศูนย์ และจุดบัพของความดันจะอยู่ที่ตำแหน่งความเร็วเชิงปริมาตรสูงสุด นอกจากนี้ค่า $Re[p_1]$ จะมีค่ามากกว่าค่า $Im[p_1]$ ค่อนข้างมาก ในทำนองตรงกันข้ามค่า $Im[U_1]$ จะมีค่ามากกว่าค่า $Re[U_1]$ ค่อนข้างมาก นั้นหมายความว่า ความแตกต่างของมุมระหว่างเวกเตอร์ความดัน และเวกเตอร์ความเร็วเชิงปริมาตรมีค่าประมาณ 90° ซึ่งเป็นพฤติกรรมของคลื่นนิ่ง นอกจากนี้ สแต็กซึ่งมีรูพรุนจำนวนมาก จะก่อให้เกิดความดันตกคร่อมสูง ส่งผลให้แอมพลิจูดความเร็วเชิงปริมาตรลดลง



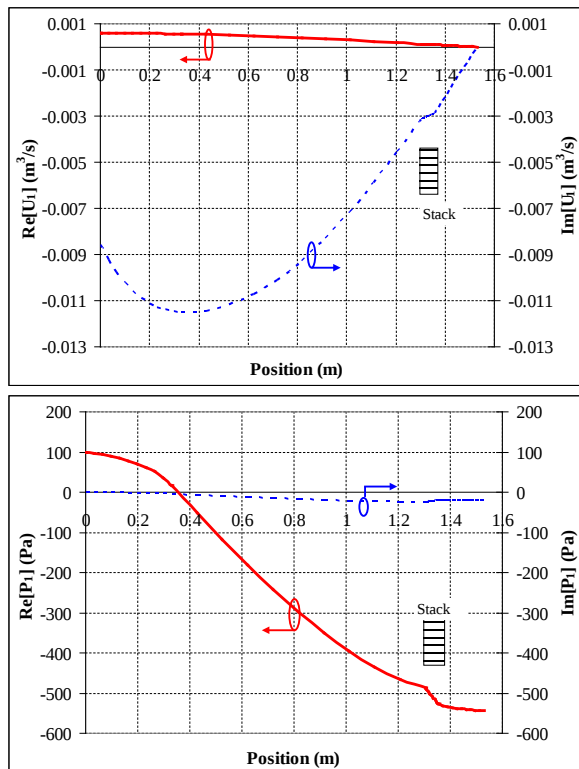
รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



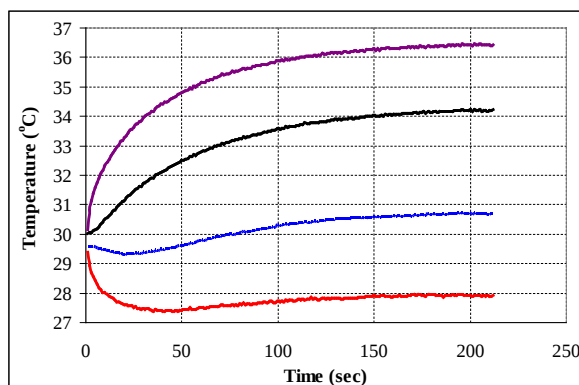
รูปที่ 2 สแต็กแบบสไปรอล (ซ้าย) และสแต็กแบบท่อ (ขวา)

4.2 ผลการทดลอง

ทันทีที่เริ่มเดินชุดทดสอบ อุณหภูมิปลายสแต็กด้านที่ติดลำโพงจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนอุณหภูมิปลายสแต็กด้านตรงข้ามก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลของเทอร์โมอะคูสติก (thermoacoustic effect) ดังแสดงในรูปที่ 4 ที่เวลาประมาณ 50 วินาที อุณหภูมิด้านเย็นเริ่มมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากถึงขีดจำกัดการระบายความร้อนออก หลังจากนั้น อุณหภูมิจะถูกล็อกเข้าสู่สภาวะสมดุล นอกจากนี้ อุณหภูมิที่กระจายตัวภายในสแต็กจะค่อนข้างสม่ำเสมอ นั้นหมายความว่า การถ่ายเทความร้อนภายในสแต็ก จะได้รับอิทธิพลของการนำความร้อนเป็นหลัก ปราศจากอิทธิพลของการไหลของมวล เนื่องจาก streaming ซึ่งเป็นจุดด้อยของระบบเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของระบบคลื่นนิ่ง

