

เครื่องต้นแบบเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก  
 PROTOTYPE OF THERMOACOUSTIC REFRIGERATOR



นายกิตติ กิติเลิศ  
 นายอนุรักษ์ ยาวิละ

เรื่อง เสนอคณะกรรมการ  
 วันที่รับ..... 24 / ส.ย. 2554  
 เลขทะเบียน..... 1551612 2  
 เลขเรียกหนังสือ..... ฝ.5.  
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 1671 A 2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
 ปีการศึกษา 2553

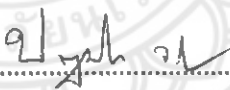



## ใบรับรองปริญญาโท

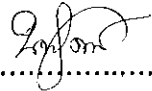
ชื่อหัวข้อโครงการ : เครื่องต้นแบบเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก  
 ผู้ดำเนินโครงการ : นายกิตติ กิติเลิศ รหัส 50380034  
 นายอนุรักษ์ ขาวิลละ รหัส 50380683  
 ที่ปรึกษาโครงการ : ผศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล  
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล  
 ปีการศึกษา : 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
 ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการการสอบโครงการวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศก วิไลพล)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

.....กรรมการ  
 (อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ : เครื่องต้นแบบเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก  
 ผู้ดำเนินโครงการ : นายกิตติ กิติเลิศ รหัส 50380034  
 นายอนุรักษ์ ขาวิลละ รหัส 50380683  
 ที่ปรึกษาโครงการ : ผศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล  
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล  
 ปีการศึกษา : 2553

---

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการสร้างชุดทดสอบของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกและศึกษาหลักการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกที่ใช้สแต็กแบบก้นหอย โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ 1) ความถี่ที่ใช้ทดลองอยู่ในช่วง 300-400 เฮิรตซ์ 2) ตำแหน่งระยะการวางของสแต็กจากปลายท่อด้านบนอยู่ในช่วง 1-2 ซม. 3) ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กอยู่ในช่วง 0.4-0.6 มม. โดยผลการทดลองจะพิจารณาจากอุณหภูมิที่แตกต่างที่มากที่สุดระหว่างสแต็กฝั่งร้อนและฝั่งเย็น ชุดทดสอบประกอบด้วยลำโพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 ซม. ท่อที่มีความยาว 25 ซม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 2.5 ซม. ปลายท่อบีบปิด ภายในท่อบีบปิดแบบก้นหอยบรรจุอยู่สแต็กที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 4 แบบ ภายในท่อใช้อากาศเป็นสารทำงานที่ความดันบรรยากาศ

ผลการทดลองพบว่าความถี่ที่ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิสูงที่สุดคือ ที่ความถี่ของคลื่นเสียง 336 เฮิรตซ์ ที่  $V_{rms} = 7$  โวลต์ ซึ่งให้ผลความแตกต่างของอุณหภูมิที่ 1.7 องศาเซลเซียส ตำแหน่งระยะการวางของสแต็กที่ดีที่สุดอยู่ที่ 1.5 ซม. จากปลายท่อ และระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กที่ให้ผลความแตกต่างของอุณหภูมิสูงที่สุดคือที่ระยะ 0.4 มม. ผลการทดลองที่ได้กล่าวเคลื่อนจากที่คำนวณไว้มากเนื่องจากการคลาดเคลื่อนจากการสร้างชุดทดสอบ

**Project title** : Prototype of Thermoacoustic Refrigerator  
**Name** : Mr.Kitti Kitilert Code 50380034  
Mr.Anurak Yawila Code 50380683  
**Project advisor** : Asst. Prof. Patomsok Wilaipon, Ph. D  
**Department** : Mechanical Engineering  
**Academic year** : 2010

---

### Abstract

This project is an experimental model of thermoacoustic refrigerator and working principle of thermoacoustic refrigerator with a spiral stack. In the study, frequencies used were in the range of 300-400 Hz, The displacement of the stack from the top end of the tubing ranging from 1-2 cm, plate spacing between stack layers is in the range 0.4-0.6 mm. The results are based on temperature difference between both ends of the stack. The experimental model consists of a 25.4 cm diameter loudspeaker, a 2.5 –cm diameter tube end and a closed end tube. Contained a spiral stack. Four type of stack were used in the experiments with atmospheric air as the working fluid.

The results showed that the frequency that made a maximum difference in temperature was 336 Hz with  $7 V_{rms}$  power supply. The temperature difference was 1.7 degrees Celsius. The optimum position to place the stack was 1.5 cm from the end of the tube. The optimum distance between the layers of the stack according to the difference of the highest temperature was 0.4 mm. Besides, it may be noted that the major errors of this experiment were the stack construction process including the control of input signal.

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยปริญญาโทฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือ และความกรุณาจากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกันซึ่งบุคคลเหล่านั้นได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ ตลอดจนข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาทดลองโครงการนี้ ผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่จะได้กล่าวดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาหัวข้อโครงการนี้ ตลอดจนการตรวจและแก้ไขปริญญาโท และสถานที่สำหรับทำการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่กรุณาให้ยืมเครื่องวัดอุณหภูมิ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดลอง

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ตลอดจนการชี้แนะแนวทางในการดำเนินชีวิตจนสำเร็จการศึกษา

นายกิตติ

นายอนุรักษ์

กิติเลิศ

ยาวิละ

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการวิจัย	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
ลำดับสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการทำโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน	2
1.6 งบประมาณ	3

