

การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความ
เย็นจากพลังงานเสียงด้วยวัสดุอย่างง่าย

A FEASIBILITY STUDY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION
THERMOACOUSTIC REFRIGERATOR MADE OF READILY
AVAILABLE MATERIALS

นายทรงวุฒิ เพ็ชรแสง

MR. SONGWUT PHETSAENG

นายเอนก ดวงมาลา

MR. ANEK DUANGMALA

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความ
เย็นจากพลังงานเสียงด้วยวัสดุอย่างง่าย

A FEASIBILITY STUDY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION
THERMOACOUSTIC REFRIGERATOR MADE OF READILY
AVAILABLE MATERIALS

นายทรงวุฒิ เพ็ชรแสง

MR. SONGWUT PHETSAENG

นายเอนก ดวงมาลา

MR. ANEK DUANGMALA

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

A FEASIBILITY STUDY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION
THERMOACOUSTIC REFRIGERATOR MADE OF READILY
AVAILABLE MATERIALS

MR. SONGWUT PHETSAENG

MR. ANEK DUANGMALA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็น
จากพลังงานเสียงด้วยวัสดุอย่างง่าย
A FEASIBILITY STUDY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION
THERMOACOUSTIC REFRIGERATOR MADE OF READILY
AVAILABLE MATERIALS

นักศึกษา

นายทรงวุฒิ เพ็ชรแสง
นายเอนก ดวงมาลา

รหัสนักศึกษา 54010499
รหัสนักศึกษา 54011582

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(รศ.ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต)

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียงด้วยวัสดุอย่างง่าย

นักศึกษา

นายทรงวุฒิ เพ็ชรแสง

นายเอนก ดวงมาลา

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียงด้วยวัสดุอย่างง่าย การศึกษาเริ่มด้วยการออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองการทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ลำโพง ท่อกำทอน และสแต็ก โดยปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกเกิดขึ้นจากการสั่นของอนุภาคของของไหลในสแต็ก ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนอย่างต่อเนื่องระหว่างปลายสองข้างของสแต็กที่อยู่ภายในท่อกำทอน จากการทดลองโดยใช้อากาศเป็นก๊าซทำงานและน้ำเป็นของไหลทำงาน โดยทำการควบคุมตัวปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) ความเข้มของเสียงหรือระดับเสียง (แบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ระดับ 96 เดซิเบล และ 116 เดซิเบล) 2) ความถี่ของเสียง (แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ ความถี่ 138.88 เฮิรตซ์ ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์และที่ความถี่ 238.88 เฮิรตซ์) และ 3) การถ่ายโอนความร้อนระหว่างสแต็กกับน้ำ (ไม่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำและมีการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำ) จากการทดสอบเครื่องที่อุณหภูมิห้อง 24.5 – 25.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเริ่มต้นทั้งสองข้างสแต็กเฉลี่ยที่ 25.0 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่า 1) กรณีไม่พบปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก คือ ที่ระดับเสียง 96 เดซิเบลทุกความถี่และที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ ทั้งไม่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำและมีการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำ และ 2) กรณีพบปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก พบว่า ก) กรณีไม่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำ ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 138.88 เฮิรตซ์ ได้อุณหภูมิต่ำสุดที่ 22.9 องศาเซลเซียส ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ ได้อุณหภูมิต่ำสุดที่ 19.3 องศาเซลเซียส และ ข) กรณีมีการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำ ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 138.88 เฮิรตซ์ ได้อุณหภูมิต่ำสุดที่ 23.3 องศาเซลเซียส และ ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ ได้อุณหภูมิต่ำสุดที่ 21.4 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิน้ำที่ใช้ถ่ายเทความร้อนลดลง 0.2 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำพลังงานเสียงมาสร้างความเย็นได้ ตามปัจจัยควบคุมอย่างเหมาะสม

Thesis Title	A Feasibility Study for Design and Construction Thermoacoustic Refrigerator Made of Readily Available Materials
Student	Mr. Songwut Petseang Mr. Anek Duangmala
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2014
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Sakon Klongboonjit

ABSTRACT

This thesis purposes to the feasibility study for design and construction thermoacoustic refrigerator made of readily available materials. The study starts with design and fabricate a prototype of thermoacoustic refrigerator, that consists of 3 main components: a loudspeaker, a resonance tube and a stack. Thermoacoustic cooling devices use the thermoacoustic principle to move heat using sound. A standing wave in a tube creates a temperature gradient across the stack, facilitating heat flow. In this study, air at standard temperature and pressure is employed as the working gas and water is chosen as the working fluid. There are 3 controlled factors as follows 1) A sound intensity (2 levels of 96 dB and 116 dB) 2) A sound frequency (3 levels of 138.88 Hz, 188.88 Hz and 238.88 Hz) and 3) A heat transfer between stack and water (2 levels of transfer out by water and no transfer out). An experiment at a room temperature is controlled on interval 24.5° C to 25.5° C and starting temperature at both sides of the stack about 25.0° C. The experiment results show that 1) Non-effect of thermoacoustice are both of having heat transfer out by water and no transfer out at 96 dB for all frequency and at 116 dB for 138.88 Hz 2) thermoacoustic effect exists as follows: a) No heat transfer out by water at 116 dB for 138.88 Hz is given a cooling temperature at 22.9° C and at 116 dB for 188.88 Hz is given at 19.3° C and b) Having heat transfer out, there exists at 116 dB for 138.88 Hz is given at 23.3° C , 116 dB for 188.88 Hz is 21.4° C and the temperature of water is descended of 0.2° C. As the result can assure the possibility uses of sound energy to creates a cooling power with an appropriate controlled factors.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียงด้วยวัสดุอย่างง่าย สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ในทุกๆด้านตลอดเวลาที่ผ่านมา

ดร.วิภู ศรีสืบสาย ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการวางหลักสูตรเพื่อส่งเสริมความสามารถ ศักยภาพของนักศึกษาตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ดร.พลชัย โชติปราชกุล กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดทั้งสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์สำหรับทำปริญญาานิพนธ์จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อาจารย์รณน เจียรตระกูล กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ และการสนับสนุนตลอดมา

รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำในการออกแบบการทดลองในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ผศ.ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำและการสนับสนุนด้านงบประมาณในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณครอบครัวของกลุ่มผู้วิจัย สำหรับความช่วยเหลือในด้านต่างๆ กำลังใจที่ดี และสนับสนุนให้การทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายทรงวุฒิ เพ็ชรแสง

นายเอนก ดวงมาลา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ประวัติความเป็นมาของ Thermoacoustics.....	4
2.2 การพัฒนาด้านทฤษฎี Thermoacoustics.....	7
2.2.1 เครื่องยนต์ Thermoacoustics.....	8
2.2.2 เครื่องทำความเย็น Thermoacoustics.....	9
2.2.3 คลื่นนิ่ง (Standing Wave) และคลื่นเคลื่อนที่ (Travelling Wave).....	10
2.2.4 เครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็น Thermoacoustics.....	11
2.3 แนวคิดและทฤษฎี Thermoacoustics.....	13
2.3.1 เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic).....	13
2.3.2 ทฤษฎีคลื่นเสียง.....	18
2.3.3 ความสำคัญของหลักการเทอร์โมไดนามิกส์.....	20
2.3.4 การถ่ายเทความร้อนภายในสแต็ก.....	20
2.3.5 ช่วงกว้างในระบบ Thermoacoustics.....	27
2.3.6 ปรากฏการณ์ Thermoacoustics.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.7 แนวคิดเกี่ยวกับเสียง.....	29
2.4 หลักการ Thermoacoustics.....	32
2.4.1 อุณหภูมิการเดียนร์วิกฤติ (Critical Temperature Gradient).....	41
2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment).....	42
2.5.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	44
2.5.2 อิทธิพลของปัจจัย.....	46
2.5.3 ประเภทการทดลอง.....	46
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	47
บทที่ 3 ออกแบบค่าพารามิเตอร์และชุดทดลอง	
3.1 พารามิเตอร์.....	50
3.1.1 ข้อพิจารณาสำหรับการออกแบบ.....	51
3.2 การเลือกใช้พารามิเตอร์.....	51
3.2.1 เครื่องกำเนิดเสียง.....	52
3.2.2 การเลือกชนิดของแก๊ส.....	54
3.2.3 ความดันไดนามิกส์.....	55
3.2.4 ความดันเฉลี่ย.....	56
3.2.5 ค่า Drive Ratio.....	56
3.2.6 ความถี่.....	57
3.2.7 สแต็ก.....	58
3.2.8 ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน.....	65
3.2.9 ท่อกำทอน.....	66
3.3 การออกแบบเครื่องทดสอบ.....	67
3.3.1 เลือกค่าพารามิเตอร์.....	68
บทที่ 4 วิธีการดำเนินงาน	
4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง.....	70
4.1.1 ลำโพง.....	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ท่อกำทอน.....	71
4.1.3 สแต็ก.....	71
4.1.4 ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน.....	71
4.1.5 ไมโครโฟน.....	72
4.1.6 เทอร์โมคัปเปิล.....	72
4.1.7 เครื่องขยายเสียง.....	72
4.1.8 Electronic Metering Pump.....	72
4.1.9 เครื่องมือเก็บข้อมูล.....	72
4.2 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง.....	72
4.2.1 การทดลองการกำทอนของคลื่นเสียง.....	72
4.2.2 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก.....	75
บทที่ 5 ผลการดำเนินงาน	
5.1 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง.....	80
5.1.1 ลำโพง.....	80
5.1.2 ท่อกำทอน.....	80
5.1.3 สแต็ก.....	80
5.1.4 ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน.....	80
5.1.5 ไมโครโฟน.....	81
5.1.6 เทอร์โมคัปเปิล.....	82
5.1.7 เครื่องขยายเสียง.....	82
5.1.8 Electronic Metering Pump.....	82
5.1.9 เครื่องมือเก็บข้อมูล.....	82
5.2 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง.....	83
5.2.1 ผลการทดลองการกำทอนของคลื่นเสียง.....	83
5.2.2 ผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก.....	100

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6	
สรุปผลการดำเนินงาน	
6.1 สรุปผลการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง.....	120
6.2 สรุปผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก.....	121
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	122
6.3.1 ข้อเสนอแนะการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง.....	122
6.3.2 ข้อเสนอแนะการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก.....	122
หนังสืออ้างอิง.....	123
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์.....	50
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับออกแบบอุปกรณ์ทำความเย็น.....	51
ตารางที่ 3.3 เป็นค่าเป้าหมายการออกแบบสำหรับสร้างเครื่องทำความเย็น.....	51
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติแก๊สฮีเลียม.....	55
ตารางที่ 3.5 ตัวพารามิเตอร์แปลงที่ใช้ในสมการการไหลของงานและความร้อน.....	60
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ การทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก.....	75
ตารางที่ 5.1 ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 1.....	83
ตารางที่ 5.2 ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 2.....	84
ตารางที่ 5.3 ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 3.....	85
ตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ย.....	86
ตารางที่ 5.5 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและคาบ.....	99

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การเป่าแก้ว-กระเปาะแก้วร้อนที่ปลายท่อฝั่งเย็น.....	4
รูปที่ 2.2	หลอด Soundhauss ให้ความร้อนที่กระเปาะปิด..... จะทำให้เกิดคลื่นเสียงที่ท่อปลายเปิด	5
รูปที่ 2.3	หลอด Rijke ตระแกรงลวดร้อนในท่อทำให้เกิดคลื่นเสียง.....	6
รูปที่ 2.4	เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก.....	9
รูปที่ 2.5	เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic.....	9
	(ก) โครงสร้างภายในเครื่องทำความเย็น Thermoacoustic.....	9
	(ข) เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic ติดตั้งใช้ในตู้แช่เย็น.....	10
รูปที่ 2.6	รูปแบบคลื่นนิ่ง (Standing Wave) และคลื่นเคลื่อนที่ (Travelling Wave).....	10
รูปที่ 2.7	วัฏจักร Brayton.....	11
รูปที่ 2.8	วัฏจักร Stirling.....	11
รูปที่ 2.9	เครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic.....	12
	(ก) เครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic.....	12
	(ข) โครงสร้างภายในเครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic.....	12
รูปที่ 2.10	การทำงานของเครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็นตามวัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์.....	15
รูปที่ 2.11	ระบบทำความเย็น แสดงกระบวนการไหลของพลังงาน.....	17
รูปที่ 2.12	แสดงการอัดและขยายของคลื่นตามยาวกับคลื่นรูปไซน์.....	19
รูปที่ 2.13 (a)	โครงสร้างเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก (b) การเปลี่ยนแปลงความเร็ว..... และความดันในท่อกำทอน (c) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในท่อกำทอน	21
รูปที่ 2.14	กลไกการขนถ่ายความร้อนภายในสแต็ก.....	21
รูปที่ 2.15	วัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์ของอนุภาคแก๊สระหว่างความดันกับปริมาตร.....	23
รูปที่ 2.16	วัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์ของอนุภาคแก๊สระหว่างอุณหภูมิกับความดัน.....	23
รูปที่ 2.17	เป็นแผ่นสแต็กและองค์ประกอบย่อยในวัฏจักรเทอร์โมอะคูสติก..... สัญลักษณ์บวก-ลบ บนตัวแปล คือการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิ ที่จุดเริ่มต้น (T)	26
รูปที่ 2.18	กระบวนการถ่ายขนถ่ายความร้อนโดยการสั่นแบบ Thermoacoustic ในสแต็ก.....	28
รูปที่ 2.19	คลื่นนิ่งในเครื่องยนต์ Thermoacoustic ที่มีความยาวท่อเรโซแนนซ์ยาว L แสดงตำแหน่งของความเร็วและความดันโนดและแอนติโนด	30
รูปที่ 2.20	ช่องว่างและความหนาของสแต็ก.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.21	ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ.....	43
รูปที่ 3.1	โครงสร้างอุปกรณ์ทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกทั่วไป.....	50
รูปที่ 3.2	แผนภาพวิธีการออกแบบและกำหนดค่าเป้าหมายของระบบ.....	52
รูปที่ 3.3	ความดันและความเร็วโนดและแอนติโนดในระบบทำความเย็นด้วยเสียง.....	59
รูปที่ 3.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางสแต็ก ความยาวสแต็ก และสมรรถนะ....	61
รูปที่ 3.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางสแต็ก ความยาวสแต็ก..... และกำลังความเย็น	62
รูปที่ 3.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางสแต็ก ความยาวสแต็ก และกำลังเสียง...	62
รูปที่ 3.7	กราฟ Hydraulic Ratio กับ F-Function สำหรับสแต็กในรูปแบบต่างๆ.....	63
รูปที่ 3.8	ช่องว่างระหว่างสแต็กที่เหมาะสม.....	65
รูปที่ 3.9	ค่าการสูญเสียความร้อนกับสัดส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง.....	67
รูปที่ 3.10	กระบวนการออกแบบเครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียง.....	68
รูปที่ 4.1	แผนผังของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง (หน่วยเซนติเมตร).....	70
รูปที่ 4.2	สแต็กทำจากแผ่นไมลาร์ม้วนม้วนเป็นรูปก้นหอย.....	71
รูปที่ 4.3	การกระจัดในท่ออากาศ.....	74
รูปที่ 4.4	ชุดทดสอบและอุปกรณ์การทดสอบ.....	74
รูปที่ 4.5	การต่ออุปกรณ์ในการทดลอง.....	75
รูปที่ 4.6	การเข้าใช้ DOE ในโปรแกรม Minitab ขั้นตอนที่ 1.....	77
รูปที่ 4.7	การเข้าใช้ DOE ในโปรแกรม Minitab ขั้นตอนที่ 2.....	77
รูปที่ 4.8	การเข้าใช้ DOE ในโปรแกรม Minitab ขั้นตอนที่ 3.....	78
รูปที่ 4.9	การเข้าใช้ DOE ในโปรแกรม Minitab ขั้นตอนที่ 4.....	78
รูปที่ 5.1	การติดตั้งตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายสแต็ก.....	81
รูปที่ 5.2	การติดตั้งไมโครโฟนและเทอร์โมคัปเปิล.....	81
รูปที่ 5.3	ชุดทดลองการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก.....	82
รูปที่ 5.4	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 350 เฮิร์ตซ์.....	87
รูปที่ 5.5	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 350 เฮิร์ตซ์..... อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้ 31.67°C	87
รูปที่ 5.6	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 400 เฮิร์ตซ์.....	88

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.7	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 400 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67°c	88
รูปที่ 5.8	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 450 เฮิรตซ์.....	89
รูปที่ 5.9	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 450 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67°c	89
รูปที่ 5.10	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์.....	90
รูปที่ 5.11	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67°c	90
รูปที่ 5.12	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 550 เฮิรตซ์.....	91
รูปที่ 5.13	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 550 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 31.33°c	91
รูปที่ 5.14	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 600 เฮิรตซ์.....	92
รูปที่ 5.15	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 600 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 32.33°c	92
รูปที่ 5.16	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 650 เฮิรตซ์.....	93
รูปที่ 5.17	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 650 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 33.33°c	93
รูปที่ 5.18	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 700 เฮิรตซ์.....	94
รูปที่ 5.19	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 700 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67°c	94
รูปที่ 5.20	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 750 เฮิรตซ์.....	95
รูปที่ 5.21	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 750 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 33.33°c	95
รูปที่ 5.22	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 800 เฮิรตซ์.....	96
รูปที่ 5.23	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 800 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 35.00°c	96
รูปที่ 5.24	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 850 เฮิรตซ์.....	97
รูปที่ 5.25	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 850 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 32.00°c	97

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.26	กราฟการกระจัดที่ความถี่ 900 เฮิรตซ์.....	98
รูปที่ 5.27	กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 900 เฮิรตซ์..... อุณหภูมิคำนวณได้ 30.33°C	98
รูปที่ 5.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับคาบ.....	100
รูปที่ 5.29	ลำดับการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก.....	101
รูปที่ 5.30	กราฟอุณหภูมิสองข้างสแต็กมาตรฐาน กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อน..... ที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	104
รูปที่ 5.31	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB,..... ความถี่ 138.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	105
รูปที่ 5.32	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB,..... ความถี่ 138.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	106
รูปที่ 5.33	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB,..... ความถี่ 188.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	107
รูปที่ 5.34	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB,..... ความถี่ 188.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	108
รูปที่ 5.35	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB,..... ความถี่ 238.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	109
รูปที่ 5.36	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB,..... ความถี่ 238.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	110
รูปที่ 5.37	กราฟอุณหภูมิสองข้างสแต็กมาตรฐาน กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่..... ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	113
รูปที่ 5.38	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB,..... ความถี่ 138.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	114
รูปที่ 5.39	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB,..... ความถี่ 138.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	115
รูปที่ 5.40	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB,..... ความถี่ 188.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	116
รูปที่ 5.41	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB,..... ความถี่ 188.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	117

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.42	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB,.....	118
	ความถี่ 238.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	
รูปที่ 5.43	กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB,.....	119
	ความถี่ 238.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ด้วยการเติบโตและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ผลักดันให้กระแสแห่งนวัตกรรมขยายตัวและแพร่เข้าสู่ทุกระบบของสังคม เช่น ความก้าวหน้าทางด้านคมนาคมขนส่ง ด้านการสื่อสาร แวดวงอุตสาหกรรมต่างๆ สร้างความสะดวกสบายให้กับผู้บริโภคอย่างมนุษย์เป็นอย่างมาก แต่ผลที่ตามมาคือ ความล้มเหลวในการประสานสมดุลระหว่างความสุขทางสุขภาพและความสะดวกสบายในชีวิตทรัพยากรมนุษย์กับทรัพยากรธรรมชาติ ทำให้เกิดทัศนคติว่ามนุษย์สามารถควบคุมได้ทุกอย่างบนโลกนี้ แต่นั่นคือความผิดพลาด หลายครั้งที่ผ่านมาความสูญเสียจากความแปรปรวนของธรรมชาติ นำมาซึ่งความเจ็บปวดต่อมนุษยชาติ ซึ่งประจักษ์ให้เห็นแล้วว่า สภาวะการณ์ต่างๆในโลกไม่ได้อยู่ในการควบคุมได้ ตอกย้ำถึงความตระหนักเพื่อป้องกัน ยับยั้ง ความวิปริตแปรปรวนเหล่านี้ ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเกิดจากฝีมือมนุษย์ นั่นจึงเป็นเหตุว่ามนุษย์ต้องควบคุมตัวเองแทนที่จะควบคุมธรรมชาติและสร้างสภาวะที่สมดุลต่อการดำรงอยู่ของมนุษย์และธรรมชาติให้ได้

เทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology) เป็นนวัตกรรมหนึ่งที่ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อตอบโจทยปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว ซึ่งได้รับความสนใจมายาวนานหลายปี จนมีสิ่งประดิษฐ์หลายอย่างเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีดั้งเดิม ครอบคลุมตั้งแต่ระดับโลกจนถึงเรื่องใกล้ตัว อย่างที่มีการคิดค้นกันมาเมื่อไม่กี่สัปดาห์มานี้คือ ทฤษฎีทางด้านเทอร์โมอะคูสติกตอบโจทยเทคโนโลยีด้านพลังงานเสียง เป็นที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานเสียงเป็นพลังงานความร้อนหรือความเย็น โดยอาศัยคุณสมบัติของเสียงที่เกิดจากการสั่นของอนุภาคตัวกลางอัด ขยาย เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถดึงเอาพลังงานความร้อนหรือความเย็นออกมาใช้ได้ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำมาปรับใช้กับบริเวณหรือเครื่องจักรที่เกิดเสียงได้หรือแม้แต่จุดที่เป็นมลพิษทางเสียงทั้งที่อยู่บนท้องถนนจากเครื่องยนต์ ในโรงงานอุตสาหกรรมจากเครื่องจักร นำมาสร้างให้เกิดประโยชน์และทดแทนเทคโนโลยีเดิมได้ เช่น ระบบทำความเย็นแบบอัดไอในปัจจุบัน เครื่องยนต์ความร้อน เครื่องหล่อเย็น เป็นต้น สำหรับการนำมาใช้ทดแทนระบบทำความเย็นแบบอัดไอเป็นระบบที่ให้ความสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเทคโนโลยีดั้งเดิมได้สร้างปัญหา เรือนกระจก และมีการใช้กันเกือบทุกครัวเรือนในปัจจุบัน ซึ่งถ้าเราสามารถทดแทนระบบทำความเย็นนี้ได้จะสามารถสร้างประโยชน์ได้หลายอย่าง อาทิ เช่น

1. เป็นเทคโนโลยีสะอาด ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งช่วยลดปัญหาเรือนกระจกหรือโลกร้อนที่ทุกคนให้ความสนใจในปัจจุบัน จากปัญหาเทคโนโลยีดั้งเดิม

2. นำเอาคลื่นพลังงานเสียงจากสิ่งแวดล้อมมาใช้ประโยชน์ เช่น ติดตั้งในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นระบบทำความเย็นในตัวเครื่องจักรเองได้

3. สามารถต่อยอดโดยใช้พลังงานความร้อนมาทำให้เกิดเสียงและเอาพลังงานเสียงไปปรับเป็นความเย็นต่อได้อีก เรียกได้ว่าเป็นระบบพลังงานหมุนเวียนในตัวเองได้ เป็นต้น

ซึ่งเทคโนโลยีใหม่นี้มีการทดลองและเริ่มใช้กันเชิงพาณิชย์ในบางประเทศ แต่ยังคงอยู่ในวงแคบ สำหรับประเทศไทยยังไม่มีมีการทดลองอย่างจริงจัง มีเฉพาะการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ดังนั้นจากความสำคัญที่กล่าวมา คณะผู้วิจัยจึงตระหนักในปัญหาและประโยชน์ต่อการสร้างสรรค์เทคโนโลยีสะอาด จึงได้เลือกจัดทำโครงการวิจัยนี้ขึ้นเพื่อศึกษาการนำเอาทฤษฎีมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง และศึกษาสมรรถนะการทำความเย็น เพื่อนำไปสู่การทดแทนเทคโนโลยีดั้งเดิมและรองรับการตอบโจทยโลกสีเขียวในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของระบบทำความเย็นด้วยเสียง (Thermoacoustic Refrigeration)
2. เพื่อหาแนวทางที่เป็นไปได้สำหรับออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบระบบทำความเย็นด้วยเสียง (Thermoacoustic Refrigeration)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพ (COP) อุณหภูมิด้านเย็น (Cooling Temperature) กำลังทำความเย็น (Cooling Power) ของเครื่องทำความเย็นด้วยระบบเสียง
2. ใช้แก๊สทำงาน (Working Gas) เป็น อากาศ (Air)
3. ใช้วัสดุทำสแต็กเป็น แผ่นไมลาร์ (Mylar Sheet) มีช่องว่างสแต็ก (Stack Spacing) เท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร ทำจากเส้นเอ็น (Fishing Line)
4. ใช้วัสดุทำเครื่องต้นแบบเป็น โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC)
5. ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่อง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เข้าใจหลักการการทำงานของระบบทำความเย็นด้วยเสียง รวมถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียงด้วยวัสดุอย่างง่าย

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

รายการ	ระยะเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ขั้นตอนเตรียม-เก็บรวบรวมข้อมูล เพื่อเสนอหัวข้อโปรเจค									
2. ขั้นตอนการศึกษาข้อมูล ทฤษฎีต่างๆ ดังนี้									
2.1 ทฤษฎีโมไดนามิกส์									
2.2 ทฤษฎีโมอะคูสติก รีฟิสิกเจอร์เรเตอร์									
3. ขั้นตอนการสร้างชุดทดลองระบบทำความเย็นด้วยเสียง									
3.1 เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องใช้									
3.2 เลือกวัสดุทำชิ้นส่วนอุปกรณ์									
3.3 หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสร้างอุปกรณ์									
4. ขั้นตอนการปรับแก้ชุดทดลองและวิเคราะห์ผลจากชุดทดลอง									
5. ทำการสรุปและเสนอแนวทางการพัฒนา									
6. เขียนเล่มปริญญานิพนธ์									

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียงด้วยวัสดุอย่างง่าย มีแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งสามารถแบ่งหัวข้อได้ดังนี้

- 2.1 ประวัติความเป็นมาของ Thermoacoustics
- 2.2 การพัฒนาด้านทฤษฎี Thermoacoustics
- 2.3 แนวคิดและทฤษฎี Thermoacoustics
- 2.4 หลักการ Thermoacoustics
- 2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของ Thermoacoustics [6]

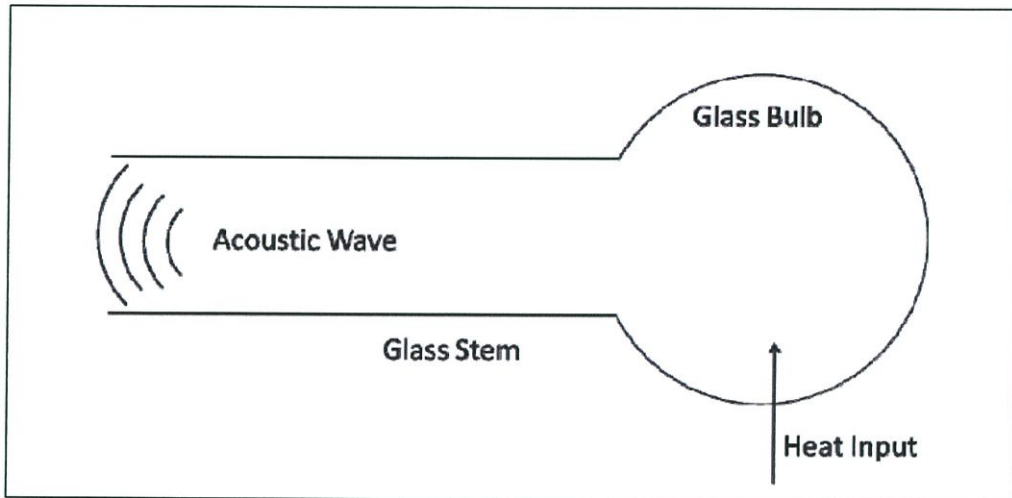
Thermoacoustics ค้นพบครั้งแรกเมื่อประมาณ 200 กว่าปีก่อน แต่ได้มีการศึกษาและพัฒนากันอย่างจริงจังเมื่อ 40 ปีมานี้ ในความเข้าใจโดยทั่วไป Thermoacoustics คือการศึกษาระหว่างความร้อน (Heat) และเสียง (Sound) ซึ่งความหมายนี้กลายเป็นการให้นิยามที่แคบในปัจจุบัน เพราะยังหมายถึงความถึงการประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์ความร้อนและเครื่องทำความเย็นได้ด้วย

การศึกษาปรากฏการณ์ Thermoacoustics ได้เริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1777 Putnam and Dennis ได้ศึกษางานของ Byron Higgins ในเรื่อง การสั่นตัวในท่อจากการเผาไหม้ ซึ่งถือเป็นผลงานชิ้นแรกที่มีการบันทึกข้อมูลการศึกษา จากการทดลองของ Higgins ทำให้เขาเกิดความประหลาดใจว่า มีเสียงเกิดขึ้นเมื่อนำเปลวไฟ Hydrogen เข้าไปในท่อปลายเปิด ทำให้เขาเรียกนี้ว่า เปลวไฟร้องเพลง (Singing Flames) Higgins ได้อธิบายไว้ว่าการเกิดการสั่นของเสียงในท่อขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเปลวไฟ



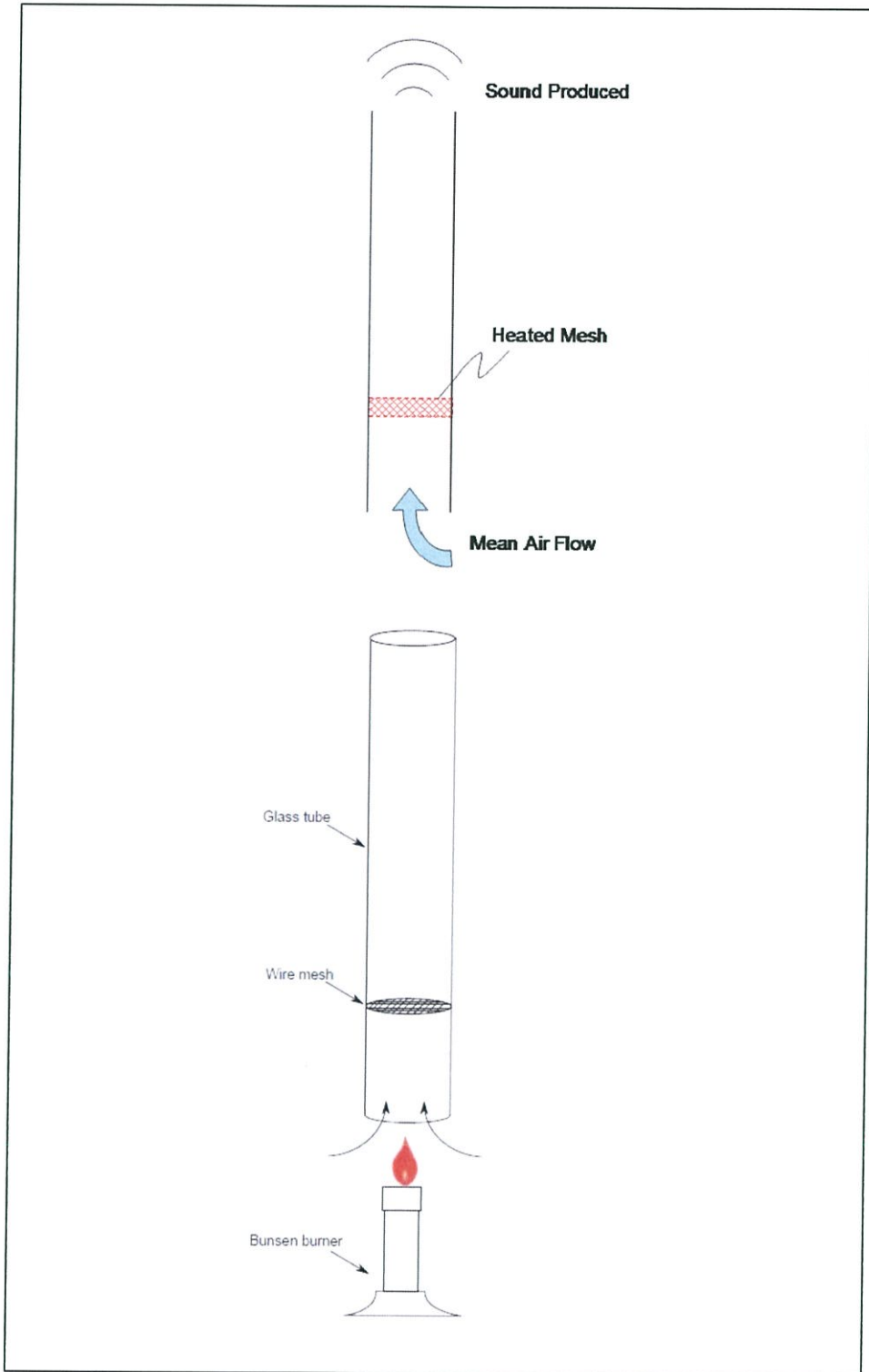
รูปที่ 2.1 การเป่าแก้ว-กระเปาะแก้วร้อนที่ปลายท่อฝั่งเย็น

หลังจากนั้นเกิดเทคนิคการเป่าแก้วขึ้น ระหว่างที่มีการเป่าแก้ว จะเกิดเสียงขึ้นจากท่อเป่า ดังรูปที่ 2.1 จากกรณีนี้ ในปี คศ.1850 Soundhauss กลายเป็นคนแรกที่ทำกรวิจัยเชิงปริมาณของ Thermoacoustics ทำการทดลองโดยใช้ท่อหลอดแก้วปลายเปิดด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งเป็นกระเปาะ ปลายปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เขาอธิบายว่าความร้อนจากกระเปาะปลายปิดทำให้เกิดการสั่นของเสียงในท่อ ในช่วงเสียง (Audible Range) และความถี่ (Frequency) หนึ่งขึ้นอยู่กับความยาวของท่อและปริมาตรของกระเปาะ เขาได้ทำการทดลองต่อ โดยการเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ความยาว และปริมาตรของกระเปาะ และอธิบายว่า ยิ่งใส่ความร้อนเพิ่ม พลังงานเสียงที่ได้ยิ่งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 หลอด Soundhauss ให้ความร้อนที่กระเปาะปิดจะทำให้เกิดคลื่นเสียงที่ท่อปลายเปิด

ในปี คศ. 1859 Rijke ค้นพบว่าเมื่อใส่ตะแกรงลวดร้อนที่ตรงกลางท่อปลายเปิดสองด้านทำให้เกิดคลื่นเสียง ความเข้มเสียงสูงสุดจะเกิดเมื่อวางตะแกรงลวดที่ตำแหน่ง $\frac{1}{4}$ ของท่อจากด้านล่าง และยังพบอีกว่าการเคลื่อนที่ของอากาศมีผลต่อการเกิด Thermoacoustics (หลอดแบบ Rijke จากรูป 2.3 เกิดจากการพัฒนาเพิ่มเติมจากงานของ Higgins)



รูปที่ 2.3 หลอด Rijke ตระแกรงลวดร้อนในท่อทำให้เกิดคลื่นเสียง

หลอดของ Soundhauss และ Rijke ถือเป็นจุดเริ่มต้นของทฤษฎีคลื่นนิ่งและคลื่นเคลื่อนที่ในปัจจุบันตามลำดับ

Feldman ได้ศึกษาผลการทดลองของ Soundhauss และ Rijike อีกครั้ง และสรุปว่า ชุดทดสอบของการสั่นของ Soundhauss มุ่งประเด็นเพื่อสร้างการสั่นที่เหมาะสมที่สุด

Lord Rayleigh ได้พูดถึงการทดลองของ Soundhauss และ Rijike และอธิบายเชิงคุณภาพทาง Thermoacoustics สรุปได้ว่า คลื่นเสียงโดยทั่วไปจะถูกกระตุ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของของไหลและการขนถ่ายความร้อนไปสู่ของไหลมีความเหมาะสม ฉะนั้นเมื่อการสั่นของของไหลมีค่าสูง แสดงว่าได้รับความร้อนและเมื่อมีการสั่นของของไหลต่ำแสดงว่าเกิดการถ่ายเทความร้อนออกไป

2.2 การพัฒนาด้านทฤษฎี Thermoacoustics [6]

ในปี ค.ศ.1949 Taconis ได้ซื้อสรุปคล้ายกับของ ลอร์ด Rayleigh โดยเขาสังเกตการสั่นของเสียง รู้จักกันในชื่อ การสั่นของ Taconis เมื่อใส่ก๊าซที่อุณหภูมิห้องเข้าหลอดทดลองจะทำให้อุณหภูมิของก๊าซต่ำลงอย่างมาก (~2K) กระทั่ง Kramers ได้พยายามใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการสั่นของ Taconis และกล่าวว่า Thermoacoustics สามารถอธิบายได้เพียงเชิงคุณภาพเท่านั้น คำกล่าวนี้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการตั้งสมมติฐานที่ไม่ถูกต้องทำให้ผลสรุปทางทฤษฎีและผลจากการทดลองไม่ตรงกัน

ความก้าวหน้าทางความรู้ด้าน Thermoacoustics เชิงปริมาณมาจากผลการศึกษาของ Rott ที่ได้สร้างสมการซึ่งได้แก่ ความดัน (Pressure) การเคลื่อนที่ (Motion) เวลาเฉลี่ยการขนถ่ายพลังงาน (Time Averaged Energy Transport) ในท่อยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ที่สัมพันธ์กับค่า Thermal Penetration Depth ของของไหล ทฤษฎีของ Rott มีความถูกต้องและสามารถใช้ได้ซึ่งจะเห็นได้จากงานศึกษาต่างๆ เช่น จาก Yazuki กับคณะ และ Wheatly กับคณะ และยังสามารถใช้ทฤษฎีของ Rott เพื่อออกแบบและคาดการณ์สมรรถนะของอุปกรณ์ทาง Thermoacoustics ได้อีกด้วย

ถึงแม้ว่าที่ผ่านมาจะมีการทำอุปกรณ์ทดลองและทฤษฎีประยุกต์ใช้ต่างๆเกิดขึ้น ทั้งที่เป็นทฤษฎี เครื่องทำความเย็น Thermoacoustics และทฤษฎีเครื่องยนต์ Thermoacoustics แต่ที่มีการเริ่มการศึกษาและทดสอบอย่างจริงจังเกิดขึ้นที่ Los Alamos National Laboratory (LANL) ในปี ค.ศ.1980 โดย Wheatly - Swift และ Hofler ได้พัฒนาให้เกิดความก้าวหน้าในทฤษฎี Thermoacoustics และนำไปสู่การปฏิบัติเพื่อสร้างเครื่องทำความเย็น Thermoacoustics และเครื่องยนต์ Thermoacoustics โดยเครื่องทำความเย็น Thermoacoustics เป็นความสำเร็จขั้นแรกที่ระบบทำงานเต็มรูปแบบซึ่งเป็นผลจากงานดุซง์นิพนธ์ของ Hofler และทฤษฎีที่พัฒนาส่วนมากจะเป็นผลงานของ Swift

หลังจากความสำเร็จที่ LANL ได้เกิดการสร้างเครื่องต้นแบบและอุปกรณ์ทำงานได้จริงตามมา เช่น Tijani ได้ออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นด้วยเสียงจากคลื่นนิ่ง ซึ่งคล้ายคลึงกับของ Hofler แต่จะเน้นไปดูการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ เช่น คุณสมบัติของแก๊สทำงาน และขนาดของสแต็ก Galett และคณะ ได้พัฒนาไปสู่การสร้างเครื่องแช่เย็นขึ้นตัวอย่างในปฏิบัติการทางอวกาศ Swift ได้ออกแบบเครื่องยนต์ Thermoacoustics ขนาดใหญ่เป็นตัวขับเคลื่อนของเครื่องทำความเย็น และอุปกรณ์จาก Thermoacoustics อีกหลายชนิด Balister และ Mckelway ได้สร้างอุปกรณ์ทำความเย็นจากเสียงให้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

backhauss และ Swift ได้ออกแบบและทดลองเครื่องทำความเย็นด้วยเสียงจากคลื่นเคลื่อนที่ Adefff และ Hofler ได้ออกแบบ TAR ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จากเครื่องยนต์ Thermoacoustics ซึ่งสร้างให้ชิ้นส่วนประกอบไม่เคลื่อนที่และกระบวนการทำงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2.2.1 เครื่องยนต์ Thermoacoustic

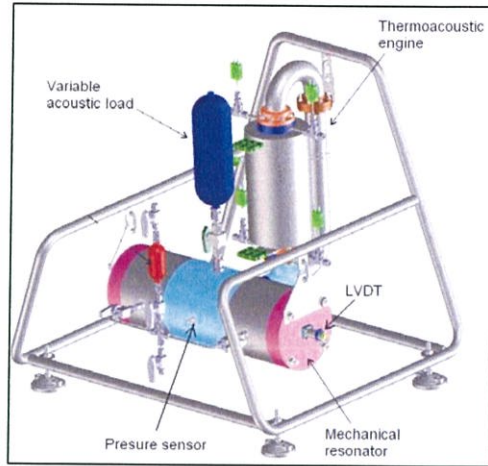
เมื่อเข้าใจปรากฏการณ์ทาง Thermoacoustics จึงมีความพยายามที่จะใช้ประโยชน์จากเสียงให้หลากหลายมากขึ้น เครื่องยนต์ Thermoacoustics เป็นการเปลี่ยนพลังงานเสียงไปเป็นไฟฟ้า

ในปี คศ.1951 สิทธิบัตรใบแรกทางด้านหลักการ Thermoacoustics ถูกจดขึ้น เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อนเข้าไปทำให้เกิดเสียง ซึ่งจะคล้ายกับหลอดของ Soundhauss จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ตัวทรานสดิวเซอร์ เสียง-ไฟฟ้า สิทธิบัตรอีกอันจดขึ้นในปี คศ.1958 มีเครื่องยนต์เสียง 2 ตัว อยู่ตรงข้ามกันเพื่อให้การสั่นสมดุล โดยใช้เพื่อเปลี่ยนความร้อนไปเป็นพลังงานเสียงและเป็นไฟฟ้าอีกที อุปกรณ์ชนิดนี้มีราคาไม่แพง น่าเชื่อถือและไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่ ซึ่งเหมาะต่อการใช้งานและมีความปลอดภัยเนื่องจากเวลาใช้ไฟฟ้าจะไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดเคลื่อนที่ แต่ข้อเสียคือประสิทธิภาพการผลิตต่ำ (<10%ในการแปลงความร้อนเป็นพลังงานเสียง)

ในปี คศ.1979 Caperley สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น ถ้าคลื่นเสียงเคลื่อนที่ภายใต้เฟสวัฏจักรของคลื่นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมซึ่งคล้ายกับวัฏจักร Stirling Thermodynamic การใช้หลักการนี้ต้องอยู่ภายใต้หลักการทางเครื่องยนต์ Thermoacoustics กล่าวคือ อุปกรณ์จะเกิดการ ทำงานแบบเครื่องยนต์ Stirling แต่จะไม่มีชิ้นส่วนใดเคลื่อนที่ ความเฉื่อยเนื่องจากการสั่นของเสียงจะต้องเหมือนกับกระบอกสูบ ข้อเหวี่ยงและชิ้นส่วนหลักอื่นๆของเครื่อง Stirling แต่น่าเสียดายที่อุปกรณ์นี้ไม่สามารถขยายกำลังเสียงได้

ในปี คศ.1998 Yazaki และคณะ ได้สร้างแบบจำลองเครื่องยนต์ Thermoacoustics Stirling ขึ้นแต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าที่คาดหวัง เนื่องจากไม่ได้คิดเรื่องการสูญเสียความร้อนและความหนืด หลังจากนั้น Backhauss และ Swift ได้สร้างเครื่องยนต์ Thermoacoustics Stirling Hybrid (TASHE) ซึ่งใช้เกณฑ์การออกแบบที่แม่นยำสูง TASHE มีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.30 และ Carnot Efficiency เท่ากับ 41%

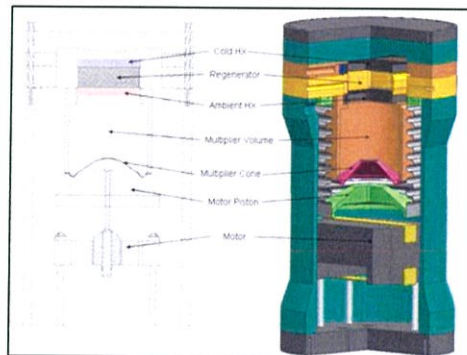
เมื่อเร็วๆนี้ Telesz ได้สร้างเครื่องแปลงกำลัง Thermoacoustics ซึ่งประกอบด้วยเครื่องยนต์ Thermoacoustics Stirling เชื่อมต่อกับตัวสลับเชิงเส้นคู่ เพื่อผลิตไฟฟ้า 100 w จากความร้อน 1200 F และฮีเลียมเป็นของไหลทำงาน ที่ความดัน 450 Psig ซึ่งมีประสิทธิภาพแปลงความร้อนเป็นกำลังเสียง 26.3 % ขณะที่ประสิทธิภาพการแปลงความร้อนเป็นไฟฟ้าเท่ากับ 16.8%



รูปที่ 2.4 เครื่องยนต์เทอร์โมอะคูสติก

2.2.2 เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic

หลังจากการสร้างการสั่นของเสียงจากความร้อนได้ Gifford และ Longworth ได้ทำการศึกษาการย้อนกลับของเครื่องยนต์ Thermoacoustics คือการใช้เสียงเพื่อให้ได้อุณหภูมิแทน เขาได้สร้างท่อพัลส์ (Pulse Tube) ตัวทำความเย็น ซึ่งจะบีบความร้อนเข้าไปในห้องปิดและคงการสั่นของแก๊สไว้ Merki และ Thomann สังเกตปรากฏการณ์การทำความเย็น Thermoacoustics ในท่อเรโซแนนซ์ที่มีความเร็วจุดปฏิบัติการ และในช่วงนี้เองที่ระบบทำความร้อนด้วยเสียงได้ประสบความสำเร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วที่ Los Alamos National Laboratory (LANL) Hofler ได้ออกแบบและสร้างกระบวนการทำงานของเครื่องทำความเย็นด้วยเสียงโดยใช้ลำโพงเป็นต้นกำเนิดเสียง ที่ 12% COP โดยมีอัตราส่วนต่ำสุดระหว่างเย็นและภายนอกเท่ากับ 0.66 ต่อมา Tijani ได้ปรับปรุงลำโพงใหม่ ทำให้สามารถสร้างความเย็นได้ที่ -67°C โดยค่า Prandtl Number ของแก๊สทำงานแต่ละชนิดจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องด้วย รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างและการนำไปใช้ในเครื่องทำความเย็นที่ Penn State University ซึ่งสามารถผลิตความเย็นได้ถึง -24.6°C



(ก) โครงสร้างภายในเครื่องทำความเย็น Thermoacoustic

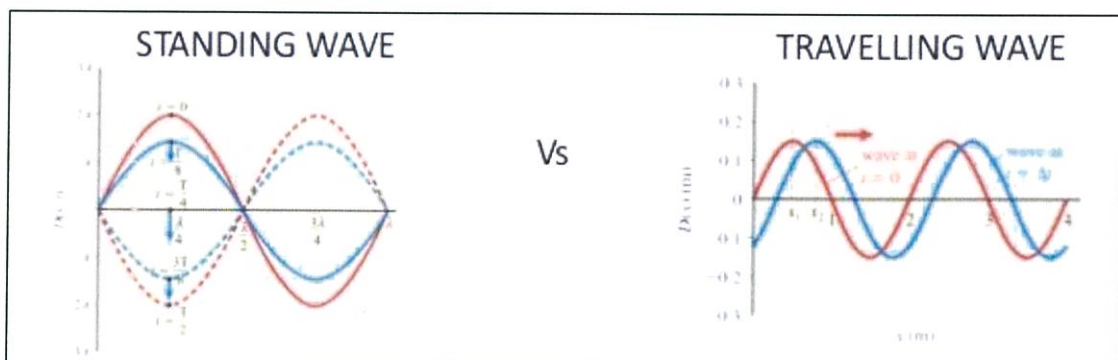
รูปที่ 2.5 เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic



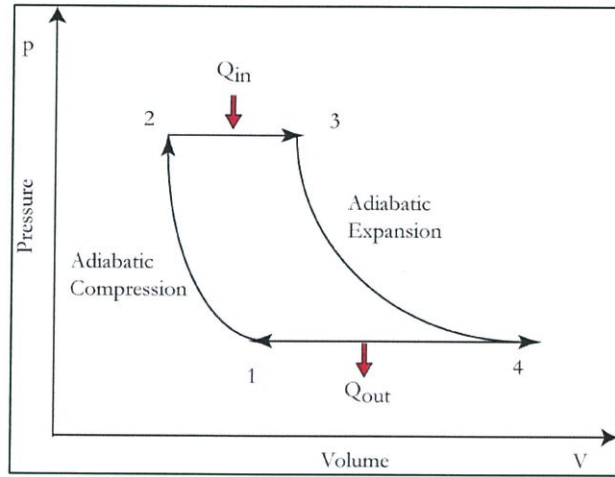
(ข) เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic ติดตั้งใช้ในตู้แช่เย็น
รูปที่ 2.5 (ต่อ)

2.2.3 คลื่นนิ่ง (Standing Wave) และคลื่นเคลื่อนที่ (Travelling Wave)