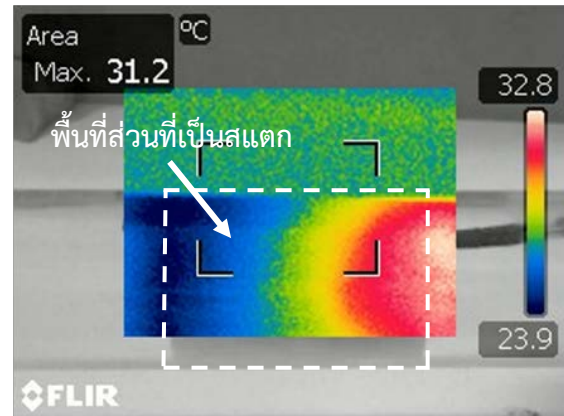


รูปที่ 3 แอมพลิจูดของความดันและความเร็วเชิงปริมาตรที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในชุดทดสอบที่ความถี่ 75 Hz



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในสแตกจากการทดลองของสแตกแบบสไปรอลยาว 8 ซม. 75 Hz

นอกจากนี้ เพื่อให้เห็นภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสแตกเพิ่มมากยิ่งขึ้น จึงได้ ทำการถ่ายภาพบริเวณสแตกด้วยกล้องอินฟราเรด ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเส้นประแสดงขอบเขตของสแตก จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแกนมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4 แต่เป็นที่น่าสนใจว่าที่บริเวณศูนย์กลางของสแตกจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่ผิวท่อ ทั้งนี้ เนื่องจากความเร็วในบริเวณศูนย์กลางมีค่ามากกว่าบริเวณที่ผิวท่อ เนื่องจากอิทธิพลของชั้นขอบผิวท่อ

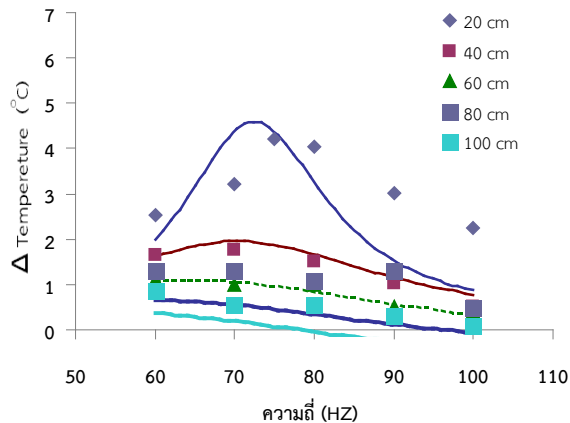


รูปที่ 5 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรดของสแตกแบบสไปรอลยาว 8 ซม. 75 Hz

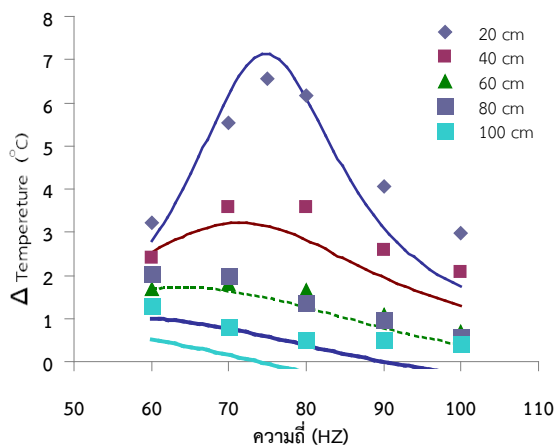
4.3 ผลของความถี่และตำแหน่งการวางสแตก

โดยความถี่ในระบบที่สูงจะมีผลทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมากยิ่งขึ้น แต่ขนาดช่องว่างภายในสแตกก็จะต้องแคบตาม ส่วนตำแหน่งการวางสแตกที่เหมาะสม ก็จะขึ้นอยู่กับความเร็วเชิงปริมาตร ถ้าแอมพลิจูดความเร็วมีค่าสูง การถ่ายเทความร้อนก็จะสูงตาม แต่การสูญเสียจากความดันลดก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยสภาวะที่เหมาะสมนี้ ก็จะแตกต่างกันไป ตามลักษณะรูปร่างของระบบ

จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงผลของความถี่และตำแหน่งการวางสแตกที่มีผลต่ออุณหภูมิคอมมอนสแตกพบว่า ความถี่ที่ให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ประมาณ 75 Hz และสแตกวางที่ตำแหน่ง 20 ซม. ห่างจากท่อปลายปิด จะให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งมีค่าเป็น 4.2 และ 6.6 องศาเซลเซียส สำหรับสแตกแบบสไปรอล ขนาด 3 และ 5 ซม. ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งการวางสแตกที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ อาจจะมีค่าน้อยกว่า 20 ซม. ก็ได้ ซึ่งจะต้องมีการศึกษาทดลองเพิ่มเติมต่อไป ส่วนผลจากแบบจำลอง DeltaEC ดังแสดงด้วยเส้นต่าง ๆ จะเห็นว่า แนวโน้มของผลการคำนวณที่ได้ สอดคล้องกับผลการทดลอง ถึงแม้ว่า จะมีความแตกต่างบางช่วงอยู่บ้าง แต่โดยรวมก็ยอมรับได้ เนื่องจาก แบบจำลอง DeltaEC พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นหนึ่งมิติ แต่ผลการทดลองในรูปที่ 4 แสดงถึงอิทธิพลของการเคลื่อนที่ในแกนขวางของคลื่น นอกจากนี้ การประมาณค่าของตัวแปรต่าง ๆ ก็มีผลต่อความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับผลต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตกสไปรอลขนาด 3 ซม. ที่ตำแหน่งการวางสแตกต่าง ๆ เปรียบเทียบกับแบบจำลอง DeltaEC



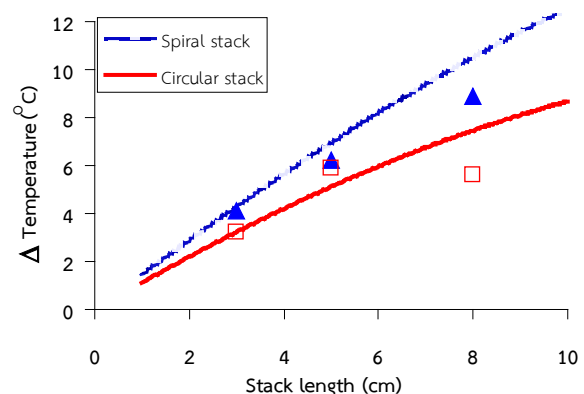
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับผลต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตกสไปรอลขนาด 5 ซม. ที่ตำแหน่งการวางสแตกต่าง ๆ เปรียบเทียบกับแบบจำลอง DeltaEC

4.4 ผลของความยาวของสแตกและชนิดของสแตก

จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของสแตกแบบสไปรอล และสแตกแบบท่อที่ขนาดความยาวต่าง ๆ โดยในที่นี้ จะทดลองที่ความถี่ 75 Hz เนื่องจากจะให้ผลต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตกสูงที่สุด ดังจากการทดลองที่แล้ว เส้นที่ปรากฏในรูปคือผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง DeltaEC ซึ่งจะเห็นว่า ที่สภาวะคงตัว ขณะที่ความยาวของสแตกเพิ่มมากขึ้น ผลต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตกยิ่งเพิ่มสูงขึ้นตาม แต่ผลต่างของอุณหภูมินี้จะเพิ่มขึ้นถึงค่า ๆ หนึ่งแล้วจะลดลง มีลักษณะโค้งคว่ำ (ไม่ได้แสดงในรูป) เนื่องจากความยาวของสแตกที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิด

กำลังอะคูสติก (acoustic power) มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็จะเพิ่มความดันลดด้วย