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎี และการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยภายในประเทศ	4
2.2 งานวิจัยต่างประเทศ	6
2.3 ทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติก	10
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	15
3.1 อุปกรณ์	15
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	16
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดลอง	17
3.4 วิธีการดำเนินงาน	23
3.5 การออกแบบชุดทดสอบ	24
3.6 การออกแบบสแต็ค	26
3.7 การหาความถี่เสียงรีโซแนนซ์	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง	35
4.1 ผลการทดลองโดยใช้สแต็คที่ทำจากฟิล์ม	35
4.1.1 ทดลองที่ความถี่ 336 Hz	35
4.1.2 ทดลองที่ความถี่ 350 Hz	40
4.1.3 ทดลองที่ความถี่ 398 Hz	44
4.1.4 การเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุด	49

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การทดลองเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการทำสแต็ก	54
4.2.1 ทดลองที่ความถี่ 336 Hz	54
4.2.2 ทดลองที่ความถี่ 350 Hz	55
4.2.3 ทดลองที่ความถี่ 398 Hz	56
<b>บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>57</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	58
5.3 ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	62
ประวัติผู้ทำโครงการ	79



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน	2
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสเต็มเด็กแบบก้นหอยที่ใช้ในการทดลอง	18
ตารางที่ 3.2 ตารางค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	25
ตารางที่ 3.3 ตารางค่าคงที่ของสารทำงาน	26



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ชุดทดสอบของ ภาวิชัย กาญจนาวดี	4
รูปที่ 2.2 ชุดทดสอบของ สว่างทิพย์ และคณะ	6
รูปที่ 2.3 ชุดทดสอบของ Russell and Weibull	8
รูปที่ 2.4 ชุดทดสอบของ Newman	9
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก	10
รูปที่ 2.6 การอัดแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน	12
รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อน	12
รูปที่ 2.8 การขยายตัวแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน	13
รูปที่ 2.9 การถ่ายเทความร้อน	13
รูปที่ 3.1 รูปแบบของชุดทดสอบ	16
รูปที่ 3.2 แผนผังการต่อสายสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ สำหรับการทดลอง	17
รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบ	18
รูปที่ 3.4 สเต็ทแบบกั้นหอยที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 แบบ	19
รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน	19
รูปที่ 3.6 เครื่องออสซิลโลสโคป	20
รูปที่ 3.7 เครื่องขยายกำลัง	20
รูปที่ 3.8 เครื่องวัดอุณหภูมิ	21
รูปที่ 3.9 ไมโครโฟน	21
รูปที่ 3.10 โปรแกรม True RTA	22

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่3.11 รูปแบบสแต็คแบบกันหอย	26
รูปที่3.12 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสแต็ค ( $COP_s$ ) กับ $x_n$ และ $L_{sm}$	28
รูปที่3.13 พลังงานที่สูญเสียจากการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ	32
รูปที่3.14 รูปแบบความยาวท่อ $\lambda/4$ ใช้ประกอบการคำนวณ	32
รูปที่3.15 แสดงผลการคำนวณผ่าน โปรแกรม Microsoft Office Excel	33
รูปที่3.16 การเปลี่ยนแปลง $\Delta SPL$ (dB) ที่ความถี่ 300 ถึง 400 Hz	34
รูปที่4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.4^\circ C$	35
รูปที่4.2 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.7^\circ C$	36
รูปที่4.3 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.5^\circ C$	36
รูปที่4.4 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.1^\circ C$	37
รูปที่4.5 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.0^\circ C$	37
รูปที่4.6 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.9^\circ C$	38
รูปที่4.7 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.3^\circ C$	38
รูปที่4.8 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ C$	39
รูปที่4.9 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.5^\circ C$	39
รูปที่4.10 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.1^\circ C$	40
รูปที่4.11 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.2^\circ C$	40
รูปที่4.12 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ C$	41

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่4.13 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.6^\circ\text{C}$	42
รูปที่4.14 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	42
รูปที่4.15 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	42
รูปที่4.16 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 1.1^\circ\text{C}$	43
รูปที่4.17 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	43
รูปที่4.18 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.9^\circ\text{C}$	44
รูปที่4.19 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	44
รูปที่4.20 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	45
รูปที่4.21 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.6^\circ\text{C}$	45
รูปที่4.22 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.8^\circ\text{C}$	46
รูปที่4.23 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	46
รูปที่4.24 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	47
รูปที่4.25 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	47
รูปที่4.26 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 1.5$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.8^\circ\text{C}$	48
รูปที่4.27 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ $X_h = 2.0$ ซม. $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$	48
รูปที่4.28 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสเต็มเท่ากับ 0.4 มม	49
รูปที่4.29 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสเต็มเท่ากับ 0.5 มม.	49

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่4.30 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.6 มม.	50
รูปที่4.31 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.4 มม.	50
รูปที่4.32 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.5 มม.	51
รูปที่4.33 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.6 มม.	51
รูปที่4.34 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.4 มม.	52
รูปที่4.35 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.5 มม.	52
รูปที่4.36 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.6 มม.	53
รูปที่4.37 กราฟแสดงค่าที่ดีที่สุดของการทดลอง	54
รูปที่4.38 เปอร์เซ็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสแต็กที่ทำจากแผ่นพลาสติกที่ $f=336$ Hz	55
รูปที่4.39 เปอร์เซ็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสแต็กที่ทำจากแผ่นพลาสติกที่ $f=350$ Hz	55
รูปที่4.40 เปอร์เซ็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสแต็กที่ทำจากแผ่นพลาสติกที่ $f=398$ Hz	56

## ลำดับสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$a$	ความเร็วเสียง	(m/s)
$A$	Cross-sectional area	(m)
$B$	Blockage ratio	(ตัวแปรไร้มิติ)
$c_p$	ค่าความร้อนจำเพาะ	(J/kg K)
$COPs$	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ	(ตัวแปรไร้มิติ)
$D$	Drive ratio	(ตัวแปรไร้มิติ)
$D_s$	เส้นผ่านศูนย์กลางของสแต็ค	(m)
$D_t$	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ	(m)
$f$	ความถี่	(Hz)
$k$	Wave number	(m <sup>-1</sup> )
$K$	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ	(W/m K)
$l$	ระยะความหนาครั้งหนึ่งของสแต็ค	(m)
$L_s$	ความยาวของสแต็ค	(m)
$L_{sn}$	ความยาวปกติของสแต็ค	(ตัวแปรไร้มิติ)
$p_m$	ความดันเฉลี่ย	(Pa)
$p_0$	Dynamic pressure amplitude	(Pa)
$Q_{cn}$	Normalized cooling power	(ตัวแปรไร้มิติ)
$T_c$	อุณหภูมิค้ำานเย็น	(K or °C)

## ลำดับสัญลักษณ์(ต่อ)

$T_h$	อุณหภูมิด้านร้อน	(K or $^{\circ}$ C)
$T_m$	อุณหภูมิเฉลี่ย	(K or $^{\circ}$ C)
$W_n$	Normalized acoustic power	(ตัวแปรไร้หน่วย)
$x_h$	ระยะห่างจากปลายท่อของสแต็คด้านร้อน	(m)
$x_s$	ระยะห่างจากปลายท่อถึงกึ่งกลางสแต็ค	(m)
$y_0$	ระยะครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างชั้นแผ่นบาง	(m)
$\gamma$	Ratio of isobaric to isochoric specific heats	(ตัวแปรไร้หน่วย)
$\Delta T$	อุณหภูมิแตกต่าง	(K or $^{\circ}$ C)
$\Delta T_m$	อุณหภูมิเฉลี่ยแตกต่าง	(K or $^{\circ}$ C)
$\Delta T_{mn}$	Normalized temperature difference	(ตัวแปรไร้หน่วย)
$\delta_k$	ระยะทางที่ความร้อนสามารถแผ่ขึ้นไปสู่ของไหล	(m)
$\delta_{kn}$	ระยะทางปกติที่ความร้อนสามารถแผ่ขึ้นไปสู่ของไหล	(ตัวแปรไร้หน่วย)
$\delta_v$	ระยะทางที่ของไหลได้รับผลจากความหนืด	(m)
$\lambda$	ความคลื่นเสียง	(m)
$\Pi$	Perimeter	(ตัวแปรไร้หน่วย)
$\rho$	ความหนาแน่นของของไหลทำงาน	(kg/m <sup>3</sup> )
$\Sigma$	Viscous stress tensor	(ตัวแปรไร้หน่วย)
$\sigma$	Prandtl number	(ตัวแปรไร้หน่วย)
$\omega$	ความถี่เชิงมุม	(rad/s)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ

ระบบทำความเย็นเทอร์โมอะคูสติก เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับการสนใจและพัฒนาในต่างประเทศซึ่งเทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาด และมีความเป็นไปได้ที่ในอนาคตจะนำมาแทนที่ระบบทำความเย็นแบบอัดไอที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกจะอาศัยปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างพลังงานเสียงและพลังงานความร้อน คลื่นเสียงที่ใส่เข้าไปจะเคลื่อนที่ในท่อปิดภายใต้ความดันคงที่ ภายในท่อจะมีสแต็คซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่จะเปลี่ยนรูปคลื่นเสียงไปเป็นพลังงานความร้อนซึ่งจะทำให้ปลายของสแต็คมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยด้านหนึ่งอุณหภูมิจะสูงกว่าอีกด้านหนึ่ง (อุณหภูมิเทียบกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม) จะทำการถ่ายเทความร้อนออกแล้วนำด้านที่อุณหภูมิต่ำไปใช้งาน โดยต่อเข้ากับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(Heat exchanger) จากที่กล่าวมาหลักการทำงานข้างต้นมีอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหวน้อยชิ้น ไม่ซับซ้อน จึงง่ายต่อการดูแลรักษา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงรูปแบบของสมการทางเทอร์โมอะคูสติกอย่างต่อเนื่อง เพราะสมการดังกล่าวจะอยู่ในรูปเชิงซ้อน หากผลเฉลยยาก ปัจจุบันได้มีการลดรูปให้เป็นสมการเชิงเส้น ซึ่งง่ายแก่การเข้าใจ เรียกว่า ทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้น จากวิธีนี้ ทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้น ได้ถูกพิสูจน์แล้วและใช้ออกแบบเครื่องทำความเย็นได้จริง และได้มีการผลิตเครื่องทำความเย็นออกมาในรูปแบบ เช่น ตู้แช่ไอศกรีม ตู้เย็น แอร์ เครื่องหล่อเย็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาขั้นตอนการออกแบบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกด้วยทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้น

1.2.2 เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกด้วยทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้น

1.2.3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก



### 1.3 ขอบเขต

ศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้นจึงต้องมีการสร้างชุดทดสอบด้วยวัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายโดยมีข้อกำหนดดังนี้

1.3.1 ให้อากาศเป็นสารทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศ

1.3.2 ใช้สแต็คแบบก้นหอย

1.3.3 หน่วยกำเนิดเสียงแบบคลื่นนิ่ง

โดยจะทำการศึกษาตัวแปรต่อไปนี้

1.3.4 หาช่วงความถี่ของคลื่นเสียงที่ 300-400 Hz โดยเลือกความถี่มาอย่างน้อย 3 ค่า และทำการทดลองในท่อที่มีความยาวท่อ  $n(\lambda/4)$  เมื่อ  $n=1, 2, 3, 4, \dots$

1.3.5 ระยะการวางสแต็คในท่อห่างจากปลายท่อจำนวน 3 ค่า ช่วงระหว่าง 1.0 -10.0 ซม.