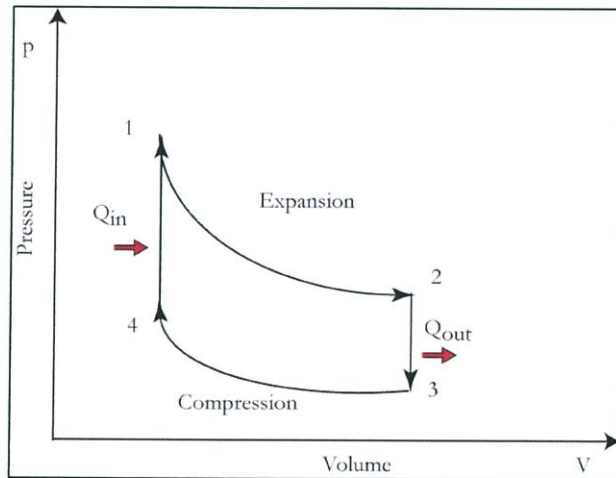
ระบบ Thermoacoustic เบื้องต้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือระบบคลื่นนิ่งและคลื่นเคลื่อนที่ โดยคลื่นนิ่งเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปและย้อนกลับ ส่วนคลื่นเคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียว ดังรูปที่ 2.6 อุปกรณ์เริ่มแรกทาง Thermoacoustic แบบคลื่นนิ่งและคลื่นเคลื่อนที่ คือ ของ Soundhauss และ Rijike ตามลำดับ ความแตกต่างระหว่างคลื่นนิ่งและคลื่นเคลื่อนที่ประการแรกคือ ระบบ Thermoacoustic จะเป็นไปตามวัฏจักร Brayton รูปที่ 2.7 ส่วนคลื่นเคลื่อนที่จะเป็นไปตามวัฏจักร Stirling รูปที่ 2.8 โดยวัฏจักร Brayton ประกอบด้วย 2 กระบวนการ Isobaric ดูดความร้อนและคายความร้อน และ 2 กระบวนการ Adiabatic อัดและขยาย (สำหรับวัฏจักรเทอร์โมอะคูสติกแบบ Brayton รายละเอียดจะอธิบายในส่วนที่ 2.3.6) ส่วนวัฏจักร Stirling ประกอบด้วย 2 กระบวนการ Isochoric ดูดความร้อนและคายความร้อน และ 2 กระบวนการ Isothermal กระบวนการอัดและขยาย



รูปที่ 2.6 รูปแบบคลื่นนิ่ง (Standing Wave) และคลื่นเคลื่อนที่ (Travelling Wave)



รูปที่ 2.7 วัฏจักร Brayton



รูปที่ 2.8 วัฏจักร Stirling

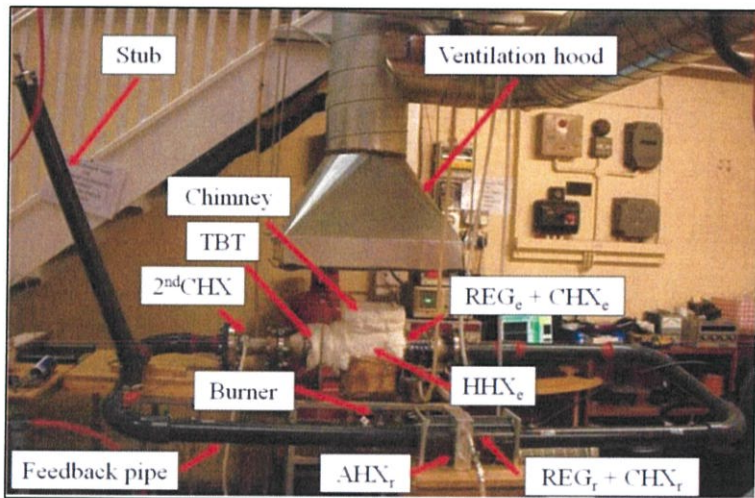
2.2.4 เครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic

แนวคิดการใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดการสั่นของเสียงเป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องทำความเย็น ค่อยๆ พัฒนา มาจากระบบเครื่องยนต์ Thermoacoustic และเครื่องทำความเย็น Thermoacoustic โดยที่เครื่องยนต์จะทำการสร้างการสั่นของเสียงและเครื่องทำความเย็นต้องการเสียงเพื่อทำงานได้ การใช้ อุปกรณ์ทั้งสองร่วมกัน จึงเรียกว่า ระบบ Thermoacoustic Engine-Refrigerator ซึ่งก็คือการสร้างความเย็นจากความร้อน

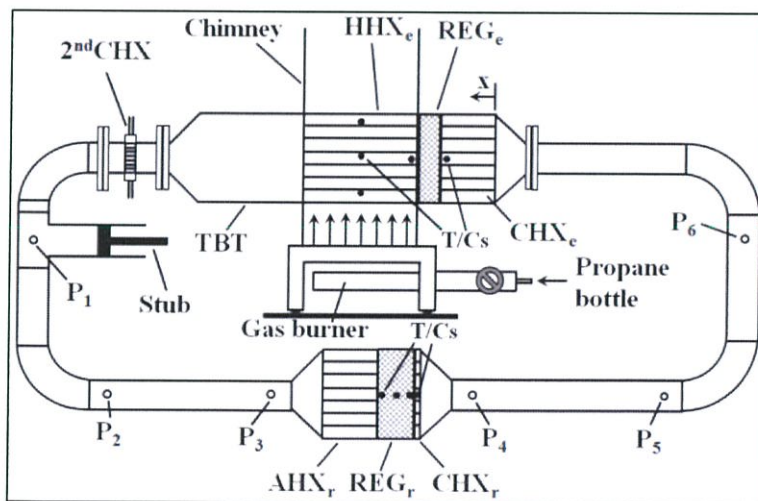
Hofler ได้สร้างเครื่องขับเคลื่อนการทำงานของเครื่องทำความเย็น สามารถสร้างกำลังความเย็น 91W และ Total Cop เท่ากับ 15 % อุณหภูมิต่ำที่ 25°C และด้านร้อน 450°C โดยใช้ก๊าซทำงานผสม ฮีเลียม-อาร์กอน

Chen ได้สร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อให้เกิดการสั่นของเสียง โดยอุปกรณ์จะใช้ตัวเก็บสะสมรังสีจากดวงอาทิตย์เป็นส่วนเครื่องยนต์เพื่อสร้างเสียง เสียงที่ได้จะใช้เพื่อสร้างความเย็นต่อไป อุปกรณ์นี้ทำงานได้ดีพอแต่มีการรั่วไหลและสูญเสียออกไป

รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่าง เครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic เป็นผลงานวิจัย Huifang Kang และคณะ ส่วนหนึ่งเป็นเครื่องยนต์ Thermoacoustic ซึ่งเป็นส่วนขับเคลื่อนให้เกิดการทำงานในส่วนเครื่องทำความเย็น Thermoacoustic ซึ่งเครื่องนี้สามารถผลิตความเย็นได้ที่ -3.6°C



(ก) เครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic



(ข) โครงสร้างภายในเครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็น Thermoacoustic

รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะและโครงสร้างเครื่องทำความเย็น Thermoacoustic

2.3 แนวคิดและทฤษฎี Thermoacoustic [5 และ 6]

เทอร์โมไดนามิกส์และแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับ Thermoacoustic จะนำเสนอในหัวข้อนี้ รวมถึงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และเครื่องทำความเย็นทางเทอร์โมไดนามิกส์ หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ สมการควบคุมและพารามิเตอร์ที่สำคัญใน Thermoacoustics

2.3.1 เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic)

1. สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP)

มี 2 หลักการสำคัญทาง Thermoacoustic คือ Thermodynamic และคลื่นเสียง โดยที่คลื่นเสียงจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไดนามิกส์การสั่นของแก๊ส ได้แก่ ชนิดของแก๊ส ความดัน ความเร็วเฟส เป็นต้น ส่วนเทอร์โมไดนามิกส์จะเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ประสิทธิภาพและการถ่ายโอนความร้อน การเปลี่ยนแปลงพลังงานจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง (ความร้อนไปเป็นเสียงหรือกลับกัน)

ตามกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือพลังงานไม่สามารถสร้างขึ้นหรือทำลายได้ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งหมดของระบบจะเท่ากับความแตกต่างของผลรวมทางเลขคณิตของกระแสความร้อนกับงาน ดังนี้

$$dE = dQ - dW \quad (2.1)$$

กฎข้อที่ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวถึงความไม่เท่าเทียมรวมของระบบ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของกระบวนการ ดังนี้

$$dS = \frac{dQ}{T} + S_{gen} \quad (2.2)$$

โดยมีเงื่อนไขว่า

$$S_{gen} \geq 0 \quad (2.3)$$

เครื่องจักรเทอร์โมไดนามิกส์หรือตัวต้นแบบ นี้จะสร้างงาน (work) โดยการรับความร้อนจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิสูงและคายความร้อนทิ้งให้แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่เครื่องทำความเย็นหรือปั๊มความร้อนจะทำงานโดยดูดซับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำและถ่ายเทความร้อนทิ้งให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง

กฎข้อที่ 1 สำหรับเครื่องจักรและเครื่องทำความเย็น จะเท่ากับ (จากสมการ 2.1)

$$Q_H = Q_L + W \quad (2.4)$$

กฎข้อที่ 2 สำหรับเครื่องจักรจะเท่ากับ (จากสมการ 2.2 และ 2.3)

$$\frac{Q_L}{T_L} - \frac{Q_H}{T_H} \geq 0 \quad (2.5)$$

สำหรับเครื่องทำความเย็น

$$\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} \geq 0 \quad (2.6)$$

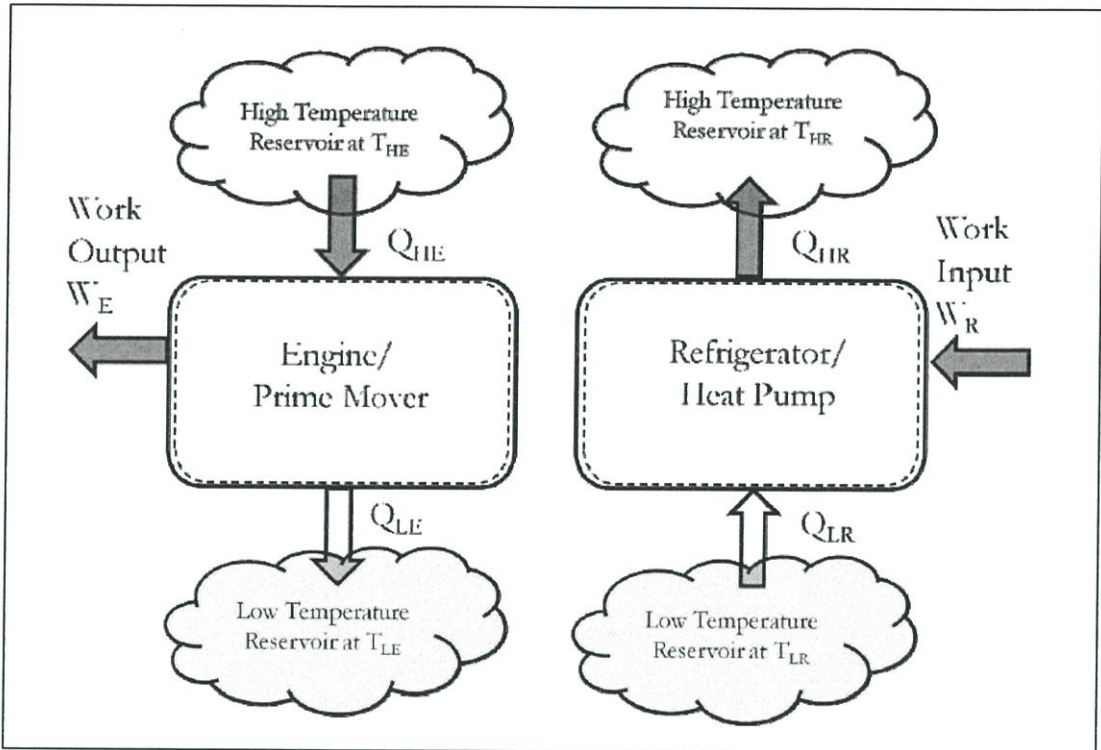
ระหว่างการทำงานของเครื่องจักรเทอร์โมไดนามิกส์ แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ (T_{HE}) จะทิ้งความร้อนที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (T_{LE}) และความร้อนที่สูญเสียไปจะถูกเปลี่ยนเป็น (W_E) Watts และในระหว่างการทำงานของเครื่องทำความเย็นแหล่งความร้อนที่ (T_{LR}) จะทิ้งความร้อนที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (T_{HR}) และความร้อนที่สูญเสียไปจะถูกเปลี่ยนเป็น (W_R) Watts แสดงในรูป 2.10

ความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรความร้อนจะอธิบายในเทอมของประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency, η)

$$\eta = \frac{W_E}{Q_{HE}} \quad (2.7)$$

เมื่อรวมสมการ 2.4 และ 2.5 จะได้

$$\eta = \frac{W_E}{Q_{HE}} \leq \frac{T_{HE} - T_{LE}}{T_{HE}} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.10 การทำงานเครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็นตามวัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์

อัตราส่วน $\frac{T_{HE}-T_{LE}}{T_{HE}}$ เรียกว่า ประสิทธิภาพคาร์โนต์ ตามหลักการของคาร์โนต์จะถือว่าประสิทธิภาพดังกล่าวนี้จะมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรความร้อนใดๆ ที่ย้อนกลับไม่ได้ระหว่างแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ T_{HE} และ T_{LE}

ความสามารถในการทำงานของเครื่องทำความเย็นจะอธิบายในเทอมของ สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของความร้อนที่ได้รับจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่องานสุทธิที่ต้องป้อนให้

จากสมการ 2.4 และ 2.6 จะได้

$$COP_R = \frac{Q_{LR}}{W_R} \leq \frac{T_{LR}}{T_{HR}-T_{LR}} \quad (2.9)$$

โดยที่ $\frac{T_{LR}}{T_{HR}-T_{LR}}$ คือสัมประสิทธิ์สมรรถนะคาร์โนต์ เป็นขีดจำกัดสูงสุดทางทฤษฎีในกระบวนการทำงานของเครื่องทำความเย็นระหว่างแหล่งอุณหภูมิ 2 แหล่ง ซึ่งในทางปฏิบัติสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็นใดๆ จะน้อยกว่าค่าคำนวณเสมอเนื่องจากสภาพย้อนกลับไม่ได้ที่เกิดขึ้นขณะทำงาน

เรายังสามารถรวมระบบเครื่องจักรและเครื่องทำความเย็น Thermoacoustic เข้าด้วยกัน จะได้ว่า Cop รวม จะเท่ากับสัดส่วนความร้อนที่ถ่ายเทออกจากด้านเย็นของเครื่องทำความเย็นจะเป็นความร้อนที่ได้รับเพิ่มเข้าไปในด้านร้อนของเครื่องจักร Thermoacoustic

จะได้สมการดังนี้

$$COP_T = \frac{Q_{LR}}{Q_{HE}} \quad (2.10)$$

สัมประสิทธิ์สมรรถนะคาร์โนต์รวม เท่ากับ

$$Carnot COP_T = \left(1 - \frac{T_{EL}}{T_{HL}}\right) \left(\frac{T_{LR}}{T_{HR} - T_{LR}}\right) \quad (2.11)$$

เมื่อ T_{LE} เป็นความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเครื่องจักร

T_{HE} เป็นความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเครื่องทำความเย็น

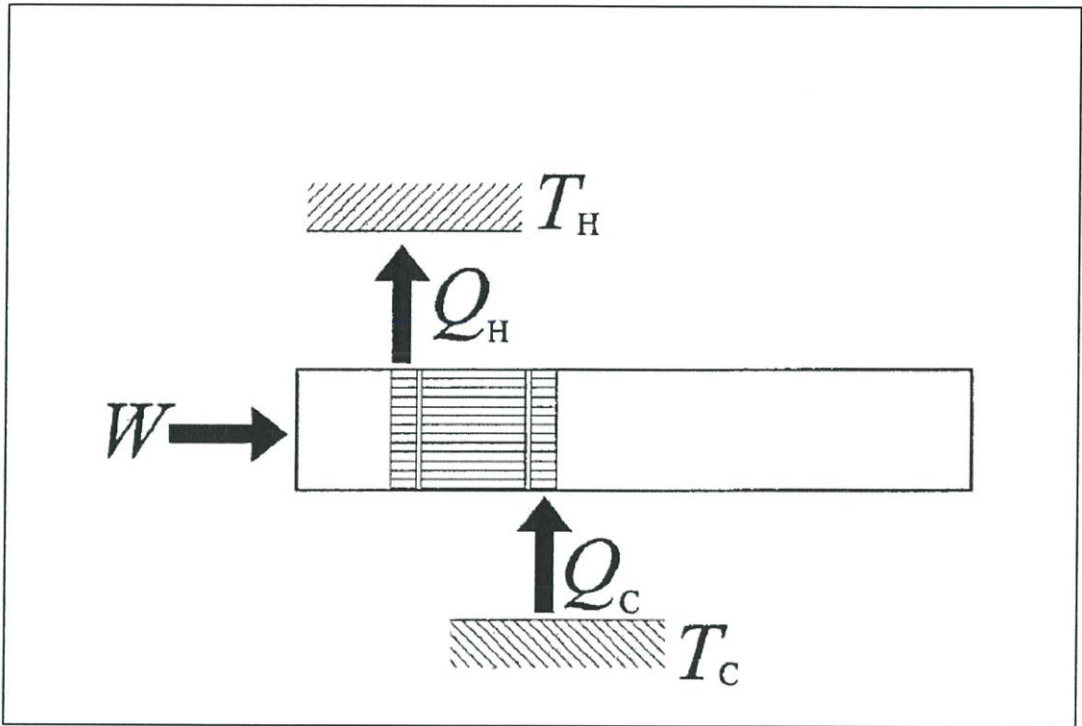
ซึ่ง

$$COP_T < carnot COP_T \quad (2.12)$$

2. สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็น (Coefficient of Performance of The Refrigerator)

เมื่อ T_H และ T_C คือแหล่งอุณหภูมิสูงและต่ำ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปด้านล่าง และให้ Q_C เป็นปริมาณความร้อนของเครื่องทำความเย็นมาจากอุณหภูมิต่ำ และ Q_H เป็นปริมาณความร้อนที่ออกจากเครื่องทำความเย็นไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูง ถ้า W คืองาน (work) ที่เข้าสู่เครื่องทำความเย็นในรูปของงานอัด และเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ตามหลักการเทอร์โมไดนามิกส์

$$Q_H = Q_C + W \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.11 ระบบทำความเย็นแสดงกระบวนการไหลของพลังงาน

นั่นคือ ปริมาณพลังงานที่ขนถ่ายไปยังแหล่งอุณหภูมิสูงจะมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ขนถ่ายมาจากแหล่งอุณหภูมิต่ำและงาน (work) ที่ใส่เข้าระบบเครื่องทำความเย็น

เช่นเดียวกับกฎข้อที่ 2 ตามหลักการเทอร์โมไดนามิกส์

$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C} + (S)_{gen} \quad (2.14)$$

เมื่อ S คือ เอนโทรปีเนื่องจากกระบวนการผันกลับไม่ได้

สมรรถนะของเครื่องทำความเย็นวัดจากเทอมของสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) ซึ่งก็คืออัตราส่วนความร้อนที่ได้ต่องานที่ใส่เข้าไป เป้าหมายหลักของระบบทำความเย็น คือ รักษาอุณหภูมิของแหล่งอุณหภูมิต่ำโดยถ่ายความร้อนออกให้คงที่ซึ่งก็คือคายเข้าสู่พื้นที่เย็นของสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้น ความร้อนที่ได้ของเครื่องทำความเย็น คือ Q_C ฉะนั้น สมการสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) ก็คือ

$$COP = \frac{\text{Removed heat}}{\text{Work done}} = \frac{Q_C}{W} \quad (2.15)$$

แทนค่าสมการ 2.13 ในสมการด้านบน จะได้

$$COP = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} \quad (2.16)$$

สำหรับกระบวนการจริงทั้งหมด $(S)_{gen} \geq 0$

$$\frac{Q_H}{T_H} \geq \frac{Q_C}{T_C} \quad (2.17)$$

และ

$$\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_C}{T_C} \geq 0 \quad (2.18)$$

รวมสมการ 2.17 และ 2.18 จะได้

$$COP = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} \leq \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (2.19)$$

แต่

$$COP_C = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (2.20)$$

เมื่อ COP_C คือ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของระบบทำความเย็นอุดมคติ ทำงานเป็นวัฏจักรคาร์โนต์ หรือรู้จักกันในชื่อระบบทำความเย็นแบบคาร์โนต์ สมการที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่า COP ของระบบทำความเย็นจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระบบทำความเย็นแบบคาร์โนต์

2.3.2 ทฤษฎีคลื่นเสียง

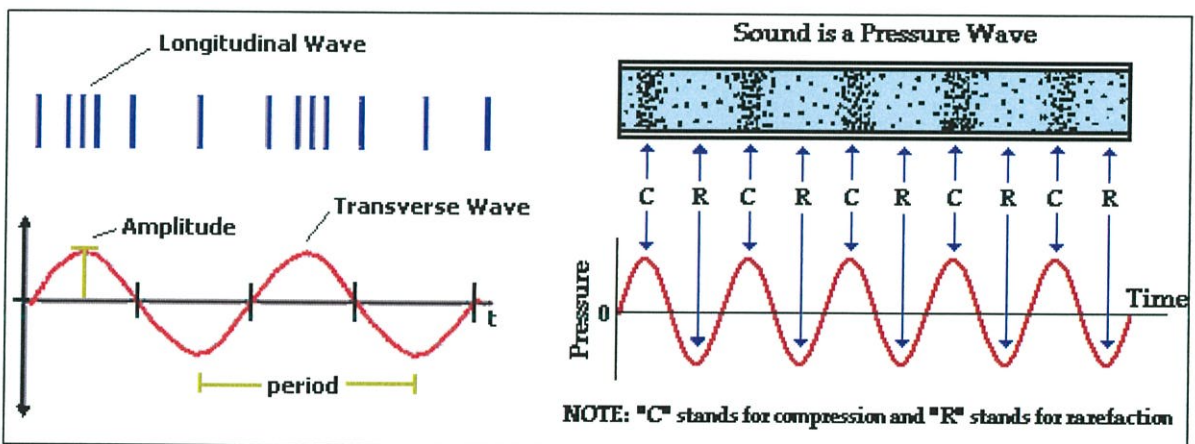
ความเข้าใจด้านการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงมีความสำคัญมาก เนื่องจากสนามความดันและความเร็วสร้างมาจากคลื่นเสียง ซึ่งมีความจำเป็นเพื่อจะได้เข้าใจการทำงานของเครื่องเทอร์โมอะคูสติก โดยทฤษฎีเสียงจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาคลื่นตามยาว โดยจะสร้างการอัดและขยายของแก๊สตัวกลาง กระบวนการอัดของแก๊สจะเกิดขึ้นที่จุดสูงสุดของคลื่นรูปไซน์และกระบวนการขยายของแก๊สจะอยู่ที่จุดต่ำสุดของคลื่น

ตัวอย่างทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 2.12 ในคลื่นตามยาว ทิศทางการกระจัดของอนุภาคจะขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งจะสั้นอย่างง่ายไปและกลับโดยค้ำึงถึงตำแหน่งสมดุล ผลที่ได้จากการอัดและขยายตัวของคลื่นตามยาว จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของความดันเป็นไปในแนวแกนนอนของการสั่น

คลื่นตามยาวต้องการตัวกลาง เช่น อากาศหรือน้ำ เพื่อเคลื่อนที่ผ่านไป นั่นก็คือว่า คลื่นชนิดนี้จะไม่สามารถสร้าง หรือ เคลื่อนที่ผ่านในสุญญากาศได้ คลื่นเสียงทุกชนิดเป็นคลื่นตามยาวและฉะนั้นคุณสมบัติของคลื่นตามยาวที่ต้องกล่าวถึงเพื่อให้เข้าใจกระบวนการเทอร์โมอะคูสติก มี 3 ข้อ คือ 1) แอมพลิจูด 2) ความถี่ และ 3) ความยาวคลื่น

การกระจัดของคลื่นมาจากตำแหน่งสมดุล ซึ่งเรียกว่า แอมพลิจูดคลื่น ซึ่งจะบ่งบอกถึงพลังงานของคลื่น แอมพลิจูดมากขึ้นก็ส่งผลให้พลังงานหรือความเข้มของคลื่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานของคลื่นเสียงจะสามารถคาดคะเนได้จากการวัดแอมพลิจูด ซึ่งพลังงานหรือความเข้มของคลื่นเสียงสามารถวัดได้ในเทอมของเดซิเบล ถ้าให้คลื่นเสียงประกอบด้วยซูเปอร์โพสิชัน ของคลื่นไซน์ที่แตกต่างกัน จะทำให้แอมพลิจูดและพลังงานที่ให้กับคลื่นสามารถคาดคะเนได้โดยการอินทิเกรตพลังงานในองค์ประกอบความถี่ทั้งหมดของคลื่นที่ให้ ช่วงเวลาของคลื่นก็คือเวลาที่ต้องการเพื่อให้คลื่นสามารถเคลื่อนที่ผ่านจุดใดๆได้อย่างสมบูรณ์

สมการพื้นฐานของความถี่คลื่น คือส่วนผกผันของช่วงเวลา หรือจำนวนของคลื่นที่ผ่านจุดหนึ่งในหน่วยเวลา จะวัดได้ในหน่วย เฮิรตซ์ ซึ่งก็คือจำนวนลูกคลื่นที่ผ่านจุดหนึ่งในหนึ่งวินาทีนั่นเอง



รูปที่ 2.12 แสดงการอัดและขยายของคลื่นตามยาวกับคลื่นรูปไซน์

ในคลื่นเสียงสามารถวัดพิทเสียงได้ โดยที่ความถี่ยิ่งสูง พิตยิ่งมากตามไปด้วย ความยาวคลื่นอธิบายได้ว่าเป็นระยะทางในแนวแกนนอนจากจุดเริ่มต้นของคลื่นจนถึงจุดสิ้นสุดของคลื่น ซึ่งก็สามารถวัดระยะจากจุดสูงสุดของคลื่นหนึ่งไปยังจุดสูงสุดที่อยู่ถัดไปหรือจากจุดต่ำสุดของคลื่นหนึ่งไปยังจุดต่ำสุดถัดไป ในเสียง เราสามารถอธิบายความยาวคลื่นว่าเป็นระยะทางระหว่างสองจุดการอัดและขยาย

หัวข้อถัดมา ผลของการอัดและขยายของคลื่นเสียงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันซึ่งจะมีรูปแบบเหมือนรูปแบบคลื่น การเปลี่ยนแปลงของคลื่นนี้ถือว่าเป็นกุญแจสำคัญในกระบวนการที่เป็นสาเหตุของทางเทอร์โมอะคูสติก ความดันที่เปลี่ยนแปลงสามารถคาดคะเนได้จากความเข้มของเสียง สมการที่ 2.21 ความเข้มเสียง (L) ในหน่วยเดซิเบล สามารถคาดคะเนจากการวัดความดันใน 2 จุด เดซิเบลหรือหนึ่งในสิบของเบล ก็คือ 20 เท่าลอการิทึม ของอัตราส่วนของความดันเสียงต่อความดันอ้างอิง หน่วยนี้วัด

มาจากระดับความดันเสียง และมีประโยชน์เพราะว่าหูดัดยีนเสียงเอ็กโปเนนเชียล สมการ 2.21 ระดับความดันเสียงในหน่วยเดซิเบล เป็นการคำนวณโดยใช้การวัดความดันเสียง กับความดันอ้างอิง ซึ่งความดันอ้างอิงจะสัมพันธ์ถึงการได้ยินเสียงของหู มีค่าเท่ากับ 0.00002 N/M^2 นั่นก็คือถ้าคลื่นเสียงเก็บค่าเดซิเบลมากเสียงก็จะดัง

$$L = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \quad (2.21)$$

สมการนี้บ่งชี้ให้ทราบว่ายิ่งความดันเปลี่ยนแปลงมาก ความเข้มเสียงก็จะยิ่งมาก จากสมการสภาวะแก๊สอุดมคติ

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (2.22)$$

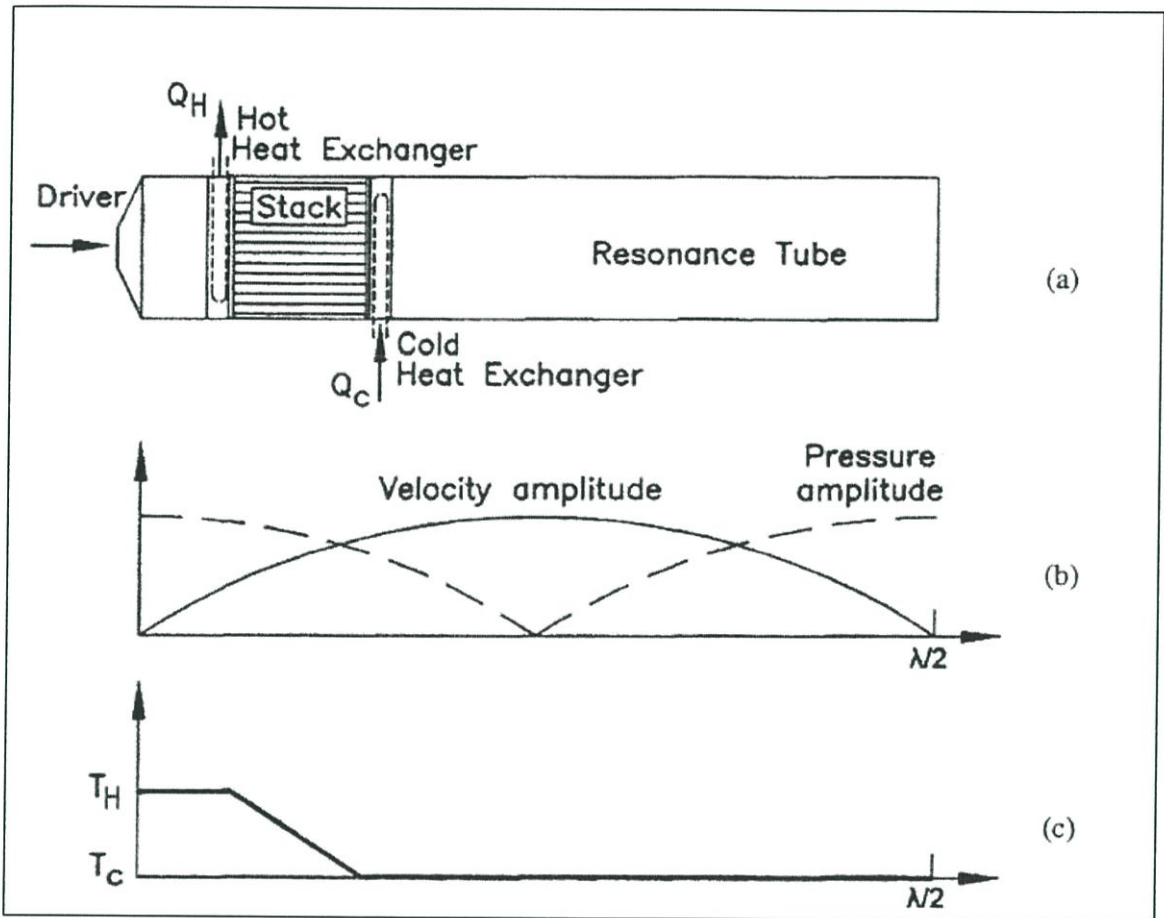
เมื่อ P คือความดัน ρ คือความหนาแน่น T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ และ R คือค่าคงที่ของแก๊ส สมการข้างบนจะบ่งบอกว่าถ้าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นน้อยมาก การเปลี่ยนแปลงของความดันจะเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั่นเอง

2.3.3 ความสำคัญของหลักการเทอร์โมไดนามิกส์

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงเทอร์โมไดนามิกส์ บนพื้นฐานของหลักการทางเสียงและเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อจะได้เข้าใจปรากฏการณ์การทำความเย็นด้วยเสียง อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยตัวกำเนิดเสียงติดเข้ากับท่อชุดกำทอน ที่บรรจุด้วยก๊าซทำงาน ภายในท่อกำทอนจะประกอบด้วยสแต็กและตัวแลกเปลี่ยนความร้อน โครงสร้างหลักของอุปกรณ์นี้แสดงดังรูป 2.13

ตัวกำเนิดเสียง จะติดตั้งอยู่ส่วนเปิดด้านหนึ่งของท่อกำทอน เพื่อทำหน้าที่ในการกระตุ้นก๊าซทำงาน (เป็นก๊าซที่มีค่า Prandtl Number ต่ำ) และเป็นตัวสร้างคลื่นนิ่งเข้าสู่ท่อกำทอน ฉะนั้นการสั่นของก๊าซที่อยู่ในท่อกำทอน ซึ่งเกิดรูปแบบช่วงอัดและขยาย กล่าวอย่างง่ายก็คือ เมื่อไม่คิดเรื่องผลจากความหนืดและการนำความร้อนในแนวยาว ความยาวของท่อโดยส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นนิ่งหรือหนึ่งในสี่ เป็นต้น

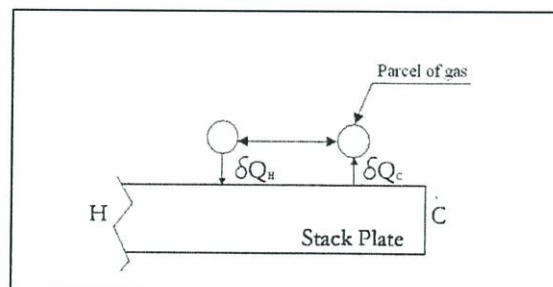
คลื่นนิ่งสร้างโนดความเร็วที่ปลายทั้งสองข้างและโนดความดันที่ตรงกลางของท่อกำทอน ดูจากรูปที่ 2.13 ถ้าใส่สแต็กไว้ข้างในท่อ ก๊าซจะอยู่ที่ตำแหน่งความดันสูงของท่อ ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มความอุณหภูมิให้กับก๊าซและสามารถขนถ่ายความร้อนได้สูงสุดไปสู่สแต็กผลก็คือ ทำให้เพิ่ม-ลดอุณหภูมิของสแต็กที่จุดปลายทั้งสองข้างได้ดี



รูปที่ 2.13 (a) โครงสร้างเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก (b) การเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันในท่อกำทอน (c) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในท่อกำทอน

2.3.4 การถ่ายเทความร้อนภายในสแต็ก

เพื่อให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนภายในสแต็กภายใต้อิทธิพลของคลื่นเสียง (ปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก) การสั่นของอนุภาคก๊าซตามแผ่นสแต็ก อนุภาคก๊าซจะอยู่ใกล้กับสแต็กฝั่งเย็นมากกว่าฝั่งร้อน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกการขนถ่ายความร้อนภายในสแต็ก

วัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์ของอนุภาคแก๊ส แสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 วัฏจักรนี้ประกอบด้วย 4 กระบวนการ การอัดแบบอะเดียแบติก (จากชั้น A ไป B) สูญเสียความร้อนด้วยความดันคงที่ (จากชั้น B ไป C) การขยายตัวแบบอะเดียแบติก (จากชั้น C ไป D) และการรับความร้อนด้วยความดันคงที่ (จากชั้น D ไป A) ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของกระบวนการเทอร์โมไดนามิกส์ ชั้น A อนุภาคแก๊สอยู่ใกล้กับด้านเย็นของสแต็ก และมีอุณหภูมิคือ T_A ในกระบวนการเริ่มแรก อนุภาคแก๊สจะอยู่ภายใต้การอัดแบบอะเดียแบติกและเคลื่อนที่ไปทางซ้าย (มุ่งหน้าไปทางความดันแอนติโนด) ที่จุดสุดท้ายของกระบวนการ อุณหภูมิของแก๊สจะเพิ่มขึ้นเป็น T_B ที่ผลสุดท้าย อนุภาคแก๊สจะร้อนกว่าสแต็กและความร้อนจะถ่ายเทแบบย้อนกลับไม่ได้ไปที่สแต็ก เป็นช่วงกระบวนการที่ 2 โดยมีปริมาณความร้อน คือ δQ_H ที่จุดสุดท้ายของกระบวนการนี้ อุณหภูมิของก๊าซจะลดลง เป็น T_C สำหรับกระบวนการที่ 3 อนุภาคก๊าซจะอยู่ภายใต้การขยายตัวแบบอะเดียแบติกและเคลื่อนที่ไปยังจุดเริ่มต้น อุณหภูมิจะลดลงเป็น T_D ที่จุดสุดท้ายของกระบวนการอนุภาคก๊าซจะเย็นกว่าสแต็ก ในกระบวนการที่ 4 จะเกิดการถ่ายโอนความร้อนแบบย้อนกลับไม่ได้ จากสแต็กไปสู่อนุภาคแก๊ส โดยมีปริมาณเท่ากับ δQ_C ผลก็คือ อุณหภูมิของแก๊สจะเพิ่มขึ้นไปเท่ากับตอนเริ่มต้นที่ T_A ที่จุดสิ้นสุดของกระบวนการ อนุภาคแก๊สเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ ของวัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์และจะเริ่มกระบวนการอีกครั้งด้วยเหตุนี้ คลื่นเสียงในท่อ จะบีบความร้อนจากด้านเย็นของสแต็กไปด้านร้อน และสร้างอุณหภูมิเกรเดียนต์ระหว่างสแต็ก แสดงดังรูปที่ 2.13 (c)

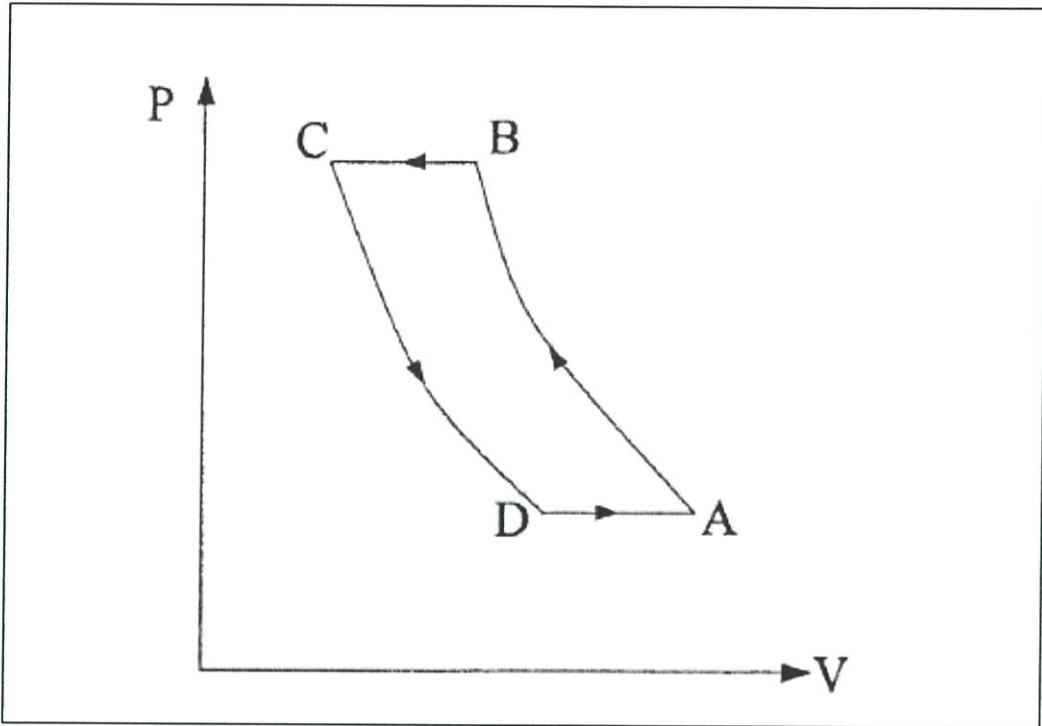
ให้อุณหภูมิ ความดัน และปริมาณของอนุภาคแก๊สที่จุด A (จุดเริ่มต้นของวัฏจักร) เป็น

$$T_A = T_m - X_1 \nabla T_m \quad (2.23)$$

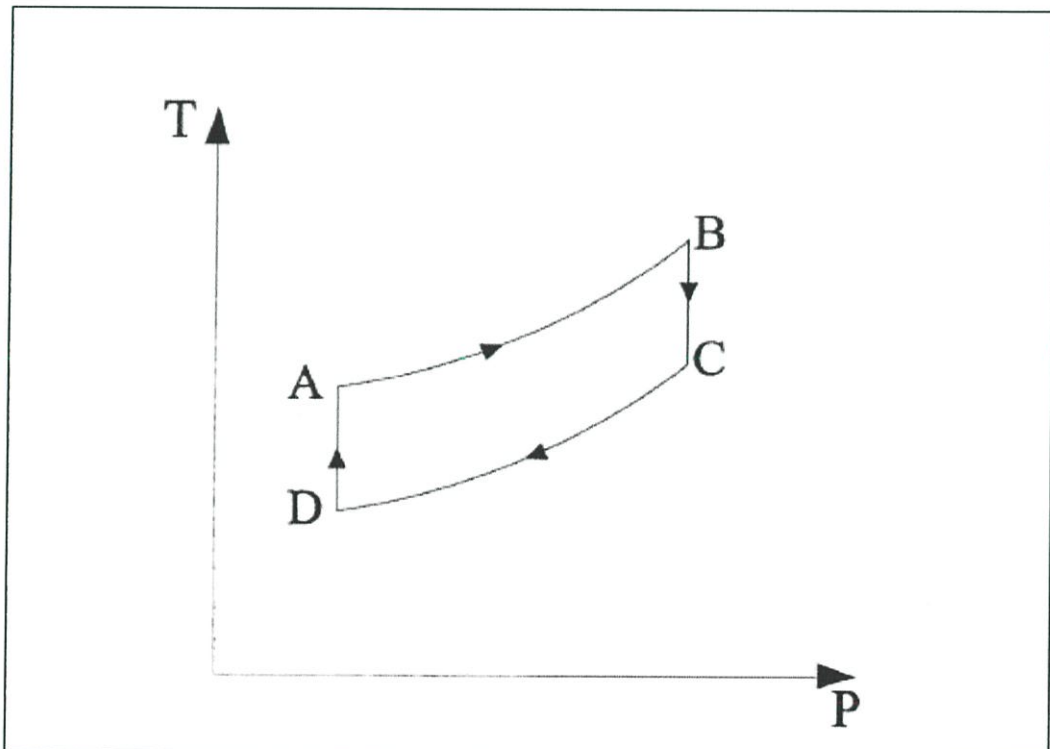
$$P_A = P_m - P_1 \quad (2.24)$$

$$V_A = V \quad (2.25)$$

โดยที่ T_m และ P_m เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยและความดันเฉลี่ยของอนุภาคแก๊ส และ X_1 คือครึ่งหนึ่งของระยะทางซึ่งอนุภาคแก๊สเคลื่อนที่ระหว่างกระบวนการสันตัว และ ∇T_m คือ อุณหภูมิเกรเดียนต์เฉลี่ยตามแนวสแต็ก สำหรับ P_A V_A และ T_A เป็นความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิของอนุภาคแก๊สที่จุด A ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 วัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์ของอนุภาคแก๊สระหว่างความดันกับปริมาตร



รูปที่ 2.16 วัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์ของอนุภาคแก๊สระหว่างอุณหภูมิกับความดัน

ในกระบวนการแรก อนุภาคแก๊สจะเคลื่อนที่เป็นระยะทาง $2X_1$ ไปทางด้านซ้ายของท่อกำหนด ภายในสแต็ก และอุณหภูมิกับความดันจะเพิ่มขึ้นและปริมาณจะลดลงเป็น $2T_1$ $2P_1$ และ V_1 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ของกฎเทอร์โมไดนามิกส์และก๊าซอุดมคติ อุณหภูมิสามารถแสดงได้ คือ

$$\frac{T_1}{T_m} = \frac{\gamma - 1 p_1}{\gamma p_m} \quad (2.26)$$

เมื่อ γ คือ อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะไอโซบาริกกับไอโซคลอริก

สำหรับในขั้นที่ 2 อุณหภูมิ ความดัน และปริมาตร สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$T_B = T_m - X_1 \nabla T_m + 2T_1 \quad (2.27)$$

$$P_B = P_m + P_1 \quad (2.28)$$

$$V_B = V - V_1 \quad (2.29)$$

เมื่อ P_B V_B T_B เป็นความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิของอนุภาคแก๊สที่จุด B ตามลำดับ

ความแตกต่างของอุณหภูมิจะหว่างอนุภาคแก๊สกับแผ่นสแต็ก คือ

$$\delta T = 2T_1 - 2X_1 \nabla T_m \quad (2.30)$$

โดยที่ $2X_1 \nabla T_m$ คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในแผ่นสแต็ก

ปริมาณความร้อน δQ ที่ไหลจากอนุภาคแก๊สไปสู่สแต็กในกระบวนการที่ 2 จะได้

$$\delta Q = mc_p \delta T \quad (2.31)$$

กำลังเสียงเข้าที่ต้องการเพื่อถ่ายโอน δQ ใน 1 รอบวัฏจักร คือ

$$\delta W \approx -2p_1(\beta V)_m \delta T \quad (2.32)$$

ในกระบวนการที่ 3 อนุภาคแก๊สจะเคลื่อนที่ไปด้านความดันโนด ซึ่งทำให้ ความดันของอนุภาคลดลง และอนุภาคแก๊สเย็นตัว ที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการนี้ (ชั้น C)

$$T_C = T_m + X_1 \nabla T_m \quad (2.33)$$

$$P_C = P_m + P_1 \quad (2.34)$$

$$V_C = V - V_1 - \delta V \quad (2.35)$$

โดยที่ P_C V_C T_C เป็นความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิของอนุภาคแก๊สที่จุด C ตามลำดับ

ในกระบวนการที่ 4 อนุภาคแก๊สเย็นกว่าสแตกทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากสแตกไปอนุภาคแก๊ส ที่จุดเริ่มต้นกระบวนการนี้ (ชั้นD)

$$T_D = T_m + X_1 \nabla T_m - 2T_1 \quad (2.36)$$

$$P_D = P_m - P_1 \quad (2.37)$$

$$V_D = V - \delta V \quad (2.38)$$

โดยที่ P_D V_D T_D เป็นความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิของอนุภาคแก๊สที่จุด D ตามลำดับ

ถ้าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสแตก ($2X_1 \nabla T_m$) เท่ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอะเดียบาติก ในช่วงกระบวนการอะเดียบาติก ($2T_1$) ดังนั้นอุณหภูมิการเดียนร์ในสแตกจะเรียกว่า อุณหภูมิเกอร์เดียนร์วิกฤติ จะได้ว่า

$$(\nabla T)_{crit} = \frac{T_1}{X_1} \quad (2.39)$$

รวมสมการที่ 2.28 $T_1 = \left[\frac{\beta T}{\rho c_p} \right]_m p_1$ และ $X_1 = \frac{u_1}{\omega}$ จะได้ว่า

$$(\nabla T)_{crit} = \frac{p_1 \omega}{\rho_m c_p u_1} \quad (2.40)$$

อุณหภูมิเกอร์เดียนร์วิกฤติเปลี่ยนเป็นอุณหภูมิเกอร์เดียนร์สามัญตามสแตก จะได้

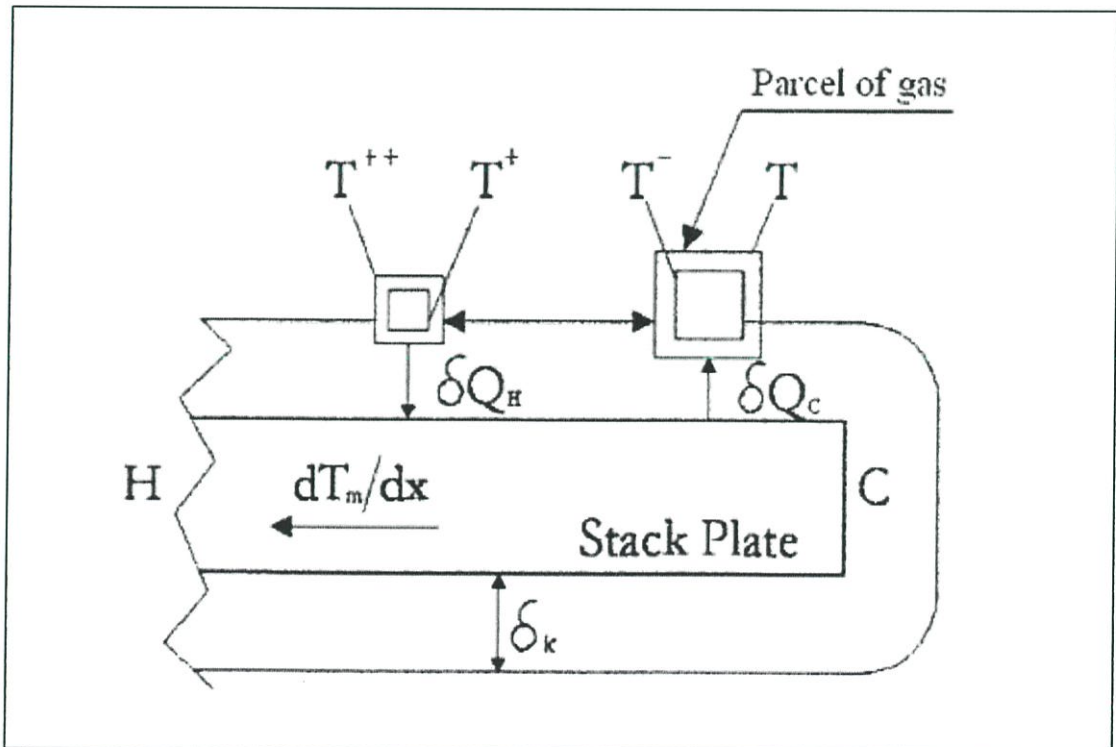
$$\Gamma = \frac{(VT)_m}{(VT)_{crit}} \quad (2.41)$$

ถ้า $\Gamma < 1$ ความร้อนจะขนถ่ายจากด้านเย็นของสแต็กไปยังด้านร้อน (ไปยังความดันแอนติโนด) สำหรับกรณีนี้งานจะติดลบ(เกิดงานในระบบ) และอุปกรณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกจะเป็นประเภทเครื่องทำความเย็น

ถ้า $\Gamma = 1$ ไม่มีการใส่งานเข้าระบบและการไหลของความร้อน

ถ้า $\Gamma > 1$ การขนถ่ายความร้อนจะเป็นบวก และความร้อนจะไหลจากด้านร้อนไปยังด้านเย็นของสแต็ก (ไปยังด้านความดันโนด) งานที่เป็นบวกในกรณีนี้บ่งชี้ว่าเกิดงานขึ้นในระบบ นั่นก็คือ งานที่ได้ออกมาเกิดจากการสร้างขึ้นของอุปกรณ์และจะเป็นอุปกรณ์ประเภท Prime Mover

