



การศึกษาการทำความเย็นด้วยคลื่นเสียง

STUDY OF SOUND WAVE COOLING

สุรัชย์ นรพิชัย¹, วรณัฐ แจ็งสว่าง², นพพล บังเมือง³

¹ หลักสูตรการจัดการเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

² คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

³ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยเชิงการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยอาศัยแรงดันอากาศแบบคลื่นเสียงทำให้เกิดการสั่นพ้องในหลอดเสียงแบบคลื่นนิ่ง ปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกเกิดขึ้นเมื่อเกิดการสั่นพ้องในท่อเสียง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่องระหว่างปลายทั้งสองข้างของรีเจนเนอเรเตอร์ ชุดทดลองที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ท่อเสียง รีเจนเนอเรเตอร์ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและสารตัวกลางในท่อเสียง คือ อากาศ ผลจากการศึกษาพบว่า ความถี่ของคลื่นเสียงรูปไซน์ที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดเสียง (ลำโพง) ขนาด 145 เฮิร์ตซ์ มีกำลัง 6.25 วัตต์ สามารถสร้างสภาวะคลื่นนิ่งภายในท่อเสียงของชุดทดลองได้ และมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นถึง 4 องศาเซลเซียส ที่สภาวะการเกิดคลื่นนิ่งวัดความดันอากาศภายใน Compliance volume (P_H) และภายนอก Compliance volume (P_L) พบว่าอัตราส่วน P_H/P_L มีขนาดเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 3 เท่า และความดันอากาศมีเฟสต่างกันประมาณ 90 องศา

คำสำคัญ: เทอร์โมอะคูสติก, ตู้เย็น, คลื่นเสียง

Abstract

This study focused on the experiment of thermoacoustic refrigerator that used a sound pressure wave to produce the air oscillating as a standing wave in resonator tube. A thermoacoustic phenomenon appears when there is fluid oscillating as a standing wave. This oscillation results continuous heat transfer between two end of the regenerator. A thermoacoustic demonstration device constructed in this study consists of acoustic driver, resonator tube, regenerator and heat exchangers. The experimental results showed that the frequency of 145 Hz and 6.25 W of power can produce a standing wave in the resonator tube, and the temperature difference between the hot side and cold side was 4 °C. On stage of the standing wave, the amplitude of pressure wave inside of the compliance volume (P_H) is greater than the pressure outside (P_L) of the resonator about 3 times. The phase of the pressure inside the compliance volume lags the phase of the pressure outside by 90° at resonance.

Keywords: Thermoacoustic, Refrigerator, Sound wave

บทนำ

คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาวรูปแบบหนึ่ง ซึ่งหูของเราสามารถได้ยินเสียงได้ โดยคลื่นนี้มีความถี่ตั้งแต่ประมาณ 20-20,000 เฮิรตซ์ เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงเกิดการสั่นสะเทือนจะเกิดการบีบอัด-คลายของสารตัวกลาง เช่น อากาศในบริเวณรอบๆ แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงและเคลื่อนที่ออกไปโดยรอบในลักษณะรูปคลื่น ในขณะที่คลื่นเสียงแพร่กระจายไปในสารตัวกลางจะมีการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิและความหนาแน่นของสารตัวกลางเกิดขึ้นร่วมด้วยเสมอ ในชีวิตประจำวันเราไม่สามารถรู้สึกถึงการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ง่ายนัก เพราะว่าผลของมันเกิดขึ้นน้อยมากจนเราสังเกตไม่ได้ ปรากฏการณ์ที่คลื่นเสียงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานความร้อน จะเรียกว่าปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก (Thermoacoustic effects) การยกระดับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้มีขนาดสูงขึ้นจะสามารถนำปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ไปสร้างเครื่องยนต์ความร้อน/ทำความเย็น (Prime movers / Refrigerator) ได้ โดยเครื่องยนต์ความร้อน หมายถึง เครื่องต้นกำลังที่ใช้ความร้อนสร้างคลื่นเสียง และเครื่องทำความเย็นหมายถึงเครื่องที่ใช้คลื่นเสียงมาสร้างความเย็น