1.3.6 ช่วงระยะห่างระหว่างชั้นของแผ่นบางของสแต็คเท่ากับ 0.2 -1.1 มม. โดยเลือกมา 3 ค่า

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องต้นแบบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

1.4.2 เข้าใจกระบวนการของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้น

1.4.3 นำเข้ามูลที่ได้ศึกษาไปปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

### 1.5 ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน

กิจกรรม	2553						2554		
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
หาหัวข้อโครงการ									
รวบรวมข้อมูล									
สร้างเครื่องต้นแบบ									
ทำการทดลอง									
สรุปและจัดทำรูปเล่ม									

## 1.6 งบประมาณที่ใช้

1.6.1 ค่าวัสดุอุปกรณ์

1.6.2 ค่าเช่าเล่ม โครงการงาน

รวมเป็นเงิน 2,000 บาท (สองพันบาทถ้วน)



## บทที่ 2

### ทฤษฎี และ การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยภายในประเทศ

ภาวิษฐ์ กาญจนาวดี ทำการศึกษาสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยทำการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบการทำงานเย็นเทอร์โมอะคูสติกโดยใช้ทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกเชิงเส้น ชุดทดสอบที่ได้จัดสร้างขึ้นใช้อากาศภายใต้ความดันบรรยากาศเป็นสารทำงาน สเต็กที่ใช้เป็นแบบก้นหอย และใช้แหล่งกำเนิดเสียงแบบคลื่นนิ่ง ผลการทดลองจะพิจารณาที่อุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นเป็นหลัก เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการวัดผล ซึ่งพบว่าชุดทดสอบที่จัดสร้างขึ้นสามารถทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ 23.5 องศาเซลเซียสที่ความถี่ 331 เฮิรตซ์ (ภาวิษฐ์, 2552)

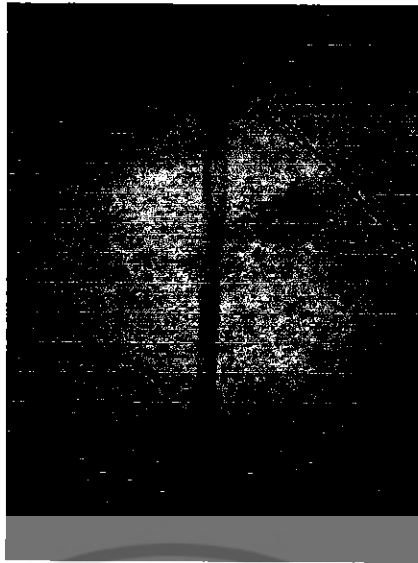


รูปที่ 2.1 ชุดทดสอบของ ภาวิษฐ์ กาญจนาวดี  
ที่มา: ภาวิษฐ์ (2552)

สว่างทิตย์ และคณะ เสนอการออกแบบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมจากสมการเทอร์โมอะคูสติก เนื่องจากสมการเทอร์โมอะคูสติกของระบบมีความซับซ้อนมาก ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของ Differential-Algebraic Equation และหาเกรเดียนต์ของฟังก์ชันได้ยาก ผู้วิจัยจึงใช้วิธีหาค่าที่

เหมาะสมโดยไม่ต้องใช้เกรเดียนต์ แต่ใช้วิธีสมการเชิงเดี่ยว (Simplex Model) และหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งได้คำตอบทั้งหมดของโดเมน ทำให้คำตอบที่ได้เป็นค่าเหมาะสมสูงสุดที่แท้จริง (Global Optimal Solution) ผลจากการหาค่าด้วยวิธีนี้เปรียบเทียบกับ การทดลองของ Hofler ได้ผลที่สอดคล้องกัน (สว่างทิพย์, 2549)

สว่างทิพย์ และคณะ สร้างชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกด้วยวัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย ชุดทดสอบประกอบด้วย ลำโพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 ซม. ความต้านทาน 8 โอห์ม กำลังสูงสุดขนาด 10 วัตต์ บรรจุในกล่องพลาสติก โดย Function Generator ส่งสัญญาณรูปไซน์ผ่าน Power Amplifier เพื่อขยายสัญญาณก่อนเข้าลำโพงในชุดทดสอบด้านบนฝากล่องลำโพงต่อเข้ากับท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ความยาวท่อ 55 ซม. และหนา 0.15 ซม. ใช้อากาศเป็นสารทำงาน อีกด้านหนึ่งของปลายท่อแก้วปิดด้วยจุกอุดท่อที่เป็นยางสำหรับสแต็กเป็นแบบกันหอย โดยสแต็กมีความยาว 10 ซม. สแต็กที่ใช้ทดลองทำจากแผ่นพลาสติกบางจำนวน 3 แบบ ระยะห่างระหว่างชั้นแผ่นบางของสแต็ก 0.2, 0.8 และ 1.1 มม. และสแต็กอีกแบบทำจากแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็ก 1.1 มม. ปลายทั้งสองด้านของสแต็กสอดเส้นทองแดงบางไว้ เพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน ที่พื้นผิวทองแดงนั้นติดเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิ โดยสายเทอร์โมคัปเปิลถูกสอดผ่านจุกยางด้านบนของท่อแก้วลงมาที่สแต็ก การทดลองที่ความถี่คลื่นเสียง 360 เฮิรตซ์ แบบคลื่นนิ่ง โดยใช้กำลังไฟฟ้า 2.6 วัตต์ ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างสองด้านของสแต็กประมาณ 5 องศาเซลเซียส โดยใช้สแต็กที่มีระยะห่างระหว่างชั้น 0.8 มม. ระยะห่าง 0.8 มม. นี้ไม่ได้อยู่ในช่วงตามทฤษฎี (0.3 ถึง 0.6 มม.) เนื่องจากต้องชดเชยระยะห่างจากการสอดเส้นทองแดงบางที่ปลายสแต็ก และผลจากการเปรียบเทียบแผ่นบางของสแต็กระหว่างพลาสติก และอลูมิเนียม พบว่าสแต็กที่ทำจากพลาสติกให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมากกว่าสแต็กที่ทำจากอลูมิเนียมอย่างชัดเจน (สว่างทิพย์, 2547)