ความร้อนที่มีการขนถ่ายด้วยอนุภาคแก๊สในโรบอวัญจักรจะเป็นอนุภาคแก๊สที่อยู่ด้านความดันสูง ซึ่งก็คืออนุภาคแก๊สที่อยู่ด้านซ้าย แสดงดังรูปที่ 2.17 ซึ่งอนุภาคแก๊สจะเคลื่อนที่เป็นวัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์และส่งความร้อนให้กับสแต็ก ถ้าวัฏจักรเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอนุภาคแก๊สทำงานจะเก็บเอาความร้อนจากด้านเย็นและขนถ่ายมาสู่ด้านร้อนของสแต็ก (ด้านร้อนจะอยู่ในฝั่งความดันแอนติโนด) ผลก็คือ อุณหภูมิเกรเดียนต์ จะเกิดขึ้นระหว่างปลายทั้งสองด้านของสแต็ก



รูปที่ 2.17 เป็นแผ่นสแต็กและองค์ประกอบย่อยในวัฏจักรเทอร์โมอะคูสติก สัญลักษณ์บวก-ลบ บนตัวแปรคือการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (T)

2.3.5 ช่วงกว้างในระบบเทอร์โมอะคูสติก

ในเครื่องทำความเย็นด้วยระบบเสียง มีช่วงกว้างในสแต็กอยู่ 2 ประเภทที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ ประเภทที่ 1 เรียกว่า Thermal Penetration Depth (δ_k) และอีกอย่างหนึ่งเรียกว่า Viscous Penetration Depth (δ_v) ซึ่งค่า Thermal Penetration Depth (δ_k) จะมีความสัมพันธ์ถึงความหนาในแต่ละชั้นของสแต็กซึ่งความร้อนสามารถแพร่ผ่านในระหว่างการสั่นในรอบวัฏจักรของอนุภาคแก๊ส ก็คือ

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2K}{\rho C_p \omega}} \quad (2.42)$$

โดยที่ K คือค่าการนำความร้อนของแก๊ส C_p คือค่าความจุความร้อนต่อหน่วยมวลที่ความดันคงที่ ρ คือค่าความหนาแน่นของแก๊สที่อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) และ ω คือค่าความถี่เชิงมุม นั่นคือ $\omega = 2\pi f$ โดยที่ f คือความถี่ของคลื่นเสียง

สำหรับ Viscous Penetration Depth (δ_v) จะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นสแต็กที่ทำให้เกิดความหนืด คือ

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}} \quad (2.43)$$

โดยที่ μ คือความหนืดไดนามิกส์ของแก๊ส

ถ้าสแต็กมีระยะห่างมากเกินไปกว่าค่า Thermal Penetration Depth แก๊สจะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนกับสแต็กได้ ก็คือ การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาคแก๊สกับแผ่นสแต็กจะเกิดขึ้นเพียงช่วงระยะที่น้อยกว่า Thermal Penetration Depth ของแผ่นสแต็ก ผลของความหนืดจะไม่พิจารณาในกระบวนการเทอร์โมอะคูสติก ค่าความหนืดจะมีค่าลดลงเมื่อช่องว่างระหว่างสแต็กเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าความร้อนที่สัมผัสกับแก๊สและสแต็กลดลงก็มีผลให้การขนถ่ายความร้อนลดลงด้วย ดังนั้นค่าทั้งสองนี้จึงใช้เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็ก ระยะที่เหมาะสมที่สุดคือมีค่าความหนืดต่ำที่สุดและการสัมผัสความร้อนมีมากพอที่จะขนถ่ายความร้อน ค่าอัตราส่วนระหว่าง Viscous Penetration Depth และ Thermal Penetration Depth เรียกว่า Prandtl Number (σ)

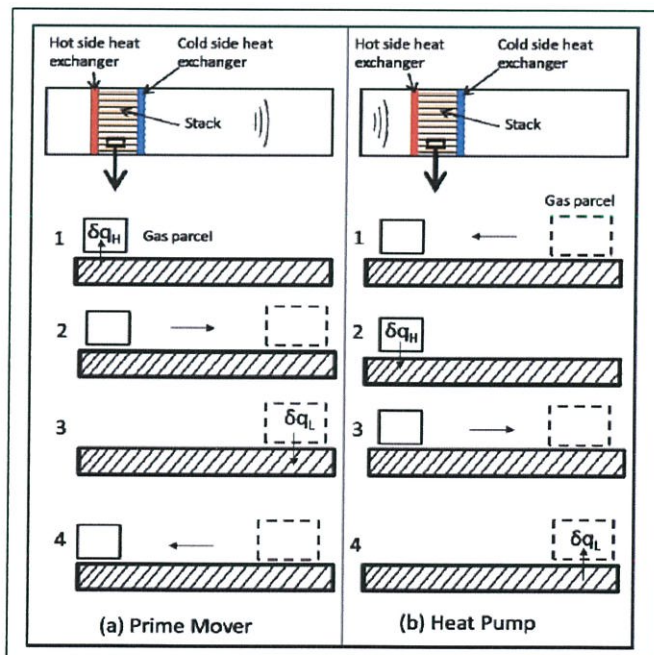
$$\sigma = \left[\frac{\delta_v}{\delta_k} \right]^2 \quad (2.44)$$

ค่า Prandtl Number (σ) คือค่าเฉพาะตัวของก๊าซแต่ละชนิด สำหรับอุปกรณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ก๊าซซึ่งมีค่า Prandtl Number ต่ำ จะทำให้ขนถ่ายความร้อนได้สูงและผลจากความหนืดจะต่ำ

สำหรับเครื่องทำความเย็นทางเทอร์โมอะคูสติก แอมพลิจูดการกระจัดของแก๊ส (X_1) คือ อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดความเร็ว ($|u_1|$) กับความเร็วเชิงมุม (ω) ของคลื่น ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นเสียงและความยาวในแนวนอนของสแต็ค และมีค่ามากกว่าค่า Penetration Depth ทั้งสอง

2.3.6 Thermoacoustics

ในชีวิตประจำวันของเราจะได้ยินเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงต่างๆอยู่ตลอดเวลา การได้ยินเสียงของเราเกิดจากหูได้รับพลังงานการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงผ่านโมเลกุลของอากาศ ลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของอากาศจะอยู่ในรูปของคลื่นตามยาว มีผลทำให้ความดันของอากาศบริเวณที่มีการถ่ายทอดพลังงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากความดันปกติ บริเวณที่มีความดันมากกว่าปกติเราเรียกว่า ส่วนอัด ส่วนบริเวณที่มีความดันน้อยกว่าปกติเราเรียกว่า ส่วนขยาย ตัวอย่างเสียงที่เกิดขึ้น เช่น เสียงพูด จะมีความดันเปลี่ยนแปลง 10^{-6} psi มีการแกว่งของอุณหภูมิ 10^{-4} c และที่ 120 เดซิเบล ความดันเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10^{-2} psi มีการแกว่งอุณหภูมิ 10^{-2} c เป็นต้น จากตัวอย่างคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมากที่จะนำมาใช้งานได้ทันที ดังนั้นวิธีการที่จะแยกแยะงานออกจากคลื่นเสียงก็คือการใส่วัสดุแข็งที่มีความจุความร้อนจำเพาะสูงและมีพื้นที่สัมผัสอนุภาคการสั่นของอากาศมาก เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบความจุความร้อนจำเพาะกับอนุภาคแก๊สแล้ว วัสดุแข็งจะสามารถเก็บและแลกเปลี่ยนความร้อนกับแก๊สได้ ซึ่งระหว่างที่ปริมาตรก๊าซขยายตัวในวัฏจักรการสั่น แก๊สจะดูดซับความร้อนไว้และในช่วงอัดตัววัสดุแข็งจะเป็นตัวดูดซับความร้อนไว้นั้นเองซึ่งจะทำให้อุณหภูมิรวมของก๊าซคงที่



รูปที่ 2.18 กระบวนการถ่ายขนถ่ายความร้อนโดยการสั่นแบบ Thermoacoustic ในสแต็ค

หลักการทาง Thermoacoustic สามารถแสดงได้ดังรูป 2.18 เมื่อเราบรรจุก๊าซเข้าไปในท่อ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุแข็งที่มีความสามารถในการจุความร้อนสูงและมีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำ เรียกว่า สแต็ก รูปร่างของสแต็กจะประกอบด้วยรูพรุนลักษณะอาจคล้ายกับรังผึ้ง โดยทำเป็นรูจำนวนมาก เพื่อให้เสียงผ่านได้ และเพื่อให้เกิด Thermoacoustic อุ่นหุุมิที่เกิดขึ้นทั้งสองข้างของสแต็กจะใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนใส่ไว้ที่ปลายทั้งสอง โดยที่ด้านหนึ่งจะมีอุณหภูมิสูงและอีกด้านหนึ่งมีอุณหภูมิต่ำ เพื่อใช้หลักการ Lagrangian ต้องติดตามอนุภาคของแก๊ส ซึ่งจะพูดถึงปริมาตรควบคุม การสั่นในระบบ การเคลื่อนที่ของอนุภาคแก๊สจะมีรูปแบบของคลื่นรูปไซน์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจะอธิบายขั้นๆ ดังนี้ ที่ด้านร้อนอนุภาคของแก๊สจะดูดซับความร้อนจากพื้นที่ใกล้เคียงนั้นคือสแต็ก (ขั้นที่1) จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปทางขวาคือด้านเย็น ระหว่างขั้นตอนนี้อุณหภูมิของแก๊สจะขยายปริมาตรมากขึ้น (ขั้นที่2) ทำให้ความดันและอุณหภูมิต่ำลง อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่งสุดท้ายของขั้นตอนที่ 2 อุณหภูมิของแก๊สก็ยิ่งสูงกว่าสแต็กทำให้ความร้อนไอโซบาริกถ่ายโอนจากอนุภาคแก๊สไปสู่สแต็ก (ขั้นที่3) สุดท้ายอนุภาคแก๊สเกิดการอัดอะเดียบาติกจะกลับเข้าสู่สถานะเดิม (ขั้นที่4) และเกิดเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปเรื่อยๆอนุภาคแก๊สก็จะทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสองพื้นที่ที่ต่างกันของสแต็ก มันจะสั่นด้วยความถี่เสียงที่สร้างงานในรูปของคลื่นเสียง นี่จึงถือเป็นปรากฏการณ์แรกของ Thermoacoustic

สำหรับการสร้างปรากฏการณ์เครื่องทำความเย็นจะใช้การสั่นของคลื่นเสียงผ่านสแต็กในท่อ รูปที่ 2.18 (b) จะอัดอนุภาคแก๊สให้มีขนาดเล็กลง (ขั้นที่1) การอัดตัวจะทำให้อุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้นและมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวสแต็ก และเกิดการเคลื่อนที่และถ่ายเทความร้อนไปสู่สแต็ก (ขั้นที่2) และเมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดหนึ่งอุณหภูมิจะลดลงและอนุภาคแก๊สจะขยายตัวทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าพื้นผิวสแต็ก (ขั้นที่3) ทำให้อนุภาคแก๊สดูดซับความร้อนจากสแต็ก (ขั้นที่4) ผลก็คือจะนำความร้อนจากสแต็กทำให้อุณหภูมิสแต็กลดต่ำลงและขนถ่ายไปที่สแต็กอีกด้านทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซเนื่องมาจากสองเหตุผลด้วยกัน คือ 1) เนื่องมาจากการอัดตัวและขยายตัวแบบอะเดียบาติกของคลื่นเสียง 2) เนื่องมาจากอนุภาคของแก๊สกระทำกันระหว่างผิวของสแต็ก ซึ่งระยะทางจะทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และการขนถ่ายความร้อนระหว่างสแต็กกับอนุภาคแก๊สจะมีระยะค่าหนึ่ง เรียกว่า Thermal Penetration Dept (δ_k) โดยที่ค่านี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นเสียงและคุณสมบัติของก๊าซอีกด้วย สำหรับระยะการถ่ายโอนความร้อนที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเป็น 2 เท่าของค่า Thermal Penetration Dept จากพื้นผิวทั้งสอง (บน-ล่าง) อนุภาคของแก๊สจะไม่เคลื่อนที่ไปไกลเกินกว่าค่า Thermal Penetration Dept ในสแต็ก ไม่เกี่ยวกับจำนวนครั้งของการถ่ายโอนของอนุภาค

2.3.7 แนวคิดเกี่ยวกับเสียง

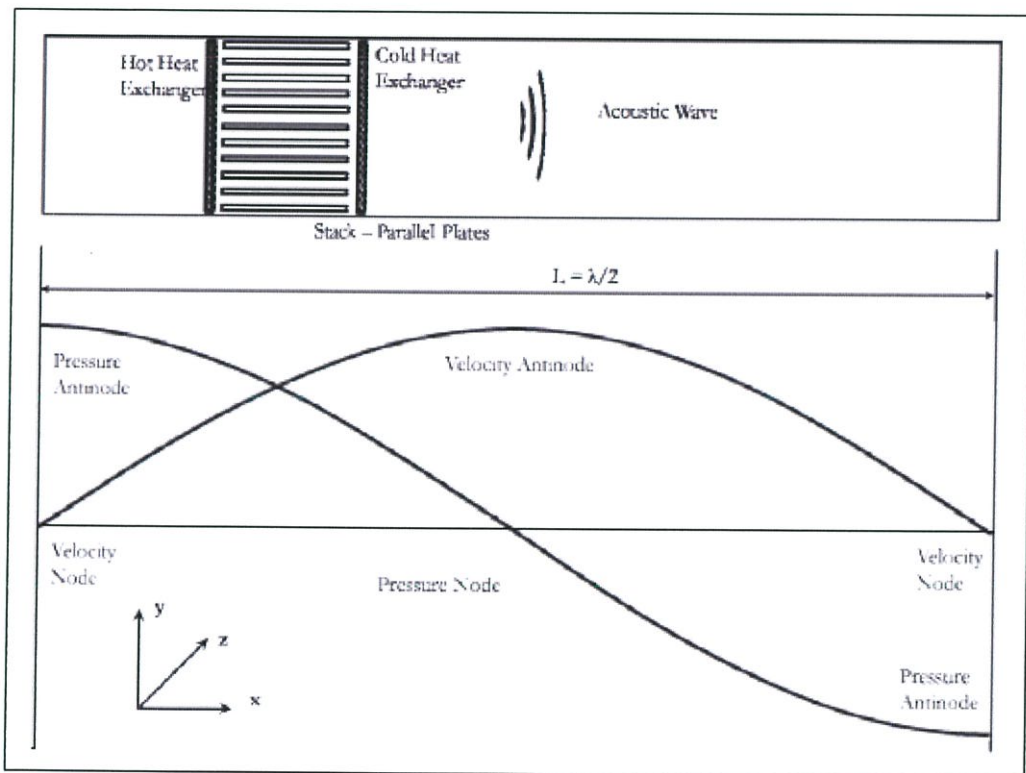
แนวคิดที่สำคัญเกี่ยวกับเสียงที่ควบคุมปรากฏการณ์ Thermoacoustic จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาจะเป็นเครื่อง Thermoacoustic แบบคลื่นนิ่ง ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงข้อจำกัดการใช้คลื่น

นิ่งในเครื่อง Thermoacoustic เมื่อพิจารณาขนาดท่อเรโซแนนซ์ที่มีความยาวเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของความยาวคลื่น โดยมีตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสองข้าง ให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยพลังงานเสียง ให้โนดเป็นจุดๆ หนึ่งในคลื่นนิ่ง ที่มีแอมพลิจูดของพารามิเตอร์หลักต่ำสุดขณะที่ แอนติโนดเป็นจุดที่มีแอมพลิจูดของพารามิเตอร์สูงสุด แอนติโนดจะอยู่ระหว่างกลางของโนดสองโนด

สำหรับการสั่นของคลื่นในหนึ่งมิติกับมุมความถี่ $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f คือความถี่ในการสั่น สมการสำหรับความดัน (2.45) ความเร็ว (2.46) อุณหภูมิ (2.47) ความหนาแน่น (2.48) และเอนโทรปี (2.49) แสดงได้ดังนี้

$$P = P_m + \text{Re}[P_1(x)e^{i\omega t}] \quad (2.45)$$

เมื่อ x คือระยะทางตามทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ความดันเสียงขึ้นกับทิศทางในแนวแกน x เท่านั้น และมีเลขห้อย 1 คือการขยายอันดับที่ 1 ของเทอมซ้อน



รูปที่ 2.19 คลื่นนิ่งในเครื่องยนต์ Thermoacoustic ที่มีความยาวท่อเรโซแนนซ์ยาว L แสดงตำแหน่งของความเร็วและความดันโนดและแอนติโนด

$$u = \text{Re}[u_1(x, y, z)e^{i\omega t}] \quad (2.46)$$

เมื่อ x คือระยะทางตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง y คือทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเสียง และ z เป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ รูปที่ 2.19 ความเร็วเฉลี่ย (u_m) มีค่าเป็นศูนย์ในกรณีที่ไม่มีกรไหล

สมการอุณหภูมิ (T) คือ

$$T = T_m + \text{Re}[T_1(x, y, z)e^{i\omega t}] \quad (2.47)$$

สมการความหนาแน่น (ρ)

$$\rho = \rho_m + \text{Re}[\rho_1(x, y, z)e^{i\omega t}] \quad (2.48)$$

สมการเอนโทรปี (S)

$$s = s_m + \text{Re}[s_1(x, y, z)e^{i\omega t}] \quad (2.49)$$

เทอมของ $e^{i\omega t}$ เป็นส่วนการสั่นที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเสียง ที่ห้อยด้วยตัวเลขคือค่าเฉลี่ยของตัวแปรค่า x จะประกอบในความดันเสียงและความเร็วเสียงในท่อกำทอน ดังสมการ

$$P_1(x) = P_A \cos kx \quad (2.50)$$

$$u_1(x) = \frac{P_A}{\rho_m a} \sin kx \quad (2.51)$$

โดยที่ $k = \omega/a$ เป็นเลขคลื่น P_A คือความดันแอมพลิจูด ρ_m คือความหนาแน่นเฉลี่ยของของไหล a เป็นความเร็วของเสียง และ x คือระยะทางตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง

ในทางอุดมคติ สำหรับคลื่นนิ่ง ความดันและความเร็วเสียงมีเฟสต่างกัน 90 องศา ดังแสดงในสมการ 2.50 และ 2.51 และในรูป 2.19 ซึ่งเนื่องมาจากเวลาที่เสียไประหว่างการถ่ายโอนความร้อนจากสแต็กไปก๊าซและการเคลื่อนที่ของก๊าซเอง หรือเกิดจากอุณหภูมิของก๊าซไม่ได้เปลี่ยนแปลงโดยทันที แต่เวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอด ดังนั้นเมื่อมีการสร้างรูปแบบเฟสจึงเห็นความแตกต่างระหว่างการขนถ่ายความร้อน ความดันและความเร็วของเสียง

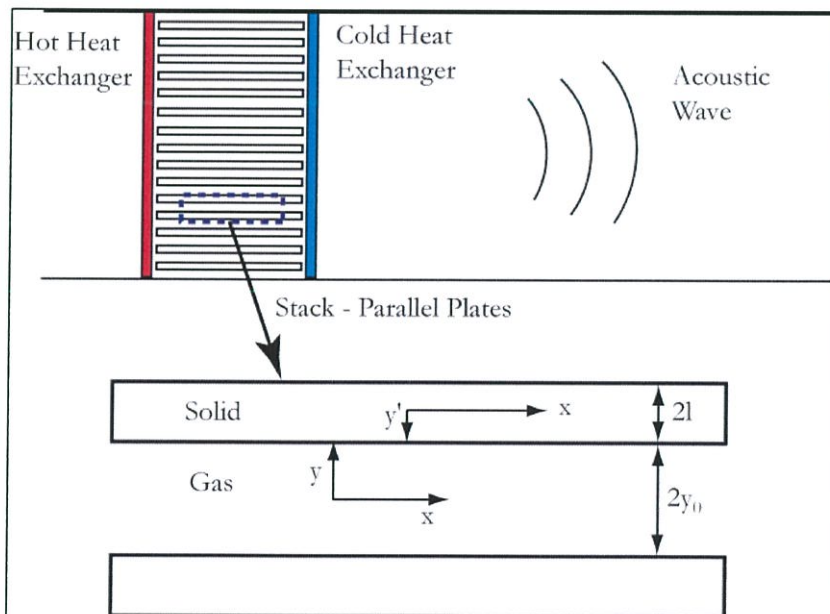
2.4 หลักการ Thermoacoustics [6]

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐานและสมการควบคุมในปรากฏการณ์ Thermoacoustic รายละเอียดที่จะกล่าวถึงเป็นผลงานการพัฒนาของ Rott Wheatley et al และ Swift

เพื่อกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของ Thermoacoustic จะอ้างอิงจากรูป 2.19 โดยให้สแต็กเป็นแผ่นขนานและบรรจุแก๊สในท่อกำทอน โดยตั้งสมมติฐานว่า

1. ระบบมีความเสถียร
2. สแต็กเป็นวัสดุแข็งและไม่เคลื่อนที่
3. ความยาวสแต็กจะสั้นกว่าความยาวของท่อกำทอน
4. ความดันเสียง ขึ้นกับ x เท่านั้น และคงที่ตลอดสแต็ก
5. ผลกระทบจากการไหลแบบปั่นป่วนและราบเรียบไม่พิจารณา
6. เรืองรังสีไม่พิจารณา
7. ความแตกต่างของอุณหภูมิสองข้างสแต็กจะน้อยเมื่อเทียบกับค่าสัมบูรณ์ของอุณหภูมิ สมมติความหนาไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
8. ความเร็วเฉลี่ยของของไหลมีค่าเป็นศูนย์

ระบบโคออดิเนต ให้ x เป็นแกนในแนวทิศทางการเปลี่ยนแปลงของเสียง และแกน y จะตั้งฉากกับสแต็กดังรูป 2.20 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็ก คือ $2y_0$ แต่ละชั้นหนาเท่ากับ $2l$



รูปที่ 2.20 ช่องว่างและความหนาของสแต็ก

สำหรับ 3 สมการพื้นฐานทาง thermoacoustic ได้แก่ สมการคลื่น-สมการพลังงาน-สมการกำลังเสียง

การคายตัวอันดับที่ 1 ในแอมพลิจูดเสียงจะนำไปใช้ในทวิแปร (ตัวอย่าง $\rho = \rho_m + [\rho_1 e^{i\omega t}]$) สมการความต่อเนื่อง คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.52)$$

จัดการเทอมที่มีอันดับสูงสุดออกจะได้

$$i\omega \rho_1 + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_m u_1) + \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (2.53)$$

เมื่อ u_1 เป็น ค่าประกอบแกน x ของความเร็ว v_1 คือค่าประกอบแกน y ของความเร็ว และ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

สมการโมเมนตัม

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) \quad (2.54)$$

เมื่อ \vec{v} คือความเร็ว ρ คือความหนาแน่น p คือ ความดัน μ คือความหนืดไดนามิกส์ และ ζ คือความจุกความหนืด

ค่าประกอบแกน x การคายตัวอันดับที่ 1 ของสมการโมเมนตัม จะได้ว่า

$$i\omega \rho_m u_1 = -\frac{dp_1}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} + \left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot \vec{v}_1) \quad (2.55)$$

เมื่อ u_1 เป็นค่าประกอบแกน x ของความเร็ว

ซึ่ง $\partial/\partial x$ เป็นอันดับของ $1/\lambda$ และ $\partial/\partial y$ เป็นอันดับของ $1/\delta_v$ เราทราบว่าความยาวในแนวแกน x คือ λ และความยาวในแนวแกน y คือ δ_v และ $\delta_v \ll \lambda$ ดังนั้น $\partial/\partial x$ จะสามารถตัดออกได้เมื่อเทียบกับเทอม $\partial/\partial y$ ฉะนั้น ค่าประกอบแกน x ของสมการโมเมนตัม จะได้ว่า

$$i\omega \rho_m u_1 = -\frac{dp_1}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \quad (2.56)$$

ขอบเขตเงื่อนไขของสมการ 2.56 คือ $u_1 = 0$ ที่ $y = 0$ ดังนั้นผลลัพธ์ของ u_1 คือ

$$u_1 = \frac{i}{\omega \rho_m} \left[1 - \frac{\cosh\left[\frac{1+i}{\delta_v} y\right]}{\cosh\left[\frac{(1+i)}{\delta_v} y_0\right]} \right] \frac{dp_1}{dx} \quad (2.57)$$

เมื่อ

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho_m \omega}} \quad (2.58)$$

สมการพลังงาน คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \epsilon + \frac{1}{2} \rho |\vec{v}|^2 \right) = -\nabla \cdot \left[-K \nabla T - \vec{v} \cdot \Sigma + \left(\rho h + \frac{1}{2} \rho |\vec{v}|^2 \right) \vec{v} \right] \quad (2.59)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่น \vec{v} คือความเร็ว p คือความดัน μ คือความหนืดไดนามิกส์ K คือการนำความร้อนของแก๊ส ϵ คือพลังงานภายในและ h คือเอนทัลปีต่อหน่วยมวล และ Σ คือ Viscous Stress Tensor จะได้ว่า

$$\Sigma_{ij} = \mu \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right] + \zeta \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \quad (2.60)$$

เมื่อ ζ คือ ความจุความหนืด

จากสมการการนำ อุณหภูมิของสแต็ก จะได้ว่า

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = K_s \left[\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right] + q \quad (2.61)$$

เมื่อ K_s ค่าการนำความร้อนของสแต็ก C_s คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสแต็ก ρ_s คือความหนาแน่นของวัสดุสแต็กและ q คือเทอมทั่วไปความร้อน

เมื่อไม่คิดค่าเทอมทั่วไปความร้อน จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{K_s}{\rho_s C_s} \nabla^2 T_s \quad (2.62)$$

สมการอันดับที่ 1 ของ 2.30 จะได้สมการอุณหภูมิของวัสดุสแต็ก คือ

$$i\omega T_{s1} = K_s \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial y^2} \quad (2.63)$$

จะได้ผลลัพธ์จากสมการ 2.31 คือ

$$T_{s1} = T_{b1} \frac{\cosh[(1+i)y'/\delta_s]}{\cosh[(1+i)l/\delta_s]} \quad (2.64)$$

เมื่อ δ_s คือ ค่า Thermal Penetration Dept ของสแตก และ T_{b1} เป็นอุณหภูมิแอมพลิจูด หน้าสัมผัสของสแตกกับก๊าซ ที่ $y' = l$

และอุณหภูมิของแก๊สจะได้ว่า (จากสมการ 2.59)

$$\rho T \left[\frac{\partial s}{\partial t} + v \cdot \nabla s \right] = K \nabla \cdot (\nabla T) + \text{เทอมอันดับสูงสุด} \quad (2.65)$$

เมื่อ s คือเอนโทรปีของก๊าซ ρ คือความหนาแน่นของก๊าซ และ K คือค่าการนำความร้อนของก๊าซ

ดังนั้น

$$ds = \left(\frac{C_p}{T} \right) dT - \left(\frac{\beta}{\rho} \right) dp \quad (2.66)$$

เมื่อ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซต่อหน่วยมวล และ β คือสัมประสิทธิ์การขยายความร้อน

จากสมการ 2.65 และ 2.66 จะได้ว่า

$$\rho_m C_p \left(i\omega T_1 + u_1 \frac{dT_m}{dx} \right) - i\omega \beta T_m p_1 = K \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \quad (2.67)$$

ที่ผิวสัมผัสของสแตกและก๊าซ อุณหภูมิของก๊าซและสแตกจะเท่ากัน เพราะฉะนั้น เงื่อนไขขอบเขต จะได้ว่า

$$\begin{aligned} T_1(y_0) &= T_s(l) = T_b \\ K \left(\frac{\partial T_1}{\partial y} \right)_{y_0} &= -K_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_l \end{aligned} \quad (2.68)$$

เมื่อใช้ขอบเขตเงื่อนไข (สมการ 2.68) จะได้ผลลัพธ์ของสมการ 2.45 คือ

$$T_{s1} = \left[\frac{T_m \beta}{\rho_m c_p} p_1 + \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dT_m}{dx} \left(\frac{dp_1}{dx} \right) \left(\frac{1}{P_r - 1} \right) \left(1 - \frac{f_v}{P_r f_k} \right) \right] \frac{\cosh((1+i)y/\delta_s)}{\cosh((1+i)l/\delta_s)} \quad (2.69)$$

เมื่อ

$$f_v = \frac{\tanh\left(\frac{(1+i)y_0}{\delta_v}\right)}{(1+i)y_0/\delta_v} \quad (2.70)$$

$$f_k = \frac{\tanh((1+i)y_0/\delta_k)}{(1+i)y_0/\delta_k} \quad (2.71)$$

$$\epsilon_s = \frac{\sqrt{K \rho_m c_p} \tanh((1+i)y_0/\delta_k)}{\sqrt{K_s \rho_s c_s} (1+i)l/\delta_s} \quad (2.72)$$

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2K}{\rho c_p \omega}} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega}} \quad (2.73)$$

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2K_s}{\rho_s c_s \omega}} \quad (2.74)$$

$$P_r = \left(\frac{\delta_v}{\delta_k} \right)^2 \quad (2.75)$$

โดยที่ δ_v คือค่า Viscous Penetration Depth ν เป็นค่า Kinematic Viscosity ของแก๊ส ρ เป็นค่าความหนาแน่นของแก๊ส μ เป็นค่า Dynamic Viscosity δ_k คือค่า Thermal Penetration Dept δ_s คือค่า Thermal Penetration Dept ของสเต็ม K เป็นค่าการนำความร้อน C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ κ คือ ค่าการกระจายความร้อนของก๊าซ ω คือค่ามุมความถี่ของคลื่นเสียง และ P_r คือเลข Prandtl ของก๊าซ f คือ ฟังก์ชันของ Rott ซึ่งขึ้นกับรูปร่างของสเต็ม

เมื่อใช้ขอบเขตเงื่อนไขจากสมการ 2.68 แทนค่าใน u_1 ของสมการ 2.57 และแก้สมการ 2.67 และ T_1 จะได้

$$T_1 = \frac{\beta T_m}{\rho_m c_p} p_1 - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \left(1 - \left[\left(\frac{P_r}{P_r - 1} \right) \frac{\cosh\left[\frac{(1+i)y}{\delta_v}\right]}{\cosh\left[\frac{(1+i)y_0}{\delta_v}\right]} \right] \right) - \left(\frac{\frac{\beta T_m}{\rho_m c_p} p_1 + \frac{1}{(P_r - 1)\rho_m \omega^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_k} \right)}{\frac{\cosh[(1+i)y/\delta_k]}{(1+\varepsilon_s)\cosh[(1+i)y_0/\delta_k]}} \right) \quad (2.76)$$

สมการคลื่นของ Rott สามารถหาได้จากการรวมกันของสมการตัวเนื่องอันดับที่ 1 อนุพันธ์ x ของสมการโมเมนต์ สามารถใช้อธิบายได้ทั้ง μ_1 และ T_1 รวมสมการ 2.53 และอนุพันธ์สมการโมเมนต์ 2.56

$$-\omega^2 \rho_1 - \frac{dp_1}{dx^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial y^2} \right) + i\omega \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (2.77)$$

ใช้สมการเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเกี่ยวกับ ρ_1 , T_1 และ p_1

$$\rho_1 = -\rho_m \beta T_1 + \left(\frac{\gamma}{a^2} \right) p_1 \quad (2.78)$$

เมื่อ γ เป็นอัตราของความร้อนจำเพาะไอโซบาริกกับไอโซคลอริก a เป็นความเร็วเสียงอะเดียบาติก

เมื่อแทนค่าสมการ 3.46 ในสมการ 2.77 จะได้

$$\rho_m \omega^2 \beta T_1 - \frac{\omega^2}{a^2} \gamma p_1 - \frac{d^2 p_1}{dx^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) + i\omega \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (2.79)$$

แทน μ_1 จากสมการ 2.57 และ T_1 จากสมการ 2.76 ในสมการ 2.79 และอินทิเกรตเทียบกับค่า y ลิมิตตั้งแต่ 0 ถึง y_0 เราจะได้สมการคลื่นของ Rott

$$\left(1 + \frac{(\gamma-1)f_k}{(1+\varepsilon_s)} \right) p_1 + \frac{a^2 \rho_m}{\omega^2} \frac{d}{dx} \left(\frac{(1-f_v)}{\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \right) + \frac{a^2 \beta}{\omega^2 (P_r-1)(1+\varepsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0 \quad (2.80)$$

สมการข้างบนจะอธิบายความดันเสียง (p_1) ในสแต็ก การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย ($T_m(x)$) และคุณสมบัติอื่นๆทาง ฟิสิกส์ความร้อน ทั้งของสแต็กและแก๊ส

ต่อไป จะกระจายสมการควบคุมเพื่อหาฟลักพลังงานเวลาเฉลี่ย (\dot{H}_2)

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \epsilon \right) = -\nabla \cdot \left[\rho v \left(\frac{1}{2} v^2 + h \right) - K \nabla T - v \cdot \Sigma \right] \quad (2.81)$$

เมื่อ ϵ คือพลังงานภายในต่อหน่วยมวล และ h คือเอนทัลปีต่อหน่วยมวล และ Σ คือ Viscous Stress Tensor ในสมการ 2.49 เทอมขวามือของสมการคือไดเวอร์เจนความหนาแน่นฟลักพลังงาน ซึ่งประกอบด้วย 3 เทอมคือการขนถ่ายมวลโดยการเคลื่อนที่ของของไหล การขนถ่ายความร้อนและการสูญเสียฟลักพลังงาน ขณะที่เทอมทางซ้ายมือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อหน่วยปริมาตร

ค่าฟลักพลังงานเวลาเฉลี่ยจะไม่ขึ้นตาม x และเมื่อตัดเทอมอันดับที่ 3 และอินทิเกรตเทียบ y จาก $y = 0$ ถึง $y' = 0$ จะได้

$$\frac{d}{dx} \left[\int_0^{y_0} \overline{\rho u h} dy - \int_0^{y_0} \overline{K \frac{\partial T}{\partial x}} dy - \int_0^1 \overline{K_s \frac{\partial T_s}{\partial x}} dy' - \int_0^{y_0} \overline{(v \cdot \Sigma)_x} dy \right] = 0 \quad (2.82)$$

ให้ ρ คือความหนาแน่น u เป็นความเร็วในแกน x h คือเอนทัลปีต่อหน่วยมวล K ค่าการนำความร้อน เส้นที่ขีดเหนือตัวพารามิเตอร์กำหนดให้เป็นค่าเฉลี่ยเวลา ปริมาณที่อยู่ในวงเล็บสี่เหลี่ยมคือฟลักพลังงานเวลาเฉลี่ยต่อหน่วยความยาวรอบรูปตามแนวแกน x จะได้ว่า

$$\frac{\dot{H}}{\Pi} = \int_0^{y_0} \overline{\rho u h} dy - \int_0^{y_0} \overline{K \frac{\partial T}{\partial x}} dy - \int_0^1 \overline{K_s \frac{\partial T_s}{\partial x}} dy' - \int_0^{y_0} \overline{(v \cdot \Sigma)_x} dy \quad (2.83)$$

เมื่อ Π คือความยาวรอบรูปของวัสดุสแต็ก

ใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.45 ถึง 2.49 และขยายเป็นอันดับที่ 2 จะได้

$$\int_0^{y_0} \overline{\rho u h} dy \approx \int_0^{y_0} (\rho_m \bar{u}_1 h_m + \rho_m \bar{u}_2 h_m + \rho_1 \bar{u}_1 h_m + \rho_m \bar{u}_1 h_1) dy \quad (2.84)$$

ถ้า $\bar{u}_1 = 0$ เทอมแรกด้านขวาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นผลรวมอินทิเกรตในเทอมที่ 2 และ 3 จะเท่ากับศูนย์เพราะว่าค่าฟลักมวลเวลาเฉลี่ยอันดับที่ 2 เท่ากับศูนย์

$$\int_0^{y_0} (\rho_m \bar{u}_2 + \rho_1 \bar{u}_1) dy = 0 \quad (2.85)$$

ให้

$$dh = Tds + \frac{dp}{\rho} = C_p dT + \frac{1}{\rho} (1 - \beta T) dp \quad (2.86)$$

จะได้

$$\overline{\rho u h} \simeq \rho_m \overline{u_1 h_1} = C_p \rho_m \overline{T_1 u_1} + (1 - \beta T_m) \overline{p_1 u_1} \quad (2.87)$$

จากสมการ 2.83 มีเพียงเทอมอันดับที่ 0 ที่มีความสำคัญ ฉะนั้น

$$-\int_0^{y_0} \overline{K \frac{dT}{dx}} dy - \int_0^1 \overline{K_s \frac{\partial T_s}{\partial x}} dy' \simeq -(y_0 K + l K_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (2.88)$$

จากสมการ 2.83 อีกครั้ง

$$\int_0^{y_0} \frac{\overline{(v \cdot \Sigma)_x dy}}{\int_0^{y_0} \overline{\rho u h dy}} \sim \frac{v}{\lambda a} = \frac{1}{2} \frac{\delta_v^2}{\lambda^2} \ll 1 \quad (2.89)$$

ดังนั้นเทอมความหนืด $v \cdot \Sigma$ ตัดทิ้งได้ ฉะนั้น สมการ 2.83 จะได้เป็น

$$\frac{\dot{H}_2}{\Pi} = \int_0^{y_0} [\rho_m C_p \overline{T_1 u_1} + (1 - \beta T_m) \overline{p_1 u_1}] dy - (y_0 K + l K_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (2.90)$$

แทนสมการ 2.76 สำหรับ T_m และสมการ 2.57 สำหรับ u_1 และรวมเข้ากันจะได้

$$\dot{H}_2 = \frac{\Pi y_0}{2h \rho_m} \text{Im} \left[\frac{d\tilde{q}_1}{dx} \rho_1 \left(1 - \tilde{f}_v - \frac{T_m \beta (f_k - \tilde{f}_v)}{(1 + \varepsilon_s)(1 + P_r)} \right) \right] + \frac{\Pi y_0 C_p}{2h^3 \rho_m (1 - P_r)} \frac{dT_m}{dx} \frac{d\rho_1}{dx} \frac{d\tilde{q}_1}{dx} \times \text{Im} \left[\tilde{f}_v + \frac{(f_k - \tilde{f}_v)(1 + \varepsilon_s f_v / f_x)}{(1 + \varepsilon_s)(1 + P_r)} \right] - \Pi (y_0 K + l K_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (2.91)$$

ในสมการข้างบนสัญลักษณ์ไฮต์เป็นคอมเพล็กซ์คอนจูเกตของพารามิเตอร์ตัวนั้น ขณะที่ $\text{Im}[\]$ เป็นส่วนจินตภาพ สมการนี้คือพลักพลังงานตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ในเทอมของความดัน อุณหภูมิเฉลี่ย คุณสมบัติของวัสดุและรูปร่างของอุปกรณ์ Rott ได้ข้อสรุปสำหรับก๊าซอุดมคติและ $\varepsilon_s = 0$

เพิ่มนิยาม

$$p_x = \frac{dp_1}{dx} \quad (2.92)$$

เราจำเป็นต้องตั้งสมการเพื่ออธิบายกำลังเสียงของระบบ Thermoacoustic โดยให้คลื่นเสียงเป็นแกน y กำลังเสียงที่ได้อยู่ในแนวแกน x กำหนดให้ dx เป็นส่วนของความยาวในแนวแกน x ดังรูป 2.4 กำลังเฉลี่ยที่ได้ จะเป็นตามสมการ ดังนี้

$$\dot{W}_2 = \Pi y_0 [(\overline{p_1 u_1})_x - (\overline{p_1 u_1})_{x+dx}] \quad (2.93)$$

ใช้ Taylor Series Expansion $(\overline{p_1 u_1})$ และตัดเทอมอันดับสูงออก จะได้

$$\dot{W}_2 = \Pi y_0 \Delta x \frac{d}{dx} (\overline{p_1 u_1}) \quad (2.94)$$

เราทราบว่า p_1 และ u_1 เป็นปริมาณเชิงซ้อน และการคูณเวลาเฉลี่ยของตัวแปรนี้คือ

$$(\overline{p_1 u_1}) = \frac{1}{2} \text{Re}[p_1 \tilde{u}_1] \quad (2.95)$$

เมื่อ $\text{Re}[\]$ เป็นส่วนจริงและสัญลักษณ์ไทด์ เป็นคอนจูเกตเชิงซ้อน

แทนค่าสมการ 2.95 ในสมการ 2.94 จะได้

$$\dot{W}_2 = \frac{1}{2} \Pi y_0 \Delta x \left[p_1 \frac{d\tilde{u}_1}{dx} + \tilde{u}_1 \frac{dp_1}{dx} \right] \quad (2.96)$$

จากสมการข้างบนเทอมอันดับที่ 2 สามารถลดเป็น $dp_1/dx = i\omega \rho_m u_1$ และส่วนจริงของเทอมไม่มี ดังนั้นจากสมการ 2.57 และ 2.80 จะได้สมการอันดับ 1 ในสมการ 2.96

$$\frac{d\tilde{u}_1}{dx} = \frac{-i\omega}{\rho_m a^2} \left[1 + \frac{(y-1)}{(1+\epsilon_s)} f_k \right] p_1 + \frac{(f_k - f_v)}{(1-P_r)(1+\epsilon_s)(1-f_v)} \beta \frac{dT_m}{dx} u_1 \quad (2.97)$$

แทนค่าสมการ 2.97 ในสมการ 2.96

$$\dot{W}_2 = \frac{1}{2} \Pi y_0 \Delta x \left[\frac{-i\omega}{\rho_m a^2} \left[1 + \frac{(y-1)}{(1+\epsilon_s)} f_k \right] p_1 + \frac{(f_k - f_v)}{(1-P_r)(1+\epsilon_s)(1-f_v)} \beta \frac{dT_m}{dx} u_1 \right] p_1 \quad (2.98)$$

สมการ 2.80 2.81 และ 2.92 เป็น 5 สมการคู่ควบกับ 5 ตัวแปร คือ

$\text{Re}(p_1), \text{Im}(p_1), \text{Re}(u_1), \text{Im}(u_1)$ และ T_m ตัวแปรเหล่านี้สามารถใช้ออกแบบ วิเคราะห์ และอุปกรณ์ Thermoacoustic ที่เหมาะสมได้

2.4.1 อุณหภูมิเกรเดียนต์วิกฤติ (Critical Temperature Gradient)

จากสมการ 2.57

$$\rho_m C_p \left(i\omega T_1 + u_1 \frac{dT_m}{dx} \right) - i\omega \beta T_m p_1 = K \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \quad (2.99)$$

สมมติว่า

1. อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเป็นศูนย์ที่ขอบเขต $T_1 = 0$
2. อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมีค่าจำกัดที่ตั้งฉากระยะห่างจากขอบสแต็กที่เพิ่ม $T_\infty = finite$

จะได้ว่า

$$T_1 = \left(\frac{p_1}{\rho_m C_p} - \frac{u_1}{i\omega} \frac{dT_m}{dx} \right) [1 - e^{-(1+i)y/\delta_k}] \quad (2.100)$$

จากสมการ 2.100 เป็นการรวมกันของอุณหภูมิการสั่นตัวของอนุภาคแก๊ส เนื่องมาจากการแกว่ง ความดันอะเดียบาติก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่จะเท่ากับตำแหน่งอุณหภูมิเกรเดียนต์ dT_m/dx ซึ่งอธิบายได้ว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งกำหนดไม่ขึ้นกับเวลา และจะเพิ่มอุณหภูมิเกรเดียนต์วิกฤติ โดยการให้สมการในวงเล็บจากสมการ 2.100 เป็นศูนย์

$$\nabla T_{crit} = \frac{i\omega |p_1|}{\rho_m C_p |u_1|} \quad (2.101)$$

สำหรับเครื่องจักรคลื่นนิ่งไม่มีความหนืด $|dT_m/dx| > \nabla T_{crit}$ ขณะที่เครื่องทำความเย็นคลื่นนิ่งที่ไม่มีความหนืด $|dT_m/dx| < \nabla T_{crit}$

ให้ $p_1 = p_A \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$, $u_1 = i \frac{p_A}{\rho_m a} \sin \frac{2\pi x}{\lambda}$ และ $\omega = 2\pi a/\lambda$ จะได้

$$\nabla T_{crit} = \frac{2\pi a^2}{\lambda} \cot \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (2.102)$$

แทนค่า

$$a^2 = \gamma \frac{P_m}{\rho_m} = T_m C_p (\gamma - 1) \quad (2.103)$$

$$\nabla T_{crit} = \frac{2\pi T_m C_p (\gamma - 1)}{\lambda} \cot\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (2.104)$$

∇T_{crit} เป็นอุณหภูมิเกรเดียนต์ที่มากที่สุด ซึ่งสามารถกระจายทั่วสแต็ก และมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งความดันแอนติโนด และมีค่าน้อยที่สุดที่ความดันโนด ซึ่งอธิบายได้ว่าอุณหภูมิเกรเดียนต์มากที่สุดสามารถคงที่ที่ความเร็วโนด (การกระจัดต่ำสุด) มากกว่าที่ความเร็วแอนติโนด (การกระจัดสูงสุด)

2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) [11]

DOE คือการทดสอบ หรือ ชุดของการทดสอบ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจคุณลักษณะทางคุณภาพ หรือ Quality Characteristics โดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้าอย่างตั้งใจตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้มีคำศัพท์ที่ต้องทราบคือ

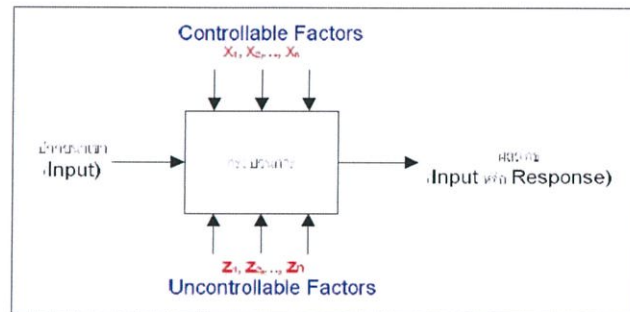
1. ปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระ (Independence) ที่ผู้วิเคราะห์สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factor หรือ Noise factor) แทนด้วย z_1, z_2, \dots, z_n และปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factor) แทนด้วย x_1, x_2, \dots, x_n โดย DOE จะมุ่งเน้นที่การศึกษาเพื่อบ่งชี้ผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ ในขณะที่ต้องการกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยที่ควบคุมได้จะเรียกว่า ทรีตเมนต์ (Treatment)
 2. จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการทำการทดลองซ้ำด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน โดยในการทดลองหนึ่ง ๆ จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลอง (Treatment combination) เท่ากับผลคูณของจำนวนปัจจัยและจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย เช่น การทดลองที่มี 2 ปัจจัย ๆ ละ 2 ระดับจะมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขการทดลอง
 3. ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ ซึ่งเป็นปัจจัยไม่อิสระ (Dependence) ต้องการศึกษาคควบคุม ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเปลี่ยนแปลงของ ทรีตเมนต์ต่าง ๆ
 4. การสุ่ม (Randomization) เป็นส่วนหนึ่งของ DOE ที่พยายามให้ผลของ Uncontrollable factors กระจายอย่างสม่ำเสมอกับค่าของ response ที่ได้จากการทดลอง
- ความสัมพันธ์ระหว่าง ปัจจัย กระบวนการและ ผลลัพธ์ แสดงได้ด้วยตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ

ดังรูปที่ 2.21

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. บ่งชี้ปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อ Response
2. กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้ Y มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด

- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้มีความผันแปร ของค่า Y ต่ำ
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้อิทธิพลของ Uncontrollable factor มีน้อยที่สุด



รูปที่ 2.21 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เช่นหากผลของการติดตามกระบวนการด้วยแผนภูมิควบคุมบ่งชี้ว่ากระบวนการ out-of-control ซึ่งอาจมีปัจจัยจำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของความผิดปกติ การที่จะปรับปรุง แก้ไขเพื่อนำกระบวนการกลับสู่ภาวะภายใต้การควบคุมจะเป็นไปได้ยาก หากไม่ทราบว่ามีปัจจัยตัวไหนที่ส่งผลต่อ Response อย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบการทดลองจึงเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เพื่อบ่งชี้ปัจจัยเหล่านี้ ทั้งนี้หากมีการประยุกต์หลักการของ DOE ตั้งแต่เริ่มต้นพัฒนาผลิตภัณฑ์จะนำไปสู่ผลการดำเนินการที่ดีขึ้นดังนี้

1. จำนวนผลผลิตจะดีขึ้น
2. ความผันแปรลดลงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าคุณลักษณะทางคุณภาพอยู่ในช่วงที่กำหนด และใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่ต้องการ
3. ลดเวลาการพัฒนาผลิตภัณฑ์
4. ลดต้นทุนโดยรวม

นอกจากนี้การออกแบบการทดลองยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้วให้ดียิ่งขึ้นดังนี้

1. ประเมินและเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบไว้แล้ว
2. ประเมินเลือกวัสดุวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ
3. บ่งชี้พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ

ซึ่งกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้ DOE อย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลต่อการปรับปรุงด้านความสามารถในการผลิต (Manufacturability) สมรรถนะ (Performance) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) ต้นทุน (Cost) และ ระยะเวลาในการพัฒนา (Development Time) ของผลิตภัณฑ์ขึ้น

2.5.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DOE มีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นที่ผู้วิเคราะห์ต้องมีเป้าหมายการศึกษา Response ที่สนใจ ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อ Response วิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนแนวทางการวิเคราะห์ อย่างชัดเจน ซึ่ง Montgomery (2001) และ Montgomery (2005) ได้สรุปแนวทางการศึกษาด้วย DOE ไว้ดังนี้

1. ศึกษาปัญหา
2. กำหนด Response ที่ต้องการศึกษา
3. กำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม และ ระดับของปัจจัย
4. กำหนดรูปแบบการทดลอง
5. ทำการทดลอง และเก็บข้อมูล
6. วิเคราะห์ข้อมูล
7. สรุป และ นำเสนอแนวทางการปรับปรุง

1. การศึกษาปัญหา

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิเคราะห์ต้องตระหนักว่าปัญหาคืออะไร ต้องการข้อมูลจากแหล่งใดบ้าง เพื่อกำหนดเป้าหมายของการศึกษาให้ชัดเจน การศึกษาในขั้นตอนนี้บ่อยครั้งที่พบว่ามีส่วนทำให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจกระบวนการได้ดียิ่งขึ้นและนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาในที่สุด