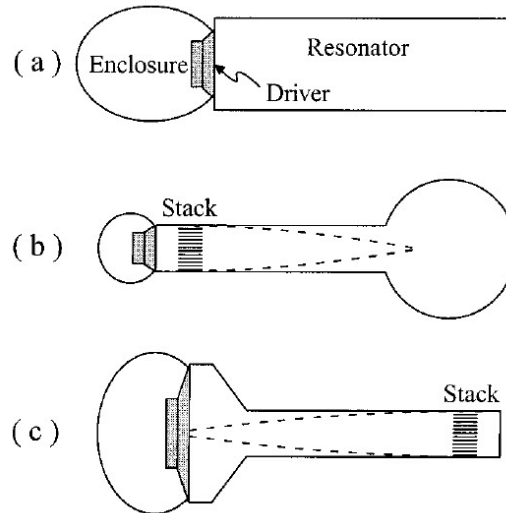
ในช่วงเวลา 25 ปี ที่ผ่านมาเริ่มมีการออกแบบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกมากขึ้นหลังจาก Rott สามารถสร้างสมการ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานเสียงได้ [1] ทำให้การวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ง่ายขึ้น เช่น สเตก/รีเจนเนอเรเตอร์ ท่อเสียง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น การพัฒนาเครื่องทำความเย็นโดยใช้คลื่นเสียงแบ่งเป็น 2 แนวทาง คือ 1) การใช้คลื่นนิ่ง (Standing wave) พบได้ในงานวิจัยของ [2-4] และ 2) การใช้คลื่นเดินทาง (Traveling wave) พบได้ในงานวิจัยของ [5,6] สิ่งที่น่าสนใจของการทำความเย็นแบบนี้คือการไม่ต้องใช้สารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างเช่นระบบอัดไอระเหย (Vapor compression) อย่างไรก็ตามการพัฒนากระบวนการทำความเย็นแบบนี้ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นและประสิทธิภาพของระบบ

ยังต่ำกว่าระบบที่ใช้ในปัจจุบันมาก

การศึกษากระบวนการทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกจนถึงปัจจุบัน ส่วนใหญ่มีแนวคิดในการพัฒนาแบบใช้สเตกเป็นตัวดูดความร้อนโดยมีองค์ประกอบคือ แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ท่อเสียง สเตก เป็นหลัก โดยจะบรรจุอยู่ภายในพื้นที่ปิดทั้งหมด แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงจะถูกวางไว้ปลายด้านหนึ่งของท่อเสียงและให้ปลายท่อเสียงอีกด้านหนึ่งปิดไว้รูปแบบนี้จะใช้แนวคิดแบบคลื่นนิ่งทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ของอากาศภายในท่อเสียง บ่อยครั้งอากาศภายในใช้การอัดก๊าซฮีเลียมหรืออาร์กอนที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศแทน โดยจะต้องให้ความดันของก๊าซทั้งหน้าและหลังแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงเท่ากัน ความถี่การสั่นของแหล่งกำเนิดเสียง เพื่อให้เกิดการสั่นพ้องคำนวณได้จาก $f = v/\lambda$ เมื่อ v คือความเร็วการเดินทางของคลื่นเสียงในสารตัวกลาง และ λ คือความยาวคลื่นเสียง ทั้งนี้ท่อเสียงจะมีความยาวได้สั้นที่สุดเท่ากับ $\lambda/4$ เมื่อสเตกจะต้องวางในตำแหน่งที่มีแรงดันอากาศสูงสุดคือบริเวณ Pressure antinode (ภาพที่ 1 แนวเส้นประแสดงขนาดแรงดันอากาศที่เกิดจากคลื่นเสียงภายในท่อเสียง) ยกตัวอย่างในภาพที่ 1 (b) Pressure antinode อยู่บริเวณใกล้กับแหล่งกำเนิดเสียง และภาพที่ 1 (c) Pressure antinode จะอยู่บริเวณปลายท่อด้านปิด เมื่อเกิดการสั่นพ้องขึ้นในท่อเสียงบริเวณปลายสเตกทั้งสองด้านจะมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ด้านหนึ่งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและอีกด้านหนึ่งจะมีอุณหภูมิต่ำลง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาระบบทำความเย็นได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกในท่อเสียงสำหรับการทำความเย็น



ภาพที่ 1 ตำแหน่ง Pressure antinode ภายในท่อเสียงเมื่อเกิดสภาวะสั่นพ้อง [7]

ที่มา: Wakeland, R.S. (2000). Use of electrodynamic drivers in thermoacoustic refrigerators. *J.Acoust. Soc. Am.* 107(2), 827-832.