รูปที่ 2.2 ชุดทดสอบของ สว่างทิตซ์ และคณะ  
ที่มา: สว่างทิตซ์ (2549)

## 2.2 งานวิจัยต่างประเทศ

ทฤษฎีทางเทอร์โมอะคูสติกเริ่มต้นในปี 1868 เมื่อ Kirchhoff คำนวณการลดทอนลงของเสียงในท่อเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวท่อ และคลื่นเสียงในก๊าซ ต่อมา Kramers ได้ทำการทดลอง โดยพัฒนาการทดลองมาจาก Taconis ซึ่งเป็นการทดลองที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมอะคูสติก แต่ผลที่ได้ไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากขนาดของเครื่องที่ใหญ่เกินไป หลังจากนั้นอีก 20 ปี Rott ได้สร้างผลงานมากมายที่เป็นจุดเริ่มต้นของความเข้าใจในการทดลองของ Taconis ในที่สุด Rott และคณะก็กำหนดรากฐานของทฤษฎีเสียงที่เหมาะสมเพื่อเป็นพื้นฐานการทดลองทางเทอร์โมอะคูสติกทั้ง แบบ Prime Move และแบบ Refrigerator โดยแบบ Prime Move จะเป็นการใส่พลังงานความร้อนแล้วได้งานออกมา ส่วนแบบ Refrigerator จะเป็นการใส่งานแล้วได้พลังงานความร้อนออกมา (Swift, 1988)

Swift ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ต่อจาก Rott เพื่ออธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกที่เกิดจากของไหลเมื่อถูกสั่นด้วยคลื่นเสียงแบบคลื่นนิ่ง ที่มีแผ่นบางวางขนานกับทิศทางการสั่นของคลื่นนิ่ง หรือสแตกที่เป็นอุปกรณ์หลักของเครื่องทำความเย็น สมการคณิตศาสตร์มาจากสมการต่อเนื่อง สมการ โมเมนตัม และสมการพลังงานของของไหลที่สั่นบนแผ่นบาง แล้วทำการลดรูปสมการลงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ จากนั้นหาผลเฉลยด้วยวิธี Complex Exponential ได้ผลเฉลยของอุณหภูมิ, Heat Flux, กำลังเสียง, ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) และประสิทธิภาพ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังยกตัวอย่างเครื่องทำความเย็น หรือทำความร้อน และเครื่องต้นกำลังในแบบต่างๆ เพื่อให้เข้าใจการทำงานยิ่งขึ้น ปัจจุบันทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติกของ

Swift ได้รับการยอมรับ และนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง จึงถือได้ว่าเป็นทฤษฎีพื้นฐานในการสร้างเครื่องจักรกลเทอร์โมอะคูสติก นอกจากนี้ Swift และผู้ร่วมงานยังได้พัฒนาโปรแกรม DELTAEC (Design Environment for Low-amplitude ThermoAcoustic Energy Conversion) ขึ้นมาใช้ในการศึกษา และออกแบบเครื่องเทอร์โมอะคูสติก (Swift and Ward, 2007)

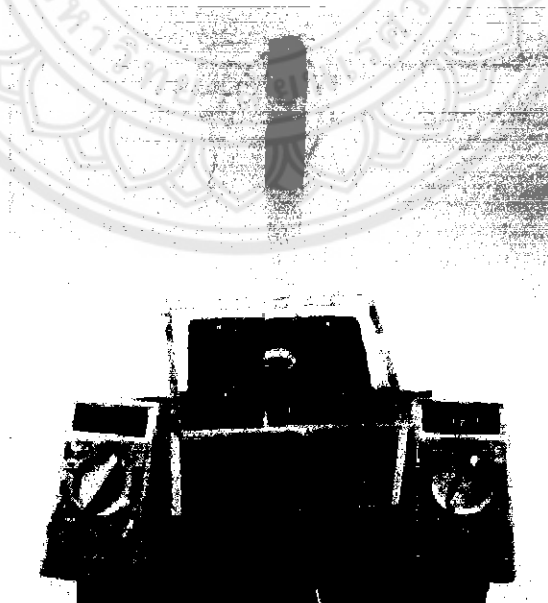
Herman and Wetzel เสนอขั้นตอนการสร้างเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยอาศัยสมการลดรูปเชิงเส้น (Simplified Linear Model) พิจารณาในส่วนการประมาณค่าเงื่อนไขขอบเขตของสแต็คขนาดสั้นสำหรับเครื่องทำความเย็น ซึ่งมีสมการพลาซซ์ของเอนทาลปี และพลาซซ์ของงานเป็นสมการหลัก แล้วแปลงสมการเป็น Normalized เพื่อใช้ในการออกแบบระบบ และหาขนาดกับระยะที่เหมาะสมของอุปกรณ์ทำความเย็น โดยอธิบายแยกส่วนดังนี้ Thermoacoustic Core (Stack), Resonance Tube, Heat Exchangers และ Acoustic Driver ผลจากการคำนวณแบบจำลองลดรูปพบว่าประสิทธิภาพคาร์โนต์มีค่าประมาณ 40-50% ที่ Thermoacoustic Core (Herman and Wetzel, 1996)