2. การกำหนด Response ที่ต้องการศึกษา

เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องกำหนดคุณลักษณะทางคุณภาพที่มั่นใจได้ว่าเป็นสิ่งที่ต้องการปรับปรุงของกระบวนการที่ทำการศึกษาอยู่ อาจเป็นผลมาจากการทำ SPC ทั้งนี้ต้องมั่นใจได้ว่าระบบการวัดมีความสามารถเพียงพอ เนื่องจากระบบการวัดที่ไม่มีความสามารถจะทำให้การบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response ไม่ชัดเจน เพราะผลการทดลองจะบ่งชี้ความแตกต่างของผลของปัจจัยได้เฉพาะปัจจัยที่ส่งผลสูง ๆ เท่านั้น ในขณะที่ปัจจัยที่ส่งผลระดับต่ำถึงปานกลางจะไม่สามารถแบ่งแยกได้

3. การกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุมและระดับของปัจจัย

เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องเลือก ปัจจัยที่สงสัยว่าจะส่งผลต่อ Response พร้อมทั้งระดับของแต่ปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนได้ โดยต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับสภาพการดำเนินการจริง ซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ และ/หรือ ประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ หากกำหนดจำนวนปัจจัย และระดับของปัจจัยไม่ครอบคลุมจะทำให้ไม่ได้ผลการทดลองที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างแท้จริง

ในขณะที่การกำหนดมากเกินไปจะส่งผลต่อต้นทุน และเวลาในการทดลอง อย่างไรก็ตามกรณีที่มีจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมากผู้ทำการทดลองสามารถคัดกรองปัจจัยต้องการการทดลองเบื้องต้น หรือ Screening Experiment ก่อนที่จะทำการทดลองโดยละเอียดกับปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อ Response อย่างแท้จริงต่อไป

4. การกำหนดรูปแบบการทดลอง

เมื่อ 3 ขั้นตอนแรกทำอย่างถูกต้องขั้นตอนนี้จะไม่ยุ่งยากนัก ผู้ทำการทดลองต้องเลือกรูปแบบ (Design) ของการทดลอง ซึ่งรวมถึงขนาดตัวอย่าง จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (จำนวน replication) การกำหนดลำดับการทดลองอย่างสุ่ม เป็นต้น

5. การทดลองและการเก็บข้อมูล

ผู้ทดลองต้องควบคุมการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ ความผิดพลาดทั้งจากการทดลองและการเก็บข้อมูล จะส่งผลให้การทดลองไม่น่าเชื่อถือ และไม่สามารถนำไปวิเคราะห์หอะไรได้ เช่นการไม่ทำการทดลองตามหลักการของการสุ่มจะส่งผลให้อิทธิพลของ Noise Factors ไม่กระจายเฉลี่ย ทำให้ผลของการทดลองแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับผลการทดลองครั้งก่อนหน้า หรือครั้งอื่นๆ (ไม่อิสระต่อกัน) หรือมี Autocorrelation ระหว่างข้อมูลจากการทดลอง เป็นต้น

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลทำตามหลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANalysis Of Variance, ANOVA) การวิเคราะห์ด้วยกราฟ การวิเคราะห์สมการเส้นถดถอย ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิเคราะห์จริงผู้วิเคราะห์มีซอฟต์แวร์ทางสถิติช่วยในการวิเคราะห์หลากหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ควรเข้าใจหลักการทางสถิติเพื่อการแปลความหมายที่ถูกต้องด้วย

7. การสรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุง

เมื่อทราบผลการวิเคราะห์ การสรุปผลและแนะนำการดำเนินการเพื่อปรับปรุงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิเคราะห์อาจใช้เครื่องมือเช่น กราฟ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่าง ๆ และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการปรับปรุงแก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ควรมีการทดลองเพื่อยืนยันข้อเสนอการปรับปรุงอีกครั้งก่อนการประยุกต์ใช้จริง นอกจากนี้ควรมีการตรวจติดตามผลการปรับปรุงด้วยเครื่องมือของ SPC ที่เหมาะสมต่อไปด้วย

จากขั้นตอนทั้งหมด ขั้นตอนที่ 1 – 3 เป็นขั้นตอนการเตรียมการทดลอง ซึ่งต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดขึ้น และได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ นำไปสู่การปรับปรุงได้อย่างแท้จริง โดยการดำเนินการตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 – 7 สามารถทำเป็นรอบ ๆ ได้ จากการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย (Screening Experiment) การทดลองโดยละเอียดเพื่อบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response อย่างแท้จริง (Refining Experiment) และการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่มีผลอย่างเหมาะสม (Optimizing Experiment)

ความผิดพลาดที่พบบ่อยในการนำ DOE ไปใช้กับงานจริงคือผู้ทดลองพยายามที่จะทำการทดลองขนาดใหญ่เพียงครั้งเดียว และสรุปผลให้ได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุของความผิดพลาดต่าง ๆ ที่ตามมาเช่น ข้อมูลที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกัน ความผันแปรของข้อมูลไม่คงที่ตลอดการทดลอง เป็นต้น

2.5.2 อิทธิพลของปัจจัย (Factor Effects)

อิทธิพลของปัจจัยจะประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของ Response เมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษาเปลี่ยนแปลงไปซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ อิทธิพลหลัก หรือ Main Effect และ อิทธิพลร่วม หรือ Interaction Effect Main Effect เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยเฉพาะปัจจัยหนึ่งโดยตรงต่อ Response โดยมีได้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอื่น ๆ

2.5.3 ประเภทของการทดลอง

การออกแบบการทดลองมีหลากหลายประเภทซึ่งผู้ทำการทดลองต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะของปัญหาซึ่งประกอบด้วย จำนวนปัจจัย เงื่อนไขการพิจารณา โครงสร้างการทดลองโดยเฉพาะด้านการสุ่ม ความยาก-ง่ายในการทำการทดลอง ระยะเวลาที่มี ต้นทุนที่ยอมรับได้ เป้าหมายของการทำการทดลอง เป็นต้น ประเภทของการทดลองมีตั้งแต่ แบบที่ไม่ซับซ้อน ไปจนถึงแบบที่มีความซับซ้อนมาก เช่น การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design) การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) การทดลองแบบละตินสแควร์ (Latin Squares Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูป (Fractional Factorial Design) และการทดลองด้วยเทคนิคของ Taguchi เป็นต้น

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) และ การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูป (Fractional Factorial Design) เท่านั้น

1. การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design)

เป็นการออกแบบการทดลองเมื่อสงสัยว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response มีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น การทดลองจึงมุ่งไปที่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและ Response ซึ่งเป็นการทดลองที่ออกแบบง่ายแต่อาจนำไปสู่ผลการวิเคราะห์ที่มีได้ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเสมอไป (เนื่องจากพิจารณาเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น ในขณะที่อาจมีปัจจัยอื่น ๆ เกี่ยวข้อง และมีอิทธิพลแบบ Interaction ได้)

2. การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design)

เมื่อมีปัจจัยที่สนใจมากกว่า 1 ปัจจัย การออกแบบการทดลองที่ง่ายที่สุดคือการทดลองโดยปรับเปลี่ยนทีละปัจจัย และกำหนดระดับของปัจจัยอื่น ๆ คงที่ อย่างไรก็ตามการออกแบบการทดลองลักษณะนี้เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เพราะจะไม่ได้ข้อมูลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเลย

3. การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design)

เป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Combinations) ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อ Response ได้ทั้งแบบ Main effect และ Interaction แต่การออกแบบการทดลองแบบนี้ต้องการเวลาและทรัพยากรในการทดลองมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนปัจจัยมีมากขึ้น การออกอาจแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย คือ 1) เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยมากกว่า 2 ระดับขึ้นไป และ 2) เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ ในกรณีที่ 2 จะใช้สัญลักษณ์ 2^k Design โดยเลข 2 แทนจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย และ k แทนจำนวนปัจจัยที่พิจารณาในการทดลอง

สิ่งสำคัญในการทำการทดลองตามนี้ออกแบบไว้จะต้องไม่ลืมว่าการทดลองแต่ละครั้งต้องทำตามลำดับการสุ่ม จากกระบวนการสุ่มที่เหมาะสม มิฉะนั้นอาจส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์และนำไปใช้ได้อย่างน่าเชื่อถือ เนื่องจากสมมติฐานของเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติไม่เป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลองสามารถสร้างลำดับการทดลองแบบสุ่มโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติเช่น Minitab เป็นต้น

4. การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูปแบบ (Fractional Factorial Design)

จากการที่จำนวน Runs ของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนปัจจัยเพิ่มขึ้น เช่นจะมี 32 Runs ถ้ามี 3 Replicates จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 96 ครั้ง ในการทดลองนี้จะมี อิทธิพลหลัก (Main Effects) 5 ตัว อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (2 Ways Interactions) 10 ตัว เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากทราบหรือมีแนวโน้มว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย หลายปัจจัย (High Order Interactions) จะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการทดลองเพียงบางส่วน หรือการทดลองแบบไม่เต็มรูปแบบจะยังคงให้ข้อมูลที่มีนัยสำคัญเพียงพอ โดยการทดลองแบบไม่เต็มรูปแบบจะเป็นแบบ 2^{k-p} Factorial Design เช่นเมื่อ $p = 1$ จะเป็นการทดลองแบบ Half Factorial Design ซึ่งจะลดจำนวนการทดลองได้ครึ่งหนึ่ง เมื่อ $p = 2$ จะลดจำนวนการทดลองเหลือเพียง 1/4 เท่านั้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ ปุณยศ วัลลิกุล และ สุวัฒน์ กุศลชนปรีดา [1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2547) ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองของการทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก ชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นในงานศึกษานี้ประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือลำโพง ท่อแก้วและสแต็ก โดยเทอร์โมอะคูสติกเกิดขึ้นจากการสั่นแบบคลื่นนิ่งของของไหลในสแต็ก ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนอย่างต่อเนื่องระหว่างปลายทั้งสองข้างของสแต็ก ผลจากการทดลองเบื้องต้นในการศึกษานี้ พบว่า ชุดทดลองที่ใช้อากาศเป็นของไหลและใช้สัญญาณเสียงที่มีความถี่ 360 เฮิร์ตซ์ สามารถทำให้ปลายของสแต็กทั้งสองด้านมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันประมาณ 4 องศาเซลเซียส

ภาวิษฐ์ ภาณุจนวนดีและ เกียรติกร อัครมาตบับลือ [2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตร

ศาสตร์ (2552) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยทำการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบการทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติกโดยใช้ทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้น ชุดทดสอบที่ได้จัดสร้างขึ้นใช้อากาศภายใต้ความดันบรรยากาศ สแต็กแบบกันทอย และใช้แหล่งกำเนิดเสียงแบบคลื่นนิ่ง ผลการทดลองจะพิจารณาที่อุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นเป็นหลัก เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการวัดผล ซึ่งพบว่าชุดทดสอบที่จัดสร้างขึ้นสามารถทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ 23.5°C ($T_h = 20^{\circ}\text{C}$ และ $T_c = -3.5^{\circ}\text{C}$) ที่ความถี่รีโซแนนซ์ 331 Hz

Normah Mohd Ghazali และ Azhar Abd Aziz [3] มหาวิทยาลัย Technology Malaysia ได้ศึกษาระบบการทำความเย็นด้วยเสียงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นด้วยระบบเสียง โดยเลือกใช้เงื่อนไขและกระบวนการประกอบที่เหมาะสมที่สุด โดยระบบไม่มีสารทำความเย็นที่จะก่ออันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและไม่มีตัวคอมเพรสเซอร์ อีกทั้งระบบไม่มีการเคลื่อนที่ยกเว้นแหล่งกำเนิดเสียงที่ใช้ลำโพงเพื่อเชื่อมกับตัวส่งสัญญาณ จากการจำลองทางเลขคณิต พบว่าก๊าซผสมระหว่างฮีเลียมกับก๊าซเฉื่อยตัวอื่น จะสามารถสร้างเทอร์โมอะคูสติกได้มากที่สุด ส่วนชิ้นส่วนอื่นๆจะมาจาก ทองแดงและอลูมิเนียม ซึ่งจะสามารถอัดความดันสูงถึง 10 บาร์ได้ แต่ผลการทดลองลดลงแค่ 1 องศาเซลเซียส จากที่ตั้งไว้คือ 35 องศาเซลเซียส

Timothy S.Ryan [4] สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและโลหะวิทยา มหาวิทยาลัย Pittsburgh Swanson (2006) ได้ศึกษาการออกแบบและควบคุมคลื่นนิ่งของเครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) เฟสล็อกลูป (Phase-Locked Loop) 2) ใช้ตัวอัลกอริทึมการเคอร์เรียร์เพื่อติดตามผลของความถี่ที่ทำให้เกิดความดันเสียงสูงสุด 3) ใช้ตัวอัลกอริทึมเพื่อติดตามผลของความถี่ที่ทำให้กำลังเสียงสามารถถ่ายเทไปสู่ท่อกำทอนได้สูงสุด ผลปรากฏว่าเครื่องนี้สามารถทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 ข้างของสแต็กได้ 10.32 องศาเซลเซียส สร้างกำลังความเย็นได้ 16.42 วัตต์ ที่ COP เท่ากับ 2.188 และ COPR เท่ากับ 7.73%

Masoud Akhavanbazaz [5] สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย Concordia ประเทศแคนาดา ได้ทำการศึกษา การออกแบบ วิเคราะห์ ทดสอบและพัฒนาระบบเทอร์โมอะคูสติกในเครื่องทำความเย็น โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ชิ้นส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทำความเย็นด้วยระบบเสียงโดยยึดหลักการออกแบบด้วยเลขคณิตวิเคราะห์ 2) การสร้างเครื่องด้วยการออกแบบเลขคณิตทั้งการทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะ ซึ่งใช้ลำโพง 15 วัตต์ ที่ความถี่ 450 เฮิรตซ์ ผลปรากฏว่าความแตกต่างของอุณหภูมิสองข้างสแต็กเท่ากับ 23 เคลวินและอุณหภูมิน้ำฝั่งเย็นลดลง 3 เคลวิน และฝั่งร้อนเพิ่มขึ้น 7.5 เคลวิน

Sudeep Sastry [6] สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน มหาวิทยาลัย Case Western Reserve ได้ทำการศึกษาาระบบเครื่องยนต์-เครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียงสำหรับการสำรวจทางอวกาศ โดยเป็นการออกแบบและสร้างเครื่องเพื่อให้ความเย็นกับส่วนที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์

เช่น ก๊าซทำงาน ความดัน วัสดุทำสแตก เป็นต้น ซึ่งปรากฏว่า ระบบให้กำลังความเย็นเท่ากับ 150 วัตต์ ขณะที่เครื่องทำงานในช่วงอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส

Daniel George chin [7] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัย Maryland ได้ทำการศึกษาเครื่องทำความเย็นด้วยระบบเสียงโดยใช้ตัวขับเคลื่อนแบบเพียโซอิเล็กทริกคาลอ ผลปรากฏว่าตัวขับเคลื่อนชนิดนี้สามารถสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิได้ 18 องศาเซลเซียส โดยกำลังอินพุทเท่ากับ 7.6 วัตต์

Bheemsha และคณะ [8] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ B M S ได้ทำการศึกษาการออกแบบท่อกำทอนและตัวบัพเพอร์ของเครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียง โดยใช้โปรแกรม CATIA เพื่อจำลองรูปร่าง และ MATLAB สำหรับออกแบบขนาดของชิ้นส่วน ซึ่งพบว่าท่อกำทอนที่ลดการสูญเสียพลังงานมากที่สุดจะมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.43

Bheemsha และคณะ [9] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ B M S ได้ทำการศึกษาขนาดที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียง โดยใช้โปรแกรม CATIA เพื่อจำลองรูปร่าง และ MATLAB สำหรับออกแบบขนาดของชิ้นส่วน ซึ่งพบว่าโดยสามารถสร้างกำลังความเย็นได้ 10 วัตต์ และ COP เท่ากับ 2.4948 โดยเครื่องมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.43

Bheemsha และคณะ [10] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ B M S ได้ทำการศึกษาการออกแบบแอสติกแบบขนานในเครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียง โดยใช้โปรแกรม CATIA เพื่อจำลองรูปร่าง และ MATLAB สำหรับออกแบบขนาดของชิ้นส่วน ซึ่งพบว่า ให้กำลังความเย็น 10 วัตต์ โดยสแตกยาว 40.55 มิลลิเมตร มีตำแหน่งกึ่งกลางสแตกจากหน้าลำโพงเท่ากับ 60.82 มิลลิเมตร

บทที่ 3

ออกแบบค่าพารามิเตอร์และเครื่องทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาค่าพารามิเตอร์และการออกแบบระบบของเครื่องทดสอบโดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

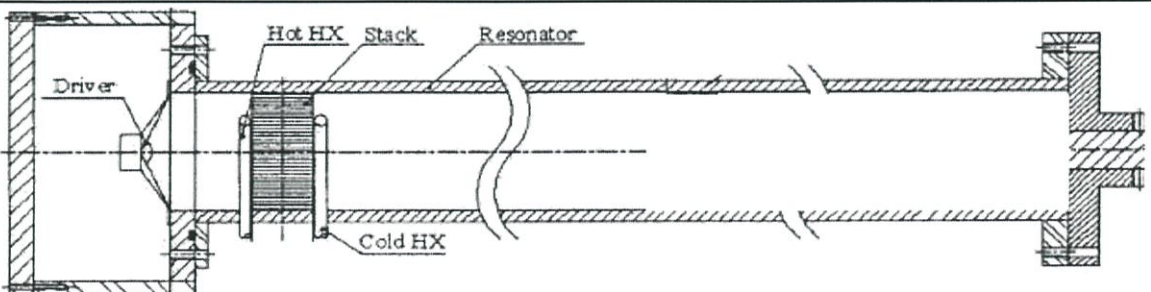
- 3.1 พารามิเตอร์และค่าเป้าหมาย
- 3.2 การเลือกใช้พารามิเตอร์
- 3.3 การออกแบบเครื่องทดสอบ

3.1 พารามิเตอร์ [6]

เครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก เพื่อให้สามารถออกแบบระบบเครื่องทำความเย็นที่เหมาะสมจึงต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ เช่น ความดัน รูปร่างของระบบ ความยาวของอุปกรณ์ ก๊าซทำงาน วัสดุสแต็ก เป็นต้น จุดสนใจในหัวข้อเหล่านี้คือค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์

Mean Temperature Of The Gas	T_m	Mean Pressure Of The Gas	P_m
Dynamic Pressure Amplitude Of The Gas	P_o	Frequency	f
Drive Ratio	$D = P_o/P_m$	Temperature Difference Between	
The Kinematic Viscosity	ν	Two Side of Stack	ΔT_m
Thermal Conductivity	K	Prandtl Number	σ
Sound Velocity	α	Specific Heats Ratio	γ
Blockage Ratio	B		



รูปที่ 3.1 โครงสร้างอุปกรณ์ทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกทั่วไป

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับออกแบบในงานวิจัยเล่มนี้ แสดงในตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับออกแบบอุปกรณ์ทำความเย็น

$P_m = 1 \text{ atm}$	$D = 0.2$	$\sigma = 0.68$
$T_m = 300 \text{ K}$	$a = 1019 \text{ m/s}$	$B = 0.9$
$\Delta T_m = 100 \text{ K}$	$\gamma = 5/3$	

3.1.1 ข้อพิจารณาสำหรับการออกแบบ

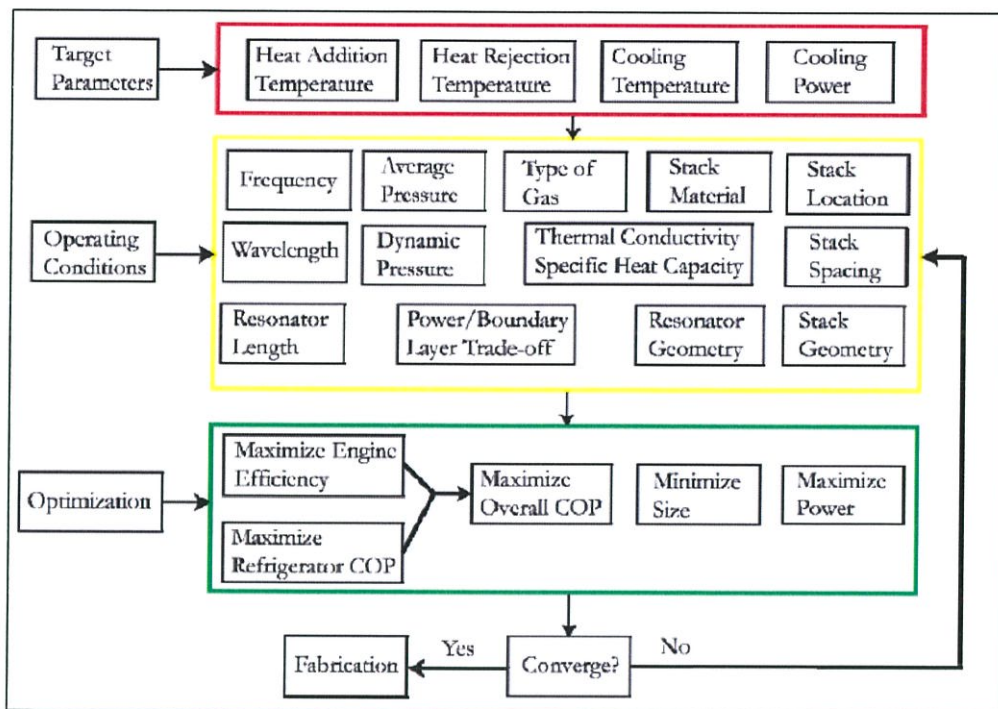
เป้าหมายสำหรับการศึกษาคือการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็น จึงมีพารามิเตอร์เป้าหมายที่ต้องกำหนดขึ้นเพื่อประโยชน์ต่อการใช้งาน ได้แก่ สัมประสิทธิ์สมรรถนะ อุณหภูมิด้านเย็น และความแตกต่างของอุณหภูมิสองข้าง

ตารางที่ 3.3 เป็นค่าเป้าหมายการออกแบบสำหรับสร้างเครื่องทำความเย็น

พารามิเตอร์	ค่า
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ	maximum
อุณหภูมิด้านเย็น	10 °C
ความแตกต่างของอุณหภูมิสองข้าง	100 K

3.2 การเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบ [4 และ 6]

มีตัวพารามิเตอร์จำนวนมากที่มีผลต่อการทำงานและสมรรถนะของระบบเทอร์โมอะคูสติก ดังนั้นจะต้องพิจารณาให้แน่นอนถึงบทบาทต่อการทำงานของเครื่อง รูปที่ 3.2 แสดงถึงลำดับการออกแบบ ซึ่งแสดงตัวพารามิเตอร์ที่มีผลต่อระบบเทอร์โมไดนามิกส์ และเชื่อมโยงต่อกัน



รูปที่ 3.2 แผนภาพวิธีการออกแบบและกำหนดค่าเป้าหมายของระบบ

สำหรับการออกแบบ ค่าพารามิเตอร์เป้าหมายจะเป็นเงื่อนไขควบคุมและไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยกำหนดค่า อุณหภูมิด้านเย็นเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส สำหรับเงื่อนไขกระบวนการต่างๆจะเปลี่ยนตามค่าเป้าหมาย เช่น ความถี่ ความดันเฉลี่ย ความดันไดนามิกส์ ชนิดของแก๊ส วัสดุสแต็ก รูปแบบสแต็ก ระยะห่างของชั้นสแต็ก ความยาวท่อกำหนด เป็นต้น เงื่อนไขเหล่านี้มีผลต่อกันดังนั้นต้องตรวจสอบให้แน่นอนเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุดของระบบ สุดท้าย ระบบที่มีความเหมาะสมจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ และอุณหภูมิด้านเย็นสูงสุดในเวลาเดียวกันก็มีขนาดเล็กที่สุด

3.2.1 เครื่องกำเนิดเสียง

พลังงานเสียงที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นได้มาจากลำโพงเสียง โดยลำโพงต้องมีความสามารถเพียงพอที่จะให้กำลังเสียงต่อระบบเพื่อสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิในสแต็ก ซึ่งลำโพงจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียง โดยทั่วไปลำโพงเป็นชนิดอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วยหลอดแดงและแม่เหล็ก ถ้าลำโพงเสียงมีสมรรถนะสูงจะทำให้สมรรถนะโดยรวมของเครื่องทำความเย็นสูงขึ้นตามด้วย

ในแนวคิดการออกแบบลำโพงเพื่อให้ได้กำลังรวมของลำโพงมีประสิทธิภาพสูงสุด ผลรวมรีแอกแตนซ์ทางกลของลำโพงและรีแอกแตนซ์ของท่อกำหนดต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือทำให้แมกนิจูดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกันหรือในอีกกรณีคือการปรับค่า Suspension Stiffness ซึ่งจะทำให้คัมคาร์รีแอกแตนซ์ทางกลของลำโพงได้อย่างที่ต้องการได้ ซึ่งค่า Suspension Stiffness นี้สามารถปรับด้วยการแทนส่วนที่

เป็นกรวยของลำโพงด้วยวัสดุอื่นๆซึ่งจะทำให้รีแอกแตนซ์ทางกลของลำโพงไม่เกิดขึ้นที่ความถี่ที่ต้องการ แต่ค่ารีแอกแตนซ์ทางไฟฟ้าของลำโพงก็ยังไม่เท่ากับศูนย์แต่จะสามารถจัดการได้ด้วยการเพิ่มตัวคาร์ปาซิเตอร์ (Capacitor) ซึ่งก็ทำให้การค่าอินพุทอิมพีแดนซ์จากตัวขยายเสียง (Amplifier) ของลำโพง มีความคมชัดยิ่งขึ้น ดังนั้นการปรับค่ารีแอกแตนซ์ทั้งหมดของระบบให้หมดไป จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพหรือการผลิตกำลังเสียงไฟฟ้า (Electroacoustic) ได้สูงสุด

เพื่อให้ลำโพงทำงานได้เต็มที่ พื้นที่ส่วนกรวยของลำโพงจะต้องออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและกำลังของ Electroacoustic สูงสุด Wakeland พบว่าประสิทธิภาพ Electroacoustic (η) ของลำโพง เครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียง สามารถคำนวณได้ โดย

$$\frac{1}{\eta} = \frac{R_e R_m}{(BI)^2} \frac{R_m}{R_a} \left(1 + \frac{R_a}{R_m}\right)^2 + \left(1 + \frac{R_m}{R_a}\right) + \frac{R_e R_m}{(BI)^2} \frac{X^2}{R_m R_a} \quad (3.1)$$

และค่าเฉลี่ยเวลากำลังเสียง (Time-Averaged Acoustic Power, (Π_a)) ที่ลำโพงจะทนได้สูงสุด (I_m) คือ

$$\Pi_a(I_{max}) = \frac{(BI \cdot I_{max})^2}{2} \frac{R_a}{(R_m + R_a)^2 + X^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ R_e คือค่าต้านทานไฟฟ้าของลำโพง R_m คือค่าต้านทานทางกลของลำโพง R_a คือค่าต้านทานทางกลของท่อลำโพงเสียง X คือผลรวมค่ารีแอกแตนซ์ทางกลของลำโพงและท่อลำโพง และ BI คือค่าแรงประกอบ (Force Factor) ของลำโพง เมื่อทำการอนุพันธ์สมการ 3.1 และ 3.2 ให้ R_a เป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$(R_a)_{\eta_{max}} = R_m \sqrt{\frac{(BI)^2}{R_e R_m} + 1} \quad (3.3)$$

ซึ่งจะเป็นค่าเหมาะสมที่สุดของ R_a สำหรับประสิทธิภาพ Electroacoustic และ

$$(R_a)_{I_{max}} = R_m \quad (3.4)$$

ก็คือค่าที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างกำลังเสียง (Acoustic Power Production) โดย R_a จะสัมพันธ์กับประสิทธิภาพพื้นที่ลำโพง (S) คือ

$$R_a = S^2 Re[Z] \quad (3.5)$$

เมื่อ Z คือค่าอิมพีแดนซ์เสียงเชิงซ้อน (Complex Acoustic Impedance) ของท่อลำโพง

ดังนั้นขนาดของหน้าลำโพงสามารถเลือกใช้โดยคำนึงถึงทั้งจากค่ากำลังเสียง (Acoustic Power) และจากประสิทธิภาพ Electroacoustic จึงสำคัญที่จะกล่าวว่า ค่า S ที่จะให้กำลังสูงสุดจะต้องขึ้นกับความสามารถในการรับกระแสได้สูงสุดของลำโพง แต่ในทางปฏิบัติมักจะมีข้อจำกัดในด้านเอาต์พุทกำลังเสียง

ซึ่งทางเลือกที่จะแก้ไขเรื่องพื้นที่ลำโพงก็คือใช้ความถี่ที่ลำโพงที่เลือกมาสามารถรองรับได้ ก็คือการกำหนดความต้านทานเสียง แต่เนื่องจาก Z เป็นฟังก์ชันของความถี่ อาจจะเป็นไปได้ว่า สามารถเลือกใช้ความถี่ที่ค่า R_a พอดีกับที่ต้องการ ในสมการ 3.3 และ 3.4

เนื่องจากงานวิจัยเล่มนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้อุปกรณ์และวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด จึงใช้ลำโพงขนาด 4 นิ้วที่มีกำลัง 120 วัตต์ ความต้านทาน 8 โอห์ม เพียงแต่ควบคุมการให้กำลังโดยที่ตัวคอยล์เสียงไม่เกิดการไหม้เท่านั้น

3.2.2 การเลือกชนิดของแก๊ส

ชนิดของแก๊สที่ใช้เพื่อเป็นของไหลทำงานในเครื่องทำความเย็นเคลื่อนนิ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเครื่อง โดยการเลือกชนิดของแก๊ส จะพิจารณาเลือกก๊าซที่มีค่า Thermal Penetration Depth (δ_k) ที่สูงและค่า Viscous Penetration Depth (δ_v) ที่ต่ำ ซึ่งค่า Thermal Penetration Depth จะวัดจากความสามารถของของไหลที่ขนถ่ายความร้อนผ่านชั้น โดยที่ Thermal Penetration Depth ที่มีค่าสูง จะทำให้การขนถ่ายความร้อนได้ดีระหว่างชั้นสแตกกับก๊าซ ซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง ส่วนค่า Viscous Penetration Depth ของของไหล จะเป็นการวัดจากความสูญเสียจากแรงเสียดทานภายในของไหล ค่า Viscous Penetration Depth ที่ต่ำจะบ่งบอกถึงการสูญเสียต่อพื้นที่เนื่องจากผลของความหนืดต่ำ

ช่วงกำลังเทอร์โมอะคูสติกทั่วไปเป็นแบบตัวแปรไร้มิติ คือ $\rho_m a^2$ (อ้างอิงจากสมการ 3.7) เพราะฉะนั้น เพื่อให้ค่าแอมพลิจูดความดันเฉลี่ย ความเร็วเสียงสูงทำให้กำลังต่อหน่วยปริมาตรสูง แก๊สที่โดดเด่นที่มีความเร็วเสียงสูงสุด เช่น ไฮโดรเจน ฮีเลียม นีออน เป็นต้น และก๊าซเหล่านี้ยังมีค่าการนำความร้อนสูงด้วย ซึ่งการเพิ่มความหนาของ Thermal penetration depth (δ_k) จะทำให้เพิ่มขนาดของสแตกและตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและเพราะดังนั้น ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีช่องว่างข้างในกว้างจะถูกเลือกใช้

ค่า Thermal และ Viscous Penetration Depth จะมีความสัมพันธ์กับค่า Prandtl Number (p_r) คือ

$$p_r = \left(\frac{\delta_v}{\delta_k}\right)^2 = \frac{\mu C_p}{k} \quad (3.6)$$

Prandtl Number ไม่มีหน่วย ซึ่งประมาณจากความสัมพันธ์ด้านประสิทธิภาพ ของโมเมนตัมและการขนถ่ายพลังงานโดยแพร่ในชั้นขอบเขตความร้อนและความเร็ว ชั้นขอบเขตความร้อนจะบางลงและสร้างเทอร์โมอะคูสติก ในทางตรงกันข้ามการกระจายชั้นขอบเขตความหนืด จะต้านปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก เพราะฉะนั้นค่า Prandtl Number ที่ต่ำจะทำให้ลดผลกระทบจากความหนืดให้น้อยลง สำหรับการผสมก๊าซที่มีน้ำหนักจะช่วยลดค่า Prandtl Number ลงได้ $\frac{2}{3}$ ของก๊าซ บริสุทธิ์

เนื่องจากข้อจำกัดการวิจัยจึงเลือกใช้ แก๊สฮีเลียม เป็นก๊าซทำงานซึ่งถือว่าเป็นแก๊สบริสุทธิ์ที่มีค่า Prandtl Number ต่ำสุด

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติแก๊สฮีเลียม

Thermal conductivity, K	0.138 W/(m*K)
Ratio of specific heats, γ	5/3
Isobaric specific heat, c_p	5193.2 J/(kg*K)
Prandtl number, σ	0.68
Specific ideal gas constant, R_s	2077

3.2.3 ความดันไดนามิกส์

ความดันไดนามิกส์หรือแอมพลิจูดความดัน คือการแกว่งตัวประกอบของความดันซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นเสียง จากสมการ 3.7 โดย Swift แสดงความหนาแน่นกำลังต่อหน่วยปริมาตรของเครื่องเทอร์โมอะคูสติก คือ

$$\frac{\dot{H}_2}{V} \sim \frac{f}{2} \frac{T_m \beta}{(1+\epsilon_s)} \frac{P_A^2}{\rho_m a^2} = \frac{f}{2} \frac{T_m \beta}{(1+\epsilon_s)} \rho_m a^2 M^2 \quad (3.7)$$

เมื่อ P_A คือความดันไดนามิกส์ a คือความเร็วเสียง f คือความถี่ของการสั่น β คือสัมประสิทธิ์การคายความร้อน ϵ_s คืออัตราการจุความร้อนของสแต็ก ρ_m คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของก๊าซ M คือ Mach number และ T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของแก๊ส

Mach number ของเสียง คือ

$$M = \frac{P_A}{\rho_m a^2} \quad (3.8)$$

เมื่อสังเกตสมการ 3.7 พบว่าความหนาแน่นกำลังเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกำลังสองของความดันไดนามิกส์ ซึ่งก็หมายความว่าความดันไดนามิกส์มีค่าสูงจะทำให้ได้กำลังต่อหน่วยปริมาตรสูงตามด้วยเพื่อหลีกเลี่ยง ผลของ Non-Linear ค่า P_A ต้องจำกัดโดยที่ $M \leq 0.1$ เพื่อให้มีค่าความดันไดนามิกส์สูงและอยู่ในข้อจำกัดของ $M \leq 0.1$ เทอม $\rho_m a^2$ ต้องมีค่ามากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้น

$$\rho_m a^2 = \gamma p_m \quad (3.9)$$

เมื่อ γ คืออัตราการจุความร้อนจำเพาะของแก๊ส และ p_m คือความดันเฉลี่ย จึงกล่าวได้ว่าความดันเฉลี่ย ต้องมีค่าสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้เช่นกัน

3.2.4 ความดันเฉลี่ย

ความหนาแน่นกำลังของระบบเทอร์โมอะคูสติกใดๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความดันเฉลี่ยของการสั่นของแก๊ส สมการที่ 3.7 และ 3.9 เพราะฉะนั้นจึงต้องมีค่ามาก ข้อสังเกตความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน δ_k แปรผกผันกับรากที่สองของความดันเฉลี่ย เนื่องจากความหนาแน่นของแก๊สแปรผกผันกับรากที่สองของความหนาชั้นขอบเขตความร้อน ในสมการที่ 3.8 สำหรับในแก๊สอุดมคติ ที่อุณหภูมิคงที่ ความหนาแน่นจะแปรผันตรงกับความดันแก๊ส สมการที่ 3.10 ตามกฎของแก๊สอุดมคติ

$$p = \rho RT \quad (3.10)$$

เมื่อ p คือความดัน ρ คือความหนาแน่น R คือค่าคงที่สหสัมพันธ์ของแก๊ส และ T คืออุณหภูมิของแก๊ส เพราะฉะนั้นการเลือกค่าความดันเฉลี่ยสูงมากเกินไปจะลดค่า δ_k ให้น้อยลง ซึ่งจะทำให้ช่องว่างระหว่างสแต็กเล็กลง ซึ่งจะทำให้เสียเวลามากในการทำสแต็กและบางครั้งก็อาจเป็นไปได้

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ความดันเฉลี่ย 0.1 MPa หรือ 1 บาร์ เนื่องจากข้อจำกัดของความแข็งแรงอุปกรณ์

3.2.5 ค่า Drive Ratio

ค่า Drive Ratio คือ ค่าความดันไดนามิกส์หารด้วยความดันเฉลี่ย อัตราส่วนนี้จะต้องมีค่าต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงผลไร้เชิงเส้นของเสียง เช่น ความปั่นป่วนของระบบ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่า Mach Number (M) ดังสมการ 3.7 ซึ่งต้องน้อยกว่า 0.1 และค่า เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, R_y) ต้องมีค่าน้อยกว่า 500 สมการ 3.7 เขียนให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้สะดวก คือ

$$M = \frac{D}{\gamma} \quad (3.11)$$

ถ้าเลือกใช้แก๊สฮีเลียมเป็นก๊าซทำงาน ค่า γ จะเท่ากับ $\frac{5}{3}$ ฉะนั้นค่า Drive Ratio จะต้องมีย่าน้อยกว่า 16.7 % เพื่อให้ค่า Mach Number น้อยกว่า 0.1 และควรน้อยกว่า 10 % เพื่อให้ Reynolds Number น้อยกว่า 500 สำหรับ Drive Ratio ที่เหมาะสมของลำโพงโดยทั่วไปจะน้อยกว่า 2-3 % สำหรับงานวิจัยเล่มนี้กำหนดให้ใช้ค่า Drive Ratio เท่ากับ 0.02 หรือ 2 %

3.2.6 ความถี่

สมการทั่วไปของความถี่ คือ

$$f = \frac{a}{\lambda} \quad (3.12)$$

เมื่อ a คือความเร็วเสียง และ λ คือความยาวคลื่น แนนอนที่สุดสมการด้านบนเป็นการหาความถี่ ความยาวคลื่น ความเร็วเสียง ที่ต้องการซึ่งขึ้นกับชนิดของแก๊ส ขอบเขตเงื่อนไข และความยาวของท่อกำหนด เมื่อระบบอยู่ในการกำหนด ความยาวของเครื่องต้นแบบจะอยู่ในครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นก็ต้องเป็นหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ท่อกำหนดที่มีขนาดครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นจะมีปลายปิดสองด้าน สรุปลก็คือความเร็วโนดและความดันแอนติโนดที่ปลายแต่ละด้าน ดังรูป 3.3 สำหรับท่อกำหนดที่มีขนาดเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นจะมีปลายหนึ่งปิดปลายหนึ่งเปิด สำหรับท่อกำหนดที่มีปลายปิดทั้งสองจะใช้สมการ 2.51 และเงื่อนไขขอบเขตความเร็วเป็นศูนย์ ที่ท่อกำหนดยาว L

$$\sin kl = 0 \quad (3.13)$$

จากสมการ 3.12 และ $k = \omega/a$

$$k = \frac{2a}{\lambda} \quad (3.14)$$

เพราะฉะนั้น ผลลัพธ์ของสมการ 3.13 คือ

$$\lambda = \frac{2L}{n}; (n = 1,2,3 \dots) \quad (3.15)$$

ในกรณีของท่อกำหนดยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น คือมีปลายเปิดด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งปิดฝั่งด้านเปิดจะเป็นโนดความดัน เพราะฉะนั้นจากสมการ 2.50

$$\cos kl = 0 \quad (3.16)$$

จะได้ผลลัพธ์ของสมการ คือ

$$\lambda = \frac{4L}{2n-1}; (n = 1,2,3 \dots) \quad (3.17)$$

มีอีกสองปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความถี่ของเครื่อง คือหนึ่ง ความหนาแน่นกำลัง คำนี้นี้เป็นสัดส่วนเชิงเส้นตรงกับความถี่กำหนดของเสียง เพราะฉะนั้นควรมีค่าความถี่มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ปัจจัยที่สอง ค่าความหนาแน่นขอบเขตความร้อน δ_k เป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของความถี่ ดังนั้นเพื่อให้มีระยะห่างของชั้นสแต็กมากค่าความถี่ต้องมีค่าน้อย เพราะฉะนั้นจึงเลือกให้เหมาะสม

สำหรับงานวิจัยเล่มนี้คำนวณความถี่ที่ต้องใช้ คือ 612 เฮิร์ตซ์ ซึ่งวิธีคำนวณใช้โปรแกรม Matlab ช่วยวิเคราะห์ (ตัวโค้ดโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวกที่ ผ. 1)

3.2.7 สแต็ก

สแต็กถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของอุปกรณ์เทอร์โมอะคูสติก เป็นกุญแจที่จะบ่งบอกถึงสมรรถนะและประสิทธิภาพ ซึ่งต้องแยกพิจารณาแต่ละองค์ประกอบดังนี้

1 วัสดุทำสแต็ก

สำหรับเทอร์โมอะคูสติกที่เกิดขึ้น สแต็กต้องมีความสามารถในการจุความร้อนจากอนุภาคของแก๊สที่ชนถ่ายความร้อน จากเทอมของพลังงานสมการ 2.91

$$-\Pi(y_0K + lK_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (3.18)$$

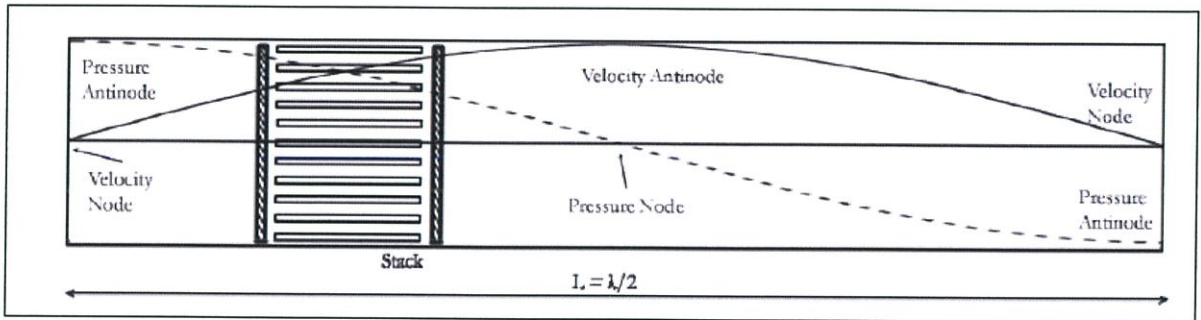
เมื่อ Π คือความยาวรอบรูปของสแต็ก K คือค่าการนำความร้อนของสแต็ก l คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของแผ่นสแต็ก และ y_0 คือค่าครึ่งหนึ่งระยะระหว่างชั้นสแต็ก จะเห็นว่ามีค่าติดลบของพลังพลังงานโดยทั่วไปของแข็งทั่วไปจะมีค่าการนำความร้อนสูง เพราะฉะนั้นการเลือกวัสดุ ต้องมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดและค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงสุด พื้นที่หน้าตัดสแต็กกว้างจะสามารถสัมผัสกับแก๊สได้มาก สแต็กสามารถทำมาจากวัสดุหลากหลายชนิด เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เซรามิกส์ พลาสติกหรือไฟเบอร์กลาส ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ ถ้าวัสดุสแต็กมีค่าการนำความร้อนสูง การชนถ่ายความร้อนของสแต็กจะเกิดขึ้นตลอดสแต็กซึ่งจะทำให้ไม่เกิดเทอร์โมอะคูสติก

สำหรับงานวิจัยเล่มนี้ เลือกใช้แผ่นไมลาร์ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการจุความร้อนสูงและนำความร้อนต่ำ

2. ความยาวสแต็กและตำแหน่งสแต็ก

การไหลของความร้อนในแนวแกน x ขึ้นกับความดันและความเร็ว การเปลี่ยนแปลงความดันมีผลสร้างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็ว เพื่อการชนถ่ายโมเมนตัม สมมติความยาวท่อกำหนดมีค่า

$\lambda/2$ (รูปที่ 3.3) ความเร็ว เท่ากับศูนย์ที่จุดปลายทั้งสองและที่ $\lambda/4$ การเปลี่ยนแปลงความดันจะน้อย ค่า การไหลของความร้อนสูงสุดที่ตำแหน่ง $x = \lambda/8$ หรือที่ตำแหน่ง $\lambda/4$ ของความยาวท่อกำหนด



รูปที่ 3.3 ความดันและความเร็วโนดและแอนติโนดในระบบทำความเย็นด้วยเสียง

การสูญเสียความหนืดและความร้อน เป็นสัดส่วนต่อความเร็ว (u_1^2) และความดัน (p_1^2) ตามลำดับ และผลรวมเกือบเท่ากับควมยาวท่อคลื่นนิ่ง ที่ความเร็วแอนติโนดเกิดการสูญเสียความหนืดสูงสุดและที่ ความดันแอนติโนดจะสูญเสียความร้อนสูงสุด

ความดันจะลดลงตลอดสแต็กประมาณได้โดยสมการ

$$\Delta p_1 \approx -\frac{i\omega \rho_m \Delta x u_1}{A(1-f_v)} \quad (3.19)$$

เมื่อ Δx คือความยาวของสแต็ก และค่าอื่น ๆ คิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสแต็ก

เราสังเกตเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความยาวสแต็กจะทำให้ความดันสูงขึ้นซึ่งทำให้สมรรถนะของระบบ ต่ำลง ถ้าสั้นเกินไปจะไม่สามารถสร้างความเย็นได้ดี เพราะฉะนั้นต้องเลือกความยาวสแต็กให้เหมาะสม

เมื่อทราบความถี่ที่ต้องใช้ จะใช้สมการการไหลของงานและความร้อนสำหรับคำนวณหาโดยการ พล็อตกราฟประสิทธิภาพกับการเปลี่ยนความยาวและตำแหน่งสแต็ก ซึ่งสมการที่ใช้เป็นการทำให้อยู่ในรูป ง่ายๆของ Tijani และคณะ ดังนี้

$$\dot{Q}_{cn} = \frac{\delta_{kn} D^2 \sin(2x_{sn})}{8\gamma(1+\sigma)\Lambda} \left[\frac{\Delta T_{mnt} \tan(x_{sn})}{(\gamma-1)BL_{sn}} \frac{1+\sqrt{\sigma}+\sigma}{1+\sqrt{\sigma}} - (1 + \sqrt{\sigma} - \delta_{kn}\sqrt{\sigma}) \right] \quad (3.20)$$

และ

$$\dot{W}_n = \frac{\delta_{kn} L_{sn} D^2}{4\gamma} \left[(\gamma-1)B \cos^2(x_{sn}) \left(\frac{\Delta T_{mnt} \tan(x_{sn})}{BL_{sn}(\gamma-1)(1+\sqrt{\sigma})\Lambda} - 1 \right) - \frac{\sqrt{\sigma} \sin^2(x_{sn})}{B\Lambda} \right] \quad (3.21)$$

เมื่อ Λ คือตัวแปรอินเตอร์มีเดีย ซึ่ง

$$\Lambda = 1 - \delta_{kn}\sqrt{\sigma} + \frac{1}{2}\sigma\delta_{kn}^2 \quad (3.22)$$

ตารางที่ 3.5 ตัวพารามิเตอร์แปลงที่ใช้ในสมการการไหลของงานและความร้อน

Operation parameters
Drive ratio: $D = p_1 / p_m$
Norm. cooling power: $\dot{Q}_{cn} = \dot{Q}_c / p_m aA$
Norm. acoustic power: $\dot{W}_n = \dot{W} / p_m aA$
Norm. temperature difference: $\Delta T_{mn} = \Delta T_m / T_m$
Gas parameters
Norm. thermal penetration depth: $\delta_{kn} = \delta_k / y_0$
Stack Geometry
Norm. stack length: $L_{sn} = kL_s$
Norm. stack center position: $x_{sn} = kx_s$
Porosity: $B = y_0^2 / (y_0 + l)^2$

สมการที่มาจาก Tijani เหล่านี้จะสามารถใช้หาความยาวและตำแหน่งที่เหมาะสมของสแต็กซึ่งวัดจากหน้าลำโพง ซึ่งต้องรู้อรูปร่างของสแต็ก ความถี่ที่ใช้ คุณสมบัติของก๊าซทำงาน ความดันเฉลี่ย และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ต้องการ

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของเครื่องทำความเย็นด้วยระบบเสียงจะสามารถหาได้จาก

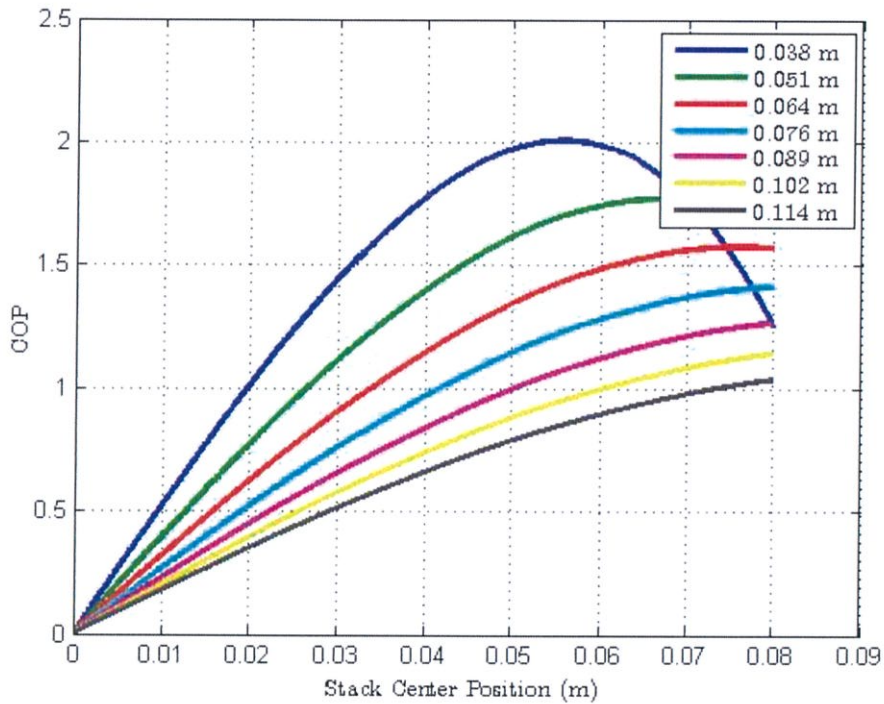
$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (3.23)$$