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

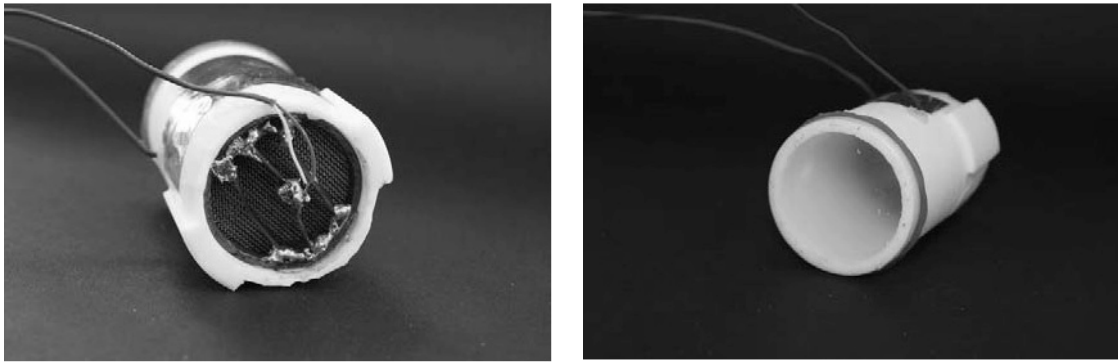
ชุดทดลองที่ออกแบบและสร้างขึ้นยึดหลักการของการเกิดสภาวะคลื่นนิ่งภายในท่อเสียงเพื่อนำแรงดันอากาศที่สูงไปทำให้เกิดการสั่นพ้องภายในโพรงอากาศ (Compliance volume) อีกครั้งหนึ่งตามหลักการของ Helmholtz โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทำให้เกิดขนาดแรงดันอากาศสูงกว่าสภาวะคลื่นนิ่งธรรมดา ทั้งนี้การหด-ขยายตัวของสารตัวกลางที่สภาวะแรงดันอากาศสูงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงตามไปด้วย ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องใน compliance volume คำนวณได้จาก $f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1/LC}$ เมื่อ L คือ Inertance , C คือ Compliance และองค์ประกอบหลักของระบบการทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่น (Driver) สารตัวกลางในระบบ (Working fluid) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) สแตกหรือรีเจนเนอเรเตอร์ (Stack / Regenerator) และท่อเสียง (Resonator tube)

1. แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง การสร้างคลื่นเสียงในระบบของชุดทดลองเลือกใช้ลำโพงขนาด 5.25 นิ้ว มีกำลังขับ 120 วัตต์ และความต้านทาน 4 โอห์ม เป็นผลิตภัณฑ์ของ Priority ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น Pro-5522M ต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณเสียง (Amplifier) ขนาด 90 วัตต์ เป็นผลิตภัณฑ์ของ TOA

รุ่น A-1061 ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine wave) โดยใช้เครื่อง Function generator ของ Instek รุ่น GFG-8020H ปรับความถี่ได้ในช่วง 20 – 20,000 เฮิรตซ์ และติดตั้งลำโพงเข้ากับปลายด้านหนึ่งของท่อเสียงที่มีความยาว 25 ซม.

2. ท่อเสียงใช้ท่ออะคริลิกใส ขนาด 50 มม. หนา 3 มม. ยาว 250 มม. ต่อเข้ากับขอลดขนาด 125 x 50 มม. โดยใช้กาวประสานได้ความยาวของท่อเสียงจากตำแหน่งติดตั้งลำโพงถึงปลายท่อรวม 410 มม. ภายในท่อบรรจุด้วยอากาศทำหน้าที่เป็นสารตัวกลาง

3. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ซม. หนา 1.5 มม. ตัดเป็นวงแหวนหนา 5 มม. ภายในใช้แผ่นทองแดงหนา 0.60 มม. กว้าง 5 มม. จำนวน 3 แผ่นบัดกรีติดกับวงแหวนให้ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยนำไปติดตั้งไว้ด้านหน้าและด้านหลังของรีเจนเนอเรเตอร์ในท่อเสียง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะทำหน้าที่ดูดซับความร้อนจากอากาศที่เกิดการอัดและขยายตัวภายในรีเจนเนอเรเตอร์ นำสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) Type K บัดกรีติดกับชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิ

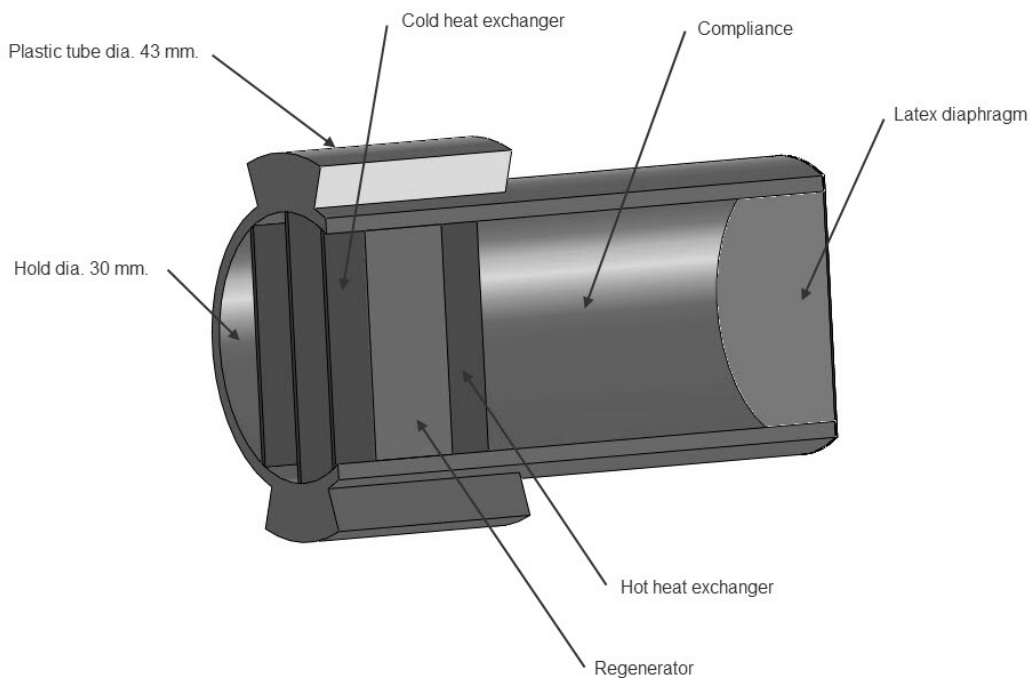


ภาพที่ 2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งด้านหน้ารีเจนเนอเรเตอร์และแผ่นลาเท็กซ์ไดอะแฟรมทำหน้าที่แทน Inertance (L)

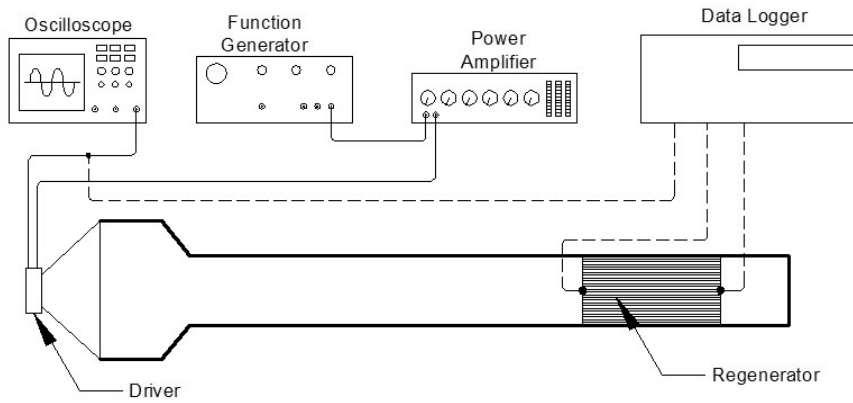
4. รีเจนเนอเรเตอร์ เป็นวัสดุรูพรุน ทำหน้าที่ลดขนาดก้อนมวลอากาศให้เล็กลง และบังคับทิศทางไหลของก้อนมวลอากาศนั้นๆ ขนาดของรูพรุนจะถูกกำหนดโดยรัศมีชลศาสตร์ (Y_h) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอากาศต่อพื้นที่ผิวของรูพรุน

ในการสร้างชุดทดลองนี้ เลือกใช้รีเจนเนอเรเตอร์เป็นตัวลดขนาดก้อนมวลอากาศทั้งนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบสแตกโดยสร้าง

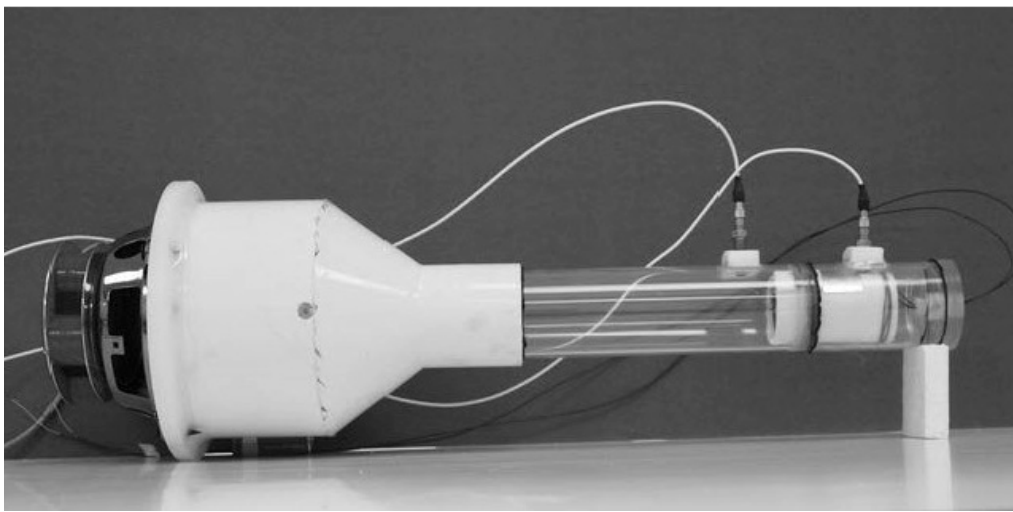
จากแท่งพลาสติกกลึงให้มีขนาดดังภาพที่ 3 ภายในบรรจุแผ่นตาข่ายสแตนเลสขนาด 40 เส้นต่อนิ้ว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม. วางเรียงซ้อนกัน 26 ชั้น โดยมีความหนาประมาณ 10 มม. วางต่อจากวงแหวนทองแดง และปลายด้านที่ติดตั้งแผ่นลาเท็กซ์ไดอะแฟรมวางห่างจากปลายด้านปิดของท่อเสียง 15 มม. และต่อไปจะเรียกชุดอุปกรณ์รวมนี้ว่า Resonator