Tijani เสนอขั้นตอนการออกแบบลักษณะเดียวกับ Herman and Wetzel (1996) โดยใช้ทฤษฎีของ Swift ลดรูปเชิงเส้น แล้วแปลงสมการเป็น Normalized สำหรับการออกแบบระบบ และการหาขนาดกับระยะที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีการอธิบายขอบเขตตัวแปรและแนวทางสำหรับการเลือกตัวแปรที่จำเป็นต่างๆ ในการคำนวณ การหาค่าขนาดของอุปกรณ์ที่เหมาะสมได้อธิบายแยกส่วน เริ่มจากการเลือกตัวแปร, หาค่าที่เหมาะสมของสแต็ค, Resonator, Heat exchanger และ Acoustic Driver สุดท้ายผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม DELTAE (Design Environment for Low-amplitude Thermo Acoustic Engines) (Swift and Ward, 2004) ซึ่งเป็นเวอร์ชันที่เก่ากว่า DELTAEC เพื่อหาคำตอบที่ใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น (Tijani, 2002)

Tijani อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยสร้างเครื่องที่ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นสารทำงาน เริ่มจากการอธิบายการเลือกวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการสร้าง การติดตั้งท่อสุญญากาศ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าต่างๆ และอุปกรณ์ที่ใช้เก็บบันทึกผลการทดลอง ผลการทดลองแสดงถึงพฤติกรรมที่ดี โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ - 65 องศาเซลเซียส โดยมีช่วงอุณหภูมิทำงานประมาณ 80 องศาเซลเซียส (Tijani, 2002)

Russell and Weibull สร้างชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก ชุดทดสอบประกอบด้วย ตู้ลำโพงขนาด 10.16 ซม. กำลังสูงสุดขนาด 40 วัตต์ โดยเครื่อง Sine Wave Generator ส่งสัญญาณรูปไซน์ผ่าน Power Amplifier (100 วัตต์) เพื่อขยายสัญญาณก่อนเข้าลำโพง ในชุดทดสอบ ด้านบนตู้ลำโพงมีแผ่นพลาสติกที่ต่อกับท่อพลาสติกวางอยู่ โดยมี O-ring ชั้นกลางระหว่างแผ่นพลาสติกกับตู้ลำโพง โดยท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 ซม. ความยาว 23 ซม. ชุดทดสอบใช้อากาศเป็นสารทำงาน ปลายด้านหนึ่งของท่อปิดด้วยจุกอุดท่ออลูมิเนียม สำหรับสแต็กเป็นแบบกั้นหอย ซึ่งทำมาจากฟิล์มถ่ายภาพ ขนาดความยาวสแต็ก 3.5 ซม. ระยะห่างระหว่างชั้นแผ่นบางของสแต็ก 0.34 มม. สแต็กวางห่างจากปลายท่อด้านจุกอุดท่อ 4 ซม. และบริเวณปลายทั้งสองด้านของสแต็กมีเทอร์โมคัปเปิลวางลอยสำหรับวัดค่าอุณหภูมิของอากาศบริเวณนั้น โดยสายเทอร์โมคัปเปิลเปิดถูกสอดผ่านจุกอุดท่อด้านบนลงมาที่สแต็ก

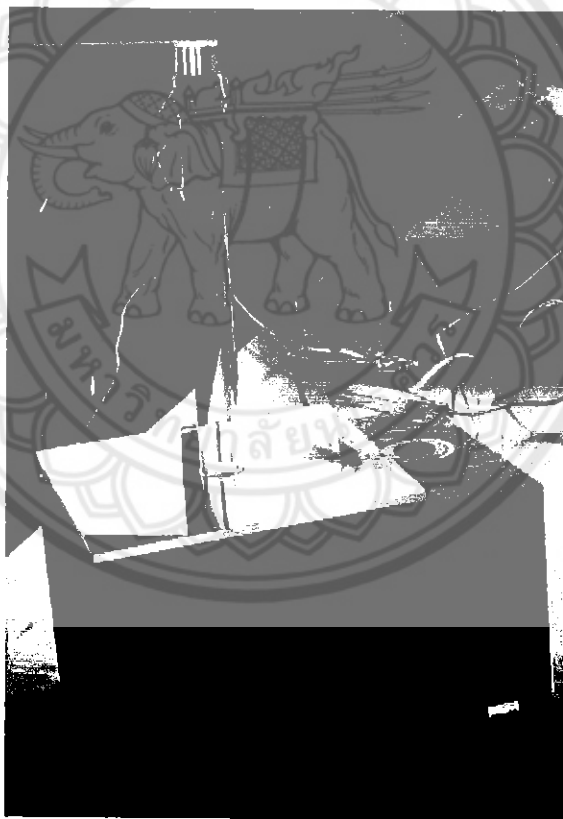
การทดลองที่ความถี่คลื่นเสียง 385 เฮิรตซ์ แบบคลื่นนิ่ง ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสองด้านของสแต็กประมาณ 15.5 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิด้านร้อนเปลี่ยนแปลงประมาณ 5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิด้านเย็นเปลี่ยนแปลงประมาณ 10.5 องศาเซลเซียส) โดยใช้เวลา 240 วินาที นอกจากผลความแตกต่างของอุณหภูมิที่แสดงแล้ว Russell ได้อ้างว่าเมื่อเวลาผ่านไป 600 วินาที สแต็กมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสองด้านประมาณ 25.6 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิด้านร้อนประมาณ 5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิด้านเย็น 20.6 องศาเซลเซียส) (Russell and Weibull, 2002)