เมื่อ \dot{W} คือค่าอินพุตกำลังที่ต้องการจากแหล่งกำเนิด ค่า COP จะอ้างถึงสมรรถนะซึ่งจะไม่รวมอินพุตกำลังจากสิ่งแวดล้อม ดังนั้นไม่ควรสับสนกับประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเครื่อง ถ้าไม่มีการอินพุตที่มาจากสิ่งแวดล้อมค่า COP และประสิทธิภาพจะเท่ากัน แต่โดยทั่วไปจะมีหน่วยที่แตกต่างกัน

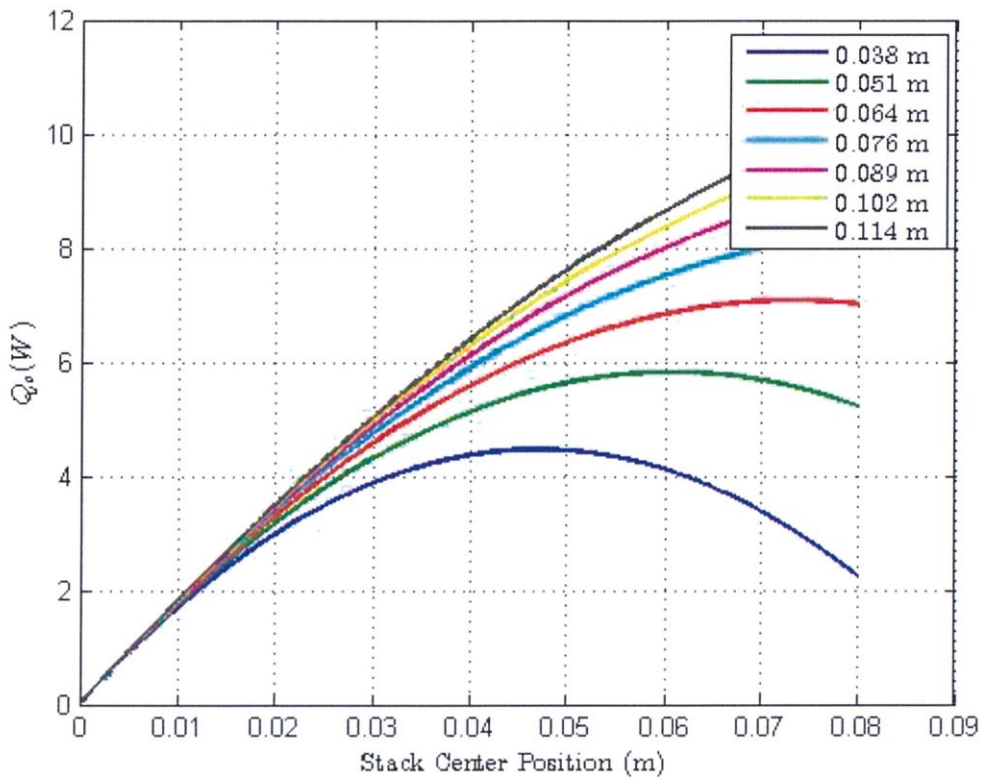
ในกรณีของสแต็กเครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียง อินพุตกำลังจะมาจากลำโพง ดังนั้น COP จะสามารถคำนวณหาได้จาก

$$Cop = \frac{\dot{Q}_{cn}}{\dot{W}_n} \quad (3.24)$$

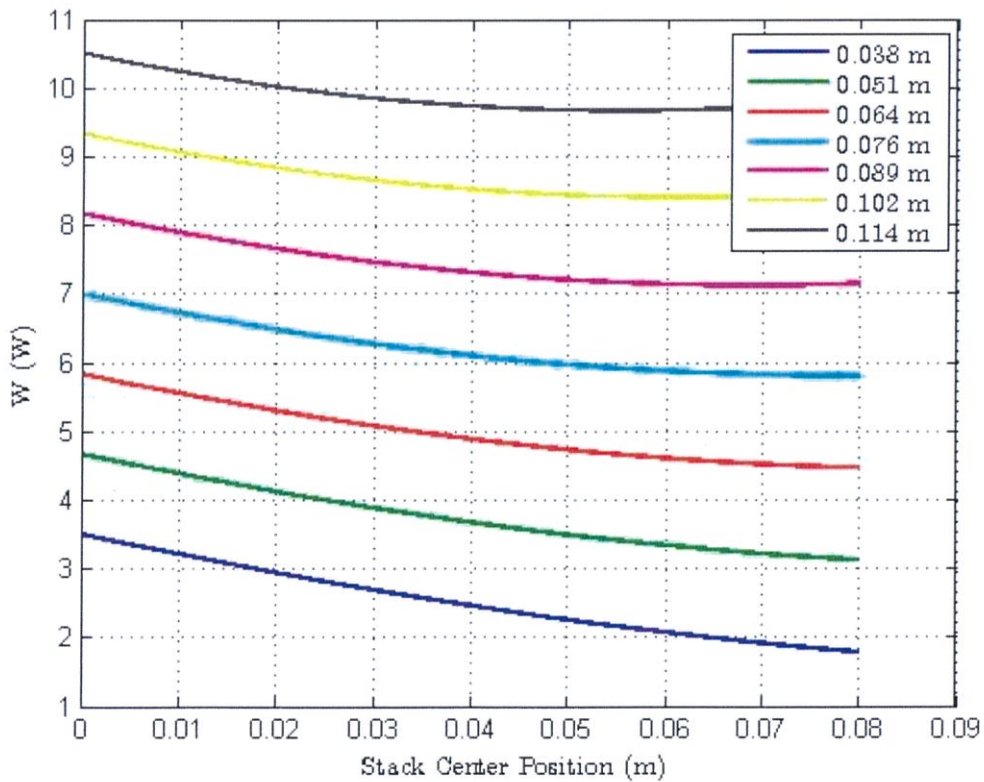
ซึ่งค่านี้ได้พล็อตไว้ในรูปที่ 3.4 สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องทดลอง สำหรับงานวิจัยเล่มนี้เลือกใช้สแต็กที่มีความยาว 6.4 เซนติเมตร เพื่อความสะดวกในการทำสแต็ก จากรูปที่ 3.4 เมื่อเลือกใช้สแต็กที่มีความยาวเท่ากับ 6.4 เซนติเมตร จะได้ COP ประมาณ 1.6 และมีตำแหน่งกึ่งกลางสแต็กห่างจากหน้าลำโพงเท่ากับ 7.7 เซนติเมตร ฉะนั้น ด้านร้อนของสแต็กจะต้องวางห่างจากหน้าลำโพงเท่ากับ 4.5 เซนติเมตร (คิดจาก $7.7 - \frac{6.4}{2} = 4.5$ cm)



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางสแต็ก ความยาวสแต็ก และสมรรถนะ



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางสแตก ความยาวสแตก และกำลังความเย็น



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางสแตก ความยาวสแตก และกำลังเสียง

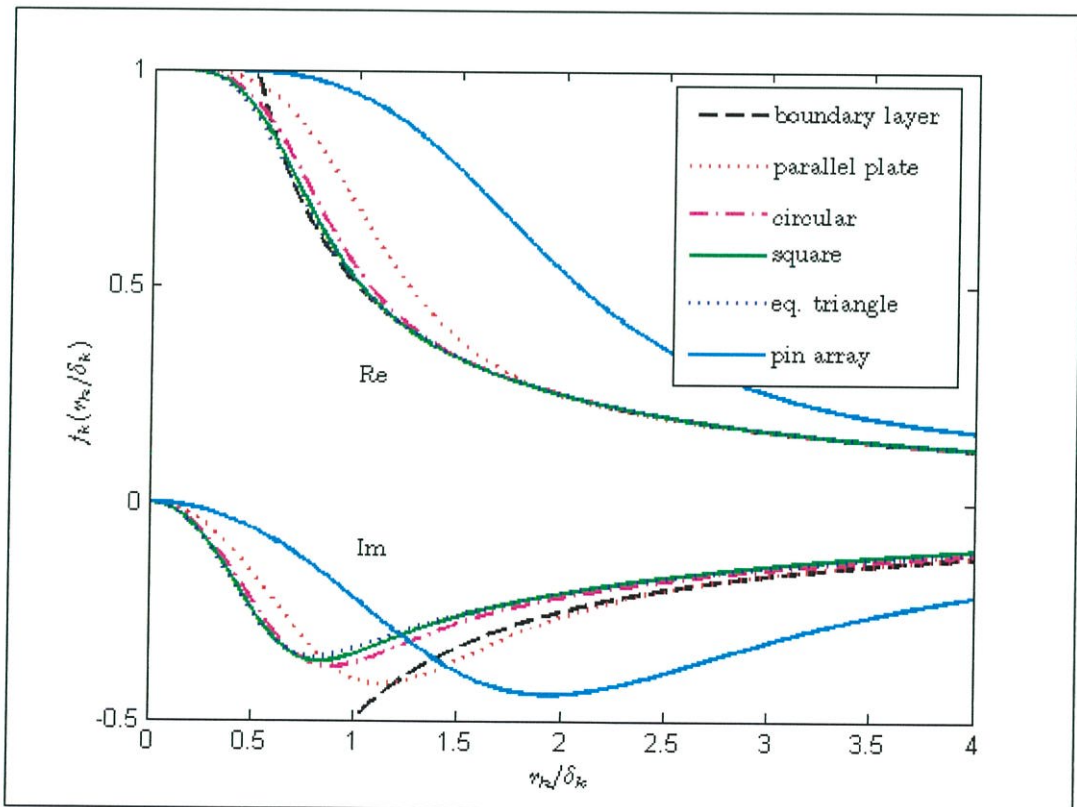
3. รูปร่างสแต็ก

ลักษณะของสแต็กถือว่ามีความสำคัญต่อระบบการทำความเย็น ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่า Thermal Penetration Depth (จะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ) Viscous Penetration Depth (จะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ) ซึ่งกล่าวไว้ในสมการ 2.58 และ 2.73 ตามลำดับ พารามิเตอร์อื่นที่มีความสำคัญคืออัตราไอโดรลิก ดังสมการ

$$r_h = \frac{y_0}{\delta_k} \quad (3.25)$$

เมื่อ y_0 คือครึ่งหนึ่งของช่องว่างของสแต็ก δ_k คือชั้นขอบเขตความร้อน

ค่าเป้าหมายที่ต้องการ เช่น Cooling Power และ Cooling Temperature เป็นการทำงานที่เกี่ยวข้องกับสแต็กในสนามคลื่นนิ่ง และส่งผลต่อปัจจัยที่เป็นกำลังขาเข้า ความยาวสแต็ก ความดัน เป็นต้น ตัวบ่งชี้ค่าเหมาะสมของเฟสคลื่นนิ่งในระบบเทอร์โมอะคูสติกคือ ค่า Rott's Function รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟ Hydraulic Ratio กับ F-Function สำหรับสแต็กในรูปแบบต่างๆ

องค์ประกอบส่วนจินตภาพของ F-Function จะเกี่ยวข้องกับเฟสของความเร็วและความดันซึ่งส่งผลต่อเทอร์โมอะคูสติก ถ้าอัตราไฮโดรลิกมีค่าน้อยมาก ($r_h \ll 1$) การแกว่งของอุณหภูมิในก๊าซเป็นแบบไอโซเทอร์มอล ถ้าอัตราไฮโดรลิกมีค่ามาก ($r_h \gg 1$) การแกว่งของอุณหภูมิในก๊าซเป็นแบบอะเดียบาติก ทั้งสองกรณีการขนถ่ายความร้อนระหว่างแก๊สกับสแต็กจะไม่เกิดผลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ฉะนั้น จึงต้องหาค่าที่เหมาะสมของอัตราไฮโดรลิกจากค่า Rott's Function ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งประมาณ 1.5-2

แอมพลิจูดกระจัดของแก๊ส (ในทิศทางการเคลื่อนที่ของแก๊ส)

$$|\xi_1| = \frac{|u_1|}{\omega} \quad (3.26)$$

Prandtl Number เท่ากับ

$$p_r = \left(\frac{\delta_v}{\delta_k}\right)^2 = \frac{\mu C_p}{k} \quad (3.27)$$

เมื่อ p_r คือ Prandtl Number เป็นอันดับเอกภาพของแก๊ส ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ประกอบในระบบเทอร์โมอะคูสติก จะต้องมิตติของอันดับ δ_k เพื่อที่จะสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความหนาของชั้นมีความสำคัญมาก ปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกจะมีค่ามากที่สุดภายในชั้นขอบเขตความหนืดความร้อน การถ่ายโอนความร้อนและการให้คลื่นเสียงจะเกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นของปริมาตรก๊าซภายในความหนาของชั้นขอบเขต Thermal และ Viscous Penetration Depth มีความสำคัญเท่ากับความหนาของชั้น ชั้นขอบเขตความร้อนที่สร้างขึ้น สามารถเพิ่มการขนถ่ายความร้อนระหว่างแก๊สและสแต็ก แต่อีกทางหนึ่ง Viscous Penetration Depth จะลดหรือต้านประสิทธิภาพของระบบเทอร์โมอะคูสติก เนื่องจากการกระจายโมเมนตัม ดังนั้น ต้องพยายามลดค่าความหนืดชั้นขอบเขต ทางเดียวที่จะจัดการคือการเลือกก๊าซทำงาน ส่วนทางเลือกด้านวัสดุสแต็กจะมีผลต่อ Thermal Penetration Depth

แอมพลิจูดกระจัดของแก๊ส $|\xi_1|$ จะต้องมีค่ามากกว่าค่า Thermal และ Viscous Penetration Depth แต่ต้องน้อยกว่าความยาวคลื่น ดังนี้

$$\delta_v, \delta_k \ll |\xi_1| \ll \lambda \quad (3.28)$$

ความแตกต่างของรูปแบบสแต็กที่ใช้ในเครื่องเทอร์โมอะคูสติกคลื่นนิ่ง เช่น แผ่นขนาน สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม วงกลม เกลียวและพินอาร์เรย์ เป็นต้น กำลังของวัสดุสแต็กที่ให้โดยส่วนจินตภาพของ Rott's Function $Im[-f_k]$ (สมการ 2.71) ใช้รูป 3.7 อ้างอิงสำหรับชนิดรูปร่างที่แตกต่างของสแต็กและความหนาแน่นกำลัง เราสังเกตว่าความหนาแน่นกำลังสูงสุดคือพินอาร์เรย์และแบบขนาน ส่วนรูปวงกลมและ

สี่เหลี่ยมมีความหนาแน่นกำลังต่ำสุด เทียบระหว่างพินอาร์เรย์และแบบขนาน แบบขนานง่ายต่อการสร้างมากกว่า

4. ช่องว่างระหว่างสแต็ก

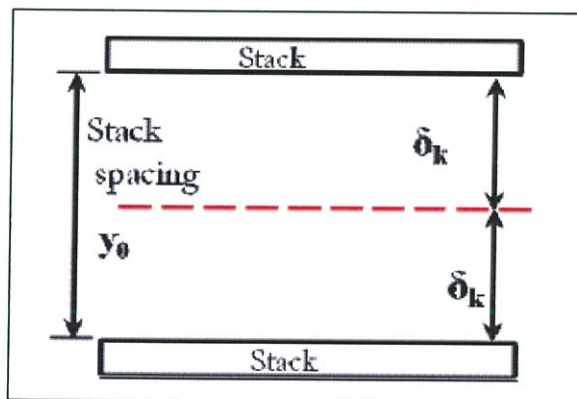
ค่าเหมาะสมของช่วงอัตราไฮโดรลิก คือ

$$1.5 \leq r_h \leq 2 \quad (3.29)$$

เพราะฉะนั้น

$$y_0 \cong 2\delta_k \quad (3.30)$$

เมื่อ y_0 คือช่องว่างสแต็ก และ δ_k คือชั้นขอบเขตความร้อน ซึ่งช่องว่างสแต็กควรจะมีค่าเป็นสองเท่าของความหนาชั้นขอบเขตความร้อนสำหรับสมรรถนะที่เหมาะสม ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ช่องว่างระหว่างสแต็กที่เหมาะสม

สำหรับงานวิจัยเล่มนี้เลือกใช้เส้นเอ็นตกปลา (Fishing Line) เป็นวัสดุแบ่งความกว้างของชั้นสแต็ก โดยกำหนดใช้เส้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร

3.2.8 ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของเครื่องเทอร์โมอะคูสติค ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนมาจากสแต็กฉะนั้นการออกแบบตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจึงถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่มีประสิทธิภาพจะทำให้สมรรถนะของเครื่องต่ำ

ซึ่งวิธีคำนวณใช้โปรแกรม Matlab ช่วยวิเคราะห์ (ตัวโค้ดโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวกที่ ผ. 4)

3.2.9 ท่อกำทอน

เมื่อเลือก ความดันที่ต้องการใช้ ความถี่ และพารามิเตอร์ของสแต็ก จะสามารถออกแบบท่อกำทอนได้ โดยท่อกำทอนต้องมีความแข็งแรงเพียงพอกับความดันที่ใช้งาน ของไหลที่ใช้และการสูญเสียความร้อน ดังนั้นการสูญเสียความร้อนและความหนืดภายในผนังท่อกำทอนต้องมีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้ประสิทธิภาพเครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียงมีค่าสูงสุด

1. วัสดุท่อกำทอน

มี 3 ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการเลือกวัสดุที่จะใช้ทำท่อกำทอน ได้แก่ 1) ทางกล 2) เสียง 3) การขนถ่ายความร้อน

สำหรับเหตุผลทางกล ท่อกำทอนต้องมีความแข็งแรงเพียงพอและสามารถบรรจุแก๊สทำงานได้ที่ความดันสูง โดยส่วนใหญ่จะมีผนังหนาแต่จะมีปัญหาด้านน้ำหนักด้วย

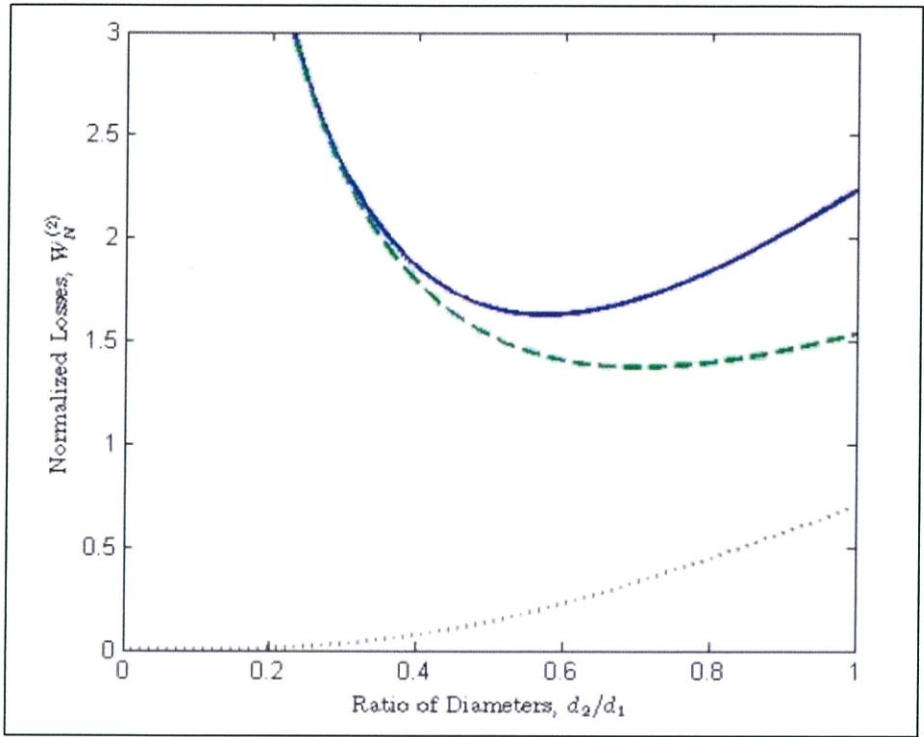
ด้านเสียง ท่อกำทอนจะมีอิมพีแดนซ์เสียงที่สูง และต้องมีการสูญเสียความดันเสียงให้ต่ำที่สุด ดังนั้นกลุ่มโลหะจะสามารถนำมาทำเป็นท่อกำทอนเป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตาม ท่อกำทอนจากโลหะ มีข้อเสียคือมีค่าการนำความร้อนที่สูง ซึ่งจะทำให้ความร้อนจากสิ่งแวดล้อมถ่ายเทเข้าสู่ระบบฝั่งเย็นของเครื่อง ความร้อนจากฝั่งร้อนจะแพร่เข้ามาฝั่งเย็นผ่านท่อกำทอนได้อีกด้วย ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำสแต็กควรมีค่าการนำความร้อนต่ำ

สำหรับงานวิจัยเล่มนี้เลือกใช้ PVC เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามหัวข้อวิจัย และยังมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ (0.19 W/m-K) และรองรับความดันที่ 1 บาร์ได้ ซึ่งกำหนดขนาดท่อที่ 4 นิ้ว ใช้เป็นตัวครอบสแต็กและส่วนที่เป็นลำโพง

2. รูปร่างท่อกำทอน

การออกแบบท่อกำทอนต้องให้มีประสิทธิภาพสูงสุด พื้นที่หน้าตัดของท่อกำทอนสามารถหาได้จากพื้นที่หน้าตัดของสแต็ก และความยาวท่อกำทอนหาได้จากความถี่กำทอน ความยาวของท่อกำทอนมักจะเลือกใช้สองขนาดคือ $\frac{1}{2}$ ความยาวคลื่นและ $\frac{1}{4}$ ความยาวคลื่น แต่เนื่องจากขนาดท่อกำทอนมีผลต่อการสูญเสียพลังงาน จึงต้องเลือกใช้สัดส่วนท่อที่เหมาะสม ซึ่งจากกราฟด้านล่าง แสดงค่าการสูญเสียความร้อนรวมต่ำสุดที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 0.57



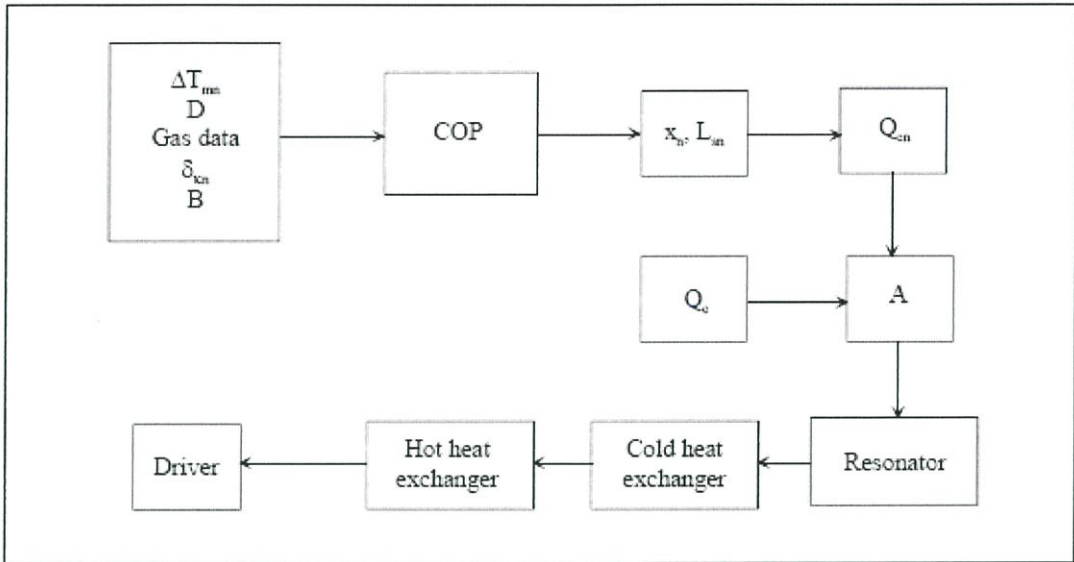
รูปที่ 3.9 ค่าการสูญเสียความร้อนกับสัดส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง

สำหรับงานวิจัยเล่มนี้ใช้ท่อกำหนดขนาด 2 นิ้วทำจาก PVC ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน 0.5 เนื่องจากต้องเลือกใช้วัสดุที่สามารถหาได้จากท้องตลาด (ตัวโค้ดโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวกที่ ผ. 4)

3.3 การออกแบบเครื่องทดสอบ [3]

มีวิธีการออกแบบจากหลายๆกรณี เช่น Swift (1988) Wetzel และ Herman (1996) และ Tijani (2001) แต่วิธีที่ง่ายคือของ Tijani (2001)

สำหรับวิจัยเล่มนี้จะใช้วิธีนี้ในการออกแบบเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก



รูปที่ 3.10 กระบวนการออกแบบเครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานเสียง

3.3.1 เลือกค่าพารามิเตอร์

ข้างล่างเป็นขั้นตอนการกำหนดค่าเป้าหมายของตัวพารามิเตอร์ของเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก

1. กำหนดระยะห่างของชั้นสแต็ก ($2y_0$)

$$2y_0 = 0.00075 \text{ m} \quad (3.31)$$

2. เลือกแก๊สทำงาน เลือกเป็นฮีเลียม เพราะว่าเป็นแก๊สที่มีความเร็ว (a) และค่าการนำความร้อน (K) สูงสุดในแก๊สบริสุทธิ์
3. อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 300 K
4. เลือกอุณหภูมิเกรเดียนต์ (ΔT_m) เท่ากับ 60 K
5. แนวคิด Tijani เพื่อเลี่ยงผลจากไม่เป็นเชิงเส้น ค่าเลขมัค จะจำกัดอยู่ประมาณ 0.1

$$M = \frac{p_0}{\rho_m a^2} \quad (3.32)$$

เมื่อ M คือ เลขมัค

p_0 คือ ความดันไดนามิกส์

ρ_m คือ ความหนาแน่นของแก๊ส

a คือ ความเร็วเสียง

เมื่อ $M=0.1$ ค่า Drive Ratio จะมีค่าน้อยกว่า 0.03 ($D \leq 0.03$) สำหรับงานวิจัยเล่มนี้เลือกใช้ ($D = 0.02$)

$$D = p_o/p_m \quad (3.33)$$

เมื่อ D คือ Drive Ratio

p_o คือ ความดันไดนามิกส์

p_m คือ ความดันเฉลี่ย

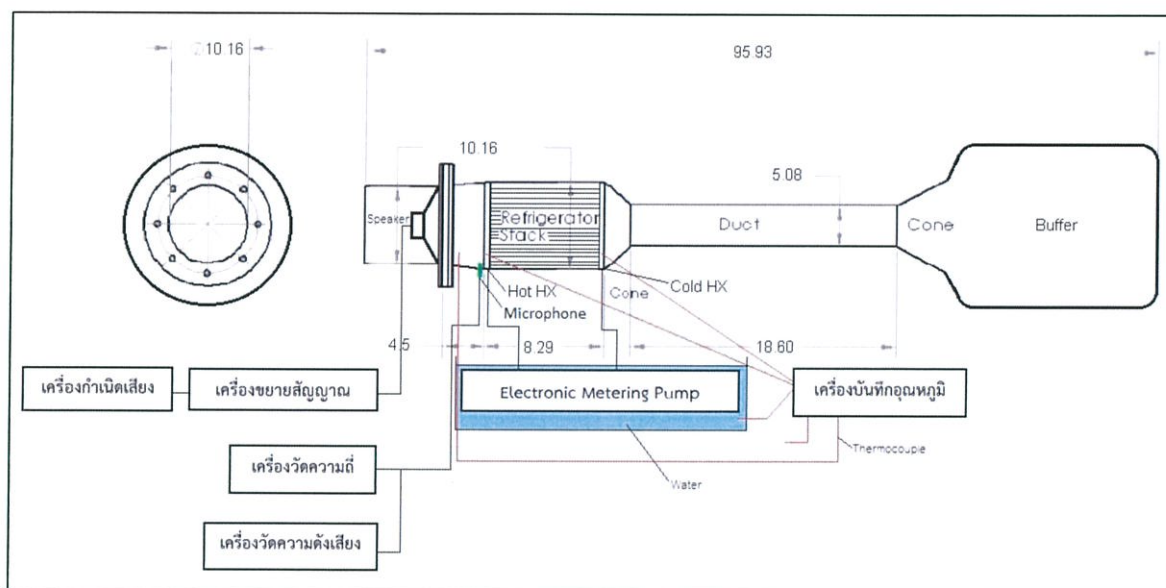
ความดันเฉลี่ย (p_m) ควรมีค่ามากที่สุด แต่เนื่องจากงานวิจัยเลือกใช้อุปกรณ์ที่ทนแรงดันต่ำ ดังนั้นจึงเลือกใช้ความดันเฉลี่ยเท่ากับ 1 บาร์

ข้อมูลเริ่มต้นเหล่านี้จะถูกนำไปใช้คำนวณในโปรแกรม Matlab เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับออกแบบชุดทดลองทำความเย็น (โค้ดที่ใช้ในโปรแกรม แสดงไว้ในภาคผนวก)

บทที่ 4

วิธีการดำเนินงาน

การออกแบบส่วนประกอบเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง และการเลือกใช้ค่าของตัวแปรที่เหมาะสมได้ถูกกล่าวไว้ในบทก่อนหน้า ในบทนี้จะเป็นการอธิบายวิธีการสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง โดยอธิบาย การเตรียมการทดลอง การใช้เครื่องมือ และวิธีการวัดในการสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง



รูปที่ 4.1 แผนผังของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง (หน่วยเซนติเมตร)

4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง

พื้นฐานของการออกแบบเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง และการเลือกใช้ค่าของตัวแปรที่เหมาะสมได้ถูกกล่าวไว้ในบทที่ 3 ส่วนประกอบหลักของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียงได้มาจากการซื้อ และการสร้างขึ้น รายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบอธิบายได้จาก รูปที่ 4.1 โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

4.1.1 ลำโพง

จากการเลือกใช้ลำโพงในบทที่ 3 (3.1) เครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียงต้องการติดตั้งอุปกรณ์ลำโพงไว้ที่ปลายของท่อกำทอน เพื่อใช้สร้างคลื่นนิ่งจากเสียงในแก๊สที่มีความถี่มูลฐานซึ่งเป็นความถี่กำทอนของท่อกำทอน ลำโพงทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง ลำโพงที่ใช้ (MP-4293, Mark Pro)

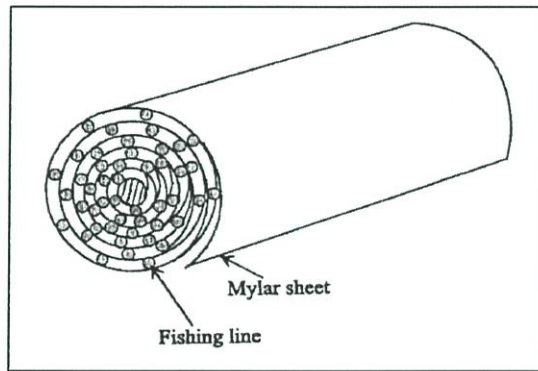
ประสิทธิภาพของลำโพงประเภทนี้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความต้านทานซึ่งไม่เป็นผลดีกับแก๊สที่เมื่อเกิดความดันสูงในท่อกำทอน เนื่องจากขนาดของแอมพลิจูดในท่อกำทอนถูกจำกัด (Swift, 1999)

4.1.2 ท่อกำทอน

ท่อกำทอนทำมาจากวัสดุพีวีซีชนิดท่อแบบกลม เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแล้วอนุภาคของตัวกลางมีการสั่นด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง ท่อกำทอนทำหน้าที่สะท้อนคลื่นเสียงทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่นเสียงระหว่างคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดกับเสียงสะท้อนจากท่อกำทอนทำให้เกิดคลื่นนิ่งขึ้น ขนาดของท่อกำทอนคำนวณออกมาด้วยสมการที่

4.1.3 สแต็ก

ในการศึกษานี้สแต็กออกแบบให้เป็นรูปก้นหอยโดยแต่ละชั้นเป็นแผ่นขนานกันสแต็กทำมาจากแผ่นไมลาร์ และเอ็นटकปลา



รูปที่ 4.2 สแต็กทำจากแผ่นไมลาร์ม้วนเป็นรูปก้นหอย

รูปที่ 4.2 แสดงสแต็กทำจากแผ่นไมลาร์ม้วนเป็นรูปก้นหอย โดยแผ่นไมลาร์ ทำหน้าที่บรรจุของไหลเป็นสารทำงาน และแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลเมื่อเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ขนาดช่องว่างของสแต็กคำนวณออกมาด้วยสมการที่ 3.2 ความยาวของสแต็กคำนวณออกมาด้วยสมการที่ 3.3 และระยะการวางตำแหน่งสแต็กคำนวณออกมาด้วยสมการที่ 3.4 เอ็นटकปลาทำหน้าที่เป็นตัวคั่นระหว่างแผ่นไมลาร์ทำให้เกิดช่องว่างขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเอ็นटकปลาที่ใช้เท่ากับขนาดช่องว่างของสแต็ก

4.1.4 ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากสแต็กไปสู่ น้ำที่ใส่เข้ามาผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้สามารถนำอุณหภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ ขนาดของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนคำนวณออกมาด้วยสมการที่ 3.5

การออกแบบตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก เพราะว่าการติดตั้งตัวแลกเปลี่ยนความร้อนไว้หน้าสแต็กด้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคแก๊ส และรบกวนการ

เกิดกระบวนการเทอร์โมอะคูสติก ดังนั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีการออกแบบในลักษณะที่ลดการรบกวนการเคลื่อนที่ของอนุภาค และออกแบบให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพระหว่างสแต็กกับตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

4.1.5 ไมโครโฟน

ไมโครโฟนที่ใช้เป็นไมโครโฟนที่หาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป และมีขนาดเล็ก ไมโครโฟนทำหน้าที่รับสัญญาณเสียงจากแหล่งกำเนิด และเสียงจากการสะท้อนของท่อกำทอน โดยส่งสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ผู้ทำการทดลองสามารถวิเคราะห์สัญญาณเสียงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาระดับเสียงและความถี่ของคลื่นเสียงได้

4.1.6 เทอร์โมคัปเปิล

ในการศึกษานี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลประเภท T ในการตรวจวัดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลถูกนำมาใช้วัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในท่อกำทอน และวัดอุณหภูมิที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน รวมไปถึงอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการทดลอง

4.1.7 เครื่องขยายเสียง

เครื่องขยายเสียงทำหน้าที่ขยายสัญญาณเสียงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ เครื่องที่ใช้ในการศึกษา (CA-245Z, Nakoya)

4.1.8 Electronic Metering Pump

Electronic Metering Pump ทำหน้าที่ใช้ปั้มน้ำผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่สแต็กด้านร้อนและสแต็กด้านเย็น

4.1.9 เครื่องมือเก็บข้อมูล

การศึกษานี้ ใช้ Data Logger (DX2000, Yokogawa) ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือในการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิต่างๆในการทดลอง

4.2 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง

ในการทดลอง ควบคุมอุณหภูมิห้องให้มี อุณหภูมิเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส การทดลองแบ่งเป็น การทดลองการกำทอนของคลื่นเสียง เป็นการทดลองเพื่อจำลองลักษณะของคลื่นเสียงในท่อกำทอน และการทดลองการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกจากเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง การเตรียมการทดลองมีดังนี้

4.2.1 การทดลองการกำทอนของคลื่นเสียง

กำทอนในท่ออากาศเกิดขึ้นเมื่อ ความถี่ของคลื่นจาก แหล่งกำเนิดมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของลำอากาศ จากการทดลองสามารถหาค่าความยาวคลื่น ความเร็วและอุณหภูมิในอากาศได้เมื่อทราบความถี่นั้น สำหรับความเร็วของคลื่นเสียงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$v = f\lambda \quad (4.1)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในอากาศขณะทดลอง (เมตรต่อวินาที)

f คือ ความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง (เฮิรตซ์)

λ คือ ค่าความยาวคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิด (เมตร)

โดยปกติความเร็วของคลื่นเสียงแปรตามความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งแปรตามอุณหภูมิในขณะทดลอง
ความเร็วของเสียงที่อุณหภูมิใดๆ (t องศาเซลเซียส) คำนวณได้จากสมการ

$$v_t = v_0[1+(t/273)]^{1/2} \quad (4.2)$$

จาก Binomial Theorem

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)x^3}{3!} + \dots$$

จากสมการ (4.2) จะได้
$$v_t = v_0 \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{t}{273} + \dots \right] \quad (4.3)$$

เมื่อ v_t คือ ความเร็วเสียงที่อุณหภูมิ t องศาเซลเซียส (เมตรต่อวินาที)

v_0 คือ ความเร็วเสียงที่ STP (เมตรต่อวินาที)

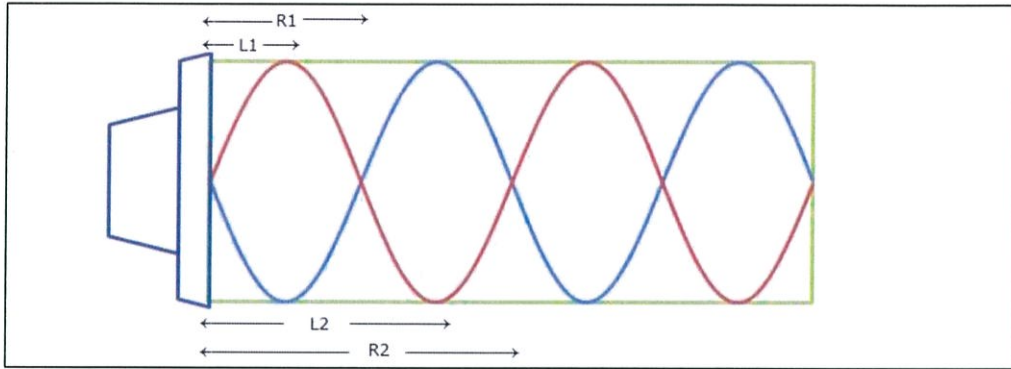
t คือ อุณหภูมิของอากาศตัวกลางที่ขณะที่ทำการทดลอง (องศาเซลเซียส)

เมื่อแทนค่า $v_0 = 331$ เมตรต่อวินาที จะได้

$$v_t = 331 + 0.6t \quad (4.4)$$

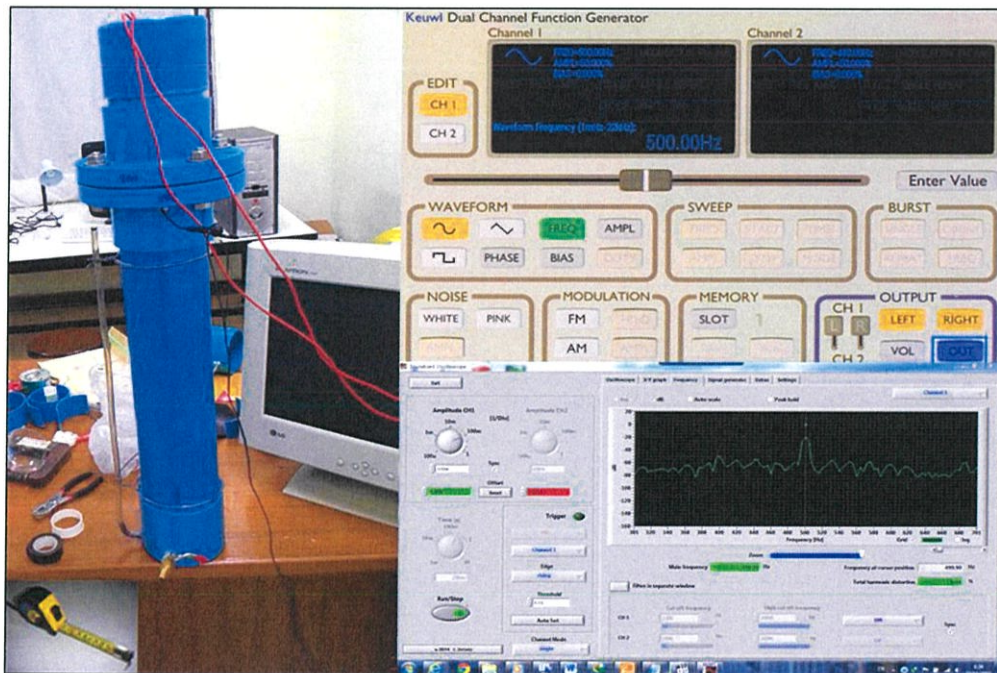
1. จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาการเกิดกำทอนในท่ออากาศ
2. เพื่อหาความยาวคลื่นนำไปสู่การวิเคราะห์ตำแหน่งการเกิดกำทอนในท่ออากาศ
3. เพื่อจำลองลักษณะของคลื่นเสียงในท่อกำทอน
4. เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ตำแหน่งการวางสแต็ก



รูปที่ 4.3 การกระจัดในท่ออากาศ

จากรูปที่ 4.3 แสดงการกระจัดในท่ออากาศ ตำแหน่งบัพระยะห่างจากปากลำโพง R_1, R_2, R_3, \dots จะได้ยินเสียงก้ำกอนและตำแหน่งปฏิบัพระยะห่างจากปากลำโพง L_1, L_2, L_3, \dots จะได้ยินเสียงเบาที่สุด



รูปที่ 4.4 ชุดทดสอบและอุปกรณ์การทดสอบการทดสอบการก้ำกอนของคลื่นเสียง

จากรูปที่ 4.4 แสดงชุดทดสอบและอุปกรณ์การทดสอบการก้ำกอนของคลื่นเสียงโดยมีอุปกรณ์ต่างๆ และวิธีการทดลองดังนี้

2. อุปกรณ์

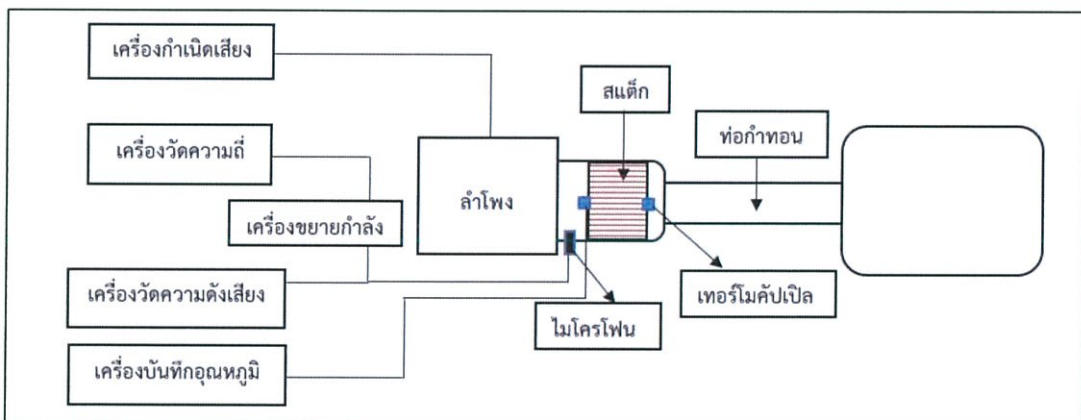
1. ท่อบรรจุน้ำซึ่งปรับระดับได้พร้อมลำโพง
2. แหล่งกำเนิดสัญญาณ (โปรแกรม Function Generator)
3. เครื่องขยายเสียง
4. Scope (โปรแกรม Scope)
5. ตลับเมตร

3. วิธีการทดลอง

1. ปล่อยสัญญาณความถี่ 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850 และ 900 เฮิรตซ์ไปที่ลำโพง ตามลำดับการทดลอง
2. เปิดน้ำเพื่อให้ระดับน้ำในท่อทดลองลดระดับลง
3. สังเกตกราฟและปิดน้ำเมื่อพบจุดที่เสียงดังสุดหรือเบาสุด
4. บันทึกระยะจากปากลำโพงถึงตำแหน่งบัพหรือปฏิบัพที่พบจากข้อ 3

4.2.2 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก

ชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นในงานวิจัยเล่มนี้ ประกอบด้วย ลำโพง ท่อกำหนดสแต็กดังรูปที่ 4 โดยต่อเข้ากับชุดขยายสัญญาณจากโปรแกรม Function Generator ซึ่งเป็นโปรแกรมที่กำเนิดสัญญาณฟังก์ชันคลื่นรูปไซน์ ต่อเข้ากับเครื่องขยายกำลัง และต่อเข้ากับลำโพงของชุดทดสอบ ใช้โปรแกรม scope ใช้ดูการเปลี่ยนแปลงความถี่ ควบคุมความถี่คลื่นเสียงให้คงที่ จากไมโครโฟนวัดที่หน้าลำโพงภายในท่อ โปรแกรมควบคุมความถี่เสียง การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างสองด้านของสแต็กใช้สายเทอร์โมคัปเปิล ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น จะถูกเก็บและบันทึกไว้ในเครื่อง



รูปที่ 4.5 การต่ออุปกรณ์ในการทดลองการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ การทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก

Operation Parameters	Gas Parameters
$P_m = 101325 \text{ Pa}$	$a = 990.12 \text{ m/s}$
$T_m = 300 \text{ K}$	$\sigma = 0.68$
$D = 0.02$	$\gamma = 5/3$
	$B = 0.9091$

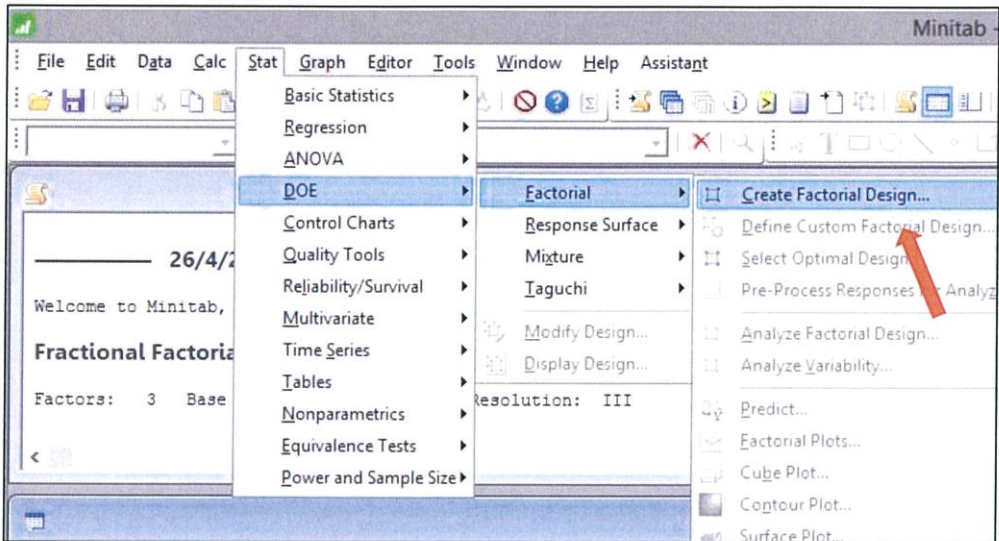
รูปที่ 4.5 แสดงการต่ออุปกรณ์ และชุดทดสอบที่ใช้ในการทดลอง ขนาดของชุดทดสอบนี้ได้จากการคำนวณ ตามสมการ ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เมื่อคำนวณตามสมการแล้วจะได้ขนาดของชุดทดลองดังนี้ ความยาวท่อกำหนด $L_R = 12.79$ เซนติเมตร ความยาวสแต็ก $L_S = 6.4$ เซนติเมตร ความยาวตัวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านร้อน-ด้านเย็น X_h กับ X_c 5.1 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ชุดทดลองนี้ทำจาก พีวีซีสำหรับลำโพงใช้ขนาด 4 นิ้ว กำลัง 120 วัตต์ ซึ่งสแต็กจะวางไว้ห่างจากด้านหน้าลำโพงเป็นระยะ 4.5 เซนติเมตร และแต่ละชั้นของสแต็กจะห่างกันเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร

หลักการทำงานของชุดทดลอง เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูปของพลังงานเสียง ไปเป็นพลังงานความร้อนและความเย็น โดยที่ เมื่ออนุภาคของแก๊สได้รับพลังงานจากเสียงจะกระตุ้นอนุภาคให้สั่นและเคลื่อนที่ มีช่วงการอัดและขยาย จึงทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไป-กลับได้ จะเป็นไปตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิก คือเมื่อให้พลังงานเสียงกับอนุภาคแก๊ส ในช่วงอัด อนุภาคแก๊สจะได้รับการกระตุ้นและถูกบีบอัดตัวจากความดัน จะเคลื่อนที่ออกไปพร้อมกับคายพลังงานรอบตัวไปด้วย ทำให้บริเวณนั้นอุณหภูมิสูงขึ้น ในจังหวะคายตัว ความดันลดลง อนุภาคจะเคลื่อนที่กลับและดูดซับพลังงานทำให้อุณหภูมิลดลง เป็นจักรไปเรื่อยๆ ซึ่งเมื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านสแต็กจะทำให้ด้านหนึ่งมีอุณหภูมิสูงและอีกด้านหนึ่งมีอุณหภูมิต่ำ และเมื่อต้องการใช้งานความร้อน-เย็น จะต้องผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อระบายออกข้างนอกอีกชั้นหนึ่ง

1. การออกแบบการทดลอง

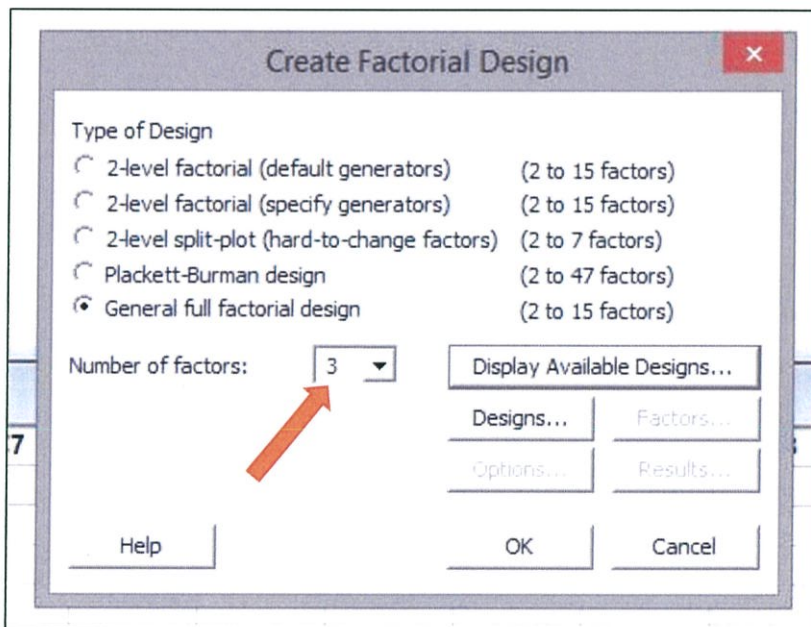
การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เป็นการวิเคราะห์หาผลกระทบ จากหลายๆปัจจัยที่ส่งผลในขณะเดียวกันต่อผลลัพธ์ที่เราสนใจ (response) กล่าวคือเป็นชุดของการทดลอง ซึ่งในแต่ละครั้งจะทำการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัย (Input Variables) อย่างเป็นระบบตามรูปแบบที่ ได้วางแผนเอาไว้ แล้วทำการบันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง ผู้เชี่ยวชาญด้านคุณภาพใช้การออกแบบการทดลองในการค้นหาเงื่อนไขของกระบวนการ หรือส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่มีผลอย่าง สำคัญต่อคุณภาพ เพื่อกำหนดการตั้งค่าปัจจัยที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด การ ใช้โปรแกรม Minitab ในการออกแบบการทดลอง ใช้ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือกเมนู File > New > MINITAB Project คลิก OK หรือเรียกโปรแกรม MINITAB ขึ้นมาใหม่ เลือกเมนู Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design แสดงใน รูปที่ 4.6