ภาพที่ 3 รูปตัดแสดงการประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน รีเจนเนอเรเตอร์ และแผ่นลาเท็กซ์ไดอะแฟรม



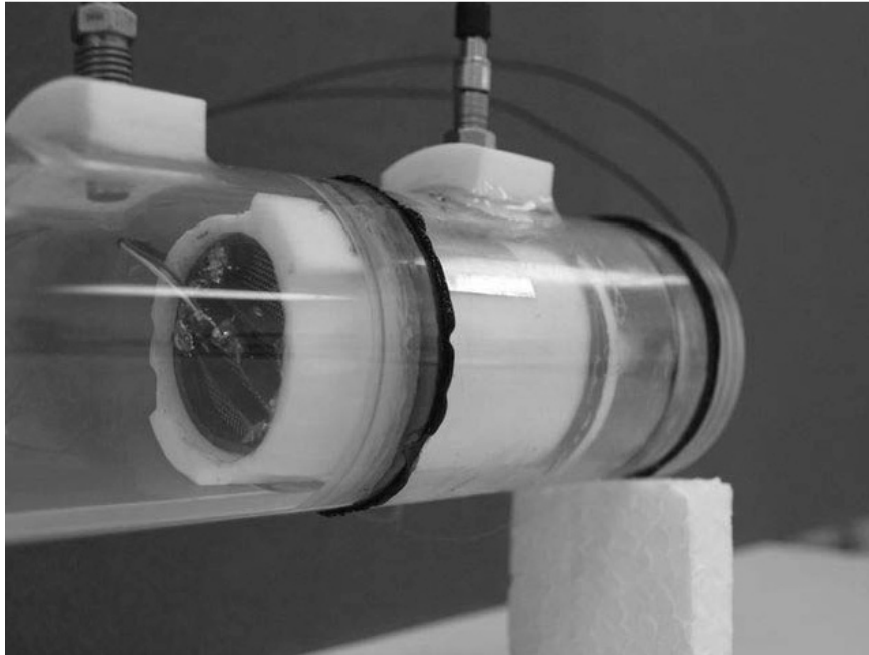
ภาพที่ 4 ผังการต่อเชื่อมระบบและอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 5 ชุดทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก

5. เซนเซอร์บันทึกข้อมูล การวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใช้สายเทอร์โมคัพเปิล Type K วัดอุณหภูมิ 2 จุด และการศึกษาแรงดันอากาศภายในท่อเสียงที่เกิดจากการสั่นของกรวยลำโพงใช้เซนเซอร์ตรวจวัดความดันแบบไดนามิก (Dynamic pressure sensor) เป็นผลิตภัณฑ์ของ Omega รุ่น DPX101-250 เบอร์ 3697 และ

3699 วัดความดันอากาศก่อนไหลเข้ารีเจนเนอเรเตอร์และภายใน Compliance volume แสดงในภาพที่ 5 อุปกรณ์เซนเซอร์วัดแรงดันอากาศทั้งหมดต่อเข้ากับการ์ดอ่านและบันทึกข้อมูลของ National Instruments รุ่น NI 9215 และสายเทอร์โมคัพเปิลต่อเข้ากับรุ่น NI 9211 โดยอ่านข้อมูลผ่านโปรแกรม LabVIEW 8.5