รูปที่ 2.3 ชุดทดสอบของ Russell and Weibull

ที่มา: Russell (2002)

Newman สร้างชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกลักษณะเดียวกับ Russell and Weibull (2002) โดยชุดทดสอบประกอบด้วยลำโพงขนาด 15.24 ซม. โดยเครื่อง Function Generator ส่งสัญญาณรูปไซน์ ผ่าน Power Amplifier (40 วัตต์) เพื่อขยายสัญญาณก่อนเข้าลำโพง ด้านบนตู้ลำโพงกับแผ่นพลาสติก อูครอยรั้วของสารทำงานด้วยซิลิโคน ท่อของชุดทดสอบทำจากพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ความยาว 25 ซม. โดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน ปลายด้านหนึ่งของท่อปิดด้วยจุกอุดท่ออลูมิเนียม ผิววท่อด้านนอกพันด้วยเส้นลวดทองแดง ตั้งแต่ปลายจุกอลูมิเนียมจนถึงปลายสแต็ก (บริเวณอุณหภูมิด้านสแต็กร้อน) สำหรับสแต็กเป็นแบบกันหอย สแต็กที่ใช้ ระยะที่วาง และการวัดค่าอุณหภูมิของอากาศเหมือนกับการทดลองของ Russell การทดลองที่ความถี่คลื่นเสียง 340 เฮิร์ตซ์ แบบคลื่นนิ่ง ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสองด้านของสแต็กประมาณ 28 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 240 วินาที (Newman, 2006)



รูปที่ 2.4 ชุดทดสอบของ Newman

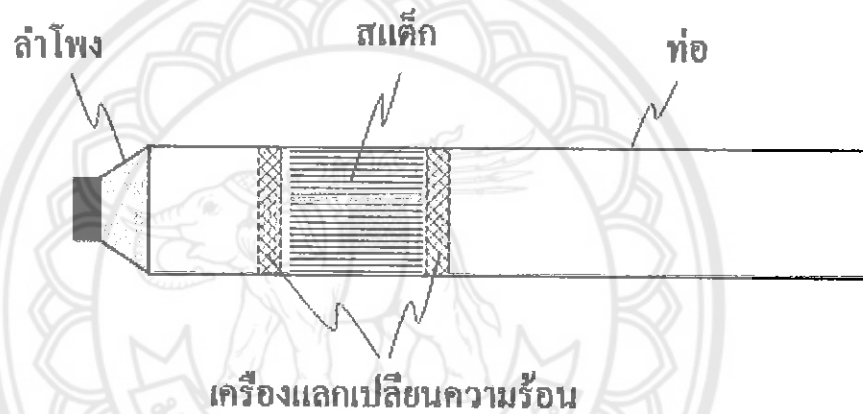
ที่มา: Newman (2006)



## 2.3 ทฤษฎีเทอร์โมอะคูสติก

### 2.3.1 การทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

เครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยทั่วไปประกอบด้วยท่อซึ่งบรรจุก๊าซที่เป็นสารทำงาน, สแต็ก (Stack), อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) และอิเล็กโทรไดนามิกส์ (Electrodynamics) เป็นต้น คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นในท่อมี่ 2 แบบคือ แบบคลื่นนิ่ง (Standing Waves) ดังแสดงในภาพที่ 1 และแบบคลื่นเคลื่อนที่ (Traveling Waves) ภายในท่อจะวางสแต็กในตำแหน่งที่เหมาะสม กรณีคลื่นเสียงเป็นแบบคลื่นนิ่ง และเป็นท่อปลายปิด ในทางอุดมคติแล้วความยาวท่อจะเป็น  $n(\lambda/4)$  โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$  และ  $\lambda$  คือค่าความยาวคลื่น ดังนั้นท่อที่สั้นที่สุดจะมีค่าเท่ากับ  $\lambda/4$



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

ที่มา: Timothy S. Ryan (2006)

อิเล็กโทรไดนามิกส์ หรือ ลำโพง คือ อุปกรณ์ที่ใช้ขับเคลื่อนพลังงานคลื่นเสียงภายในท่อของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก อิเล็กโทรไดนามิกส์มี 2 ลักษณะคือ แบบ Moving Coil (Loudspeaker) หรือลำโพงเครื่องเสียงทั่วไป ราคาไม่แพง ประสิทธิภาพต่ำ เหมาะสำหรับใช้กับพลังงานต่ำ และแบบ Static Coil (Linear Motor) มีส่วนประกอบของทองแดงเป็นจำนวนมาก และการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กมีความซับซ้อนมากกว่าแบบ Moving Coil จึงมีประสิทธิภาพในการเคลื่อน และสร้างกำลังขับเคลื่อนเสียงได้ดี ซึ่งจะทำให้เกิดความดันเสียงที่มาก