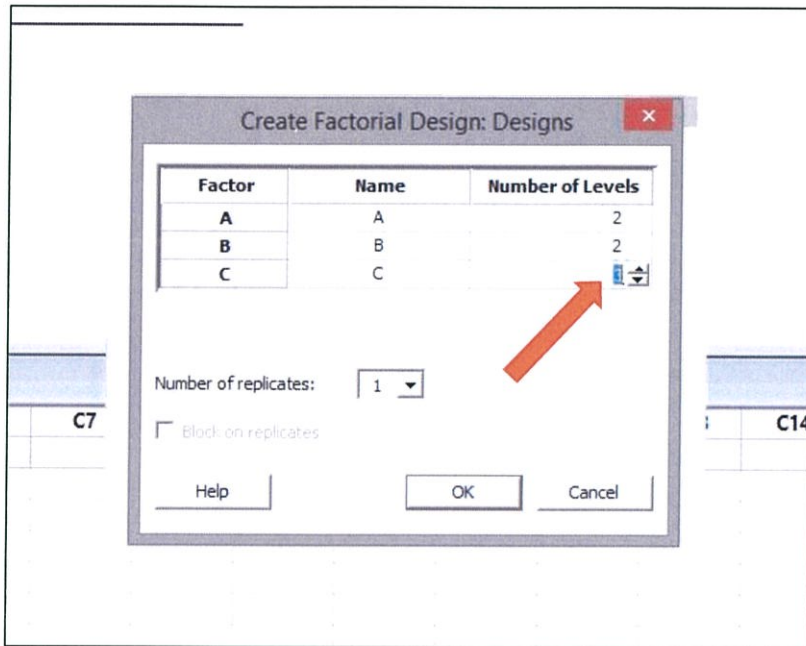
รูปที่ 4.6 การเข้าใช้ DOE ในโปรแกรม Minitab ขั้นตอนที่ 1

2. เลือกจำนวนตัวแปร 3 ตัวแปร แสดงใน รูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การเข้าใช้ DOE ในโปรแกรม Minitab ขั้นตอนที่ 2

3. เลือก Designs > Number of Levels ใส่ระดับตัวแปรแล้วกด OK แสดงใน รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การเข้าใช้ DOE ในโปรแกรม Minitab ขั้นตอนที่ 3

4. เลือก Factors แล้วเปลี่ยนชื่อตัวแปรแล้วกด OK แสดงใน รูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเข้าใช้ DOE ในโปรแกรม Minitab ขั้นตอนที่ 4

2. จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของระบบทำความเย็นด้วยเสียง
2. เพื่อหาแนวทางที่เป็นไปได้สำหรับออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบระบบทำความเย็นด้วยเสียง

3. อุปกรณ์

1. เครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง
2. แหล่งกำเนิดสัญญาณ (โปรแกรม Function Generator)
3. เครื่องขยายเสียง
4. Scope (โปรแกรม Scope)
5. Sound Level Meter (โปรแกรม Sound Level)
6. Electronic Metering Pump

4. วิธีการทดลอง

1. ควบคุมอุณหภูมิห้องให้คงที่ อุณหภูมิเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส (กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเสียบปลั๊กไฟฟ้าเพื่อให้ปั๊มทำงาน)
2. เริ่มบันทึกข้อมูลที่เครื่อง Data Logger
3. หลังจากกดปุ่มเริ่มบันทึกข้อมูลที่เครื่อง Data Logger เป็นเวลา 15 นาที ปล่อย สัญญาณความถี่ตามลำดับการทดลองในตาราง DOE
4. หลังจากเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง ปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณแล้วรอการบันทึกอีก 15 นาที
5. หยุดการบันทึกข้อมูลที่ Data Logger เก็บข้อมูลแล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์

บทที่ 5

ผลการดำเนินงาน

หลังจากที่ได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ หาแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง จากบทที่ 4 การทดลองแบ่งเป็น การทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง และการทดลองการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก โดยผลของการทดลอง มีดังต่อไปนี้

5.1 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง

5.1.1 ลำโพง

เครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียงต้องการติดตั้งอุปกรณ์ลำโพงไว้ที่ปลายของท่อกำหนด ใน การศึกษานี้ ใช้ลำโพงกำลังสูงสุด 120 วัตต์ ความต้านทานต่อไฟฟ้าสลับ 8 โอห์ม ที่ความถี่ปฏิบัติการ 138.88, 188.88 และ 238.88 เฮิรตซ์ ลำโพงขับเคลื่อนได้โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณ และเครื่องขยายเสียง เสียงเพื่อต้องการให้เกิดพลังงานไปกระตุ้นของสารทำงานในท่อกำหนด

5.1.2 ท่อกำหนด

ท่อกำหนดทำมาจากวัสดุพีวีซีชนิดท่อแบบกลม ความยาว 12.79 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร ความหนา 0.6 เซนติเมตร ปลายท่อกำหนดด้านหนึ่งติดตั้งลำโพงไว้โดยให้ขอบลำโพงชิดกับท่อกำหนด ที่ปลายท่อกำหนดอีกด้านหนึ่งติดตั้งท่อกำหนดอีกอัน ความยาว 18.60 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ความหนา 0.6 เซนติเมตร และปลายท่อกำหนดส่วนที่สองนี้ติดตั้ง Buffer ความยาว 33.72 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 เซนติเมตร ความหนา 0.6 เซนติเมตร การติดตั้งข้างต้นนั้นใช้กาวเป็นวัสดุประสาน

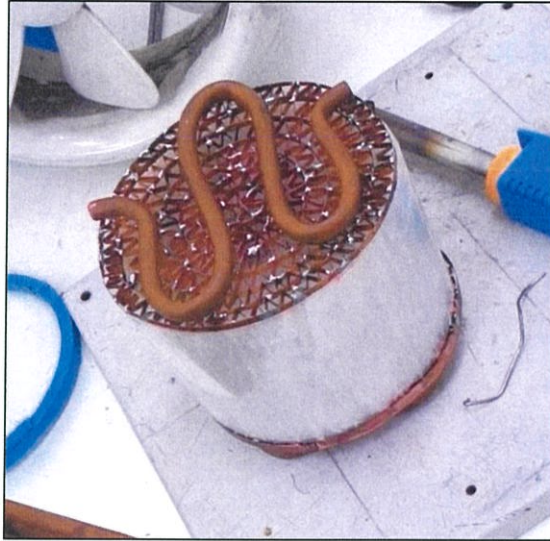
5.1.3 สแต็ก

สแต็กทำจากแผ่นไมลาร์ ม้วนเป็นรูปก้นหอย โดยใช้แผ่นไมลาร์ ความหนา 0.13 มิลลิเมตร ตัดแผ่นไมลาร์เป็นชิ้น กว้าง 6.4 เซนติเมตร ใช้เอ็นตอกปลา เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 มิลลิเมตร คั่นระหว่างแผ่นไมลาร์ และใช้กาวเป็นวัสดุประสาน ม้วนเป็นสแต็กรูปก้นหอย ทำให้ช่องว่างระหว่างแผ่นไมลาร์ กว้าง 0.70 มิลลิเมตร เป็นระยะมากกว่าการไหลผ่านของความร้อนทั้งแนวขนานการเคลื่อนที่ของอนุภาค และแนวตั้งฉากการเคลื่อนที่ของอนุภาค

5.1.4 ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งไว้ที่ปลายสแต็กทั้งสองด้าน ด้านละหนึ่งตัว ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสองตัวนั้นทำมาจากแผ่นทองแดงตัดเป็นแผ่น กว้าง 0.5 เซนติเมตร และ 0.25 เซนติเมตร จากนั้นพับให้เป็นหยักแล้วบัดกรีด้วยตะกั่วให้เป็นตาข่าย นำท่อทองแดง เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ไปตัดขึ้น

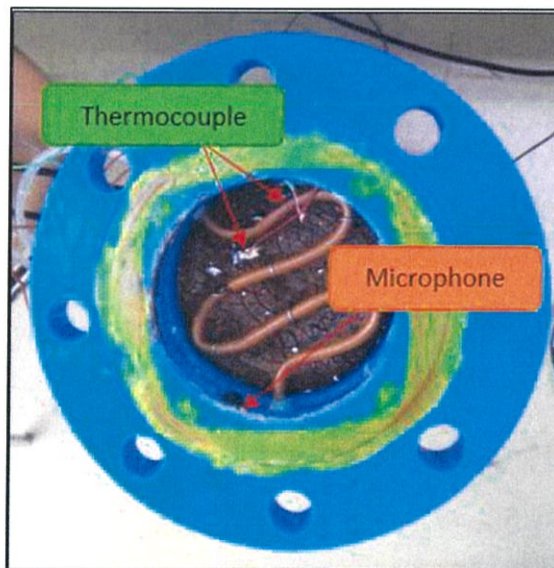
รูปเป็นรูปตัวเอ็ม (M) จากนั้นนำท่อทองแดงที่ตัดขึ้นรูปแล้วเชื่อมติดกับตาข่ายทองแดงด้วยตะกั่ว แสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การติดตั้งตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายสแต็ก

5.1.5 ไมโครโฟน

ไมโครโฟน ที่ใช้ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร สามารถใช้กับช่วงความถี่ 50 เฮิรตซ์ ถึง 16,000 เฮิรตซ์ ความไวในการได้ยินเสียง -60 เดซิเบล ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 เดซิเบล ติดตั้งไมโครโฟนไว้ระหว่างตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.2 การติดตั้งไมโครโฟนและเทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 5.2 แสดงการติดตั้งไมโครโฟน และเทอร์โมคัปเปิล ติดตั้งไมโครโฟนไว้ระหว่างตัวแลกเปลี่ยน ความร้อนกับลำโพง ระยะจากลำโพง 3.5 เซนติเมตร การติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิล ติดตั้งทั้งหมด 8 เส้น โดย เส้นที่ 1 ติดตั้งที่สแตกด้านร้อนเชื่อมด้วยตะกั่ว เส้นที่ 2 ติดตั้งที่สแตกด้านเย็นเชื่อมด้วยตะกั่ว เส้นที่ 3 ติดตั้งที่ห้องทดลอง เพื่อวัดอุณหภูมิห้อง เส้นที่ 4 ติดตั้งที่ด้านหน้าลำโพง เพื่อวัดอุณหภูมิลำโพง เส้นที่ 5 ติดตั้งที่ห้องทดลอง เพื่อวัดอุณหภูมิห้อง เส้นที่ 6 ติดตั้งที่ถังน้ำขาเข้า เส้นที่ 7 ติดตั้งที่สายน้ำร้อนขาออก เส้นที่ 8 ติดตั้งที่สายน้ำเย็นขาออก

5.1.6 เทอร์โมคัปเปิล

ในการศึกษานี้ใช้เทอร์โมคัปเปิล ประเภท T ในการตรวจวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลถูกนำมาใช้วัด อุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในท่อกำทอน และวัดอุณหภูมิที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเทอร์โมคัปเปิล สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -200 องศาเซลเซียส ถึง 350 องศาเซลเซียส ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1.0 เปอร์เซ็นต์ การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล แสดงใน รูปที่ 5.2

5.1.7 เครื่องขยายเสียง

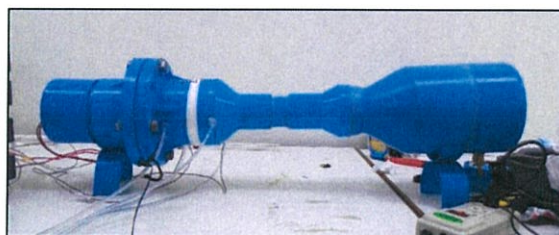
โปรแกรม Function generator สร้างคลื่นตามความถี่ที่ต้องการทดสอบ โปรแกรม Function generator นี้สามารถสร้างความถี่ในช่วง 1 มิลลิเฮิร์ตซ์ ถึง 22,000 เฮิร์ตซ์ โดยเชื่อมต่อสายไปยังเครื่อง ขยายเสียง หัวแจ็คของสายเชื่อมนั้น เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร เครื่องขยายเสียงที่ใช้กำลังขยาย 900 วัตต์ โดยเครื่องขยายเสียงจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณแล้วส่งสัญญาณนั้นให้ลำโพงซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่อง ขยายเสียง

5.1.8 Electronic Metering Pump

Electronic Metering Pump ใช้ปั๊มน้ำเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่สแตกโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำ ไฟฟ้าผ่านขดลวดเป็นแรงขับเคลื่อน สามารถปั๊มน้ำด้วยความดันสูงสุด 1 เมกกะปาสคาลใช้ปั๊ม 2 ตัวติดตั้ง ที่กั้นถึงน้ำขาเข้า

5.1.9 เครื่องมือเก็บข้อมูล

การศึกษานี้ ต่อสายเทอร์โมคัปเปิล จำนวน 8 สายกับ Data Logger ตั้งค่าการเก็บข้อมูล ตั้งเป็น เก็บข้อมูล ครั้งละ 2 ชั่วโมง และบันทึกทุกๆ 5 วินาที เมื่อทำการเก็บข้อมูลเสร็จสิ้นใช้ ยูเอสบีแฟลชไดร์ฟ คัดลอกข้อมูลเพื่อนำไปเปิดข้อมูลใน คอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม DAQ Manager เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์



รูปที่ 5.3 ชุดทดลองการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก

5.2 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องทำความเย็นจากพลังงานเสียง

5.2.1 ผลการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง

ผลการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียงแสดงใน ตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 เป็นผลผลการทดลองที่บันทึกระยะจากปากลำโพงถึงจุด ปฏิบัติ (L1, L2, L3) และระยะจากปากลำโพงถึงจุด บัพ (R1, R2, R3) เมื่อปล่อยสัญญาณความถี่ให้ลำโพง และปล่อยน้ำออกจากท่อกำหนด ระยะดังกล่าวจะใช้คำนวณหาความยาวของคลื่นเสียงในลำดับต่อไป

ตารางที่ 5.1 ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 1

ความถี่ (Hz)	L1 (cm)	R1 (cm)	L2 (cm)	R2 (cm)	L3 (cm)
350	25.0	50.0			
400	22.3	44.0			
450	20.7	39.5			
500	17.9	35.4			
550	16.1	32.0	50.0		
600	15.8	30.1	46.7		
650	13.4	27.0	41.2		
700	12.5	25.0	39.0	50.0	
750	11.3	23.0	34.8	46.5	
800	10.5	21.5	32.0	42.5	
850	10.0	20.3	31.5	40.8	
900	9.8	19.5	29.5	39.0	48.0

ตารางที่ 5.2 ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 2

ความถี่ (Hz)	L1 (cm)	R1 (cm)	L2 (cm)	R2 (cm)	L3 (cm)
350	25.0	50.0			
400	22.0	44.0			
450	20.4	39.5			
500	17.9	35.4			
550	16.0	32.0	50.0		
600	15.5	30.1	46.5		
650	13.6	27.0	41.2		
700	12.5	25.0	39.0	50.0	
750	11.5	23.0	34.8	46.5	
800	10.5	21.5	32.0	42.5	
850	10.0	20.3	31.5	40.9	
900	10.0	19.5	29.5	39.0	48.0

ตารางที่ 5.3 ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 3

ความถี่ (Hz)	L1 (cm)	R1 (cm)	L2 (cm)	R2 (cm)	L3 (cm)
350	25.0	50.0			
400	22.0	44.0			
450	20.3	39.5			
500	17.9	35.4			
550	16.2	32.0	50.0		
600	15.2	30.1	46.3		
650	13.5	27.0	41.2		
700	12.5	25.0	39.0	50.0	
750	11.1	23.0	34.8	46.5	
800	10.5	21.5	32.0	42.5	
850	10.0	20.3	31.5	40.7	
900	9.6	19.5	29.5	39.0	48.0

ตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ย

ความถี่ (Hz)	L1 (cm)	R1 (cm)	L2 (cm)	R2 (cm)	L3 (cm)	λ (cm)
350	25.0	50.0				100.0
400	22.1	44.0				87.5
450	20.5	39.5				76.0
500	17.9	35.4				70.0
550	16.1	32.0	50.0			63.6
600	15.5	30.1	46.5			58.4
650	13.5	27.0	41.2			54.0
700	12.5	25.0	39.0	50.0		50.0
750	11.3	23.0	34.8	46.5		46.8
800	10.5	21.5	32.0	42.5		44.0
850	10.0	20.3	31.5	40.8		41.2
900	9.8	19.5	29.5	39.0	48.0	38.8

ตารางที่ 5.4 แสดงตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ย ได้จากตารางบันทึกผลการทดลอง ตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 นำค่า L1, L2, L3, R1, R2 และ R3 มาเฉลี่ย และคำนวณหาความยาวคลื่นโดยระยะจาก ปฏิบัพถึงบัพ เท่ากับ $1/4$ ของความยาวคลื่น และระยะจาก บัพถึงบัพ หรือระยะจากปฏิบัพถึงปฏิบัพ เท่ากับ $1/2$ ของความยาวคลื่น และยังสามารถจำลองลักษณะของคลื่นเสียงโดยวาดกราฟการกระจัดและกราฟของความดันต่อความสูงที่สุดได้โดยใช้สมการคลื่นดังนี้

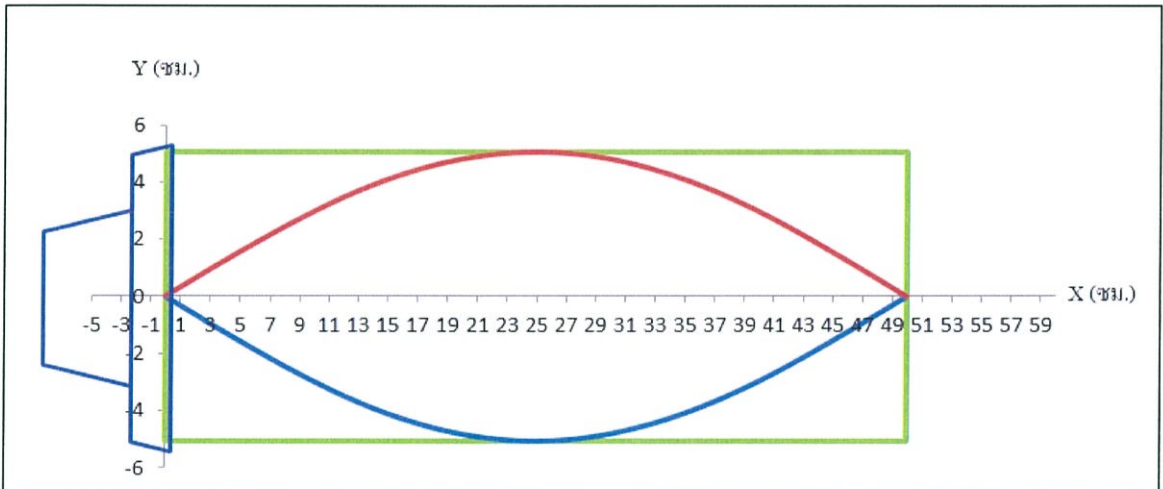
$$y = A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} x\right] \text{ (สมการการกระจัด)}$$

และ

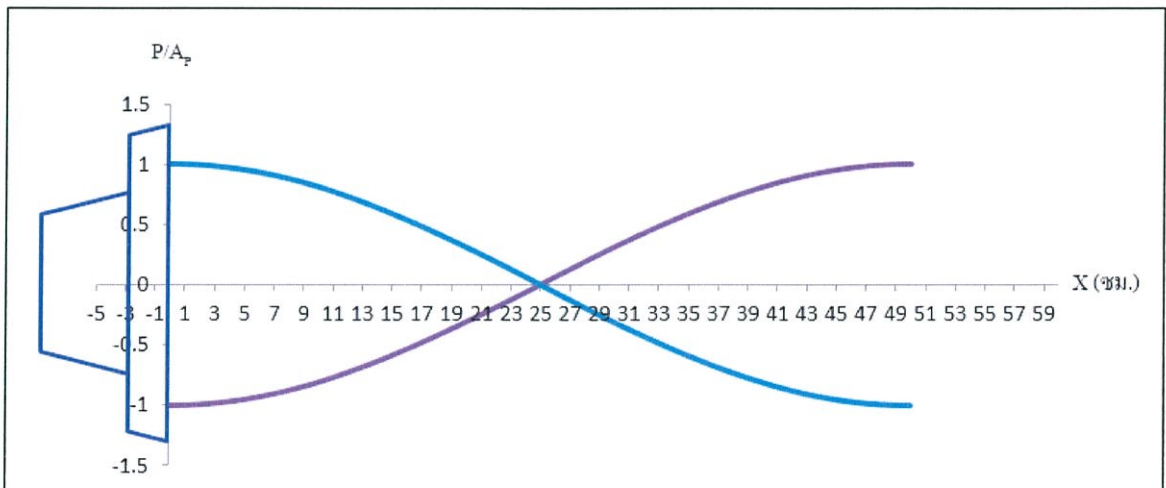
$$\frac{P}{A_p} = \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} x\right] \text{ (สมการความดัน)}$$

- เมื่อ y คือ การกระจัด
 A คือ แอมพลิจูด
 A คือ แอมพลิจูดสูงสุด
 x คือ ระยะจากปากท่อกำทอน
 λ คือ ความยาวคลื่น
 P คือ ความดัน

เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการคลื่น (ใช้โปรแกรม Excel คำนวณและวาดกราฟ) ได้กราฟดังนี้

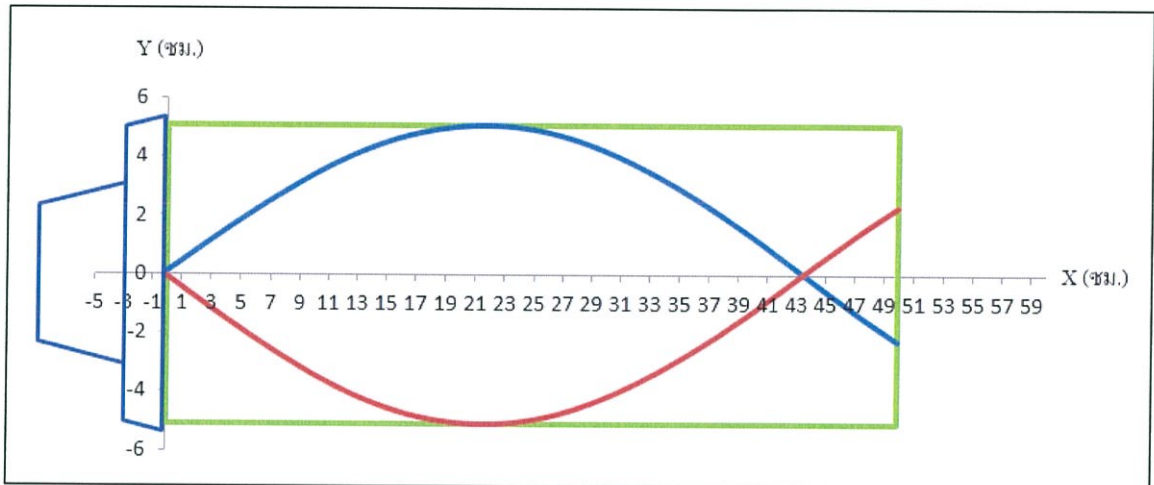


รูปที่ 5.4 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 350 เฮิร์ตซ์

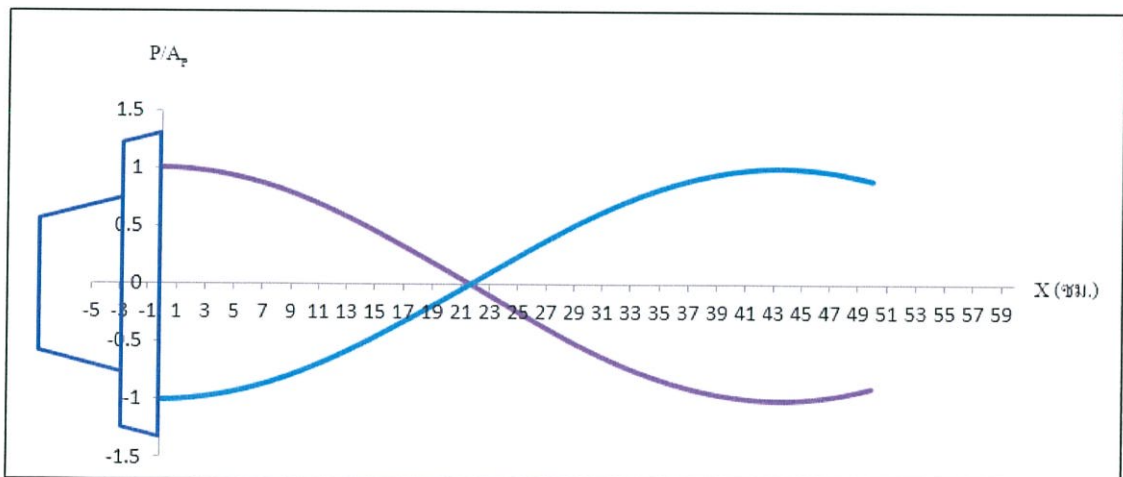


รูปที่ 5.5 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 350 เฮิร์ตซ์
 อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้ 31.67°C

รูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 350 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 350 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนดแทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครึ่งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 50$ และ $L1 = 25$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 100.0$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 350$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 100.0$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

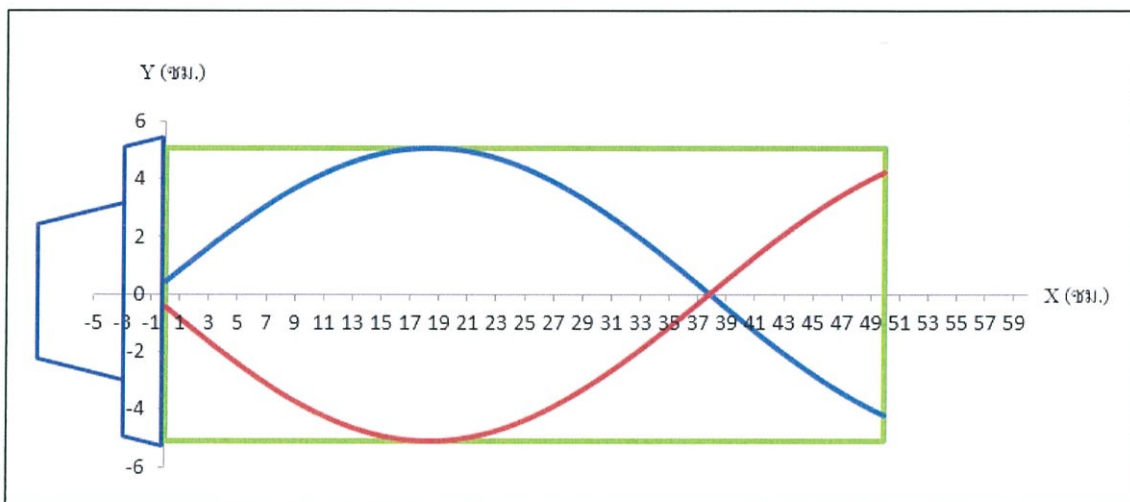


รูปที่ 5.6 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 400 เฮิรตซ์

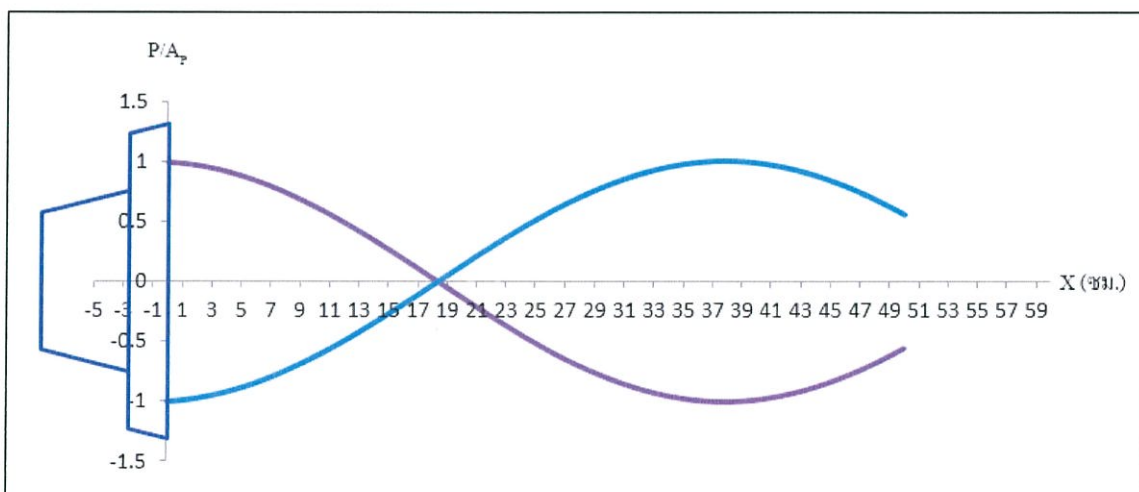


รูปที่ 5.7 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 400 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67°C

รูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 400 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 400 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนดแทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 44$ และ $L1 = 22.1$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 87.6$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 400$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 87.6$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

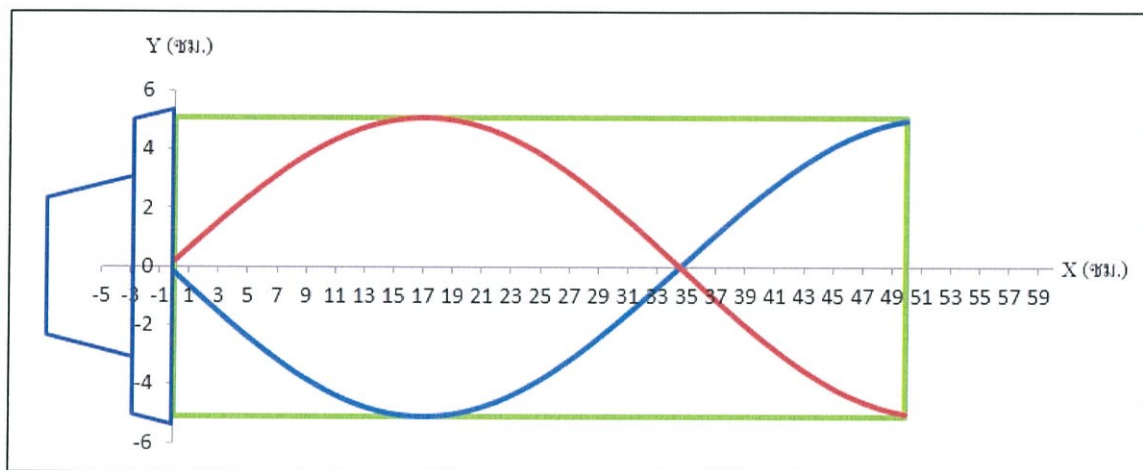


รูปที่ 5.8 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 450 เฮิรตซ์

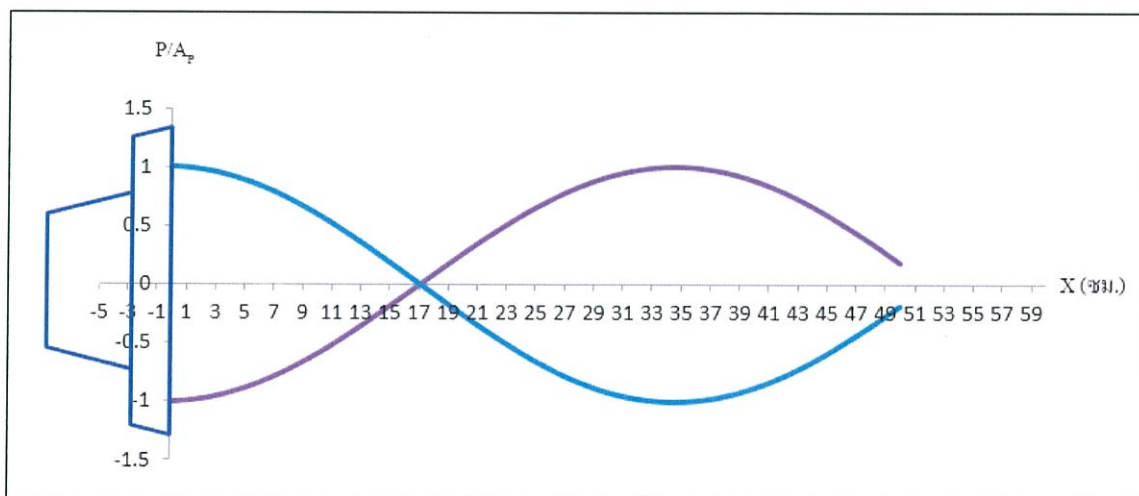


รูปที่ 5.9 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 450 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 31.83°C

รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 450 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 450 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 31.83 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนดแทน $X = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 39.5$ และ $L1 = 20.5$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 76.0$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 450$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 76.0$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

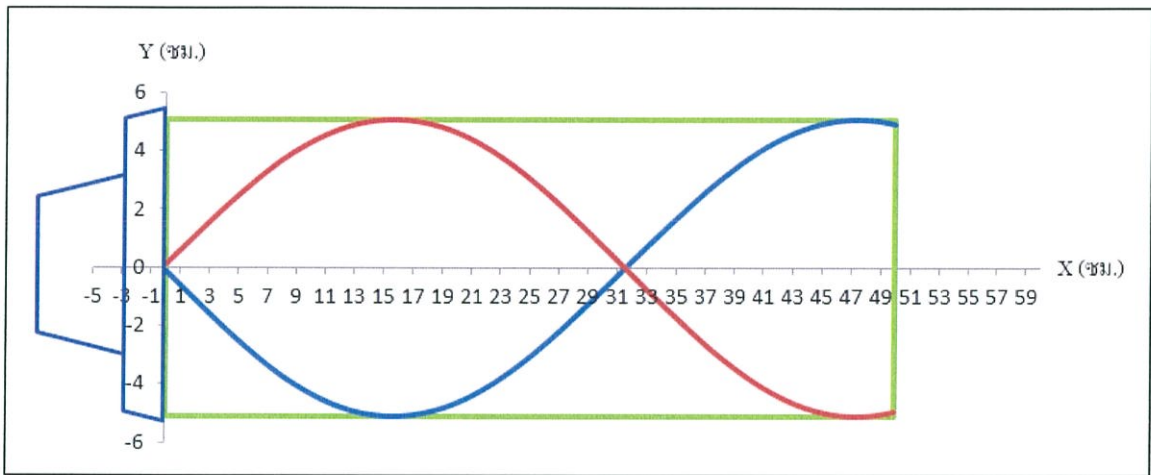


รูปที่ 5.10 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์

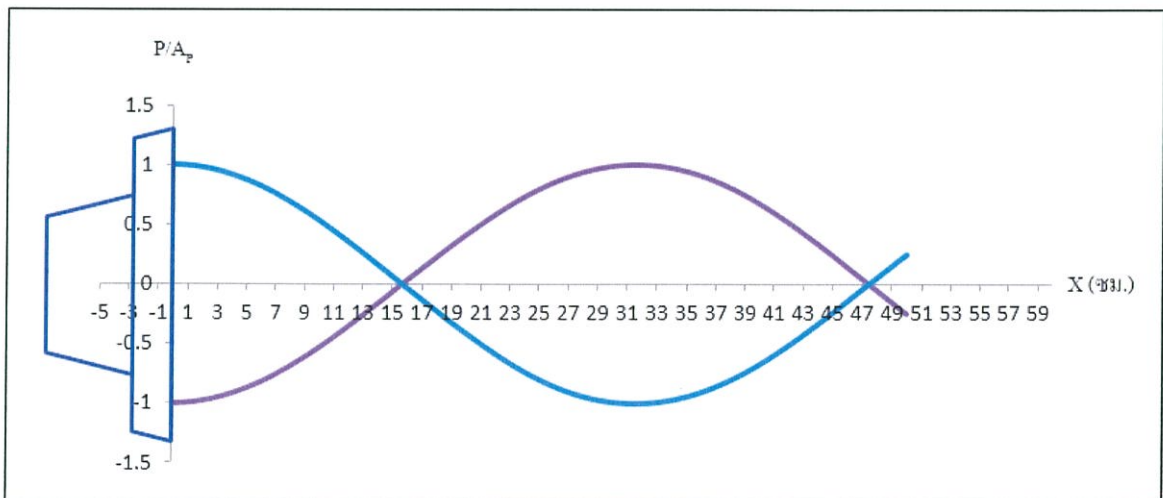


รูปที่ 5.11 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67°C

รูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำทอน แทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 35.4$ และ $L1 = 17.9$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 70.0$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 500$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 70.0$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

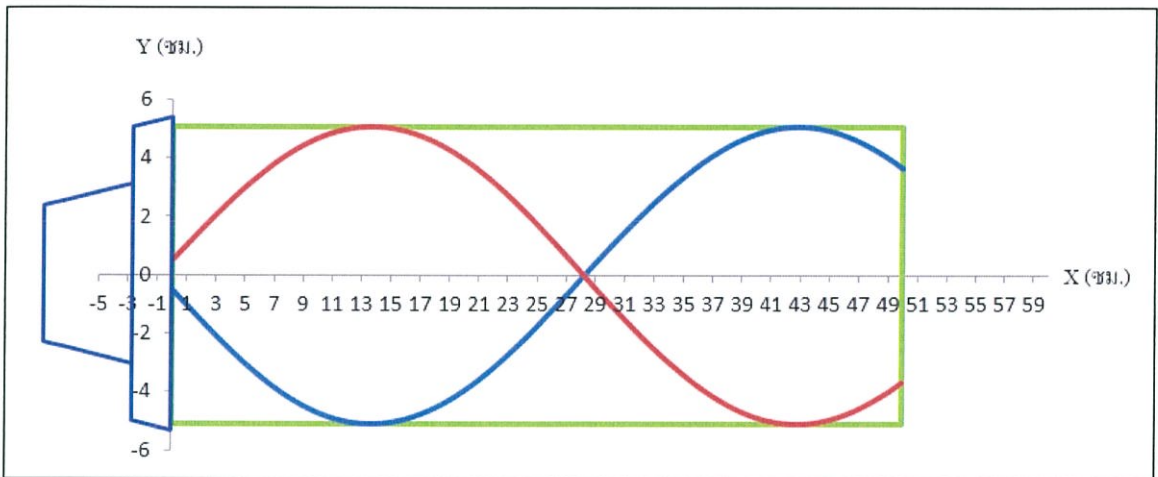


รูปที่ 5.12 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 550 เฮิรตซ์

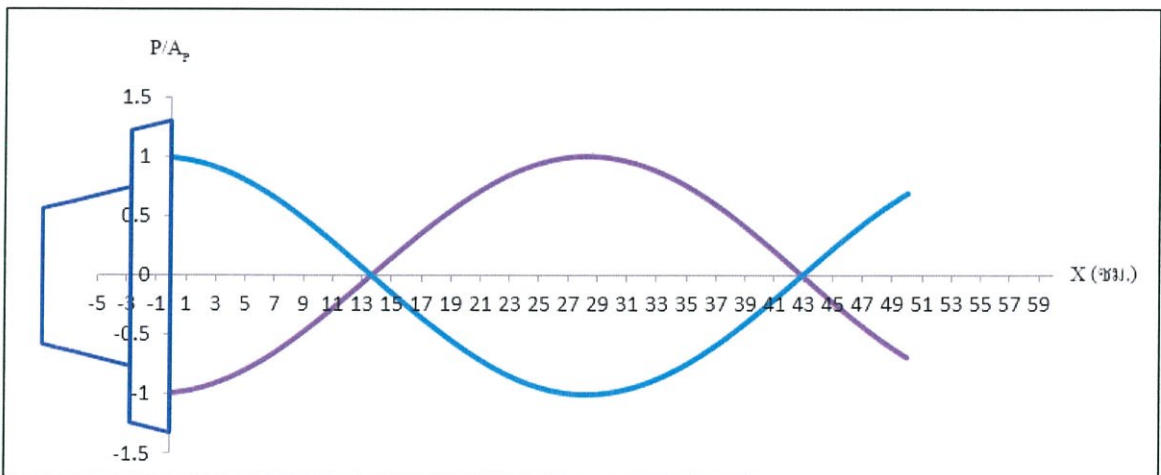


รูปที่ 5.13 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 550 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 31.33°C

รูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 550 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 550 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 31.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนด $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครึ่งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 32.0$ และ $L1 = 16.1$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 63.6$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 550$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 63.6$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

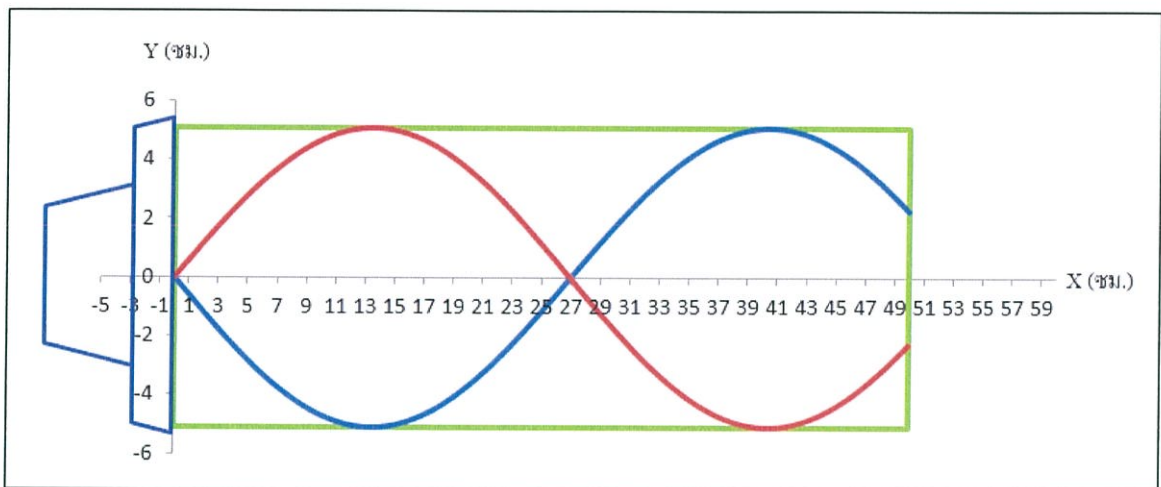


รูปที่ 5.14 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 600 เฮิรตซ์

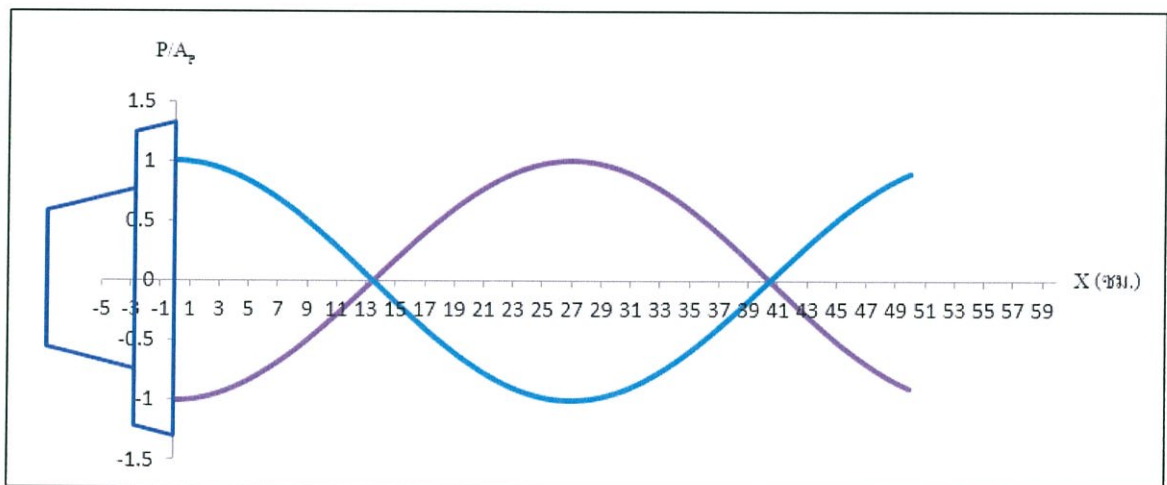


รูปที่ 5.15 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 600 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 32.33°C

รูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 600 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 600 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 32.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนด $X = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 30.1$ และ $L1 = 15.5$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 58.4$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 600$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 58.4$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

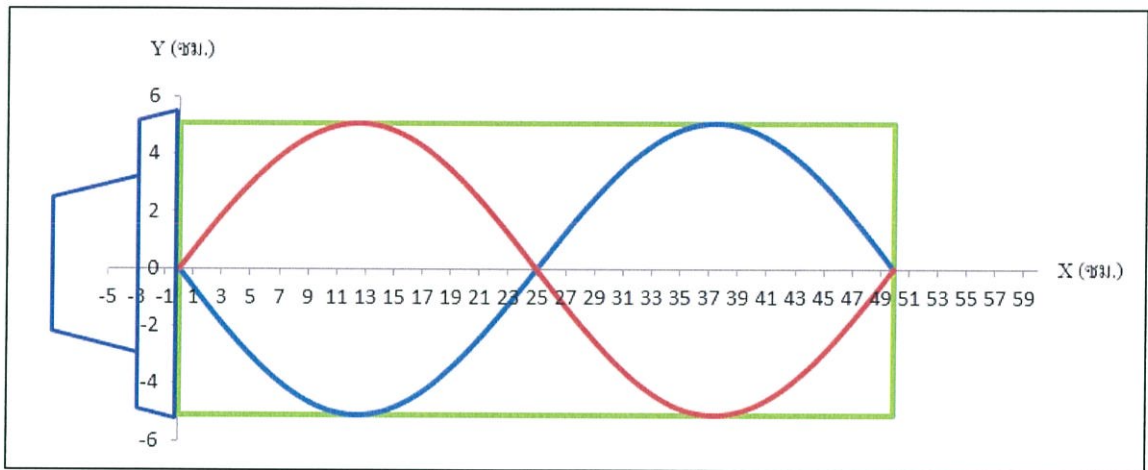


รูปที่ 5.16 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 650 เฮิรตซ์

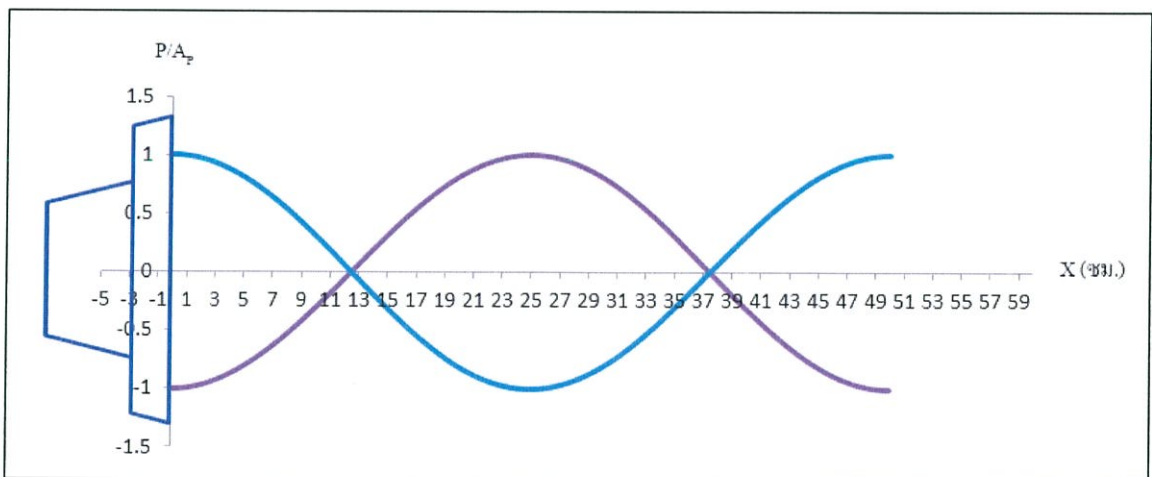


รูปที่ 5.17 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 650 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 33.33°C

รูปที่ 5.16 และรูปที่ 5.17 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 650 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 650 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 33.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำทอน แทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 27.0$ และ $L1 = 13.5$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 54.0$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 650$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 54.0$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_c = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