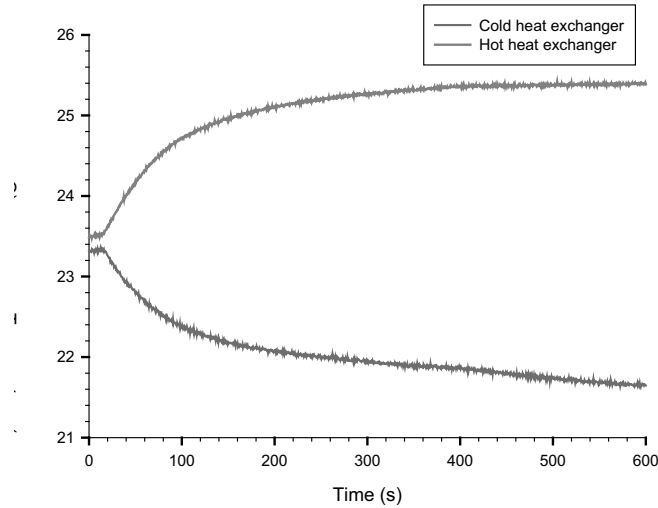
ภาพที่ 6 การติดตั้ง Resonator และอุปกรณ์เซนเซอร์

ผลการวิจัย

1. การศึกษาความถี่คลื่นเสียง

ชุดทดลองสำหรับการศึกษานี้สร้างตามแนวคิดในภาพที่ 1 (c) อากาศภายในท่อเสียงมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นบริเวณด้านหลังของลำโพงจึงไม่จำเป็นต้องครอบปิดไว้เพราะว่าปริมาตรอากาศภายนอกเปรียบเสมือน Compliance ขนาดใหญ่ ตำแหน่งการวาง Resonator อยู่ใกล้ปลายท่อด้านปิดซึ่งเป็นจุดที่มีแรงดันอากาศสูงสุด ตามทฤษฎีแล้วความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องแบบคลื่นนิ่ง โดยใช้ท่อเสียงยาว 41 ซม. และใช้อากาศคือ $f = 209.75$ เฮิร์ตซ์ แต่เนื่องด้วยการประกอบอุปกรณ์ เช่น ลำโพงมีขนาดใหญ่กว่าท่อเสียงจึงไม่สามารถติดตั้งโดยตรงได้ ผู้วิจัยได้ใช้ข้อต่อลดขนาดเป็นตัวเชื่อมต่อ ดังนั้นท่อเสียงจึงไม่สอดคล้องในทางทฤษฎี

มากนัก ความถี่คลื่นเสียงที่คำนวณได้เพื่อสร้างคลื่นนิ่งในท่อเสียงจึงไม่สามารถใช้ได้โดยตรง ดังนั้นในที่นี้จะใช้วิธีปรับความถี่แทนแล้วศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยเริ่มต้นใช้สัญญาณรูปซายน์ขนาด 5 โวลต์ (ค่าระดับแรงดัน 5 โวลต์ เป็นค่า RMS วัดที่เอาต์พุตของเครื่องขยายสัญญาณ) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับลำโพงมีค่าเท่ากับ $E = 5 \times 5/4 = 6.25$ วัตต์ ใช้ความถี่เริ่มต้นที่ 50-300 เฮิร์ตซ์ จากการศึกษาพบว่าความถี่ที่ป้อนให้กับลำโพงขนาด 145 เฮิร์ตซ์ สามารถทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแตกต่างกันมากที่สุดประมาณ 4 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที จึงสามารถสรุปได้ว่าความถี่ขนาด 145 เฮิร์ตซ์ สามารถทำให้เกิดคลื่นนิ่งในชุดทดลองนี้ได้

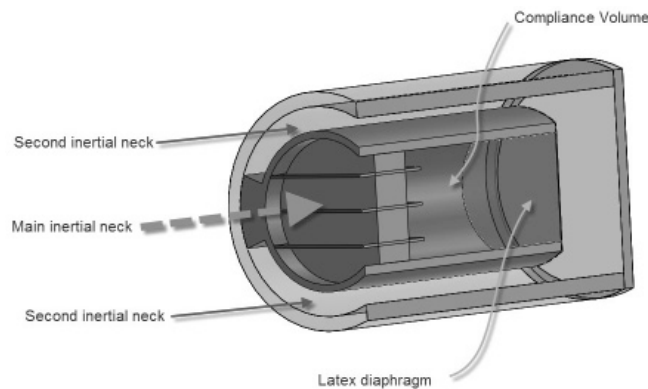


ภาพที่ 7 แสดงอณูภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อใช้ความถี่คลื่นเสียงเท่ากับ 145 เฮิรตซ์