จากการทดลอง สแตกแบบสไปรอลขนาด 8 ซม. ให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 8.9°C ส่วนสแตกแบบท่อที่มีความยาว 8 ซม. จะให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดได้เพียง 5.6°C ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของรัศมีไฮดรอลิก (r_h) ของสแตกที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสแตก กล่าวคือ ถ้า r_h มีค่าน้อย ค่าความแตกต่างอุณหภูมิคร่อมสแตกที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก โดยสแตกแบบสไปรอลนี้มีรัศมีไฮดรอลิกประมาณ 1 มม. ส่วนสแตกแบบท่อจะมีรัศมีไฮดรอลิกที่ใหญ่กว่า คือประมาณ 1.5 มม. จึงทำให้สแตกแบบสไปรอลสามารถสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิได้สูงกว่าสแตกแบบท่อ นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Swift [8] แนะนำว่า รัศมีไฮดรอลิกควรจะมีค่า อยู่ระหว่าง $2\delta_k$ ถึง $4\delta_k$ จึงจะให้ผลต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตกสูงสุด ดังนั้นค่า r_h ควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1.2 มม. จึงจะเหมาะสม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวของสแตก กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตก ทั้งแบบสไปรอลและแบบท่อ ที่ค่าความถี่ 75 Hz

5. สรุปผล

จากการศึกษาและทดลองเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยใช้สแตก 2 ชนิด คือ สแตกแบบสไปรอล (Spiral Stack) และสแตกแบบท่อ (Circular Stack) ซึ่งมีขนาดต่างๆ คือ 3, 5 และ 8 ซม. ทำการทดลองที่ความถี่และตำแหน่งการวางของสแตกต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษา ปัจจัยที่มีผล ต่อค่าความแตกต่างอุณหภูมิ คร่อมสแตกนั้น ๆ ซึ่งจากการทดสอบ

พบว่า ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับชุดทดสอบนี้คือ 75 Hz และตำแหน่งการวางสแตกที่เหมาะสมควรวางห่างไม่เกิน 20 ซม. จากปลายท่อปิด ส่วนสแตกที่มีความยาวมาก จะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิคร่อมสแตกสูงกว่า และสแตกแบบสไปรอลจะทำให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิได้ดีกว่าสแตกแบบท่อกลม ทั้งนี้เพราะ รัศมีไฮดรอลิกที่เล็กกว่า จึงทำให้ผลของอะคูสติกเกิดขึ้นได้ดีกว่า ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ที่ได้ทำการทดลองนั้น ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง DeltaEC ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่อนข้างสมเหตุสมผล และผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะถูกนำไปต่อยอดสำหรับการ ออกแบบเครื่องทำความเย็นให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sounds Cool! The Ben & Jerry's Project, Retrieved: 1 August 2010, from Penn State University, <http://www.acs.psu.edu/thermoacoustic/refrigeration/benandjerrys.htm>.
- [2] สว่างทิติย์ ศรีกิจสุวรรณ , ปุณยศ วัลลิกุล และสุวัฒน์ กุลธนปรีดา (2547). การศึกษาเชิงทดลองการทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก , การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย , ครั้งที่ 18
- [3] Yu, Z.B., Li, Q., Chen, X., Guo, F.Z. and Xie, X.J., "Experimental investigation on a thermoacoustic engine having a looped tube and resonator", Cryogenics, Vol. 45, pp. 566-571, 2005.
- [4] Sakaguchi, A., Sakamoto, S.-I., Tsuji, Y. and Watanabe, Y., "Energy conversion efficiency improvement of a thermoacoustic cooling system – The influence of a lamination mesh on colling effect-", Acoustic Paris, 2008.
- [5] ภาวิชัย กาญจนาวดี และ เกรียงไกร อัครมาศบันลือ (2552).การทดสอบสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก , การประชุมวิชาการเครือ ข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย , ครั้งที่ 23
- [6] Ward, B., Clark, J. and Swift, G.W., Design Environment for Low-Amplitude Thermoacoustic Energy Conversion, DELTA EC version 6.2: User Guide, Los Alamos National Laboratory, 2008.
- [7] Rott, N., "Thermally Driven Acoustic Oscillations, Part III: Second-order Heat Flux", Journal of Applied Mathematics and Physics ZAMP, Vol 26, pp. 43-49, 1975.
- [8] Swift, G.W., "Thermoacoustic Engines", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 84, pp. 1145-1180, 1988.