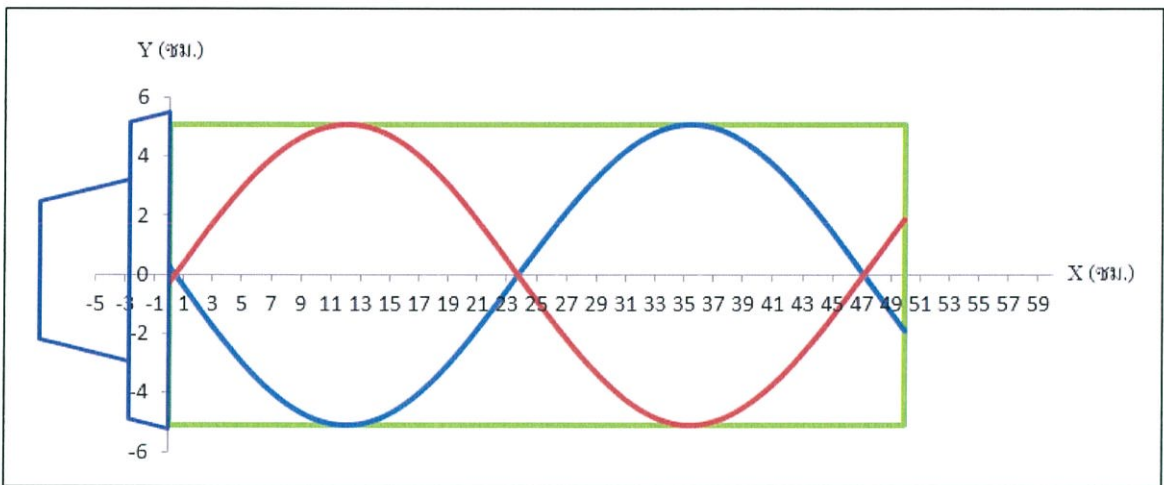


รูปที่ 5.18 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 700 เฮิรตซ์

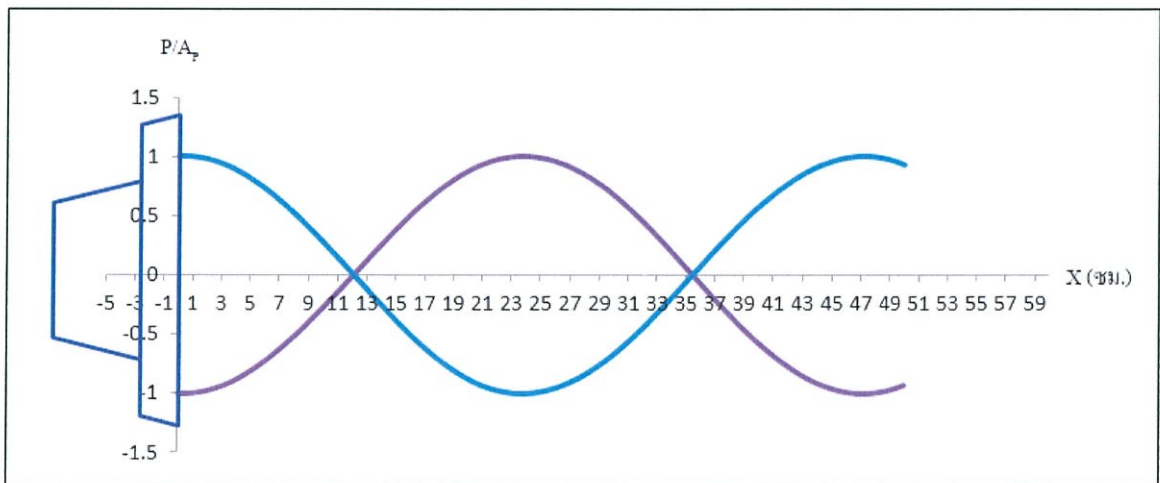


รูปที่ 5.19 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 700 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67°C

รูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 700 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 700 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 31.67 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำทอน แทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 25.0$ และ $L1 = 12.5$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 50.0$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 700$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 50.0$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

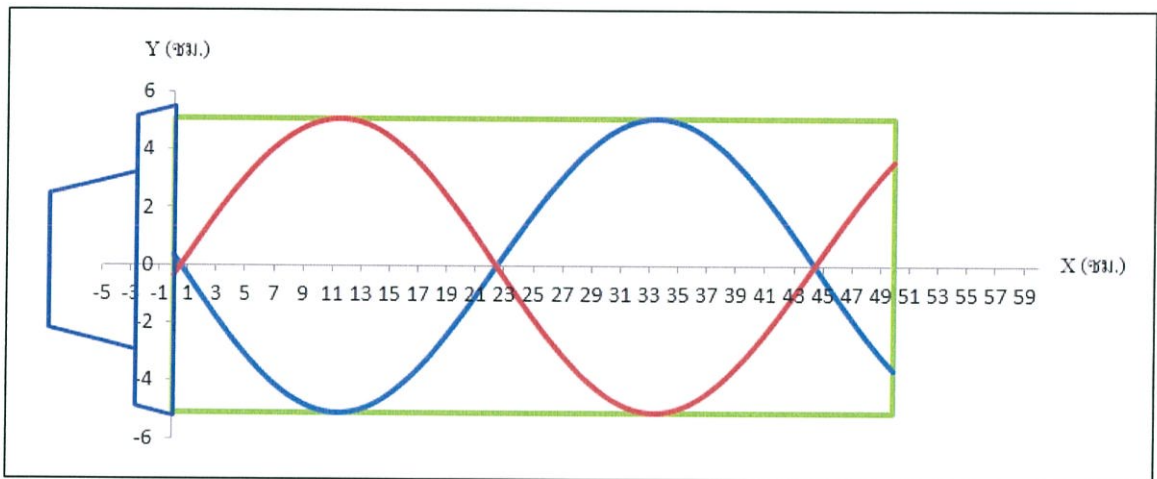


รูปที่ 5.20 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 750 เฮิรตซ์

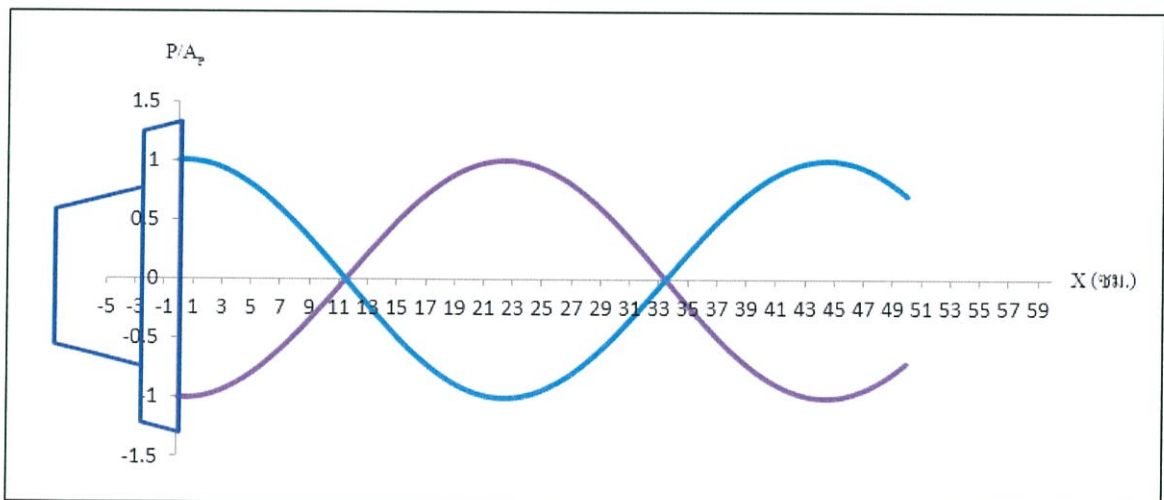


รูปที่ 5.21 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 750 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 33.33°C

รูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 750 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 750 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 33.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนด ท่อน แทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 23.0$ และ $L1 = 11.3$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 46.8$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 750$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 46.8$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_c = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

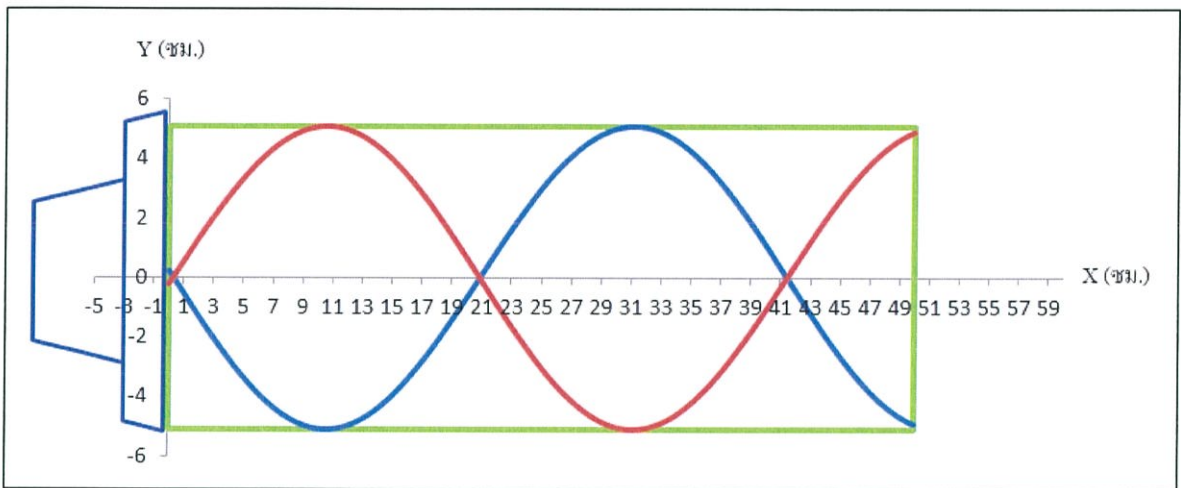


รูปที่ 5.22 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 800 เฮิรตซ์

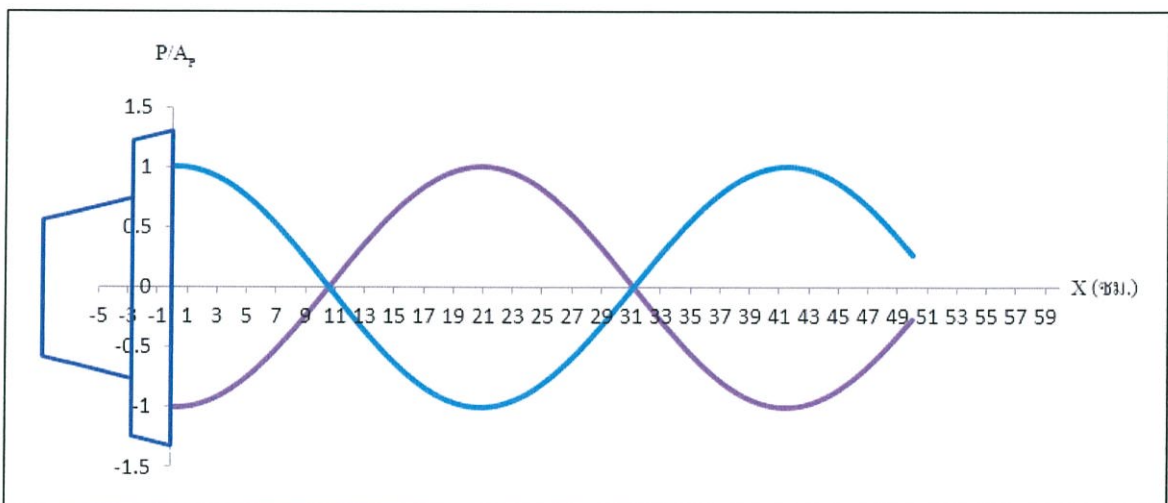


รูปที่ 5.23 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 800 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 35.00°C

รูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 800 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 800 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 35.00 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนด ท่อน แทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 21.5$ และ $L1 = 10.5$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 44.0$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 800$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 44.0$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

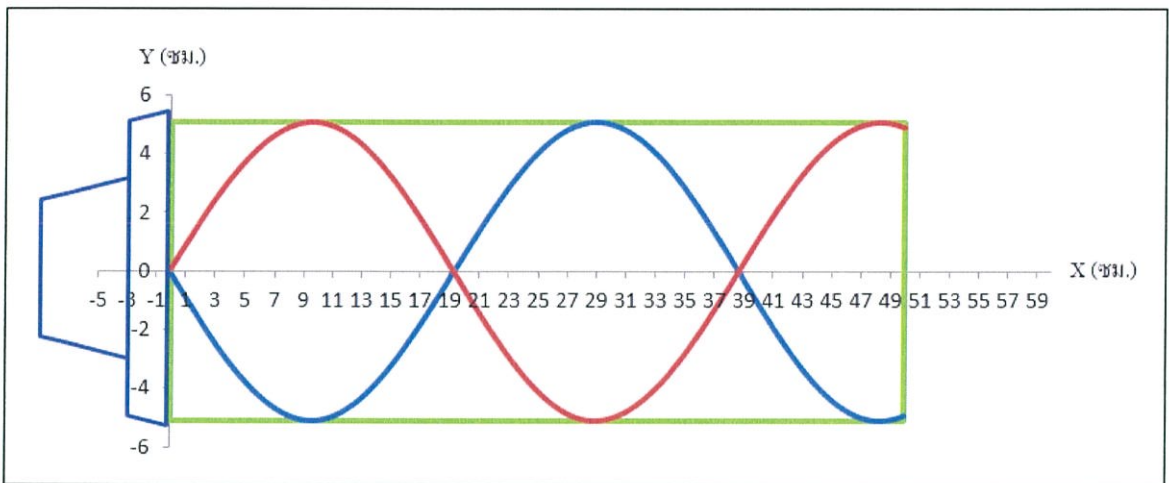


รูปที่ 5.24 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 850 เฮิรตซ์

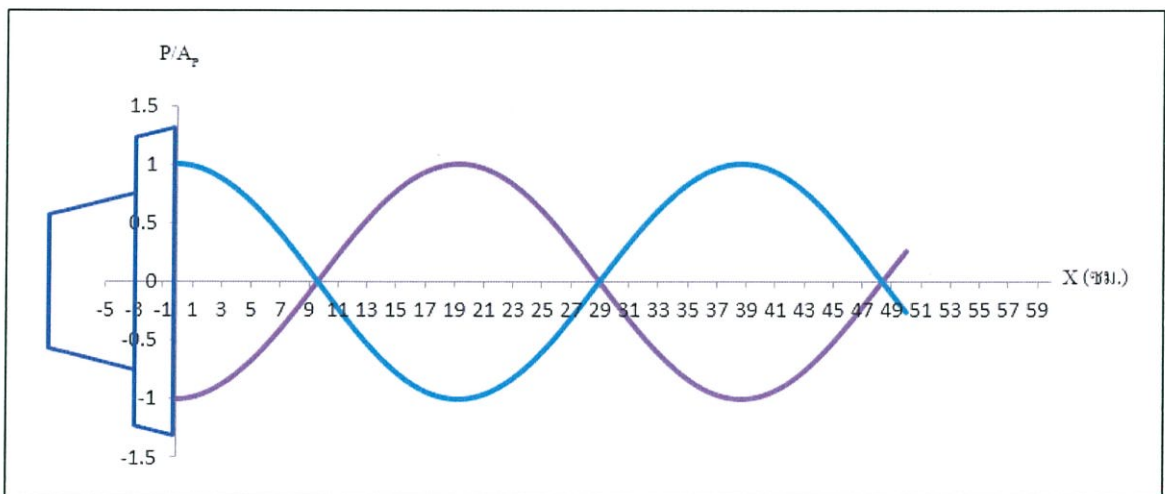


รูปที่ 5.25 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 850 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 32.00°C

รูปที่ 5.24 และรูปที่ 5.25 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 850 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 850 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 32.00 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนด ท่อน แทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 20.3$ และ $L1 = 10.0$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 41.2$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 850$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 41.2$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง



รูปที่ 5.26 กราฟการกระจัดที่ความถี่ 900 เฮิรตซ์

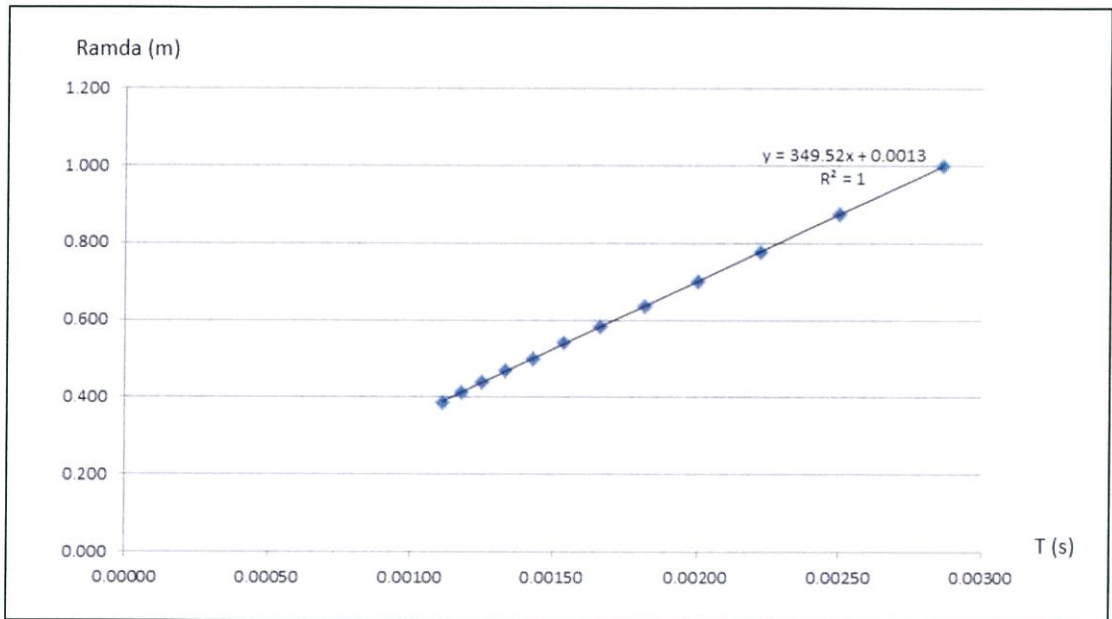


รูปที่ 5.27 กราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 900 เฮิรตซ์
อุณหภูมิคำนวณได้ 30.33°C

รูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27 แสดงกราฟการกระจัดที่ความถี่ 900 เฮิรตซ์ และกราฟของความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดที่ความถี่ 900 เฮิรตซ์ อุณหภูมิคำนวณได้ 30.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยนำค่าจากตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเฉลี่ยแทน $A = 5.08$ เซนติเมตร ซึ่งขนาดเท่ากับรัศมีท่อกำหนด แทน $x = 0$ ถึง 50 เซนติเมตร โดยเพิ่มครั้งละ 0.2 เซนติเมตร λ คือ ความยาวคลื่น คำนวณจาก $R1-L1=(1/4)(\lambda)$ โดยแทน $R1 = 19.5$ และ $L1 = 9.8$ เซนติเมตร เพราะฉะนั้น $\lambda = 38.8$ เซนติเมตร แทนค่าทั้งหมดในสมการคลื่นโดยคำนวณและวาดกราฟด้วยโปรแกรม Excel อุณหภูมิอากาศตัวกลางคำนวณได้โดยหาความเร็วเสียงจากสมการ $v = f\lambda$ แทน $f = 900$ เฮิรตซ์ แทน $\lambda = 38.8$ เซนติเมตร เมื่อได้ความเร็วเสียง แทนค่าใน สมการ $v_t = 331+0.6t$ เพื่อหาอุณหภูมิอากาศตัวกลางขณะทำการทดลอง

ตารางที่ 5.5 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและคาบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	Ramda (m)	T,1/f (s)
350	1.000	0.00286
400	0.875	0.00250
450	0.778	0.00222
500	0.700	0.00200
550	0.636	0.00182
600	0.584	0.00167
650	0.540	0.00154
700	0.500	0.00143
750	0.468	0.00133
800	0.440	0.00125
850	0.412	0.00118
900	0.388	0.00111



รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับคาบ

จากรูปที่ 5.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น กับคาบความชันกราฟคือความเร็วเฉลี่ยของเสียงในอากาศมีค่าเท่ากับ 349.52 เมตรต่อวินาที

ประโยชน์ที่ได้รับจากการทดลองนี้ ใช้การทดลองนี้เพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งสแต็กของเครื่องทำความเย็น จากพลังงานเสียง เมื่อใช้อากาศเป็นของไหล ที่ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ ที่ตำแหน่งห่างจากลำโพง 4.5 เซนติเมตร เป็นตำแหน่งของสแต็กด้านร้อนเกิดความดันของคลื่นเสียงสูง และตำแหน่งห่างจากลำโพง 10.9 เซนติเมตร เป็นตำแหน่งของสแต็กด้านเย็นเกิดความดันของคลื่นเสียงต่ำ

5.2.2 ผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก

การทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกตามหลัก DOE สำหรับการทดลองนี้ ใช้วิธีการทดลองชนิด Full Factorial โดยมีปัจจัยและระดับดังนี้

1. ระดับเสียง (Volume) แบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ระดับ 96 เดซิเบล และ 116 เดซิเบล
2. ความถี่ของเสียง แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ ความถี่ 138.88 188.88 และ 238.88 เฮิรตซ์
3. การถ่ายโอนความร้อนระหว่างสแต็กกับน้ำมี 2 ระดับ คือ ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยน ความร้อน และไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6-T	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	dB	การผ่านน้ำ	f(Hz)	
1	3	1	1	1	96	ไม่ผ่านน้ำ	238.88	
2	9	2	1	1	116	ไม่ผ่านน้ำ	238.88	
3	5	3	1	1	96	ผ่านน้ำ	188.88	
4	6	4	1	1	96	ผ่านน้ำ	238.88	
5	10	5	1	1	116	ผ่านน้ำ	138.88	
6	8	6	1	1	116	ไม่ผ่านน้ำ	188.88	
7	7	7	1	1	116	ไม่ผ่านน้ำ	138.88	
8	1	8	1	1	96	ไม่ผ่านน้ำ	138.88	
9	11	9	1	1	116	ผ่านน้ำ	188.88	
10	2	10	1	1	96	ไม่ผ่านน้ำ	188.88	
11	12	11	1	1	116	ผ่านน้ำ	238.88	
12	4	12	1	1	96	ผ่านน้ำ	138.88	
13								

รูปที่ 5.29 ลำดับการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก

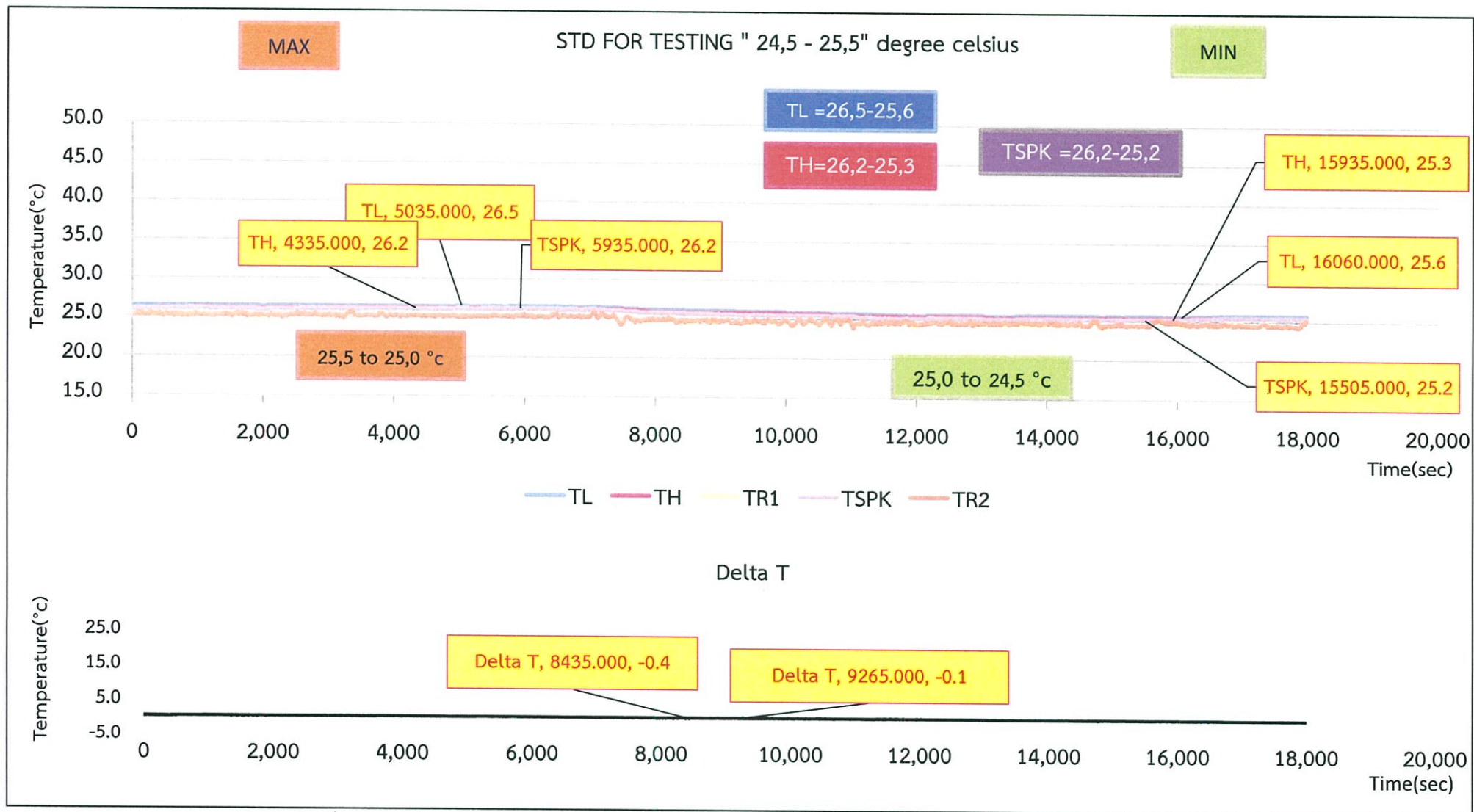
รูปที่ 5.29 แสดงลำดับการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก จากการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) ด้วยโปรแกรม Minitab ผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก โดยไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนที่สองเป็นผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก โดยใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ได้ผลการทดลองดังนี้

1. ผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกกรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

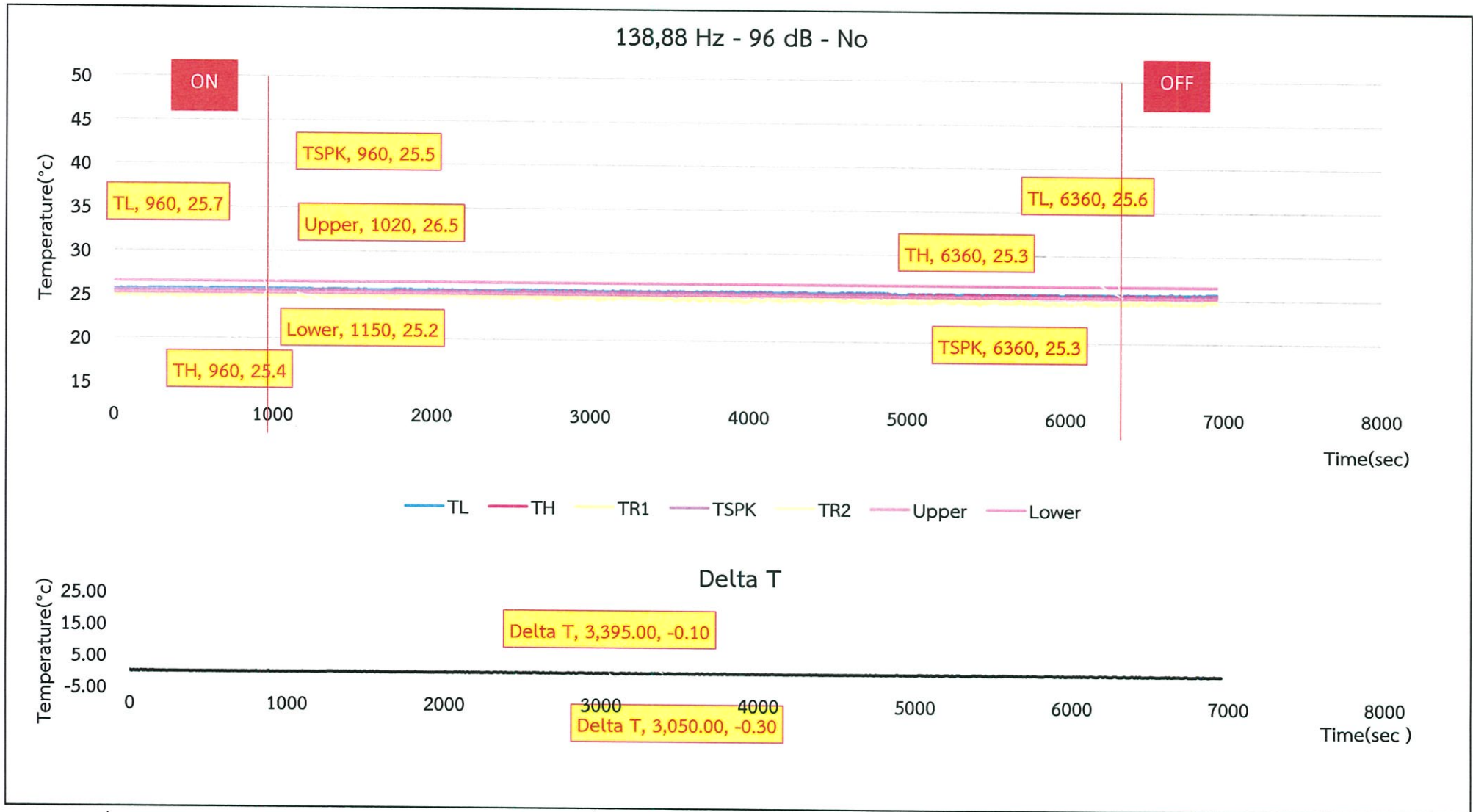
- รูปที่ 5.30 แสดงกราฟอุณหภูมิสองข้างสแต็กมาตรฐาน กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ผลของอุณหภูมิทั้งสองข้างของสแต็กที่ควบคุมไว้ในช่วงอุณหภูมิห้อง 24.5 ถึง 25.5 องศาเซลเซียส โดยบันทึกไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งจะพบว่าในกรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดการเปลี่ยนแปลงของสองข้างสแต็กเนื่องจากอุณหภูมิห้อง อยู่ในช่วง 26.5 ถึง 25.2 องศาเซลเซียส
- รูปที่ 5.31 แสดงกราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 138.88 เฮิร์ตซ์ กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสแต็กด้านเย็น) และเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสแต็กด้านร้อน) ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ เพราะฉะนั้นที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 138.88 เฮิร์ตซ์

- กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติค
3. รูปที่ 5.32 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติค ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 138.88 เฮิรตซ์ กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติคเส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดัดด้านเย็น) อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 25.4 องศาเซลเซียส มีแนวโน้ม ลดลง จนถึงวินาทีที่ 1525 เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดัดด้านเย็น) อุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 22.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้น 2.5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดัดด้านเย็น) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสดัดด้านร้อน TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 25.3 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงวินาทีที่ 1525 เส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) อุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 35.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 10.2 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การที่เส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับสูงนั้น เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิลำโพง สังกัดจากเส้นกราฟ TSPK (อุณหภูมิลำโพง) อยู่ในระดับที่สูงกว่าเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) ซึ่งลำโพงในชุดทดลองอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับสัดัดด้านร้อน
 4. รูปที่ 5.33 แสดงกราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติค ที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดัดด้านเย็น) และ เส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ เพราะฉะนั้นที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติค
 5. รูปที่ 5.34 แสดงกราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติค ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติคเส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดัดด้านเย็น) อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 25.3 องศาเซลเซียส มีแนวโน้ม ลดลง จนถึงวินาทีที่ 960 เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดัดด้านเย็น) อุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 19.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้น 6.0 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดัดด้านเย็น) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสดัดด้านร้อน TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 25.5 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงวินาทีที่ 960 เส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) อุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 36.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 11.3 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดัดด้านร้อน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างสัดัดด้านร้อน และสัดัดด้านเย็น 17.6 องศาเซลเซียส

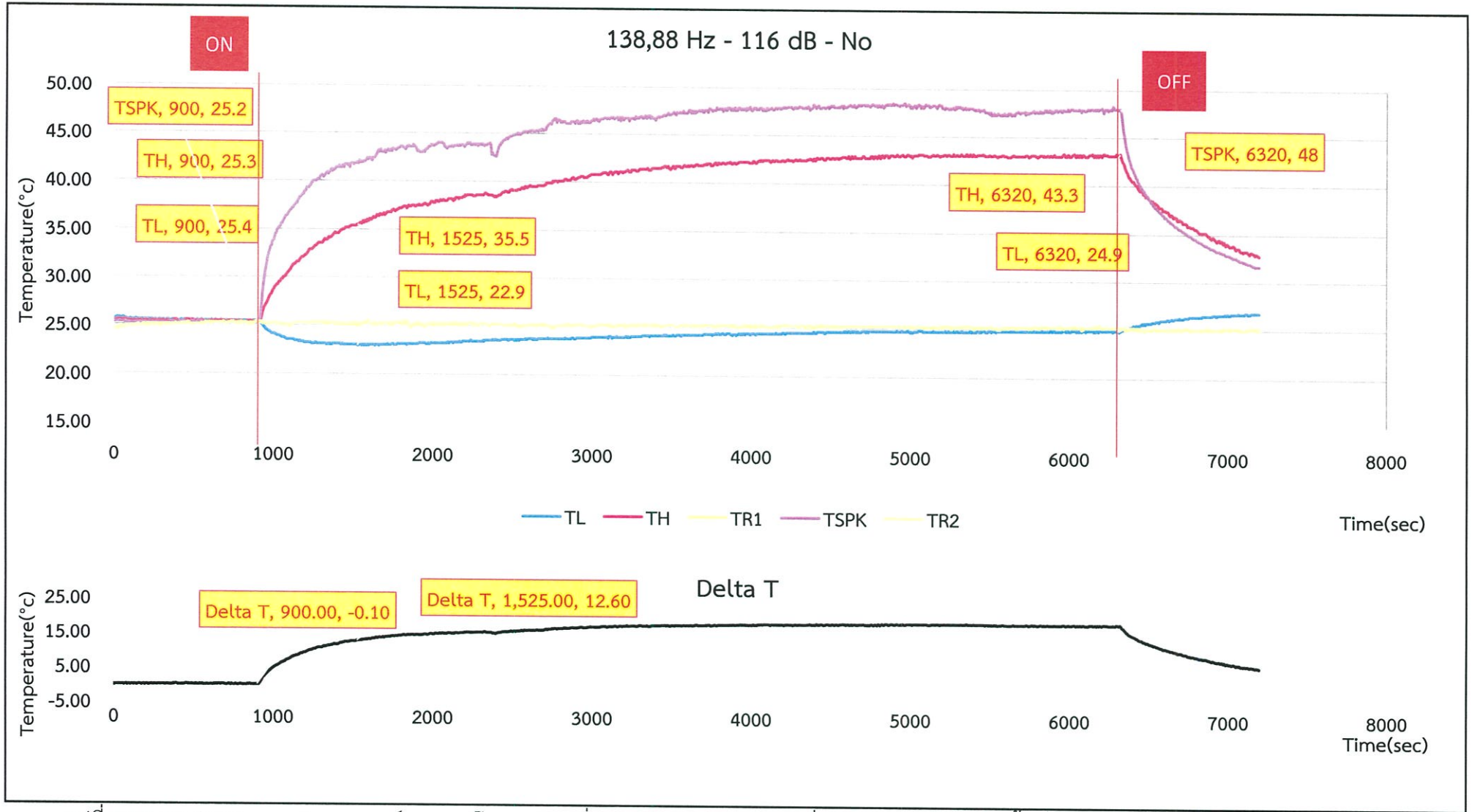
6. รูปที่ 5.35 แสดงกราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดักด้านเย็น) และเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดักด้านร้อน) ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ เพราะฉะนั้นที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก
7. รูปที่ 5.36 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากที่ระดับความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ อยู่ในช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของอนุภาคตัวกลาง จึงไม่เกิด ปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดักด้านเย็น) และเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดักด้านร้อน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิลำโพง



รูปที่ 5.30 กราฟอุณหภูมิสองข้างสแต็คมาตรฐาน กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

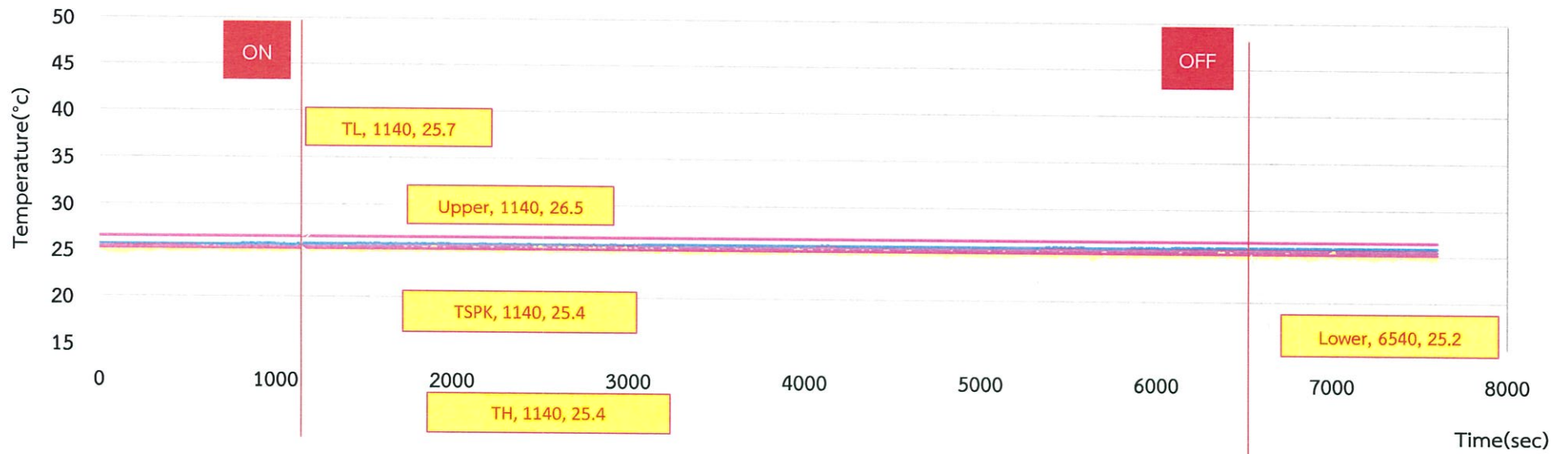


รูปที่ 5.31 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB, ความถี่ 138.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



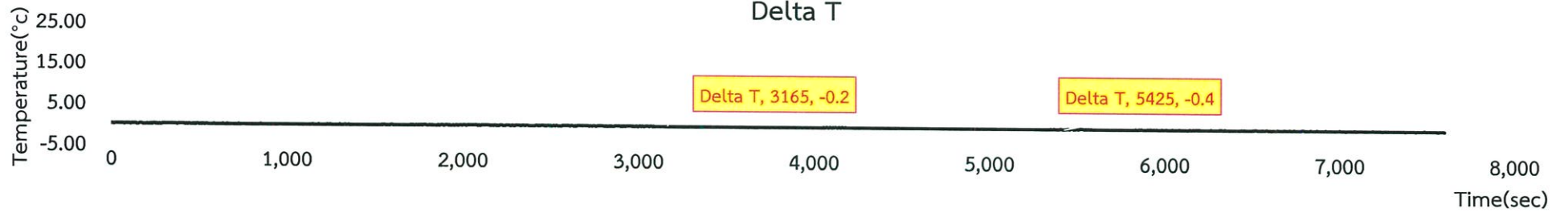
รูปที่ 5.32 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB, ความถี่ 138.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

188,88 HZ - 96 dB - No

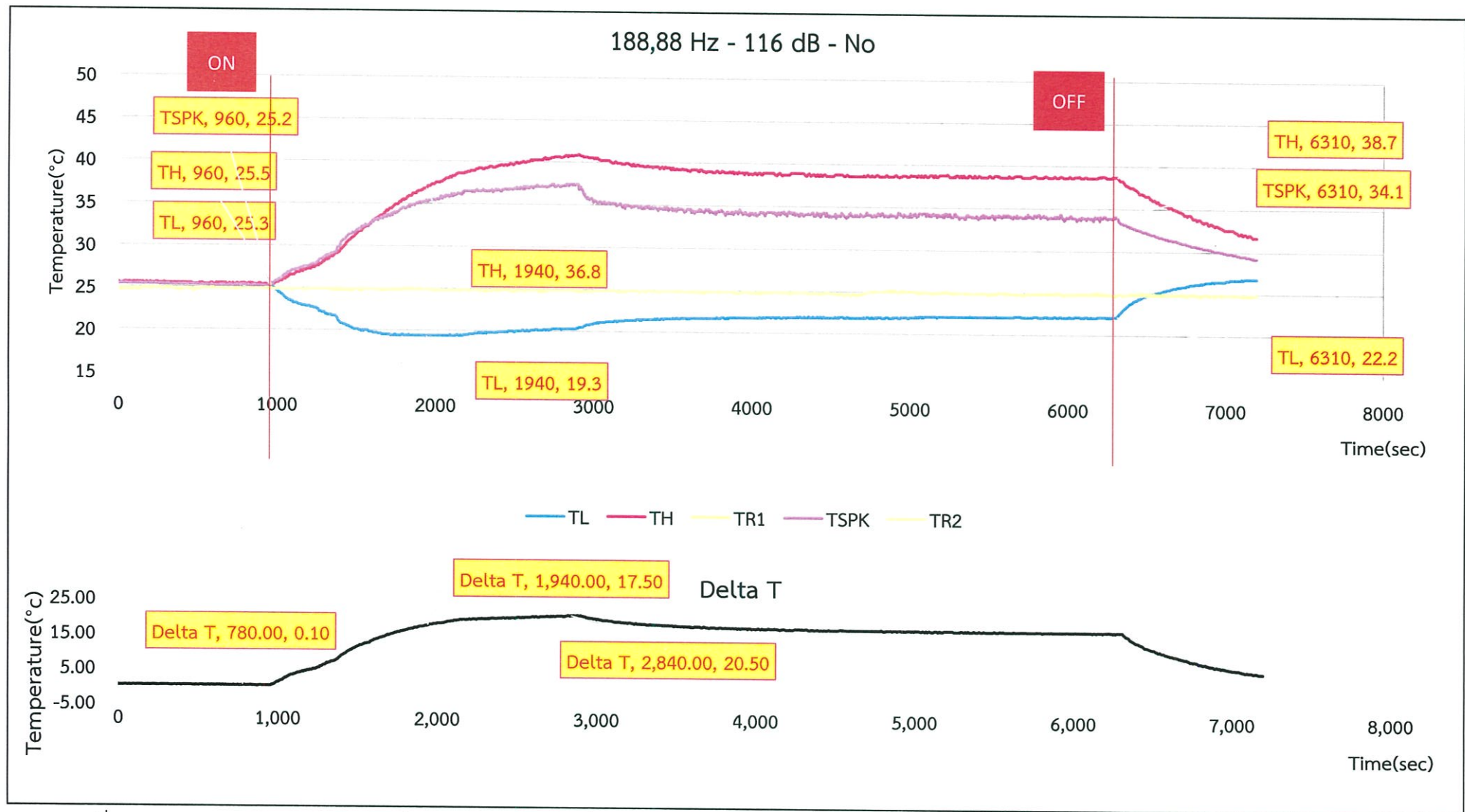


TL TH TR1 TSPK TR2 Upper Lower

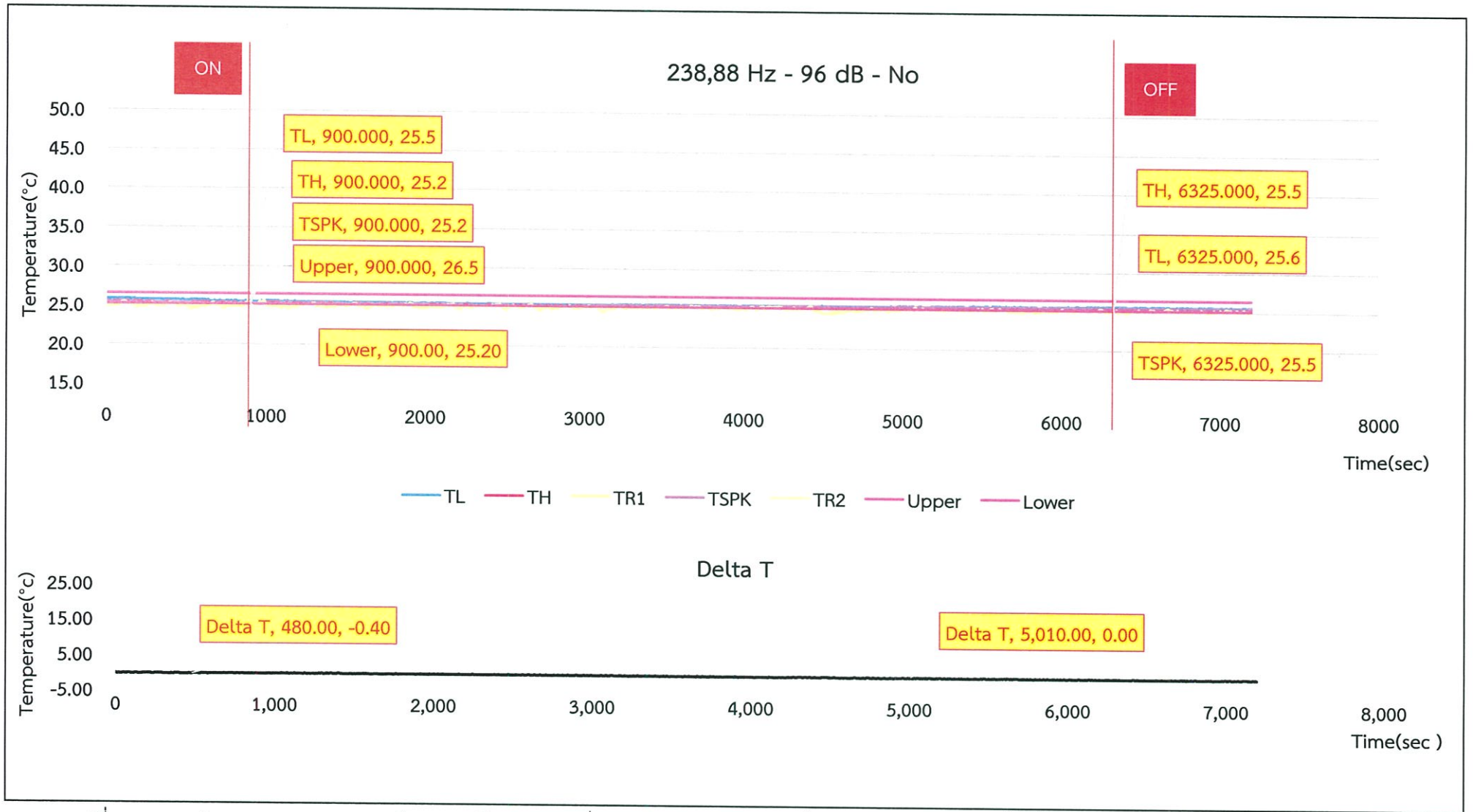
Delta T



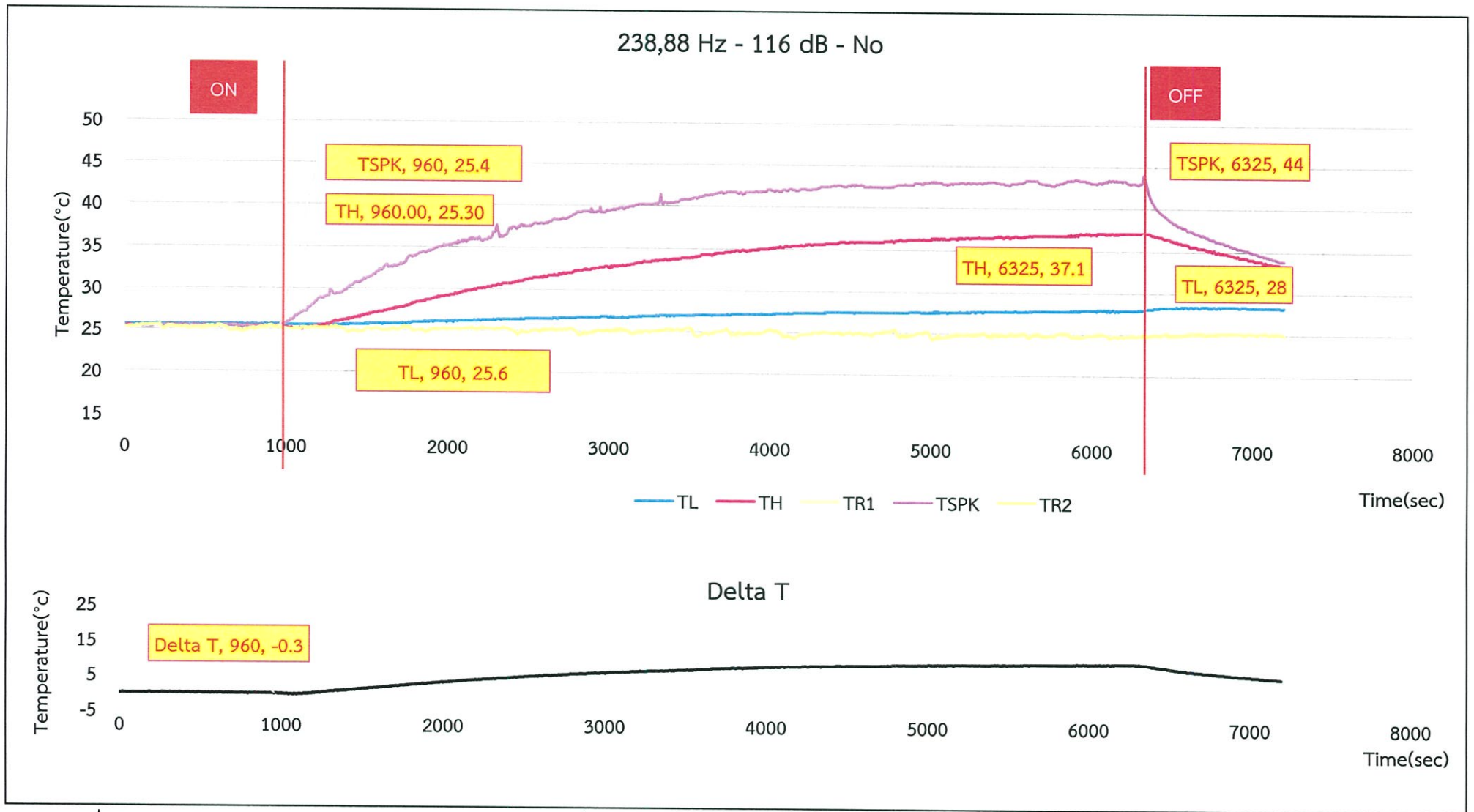
รูปที่ 5.33 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB, ความถี่ 188.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.34 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB, ความถี่ 188.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.35 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB, ความถี่ 238.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