2. การศึกษาขนาดแรงดันและเฟสของคลื่นเสียง

จากหลักทฤษฎีของ Helmholtz ความถี่สั่นพ้องที่เกิดขึ้นภายใน Compliance volume ของ Resonator มีปัจจัยหลักมาจากปริมาตรของ Compliance (C) และขนาดของ Inertance (L) Resonator ที่ได้ออกแบบไว้มีช่องให้อากาศไหลผ่านเข้าไปใน Compliance volume ได้ 2 ช่องทางหลักคือ ช่องแรกไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความระร้อนตะแกรงลวดสเตนเลสแล้วไหลเข้าไปใน Compliance volume ช่องที่สองไหลผ่านด้านข้างของ

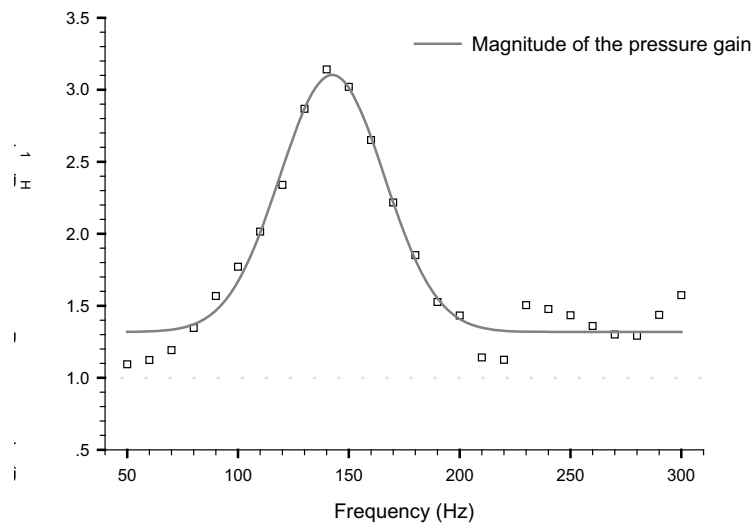
Resonator ซึ่งมี 2 ช่องย่อย จากนั้นไหลไปเจอกับแผ่นลาเท็กซ์ไดอะแฟรม ซึ่งทำหน้าที่เป็น Inertance อีกตัวหนึ่งและช่วยลด-ขยายปริมาตรของ Compliance เพื่อให้เกิดการสั่นพ้องได้ง่ายขึ้นแสดงในภาพที่ 8 (หากแผ่นลาเท็กซ์ไดอะแฟรมมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ความถี่สั่นพ้องที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถเรียกได้ว่าเป็นความถี่ Helmholtz) และแม้ว่าความถี่สั่นพ้องที่เกิดขึ้นในชุดทดลองนี้จะไม่ใช่อิมพีแดนซ์ Helmholtz ที่แท้จริง แต่ก็ยังเป็นความถี่สั่นพ้องแบบคลื่นนิ่งของชุดทดลองนั่นเอง



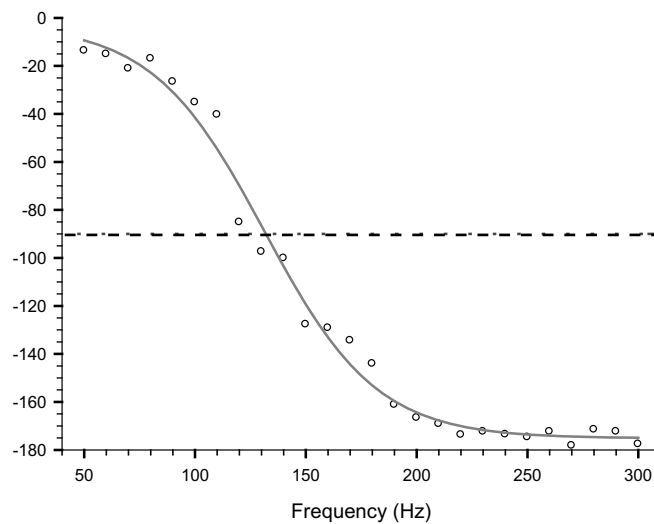
ภาพที่ 8 รูปตัดแบบจำลอง Resonator ที่วางในตำแหน่ง Pressure antinode ในหลอดเสียง

ในกรณีที่มีช่องของ Inertance เพียงช่องเดียว ความถี่ที่ใช้ขับแหล่งกำเนิดเสียงจะใกล้เคียงกับความถี่สั่นพ้องใน Compliance volume, f_H [3] จากการศึกษาและวัดขนาดแรงดันอากาศภายใน Compliance volume (P_H) และภายนอก Compliance volume (P_1) พบว่า P_H/P_1 มีขนาดสูงขึ้นที่ความถี่ประมาณ 142-145 เฮิรตซ์ แสดงในภาพที่ 9 (a) สอดคล้องกับความถี่ที่ทำให้ อุณหภูมิแตกต่างกันมากที่สุดและความถี่ของแรงดันอากาศ P_1 มีเฟสเท่ากับความถี่ที่ใช้ขับแหล่งกำเนิดเสียง