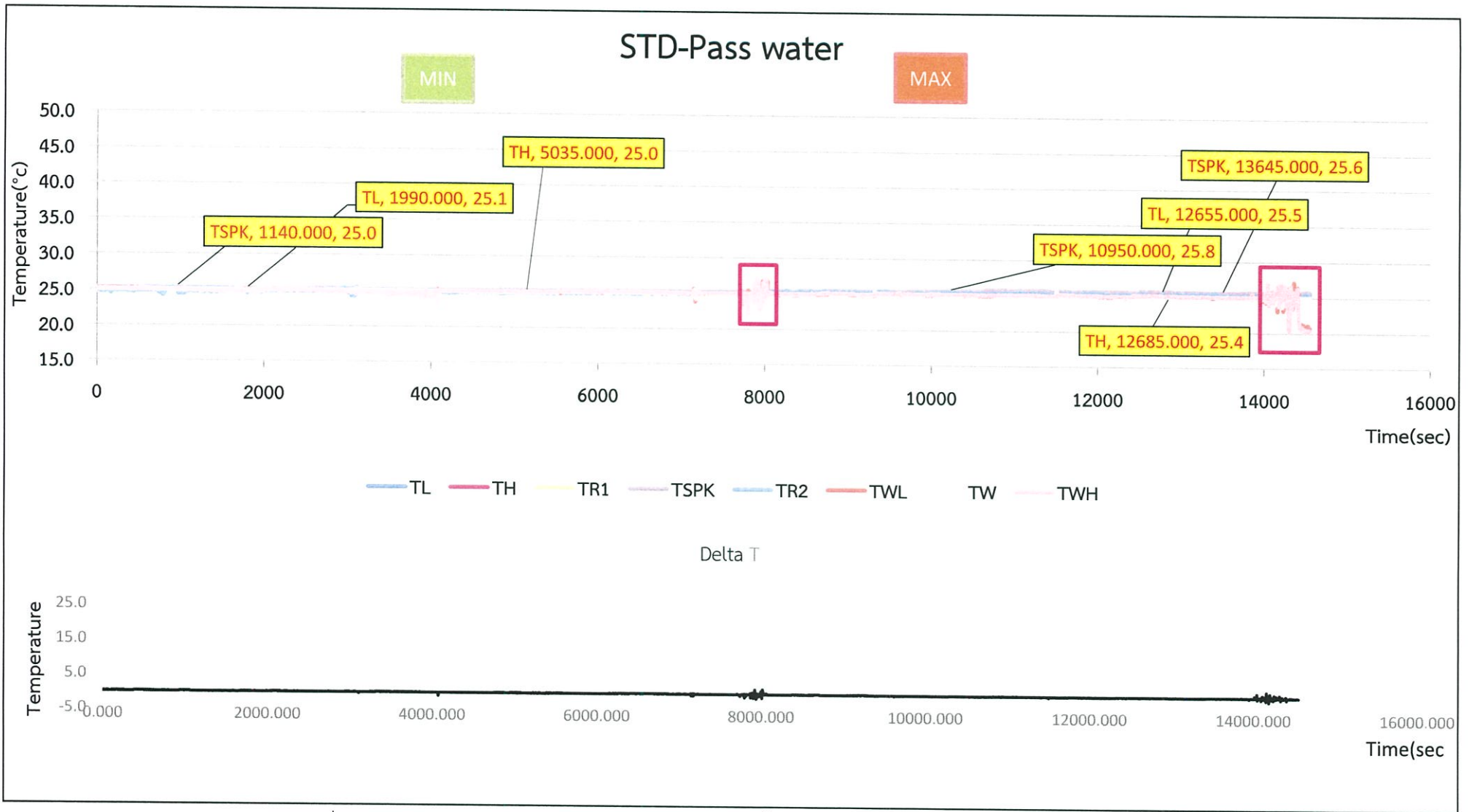
รูปที่ 5.36 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB, ความถี่ 238.88 Hz, กรณีไม่ใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

2. ผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกกรณีใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

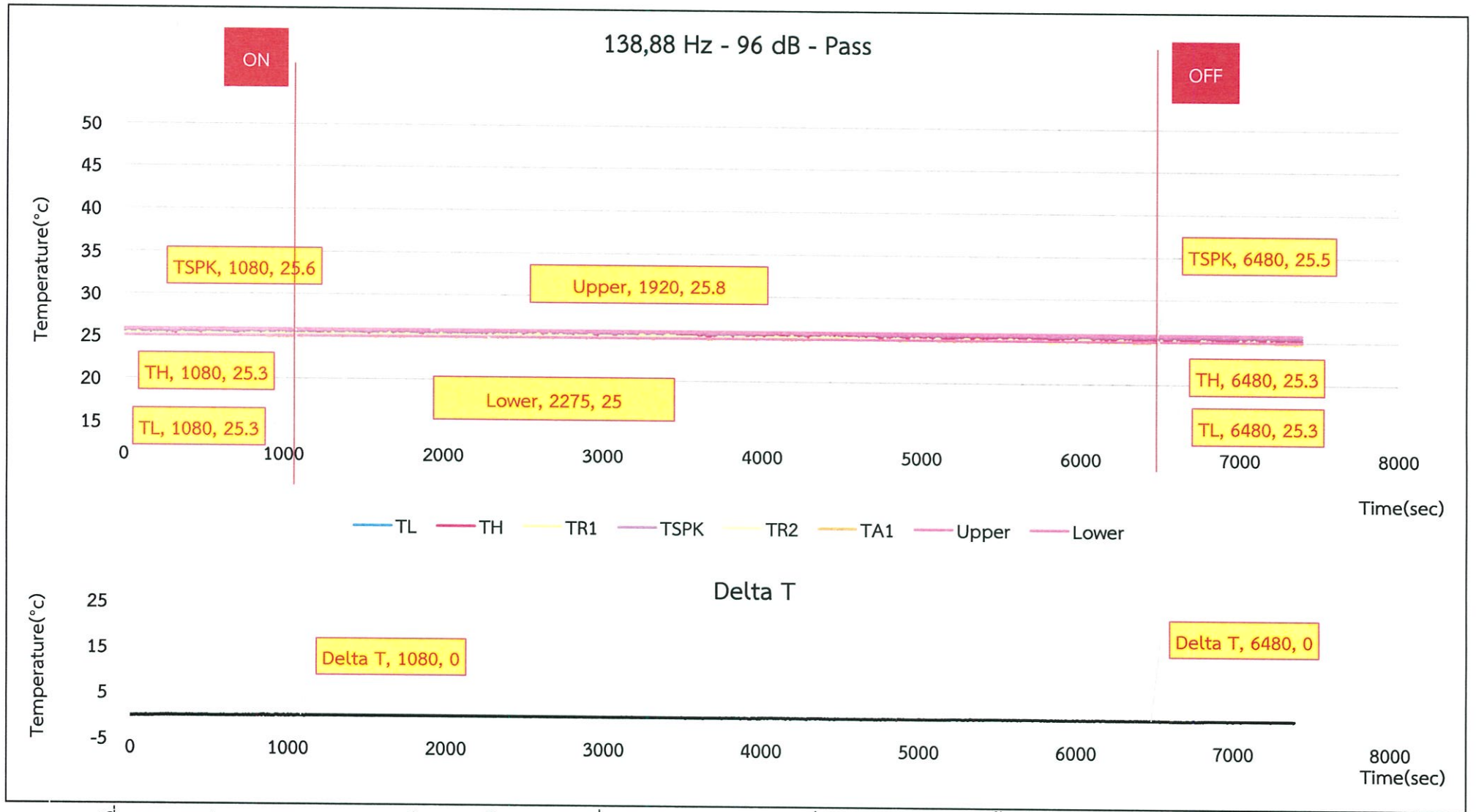
- รูปที่ 5.37 แสดงกราฟอุณหภูมิสองข้างสแต็กมาตรฐาน กรณีใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยน ความร้อน ในกรณีที่ใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดการเปลี่ยนแปลงของสอง ข้างสแต็กเนื่องจากอุณหภูมิห้อง อยู่ในช่วง 25.8 ถึง 25.0 องศาเซลเซียส โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ 25.0 องศาเซลเซียส
- รูปที่ 5.38 แสดงกราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 138.88 เฮิรตซ์ กรณีใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิต่ำด้านเย็น) และเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสูงด้านร้อน) ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ เพราะฉะนั้นที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 138.88 เฮิรตซ์ กรณีใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก
- รูปที่ 5.39 แสดงกราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 138.88 เฮิรตซ์ กรณีใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกเส้นกราฟ TL (อุณหภูมิต่ำด้านเย็น) อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 25.1 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลง จนถึงวินาทีที่ 1255 เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิต่ำด้านเย็น) อุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 23.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้น 0.8 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเส้นกราฟ TL (อุณหภูมิต่ำด้านเย็น) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำที่ใส่เข้าไปเพื่อ ถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน TH (อุณหภูมิสูงด้านร้อน) อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 25.3 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงวินาทีที่ 1255 เส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสูงด้านร้อน) อุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 28.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 3.4 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิต่ำด้านร้อน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การที่เส้นกราฟ TH (อุณหภูมิต่ำด้านร้อน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิลำโพง สังเกตจาก เส้นกราฟ TSPK (อุณหภูมิลำโพง) อยู่ในระดับที่สูงกว่าเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิต่ำด้านร้อน) ซึ่ง ลำโพงในชุดทดลองอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับสแต็กด้านร้อน
- รูปที่ 5.40 แสดงกราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ กรณีใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิต่ำด้านเย็น) และ เส้นกราฟ TH (อุณหภูมิต่ำด้านร้อน) ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ เพราะฉะนั้นที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ กรณีใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก
- รูปที่ 5.41 แสดงกราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 188.88 เฮิรตซ์ กรณีใสน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เกิด

ปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกเส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดักด้านเย็น) อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 25.2 องศาเซลเซียส มีแนวโน้ม ลดลง จนถึงวินาทีที่ 1415 เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดักด้านเย็น) อุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 21.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้น 3.8 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดักด้านเย็น) ระยะแรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำที่ใส่เข้าไปเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นกราฟจะคงที่ TH (อุณหภูมิสดักด้านร้อน) อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 25.2 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงวินาทีที่ 1415 เส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดักด้านร้อน) อุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 31.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 6.2 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดักด้านร้อน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความแตกต่างของอุณหภูมิจากสดักด้านร้อน และสดักด้านเย็น 10.0 องศาเซลเซียส และน้ำขา ออกจากตัวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเย็นอุณหภูมิลดลง 0.2 องศาเซลเซียส

6. รูปที่ 5.42 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดักด้านเย็น) และเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดักด้านร้อน) ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ เพราะฉะนั้นที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก
7. รูปที่ 5.43 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล ความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากที่ระดับความถี่ 238.88 เฮิรตซ์ อยู่ในช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของอนุภาคตัวกลาง จึงไม่เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก เส้นกราฟ TL (อุณหภูมิสดักด้านเย็น) และเส้นกราฟ TH (อุณหภูมิสดักด้านร้อน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิลำโพง

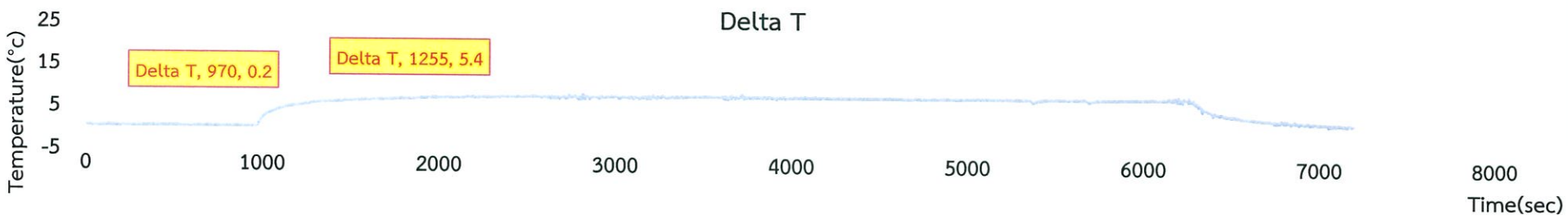
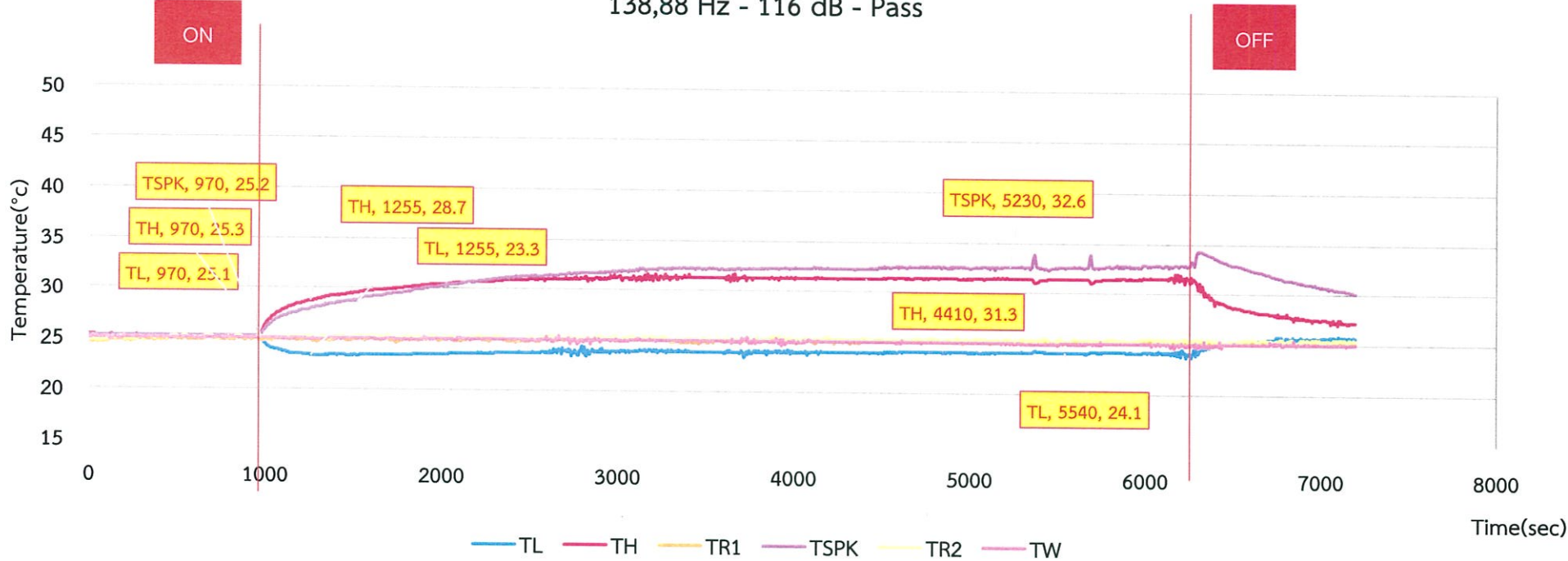


รูปที่ 5.37 กราฟอุณหภูมิสองข้างสแต็คมาตรฐาน กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



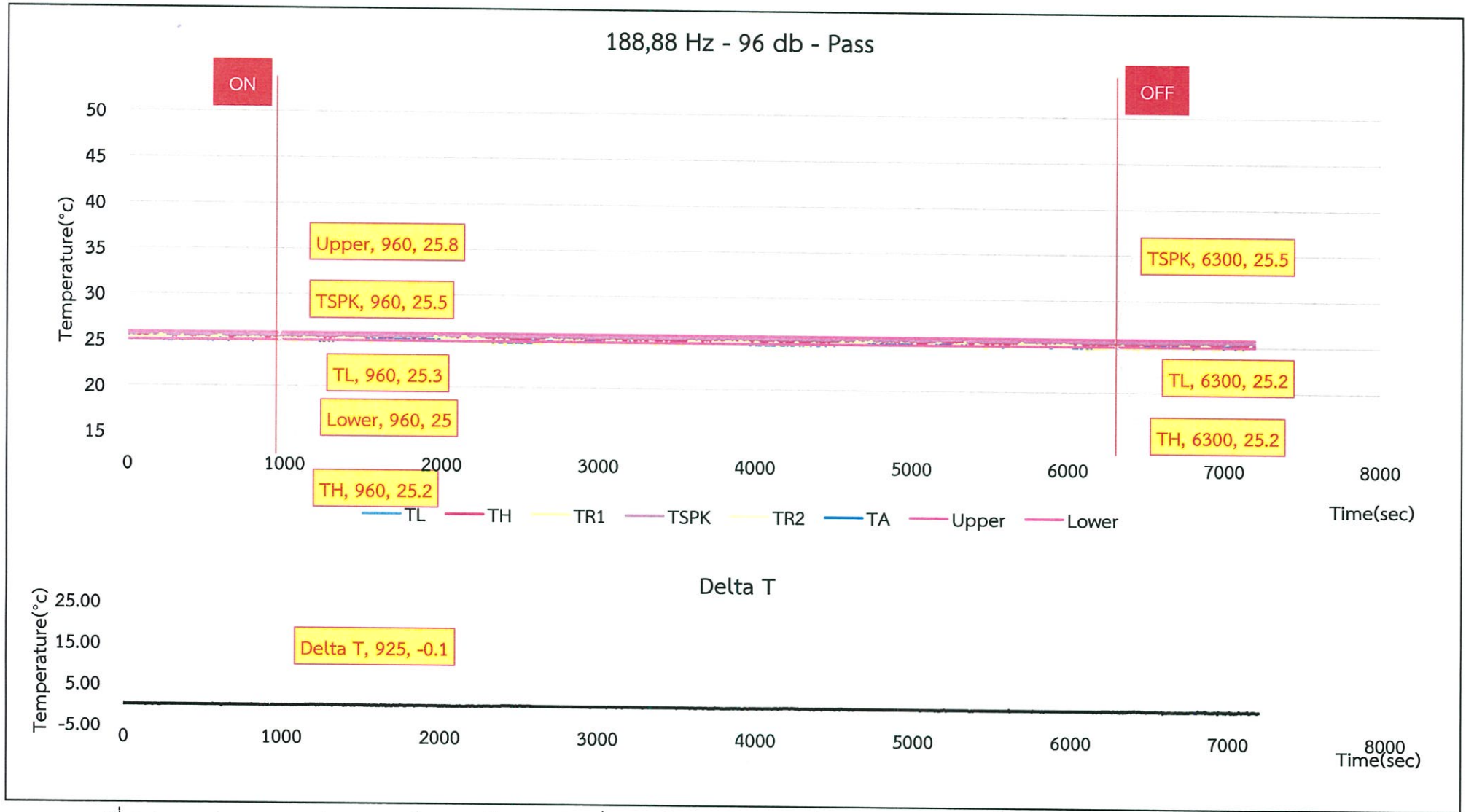
รูปที่ 5.38 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB, ความถี่ 138.88 Hz, กรณีใส่แก้วเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

138,88 Hz - 116 dB - Pass

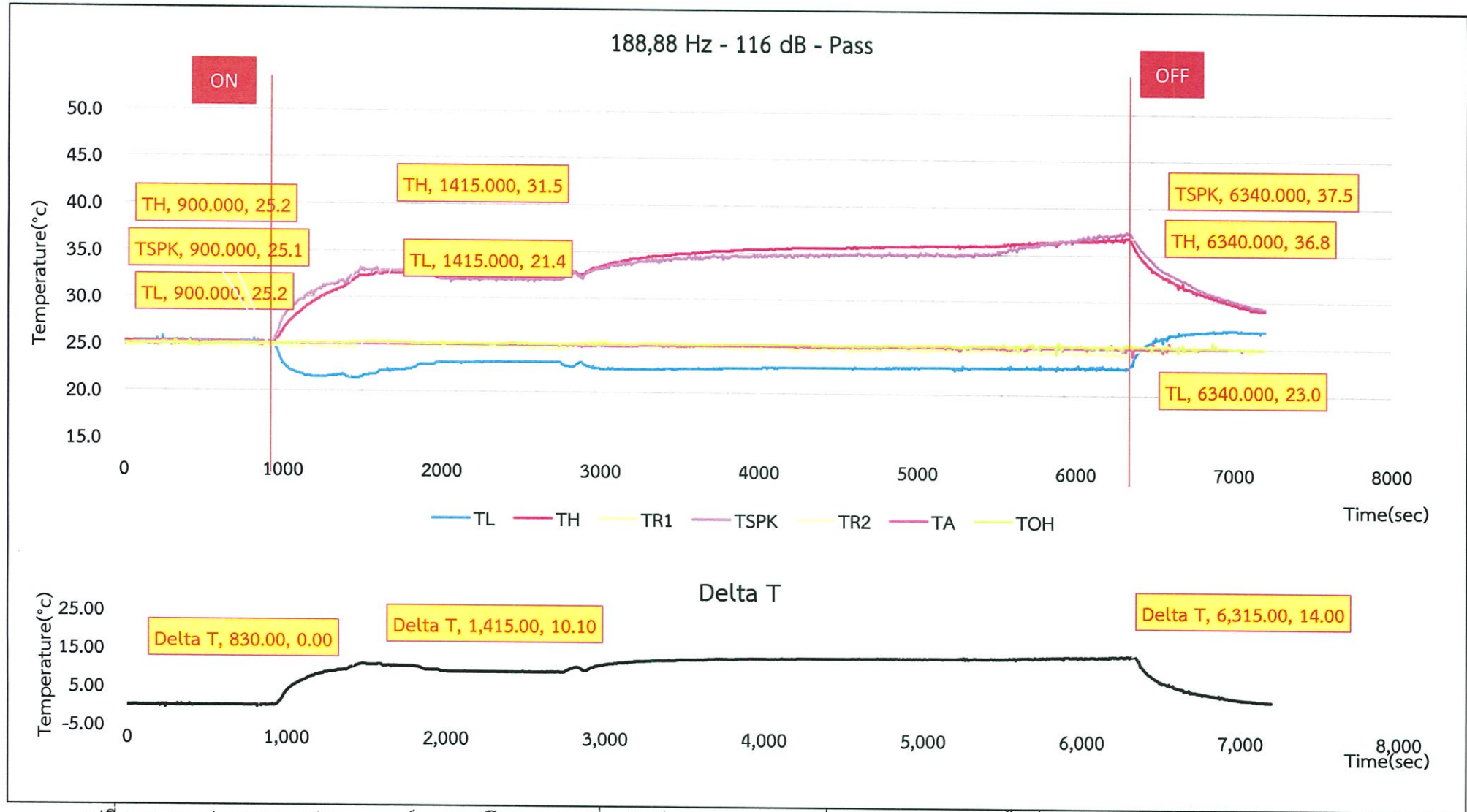


รูปที่ 5.39 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB, ความถี่ 138.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

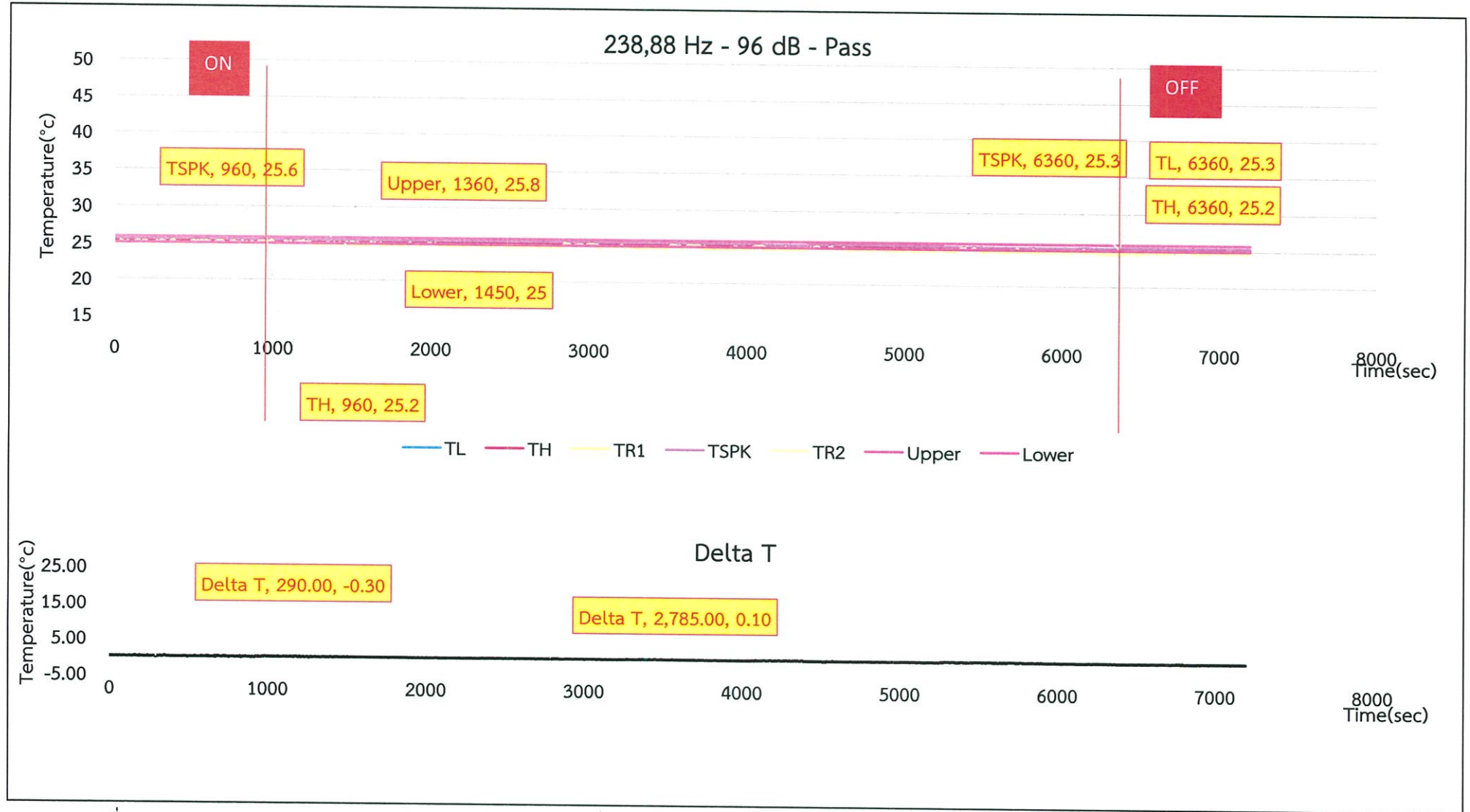
115



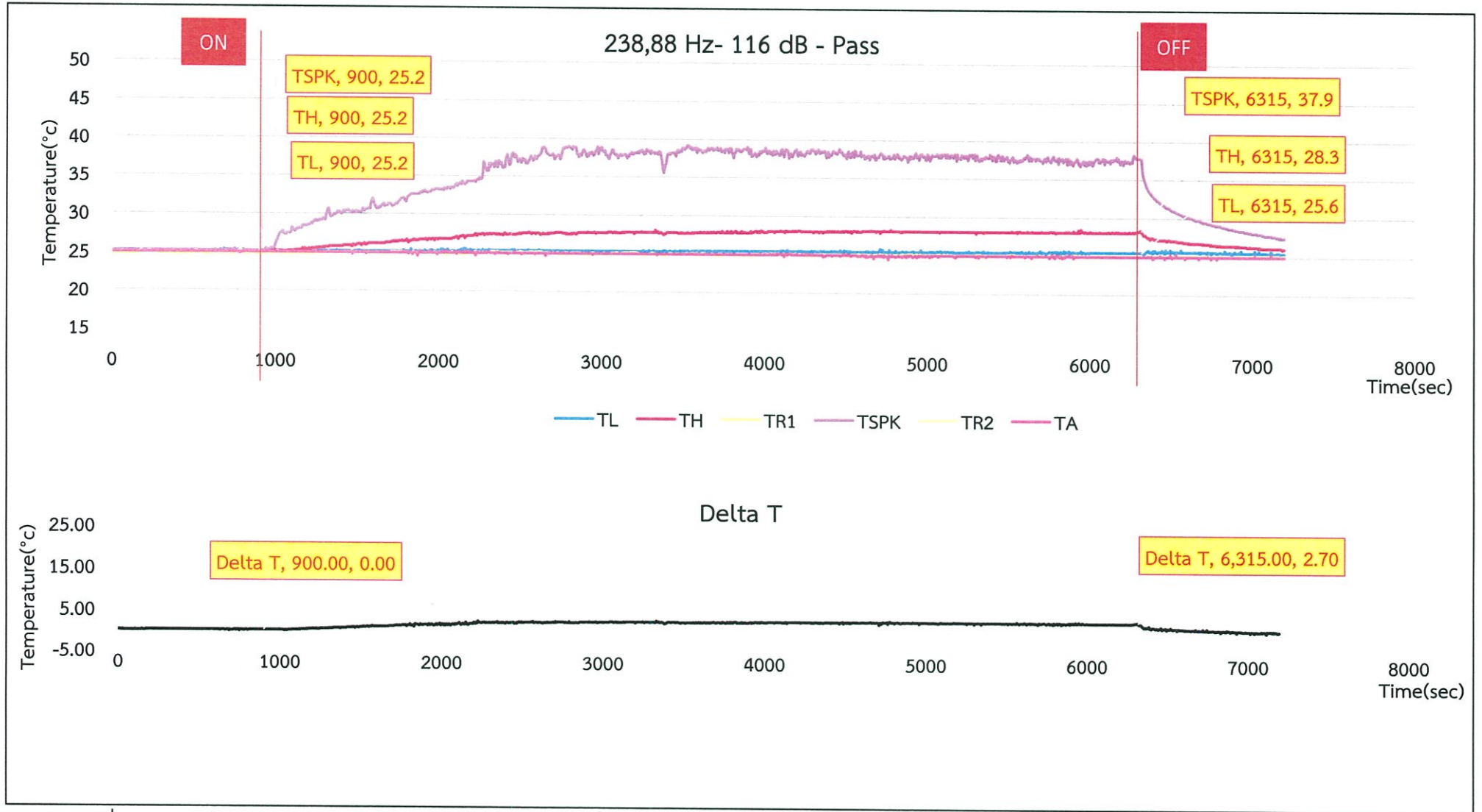
รูปที่ 5.40 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB, ความถี่ 188.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.41 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB, ความถี่ 188.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.42 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 96 dB, ความถี่ 238.88 Hz, กรณีใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.43 กราฟการทดลองปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ที่ระดับเสียง 116 dB, ความถี่ 238.88 Hz, กรณีใส่ น้ำ เพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 6

สรุปผลการดำเนินงาน

จากการวิเคราะห์และจำลองลักษณะคลื่นเสียงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิจากเครื่อง Data Logger ด้วยโปรแกรม DAQ Manager การสรุปผลการดำเนินงานแบ่งเป็น สรุปผลการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง และสรุปผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก มีดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง

การทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง ทดลองที่ความถี่ 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850 และ 900 เฮิรตซ์ ตามลำดับโดยใช้ท่อพีวีซี เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ใช้น้ำเป็นตัวปรับระดับผนังท่อปลายปิดเพื่อหาตำแหน่งปฏิบัพ และตำแหน่งบัพ เพื่อหาความยาวคลื่น และเพื่อจำลองรูปร่างของคลื่นไซน์ที่ความถี่ต่างๆที่ระบุไว้ข้างต้น สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียงเมื่อทราบระยะระหว่างบัพกับปฏิบัพ บัพกับบัพ และปฏิบัพกับปฏิบัพ สามารถหาความยาวคลื่นได้
2. เมื่อทราบระยะจากข้อ 1 และความยาวคลื่น สามารถจำลองลักษณะการกระจัดของรูปคลื่นได้ โดยใช้ สมการ $y = A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} x\right]$ ซึ่งได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การกระจัดกับระยะทาง
3. เมื่อได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การกระจัดกับระยะทาง สามารถจำลองลักษณะความดันของรูปคลื่น ได้ โดยใช้สมการ $\frac{P}{A\rho} = \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} x\right]$ ซึ่งได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดกับระยะทาง
4. การเกิดการกำหนดของคลื่นเสียงสำหรับท่อปลายปิดสองด้าน พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันต่อแอมพลิจูดสูงสุดกับระยะทาง พบว่าเมื่อเปลี่ยนความถี่แล้วเกิดการกำหนดเกิดขึ้น ตำแหน่งปฏิบัพจะอยู่ที่ปากท่อด้านชิดกับแหล่งกำเนิดเสียงเช่นเดิม
5. เมื่อเพิ่มความถี่เสียงขึ้นตามลำดับการทดลอง พบว่า ระยะระหว่างบัพกับปฏิบัพ บัพกับบัพ และปฏิบัพกับปฏิบัพ จะสั้นลงเรื่อยๆ ดังนั้น คลื่นมีขนาดเล็กลงเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น
6. เมื่อทราบความถี่เสียงและความยาวคลื่น สามารถคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศได้
7. เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับคาบสามารถหา ความเร็วเสียงในตัวกลางได้

6.2 สรุปผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก

เนื่องจากขนาดของชุดทดลองได้ออกแบบมาเพื่อใช้กับแก๊สฮีเลียม ซึ่งจะมีความถี่กำทอนที่ 612 เฮิร์ตซ์ แต่เนื่องจากฮีเลียมได้รั่วออกจากท่อ จึงได้ใช้แก๊สทำงานเป็นอากาศ และหาความถี่กำทอนในอากาศแทนภายใต้เงื่อนไขของปรากฏการณ์การไหลแบบราบเรียบ โดยจะเกิดในช่วงความถี่ 86-195 เฮิร์ตซ์ ซึ่งพบว่าความถี่กำทอนช่วงการไหลแบบราบเรียบ มีค่าเท่ากับ 188.88 เฮิร์ตซ์ และเพื่อเปรียบเทียบปัจจัยด้านความถี่ ความดัน และผ่านน้ำเข้าท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จึงได้จัดทำทดลองตามหลัก DOE

รูปที่ 5.30 และ รูปที่ 5.37 แสดงถึงผลของอุณหภูมิทั้งสองข้างของสแต็กที่ควบคุมไว้ในช่วงอุณหภูมิห้อง 24.5 – 25.5 องศาเซลเซียส โดยบันทึกไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งจะพบว่าในกรณีที่ไม่ผ่านน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงของสองข้างสแต็กเนื่องจากอุณหภูมิห้อง อยู่ในช่วง 26.5 – 25.2 องศาเซลเซียส และในกรณีที่ผ่านมาเกิดการเปลี่ยนแปลงของสองข้างสแต็กเนื่องจากอุณหภูมิห้อง อยู่ในช่วง 25.8 – 25.0 องศาเซลเซียส โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ 25.0 องศาเซลเซียส การทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้น สามารถทำให้เกิดอุณหภูมิด้านเย็นได้ถึง 19.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ น้ำฝั่งเย็นขาออกลดลง 0.2 องศาเซลเซียส ใช้อากาศที่ความดันบรรยากาศเป็นแก๊สทำงาน
2. จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเราสามารถนำพลังงานเสียงมาสร้างความเย็นได้ ซึ่งจะมากหรือน้อยก็ขึ้นกับ ปัจจัยที่เราใส่เข้าไปในระบบ ดังนั้นหลักการทางเทอร์โมอะคูสติกจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ สามารถนำไป ประยุกต์ใช้กับเครื่องทำความเย็นได้
3. จากการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก เมื่อเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก หากไม่มีการใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิสแต็กด้านเย็นมีแนวโน้มอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป
4. จากข้อ 3 เมื่อมีการใส่น้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิสแต็กด้านเย็นมีแนวโน้มอุณหภูมิกคงที่เมื่อเวลาผ่านไป
5. ที่ระดับเสียง 96 เดซิเบล ไม่เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก ทุกย่านความถี่ที่ใช้ทดลองที่ระดับเสียง 116 เดซิเบล เกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก และความถี่ 188.88 เฮิร์ตซ์ เป็นความถี่ที่ทำให้เกิด อุณหภูมิเย็นต่ำที่สุด

6.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะมีสองส่วน ส่วนแรกเป็นข้อเสนอแนะการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง ส่วนที่สองเป็นข้อเสนอแนะการทดลองการเกิดกระบวนการทางเทอร์โมอะคูสติก

6.3.1 ข้อเสนอแนะการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียง

1. การทดลองควรปล่อยน้ำออกจากท่อเพื่อลดระดับน้ำในท่ออย่างช้าๆ หากปล่อยน้ำออกเร็วอาจทำให้น้ำ ในท่อกระเพื่อม ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดได้
2. ขณะทดสอบมือต้องคอยควบคุมวาล์วเปิดปิดน้ำตลอดเวลา เมื่อพบว่ากราฟระดับเสียงเพิ่มขึ้นสูงสุด หรือกราฟระดับเสียงลดลงต่ำสุดจะได้ปิดวาล์วเปิดปิดน้ำทันที
3. จากข้อ 2 เพื่อความแม่นยำในการวัด เมื่อสังเกตเห็นว่ากราฟระดับเสียงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หรือกราฟ ระดับเสียงมีแนวโน้มลดลง ให้ปรับอัตราการไหลของน้ำให้ไหลช้าที่สุด จนได้ตำแหน่งกราฟระดับเสียง เพิ่มขึ้นสูงสุด หรือตำแหน่งกราฟระดับเสียงลดลงต่ำสุดปิดวาล์วเปิดปิดน้ำทันที
4. การวัดระดับน้ำจากท่อใส ซึ่งทำไว้สำหรับการวัด ระดับสายตาควรตั้งฉากกับระดับน้ำ และวัดในตำแหน่งล่างสุดของระดับน้ำ
5. ในการทดลองการกำหนดของคลื่นเสียงนี้ สามารถนำผลการจำลองลักษณะคลื่นในท่อไปใช้ประโยชน์ใน การศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติกได้

6.3.2 ข้อเสนอแนะการเกิดปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอะคูสติก

1. ในการศึกษาต่อไปเพื่อพัฒนาให้อุปกรณ์สามารถสร้างความเย็นให้ได้มากกว่าเดิม และสามารถนำความเย็นที่ได้มาใช้งานได้จริงอีกทั้งแก้ไขจุดบกพร่องจากงานวิจัยเล่มนี้ คือ อุปกรณ์ควรออกแบบให้สามารถ บรรจุแก๊สทำงานอย่างอื่นได้โดยไม่รู้ และสามารถรองรับความดันที่สูงได้
2. กำลังของลำโพงที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงควรออกแบบลำโพงมีกำลังวัตต์สูงขึ้น เพื่อให้พลังงานต่อระบบได้มาก
3. ของไหลที่ใช้ในการขนถ่ายความเย็นในระบบออกมา ควรเลือกใช้ของไหลที่สามารถแลกเปลี่ยนความเย็นจากระบบได้ดี
4. การทดลองควรเลือกใช้ห้องที่อุณหภูมิคงที่ เพื่อความสะดวกในการดำเนินการทดลอง และลดผลกระทบกับตัวแปรอื่นในการทดลอง
5. การออกแบบเครื่องทำความเย็นควรพัฒนาเรื่องของเสียงจากตัวเครื่องให้ลดลง เพื่อความปลอดภัยของผู้ทดลอง

หนังสืออ้างอิง

- [1] สว่างทิตย์ ศรีกิจสุวรรณ, ปุณยศ วัลลิกุล และสุวัฒน์ กุลธนปรีดา (2547).การศึกษาเชิงทดลองการทำ ความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18
- [2] ภาวิชัย กาญจนาวดีและเกรียงไกร อัศวมาสน์ (2552).การทดสอบสมรรถนะการทำความเย็นของ เครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
- [3] Normah Mohd Ghazali and Azhar Abd Aziz, Environmentally Friendly Refrigeration with Thermoacoustic, University of Technology Malaysia.
- [4] Timothy S.Ryan, Design and Control of A Standing-Wave Thermoacoustic Refrigerator, Thesis for The Degree of Master University of Pittsburgh, 2006.
- [5] Masoud Akhavanbazaz, Design Analysis Testing and Development of A Thermoacoustic System for Refrigeration Application, Thesis of Degree of Master.
- [6] Sudeep Sastry, A Thermoacoustic Engine Refrigerator System for Space Exploration Mission, Thesis of Doctor of Philosophy.
- [7] Daniel George Chine, Piezoelectrically-Driven Thermoacoustic Refrigerator, Thesis of Master.
- [8] Bheemsha, Ramesh Nayak.B and Pundarika.G, Design of The Resonator Tube and Buffer Volume for Thermoacoustic Refrigerator, International Journal of Advanced Scientific and Technical Research.
- [9] Bheemsha, Ramesh Nayak.B and Pundarika.G, Design and Optimization of A Thermoacoustic Refrigerator, International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development.
- [10] Bheemsha,Ramesh Nayak.B and Pundarika.G, Design of A Parallel Plate Stack for A Thermoacoustic Refrigerator, International Journal of Advanced Scientific and Technical Research.
- [11] Banhan Lila, Course Material of Design of Experiment, Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Burapha University.

ภาคผนวก
โค้ดในโปรแกรม MATLAB

ผ. 1 โค้ดที่ใช้พล็อตค่า Rott's Function ที่สแต็กมีรูปร่างต่างๆ

```

% Plot Rott's function for various pore shapes
clear all
x = linspace(.001,15,1000);           % ratio of hydraulic radius to delta_k
lam = x*2*sqrt(2);                    % dimensionless thermal disturbance number
F = zeros(5,length(x));               % initialize F array

% Arnott
y = sqrt(i)*lam;                      % intermediate variable
iy = sqrt(-i)*lam;                   % intermediate variable
F(1,:) = 1-sqrt(2)./lam*(1+i);        % boundary layer
F(2,:) = 1-(2./iy).*tanh(iy/2);       % parallel plates
F(3,:) = 1-(2./y).*(besselj(1,y)./besselj(0,y)); % circular pores
for m=1:2:11                           % square pores
    for n=1:2:11
        Ymn = 1+i*pi^2./lam.^2*(m^2+n^2)/4;
        F(4,:) = F(4,:) + 64/pi^4./(m^2*n^2*Ymn);
    end
end
end
F(5,:) = 1-2./iy).*coth(3*iy/2)+4/3*(i./lam.^2); % equi. tri. pores

Re = real(1-F);                       % f_k = 1 - F (to compare results of Arnott and Swift)
Im = imag(F);                          % Im part is same for Arnott and Swift

% Swift
% f_k(L,z) = tanh((1+i)*x) ./ ((1+i)*x); % parallel plates
% pin array:
r = 2;                                 % ratio of pin spacing (ctr-ctr) to pin diameter
z = (i-1)*x/r;                         % for convenience

f_pin = -2./(3*z)...
        *(bessely(1,r*z).*besselj(1,z)-besselj(1,r*z).*bessely(1,z))...
        ./((bessely(1,r*z).*besselj(0,z)-besselj(1,r*z).*bessely(0,z)));

```

```
Re(6,:) = real(f_pin);
```

```
Im(6,:) = imag(f_pin);
```

```
figure(),set(gcf,'defaultlinelinerwidth',1.5)
```

```
plot(x,Re(1,:), 'k--',x,Re(2,:), 'r:',x,Re(3,:), 'g-',... % plot Re parts
```

```
    x,Re(4,:), 'm-',x,Re(5,:), 'b:',x,Re(6,:), 'c-',...
```

```
    x,Im(1,:), 'k--',x,Im(2,:), 'r:',x,Im(3,:), 'g-',... % plot Im parts
```

```
    x,Im(4,:), 'm-',x,Im(5,:), 'b:',x,Im(6,:), 'c-')
```

```
axis([0 4 -0.5 1])
```

```
ylabel('$f_k(r_h^{\Delta_k})$', xlabel('$r_h^{\Delta_k}$')
```

```
legend('boundary layer','parallel plate','circular','square',... 'eq. triangle','pin array')
```

ผ. 2 โค้ดที่ใช้หาค่าความถี่

```
% Gas properties
% air @ 20 C, 1 atm
% K = 0.0257; % thermal conductivity (W/m/K)
% gamma = 1.4; % ratio of specific heats
% Cp = 1005; % isobaric specific heat (J/kg/K)
% Pr = 0.713; % Prandtl number
% Rs = 286.9; % specific ideal gas constant
% He @ 20 C, 1 atm REF. DELTA EC
K = 0.14625; % thermal conductivity (W/m/K)
gamma = 5/3; % ratio of specific heats
Cp = 5193.4; % isobaric specific heat (J/kg/K)
Pr = 0.68; % Prandtl number
Rs = 2077; % specific ideal gas constant
% Operating conditions
TH = 300; % operating temperature (K)
pm = 101325; % operating pressure (Pa)
rho = pm/Rs/TH; % density (kg/m^3)
y1= 0.00075/2; % half space between stack walls
y2=0.00037/2; % half space between stack walls
delta_k1 = y1/1.1; % optimum thermal penetration for square channels
delta_k2 = y2/1.1; % optimum thermal penetration for square channels
f1 = K/rho/Cp/delta_k1^2/pi; % optimum operating frequency (Hz)
f2 = K/rho/Cp/delta_k2^2/pi; % optimum operating frequency (Hz)
spc = 2.5;
delta_k3 = 2*y1/spc % spacing / delta_k = 2~4 to not disturb acoustics
delta_k4 = 2*y2/spc % spacing / delta_k = 2~4 to not disturb acoustics
f_spc1 = K/rho/Cp/delta_k3^2/pi; % operating frequency for 2y = spc*delta_k
f_spc2 = K/rho/Cp/delta_k4^2/pi; % operating frequency for 2y = spc*delta_k
disp(sprintf('\rRott frequency (square pores): %0.4f,f1))
disp(sprintf('\rFrequency for chosen spacing: %0.4f,f_spc1))
disp(sprintf('\rRott frequency (square pores): %0.4f,f2))
disp(sprintf('\rFrequency for chosen spacing: %0.4f,f_spc2))
```

ผ. 3 โค้ดที่ใช้พล็อตกราฟสัมพันธ์สมรรถนะกับความยาวและตำแหน่งของสแต็ก

```
%TAR stack design
clear all
% Gas parameters
% air @ 20 C, 1 atm
% K = .0257; % thermal conductivity (W/m/K)
% gamma = 1.4; % ratio of specific heats
% Cp = 1005; % isobaric specific heat (J/kg/K)
% Pr = .713; % Prandtl number
% Rs = 286.9; % specific ideal gas constant
% He @ 20 C, 1 atm
K = .14625; % thermal conductivity (W/m/K)
gamma = 5/3; % ratio of specific heats
Cp = 5193.2; % isobaric specific heat (J/kg/K)
Pr = 0.68; % Prandtl number
Rs = 2077; % specific ideal gas constant
% Operating parameters
pm = 101325; % operating pressure (Pa)
Tm = 300; % mean temperature (K)
deltaT = 60; % desired temperature difference (K)
freq = 612; % resonant frequency (Hz)
rho = pm/Rs/Tm % density (kg/m^3)
c = sqrt(gamma*Rs*Tm) % speed of sound (m/s)
deltaTn = deltaT/Tm % normalized temp. difference
w = 2*pi*freq % resonant frequency (rad/s)
lambda = c/freq % wavelength (m)
k = w/c % wave number
% Driver parameters
D = 0.02; % drive ratio (po/pm)
% Stack Parameters
y0 = 3.75e-04 % half pore diameter (m)
l = 3.75e-05 % half wall thickness (m)
```



```
set(0,'defaulttextinterpreter','latex')
figure(1),set(gcf,'defaultlinelinerwidth',2.5)
plot(x,COP)
axis()
xlabel('Stack Center Position (m)'),ylabel('COP')
legend(Lstr), grid on
figure(2),set(gcf,'defaultlinelinerwidth',1.5)
plot(x,Qc)
axis()
xlabel('Stack Center Position (m)'),ylabel('$Q_c (W)$')
legend(Lstr), grid on
figure(3),set(gcf,'defaultlinelinerwidth',1.5)
plot(x,W)
axis()
xlabel('Stack Center Position (m)'),ylabel('W (W)')
legend(Lstr), grid on
figure(4),set(gcf,'defaultlinelinerwidth',1.5)
plot(x,Qcn)
axis()
xlabel('Stack Center Position (m)'),ylabel('Qcn (W)')
legend(Lstr), grid on
figure(5),set(gcf,'defaultlinelinerwidth',1.5)
plot(x,Wn)
axis()
xlabel('Stack Center Position (m)'),ylabel('Wn (W)')
legend(Lstr), grid on
```

ผ. 4 โค้ดที่ใช้หาขนาดท่อกำหนดและตัวเลขเปลี่ยนความร้อน

```
%TAR Resonator design
clear all
% Gas parameters
% air @ 20 C, 1 atm
% K = .0257; % thermal conductivity (W/m/K)
% gamma = 1.4; % ratio of specific heats
% Cp = 1005; % isobaric specific heat (J/kg/K)
% Pr = .713; % Prandtl number
% Rs = 286.9; % specific ideal gas constant
% He @ 20 C, 1 atm
K = .14625; % thermal conductivity (W/m/K)
gamma = 5/3; % ratio of specific heats
Cp = 5193.2; % isobaric specific heat (J/kg/K)
Pr = 0.68; % Prandtl number
Rs = 2077; % specific ideal gas constant
% Operating parameters
pm = 101325; % operating pressure (Pa)
Tm = 300; % mean temperature (K)
deltaT = 60; % desired temperature difference (K)
freq = 612; % resonant frequency (Hz)
rho = pm/Rs/Tm % density (kg/m^3)
c = sqrt(gamma*Rs*Tm) % speed of sound (m/s)
deltaTn = deltaT/Tm % normalized temp. difference
w = 2*pi*freq % resonant frequency (rad/s)
lambda = c/freq % wavelength (m)
k = w/c % wave number
% Driver parameters
D = 0.02; % drive ratio (po/pm)
po=D*pm
x=0.109 % length of the large diameter tube (m)
```

% Stack Parameters

```
y0 = 3.75e-04 % half pore diameter (m)
l =3.75e-05 % half wall thickness (m)
delta_k = sqrt(2*K/(rho*Cp*w)) % thermal penetration (m)
delta_kn = delta_k/y0 % normalized therm. penetration
A = pi*(.0508)^2 % area of resonator at stack (m^2)
B = y0/(y0+l) % "blockage factor" for square pores
X1=(po/(w*rho*c))*sin(k*x) % the length of heat exchanger cold
X2=2*X1 % the optimum length of heat exchanger Cold
x3=2*X2 % the optimum length of heat exchanger HOT
d1=0.1016; %Diametre at PVC at stack (larght tube)
d2=0.0508; %Diametre at PVC resonator(small tube)
l1=x+X2+0.00645 %Lenght of pvc at stack
Lt=((atan(((d2/d1)^2)*cot(k*l1)))/k)+l1 %Lenght of All TAR
LR=Lt-l1 %Lenght of Resonator
```