ในขณะที่เฟสระหว่างแรงดันอากาศใน Compliance volume เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับลำโพงมีเฟสต่างกันประมาณ 90 องศา ที่ความถี่ในช่วงเดียวกันแสดงในภาพที่ 9 (b) อาจกล่าวอีกนัยได้ว่าความถี่รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับลำโพงแล้ว ทำให้ กรวย ลำโพง สั่นตามจังหวะความถี่ที่ป้อนก็คือปริมาณการไหลของอากาศ (Volume velocity) ในหลอดเสียงนั่นเอง



(a)



(b)

ภาพที่ 9 (a) ขนาดแรงดันอากาศ P_H/P_1 ที่เกิดขึ้นใน resonator ที่ความถี่ต่างๆ กัน

(b) เฟสระหว่างแรงดันอากาศใน Compliance volume เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดเสียงแสดงในรูปความถี่

สภาวะที่เกิดคลื่นนิ่งในหลอดเสียง แรงแดันอากาศบริเวณปลายด้านปิดจะสูงกว่าบริเวณด้านที่ติดกับแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง จากการวัดแอมพลิจูดแรงแดันอากาศใน Compliance volume (P_H) เปรียบเทียบกับภายนอก Compliance volume (P_1) ด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดความดันแบบไดนามิก พบว่า ณ ตำแหน่งที่เวลาเดียวกัน $P_H > P_1$ เสมอ แต่อย่างไรก็ตามความถี่คลื่นเสียง 145 เฮิรตซ์ ที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่งในหลอดเสียงยังคงไม่ทำให้เกิดการสั่นพ้องใน Compliance volume จากการประเมินเปรียบเทียบความถี่สั่นพ้อง Helmholtz ที่จะเกิดขึ้นใน Resonator ของชุดทดลองได้ $f_H \approx 630$ เฮิรตซ์ ทั้งนี้การเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกในชุดทดลองมีผลมาจากการเกิดสภาวะคลื่นนิ่งเท่านั้น

สรุปและอภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเราสามารถนำพลังงานเสียงมาสร้างการความแตกต่างของ

อุณหภูมิบริเวณปลายรีเจนเนอเรเตอร์ทั้งสองด้านได้เมื่อคลื่นเสียงเกิดการสั่นพ้อง การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลา ผลแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ด้านร้อนกับด้านเย็นที่ได้จากการทดลองประมาณ 4 องศาเซลเซียส ที่ความถี่คลื่นเสียง 145 Hz ในขณะเดียวกันเฟสระหว่างแรงแดันอากาศใน Compliance volume เปรียบเทียบกับแรงแดันอากาศภายนอกมีเฟสต่างกันประมาณ 90 องศาในการนำไปประยุกต์ใช้สร้างเครื่องทำความเย็นจำเป็นต้องทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมากๆ โดยเฉพาะด้านเย็นอาจจำเป็นต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นต่อไปในอนาคตจะต้องออกแบบโดยใช้สารตัวกลางที่มีคุณสมบัติในด้านการถ่ายเทความร้อนที่ดีไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเช่นก๊าซในตระกูลก๊าซเฉื่อยและให้สารตัวกลางมีความดันสูงขึ้น ตลอดจนมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rott, N. (1980). Thermoacoustic. *Advances in Theoretical and Applied Mechanics*, 20,135-175.
- [2] Garrett, S. L., Adef, J. A. and Hoffer, T. J. (1993). Thermoacoustic Refrigerator for Space Applications. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 7(4), 595-599.
- [3] Poese, M. E. and Garrett, S. L. (2000). Performance Measurements on a Thermoacoustic Refrigerator at High Amplitudes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(5), 2480-2486.
- [4] Wheatley, J. C., Swift, G. W., Migliori, A. and Hoffer, T. J. (1998). Acoustic Cooling Engine. US Patent No. 4,858,441.
- [5] Swift, G. W., Gardner, D. L. and Backhaus, S. (1999). Acoustic Recovery of Lost Power in Pulse Tube Refrigerators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(2), 711-724.
- [6] Gardner, D. L. and Swift, G. W. (1997). Use of Inertance in Orifice Pulse Tube Refrigerators. *Cryogenics*, 37(2), 117-121.
- [7] Wakeland, R. S. (2000). Use of Electrodynamical Drivers in Thermoacoustic Refrigerators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(2), 827-832.