สแต็กโดยทั่วไปจะทำจากแผ่นบางจำนวนมากประกอบกันเป็นชั้นๆ โดยในทางทฤษฎีแล้วควรมีระยะห่างของแต่ละชั้นประมาณ 2δ, ถึง 4δ, ซึ่งระยะ 3δ, เป็นระยะที่เหมาะสมที่สุด (Tijani, 2001) โดยที่ δ, คือ Thermal Penetration Depth วัสดุที่ใช้ทำสแต็กควรมี Thermal Conductivity ต่ำ เพื่อไม่ให้มีการถ่ายเทความร้อน โดยทั่วกันทั้งแผ่นบางของสแต็ก หากมีการถ่ายเทความร้อนที่แผ่นบางของสแต็ก ปฏิกิริยาเทอร์โมอะคูสติกจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แต่ละด้านของสแต็ก จะทำหน้าที่ดึงความร้อน และความเย็นออกจากสแต็ก เนื่องมาจากปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกที่สร้างอุณหภูมิที่แตกต่างขึ้นในแต่ละด้านของสแต็ก สำหรับสแต็กด้านอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจะถูกใช้ในการทำความเย็น ในขณะที่อีกด้านซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม จะถ่ายเทความร้อนออกอย่างต่อเนื่องเป็นวัฏจักร

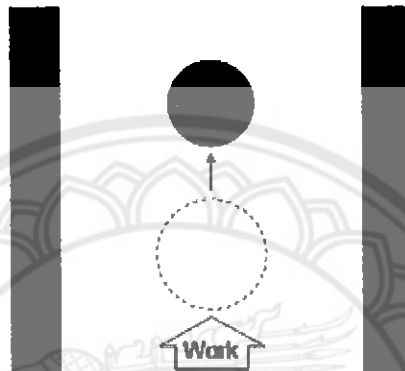
ก๊าซที่บรรจุภายในท่อ โดยทั่วไปเป็นก๊าซที่มีความดันที่สูงกว่าบรรยากาศ ก๊าซเฉื่อยเป็นก๊าซประเภทหนึ่งที่นิยมใช้เป็นสารทำงาน เนื่องจากเสียงเดินทางได้เร็วในก๊าซเฉื่อยเมื่อเทียบกับอากาศ สำหรับก๊าซที่นิยมใช้ในเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก จะมีก๊าซฮีเลียม ไนโตรเจน และอาร์กอน เป็นต้น แต่เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของก๊าซแต่ละตัวแล้ว พบว่าก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในสภาพการทำงานของเครื่อง นอกจากนี้อาจมีการผสมกันระหว่างก๊าซตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเพื่อให้ได้ลักษณะของก๊าซที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง (ภาวิชัย, 2552)

## 2.3.2 การทำงานของของไหลภายในสเต็ม

วัฏจักรการทำงานที่เกิดขึ้นภายในสเต็มสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.2.1 Adiabatic Compression เป็นจังหวะที่ความดันของคลื่นเสียงเป็นบวก ก้อนมวลของของไหล (Gas Parcel) จะถูกผลักไปทางขวาด้วยคลื่นเสียง ในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ไปปริมาตรของก้อนมวลก็ถูกบีบอัดตัวลงด้วย ทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้นกว่าที่แผ่นบางทางด้านบน

### 1) Adiabatic Compression

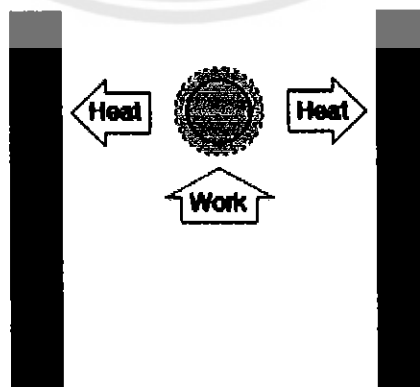


รูปที่ 2.6 การอัดแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน

ที่มา: Timothy S. Ryan (2006)

2.3.2.2 Heat Transfer เมื่อก้อนมวลของของไหลเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งบนสุดของสเต็ม ความร้อนในก้อนมวลจะถ่ายเทไปที่แผ่นบาง ทำให้อุณหภูมิที่แผ่นบางทางด้านบนสูงขึ้น

### 2) Isobaric Heat Transfer

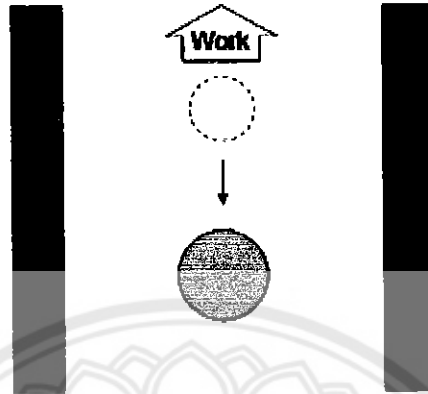


รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อน

ที่มา: Timothy S. Ryan (2006)

2.3.2.3 Adiabatic Expansion เป็นจังหวะที่ความดันของคลื่นเสียงเป็นลบ ก้อนมวลของของไหลจะเคลื่อนที่มาจากข้างล่างสุดของสแต็ก

### 3) Adiabatic Expansion

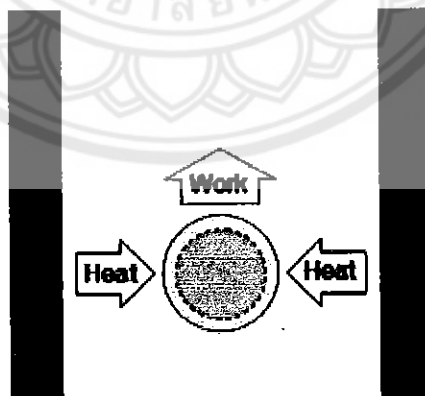


ภาพที่ 2.8 การขยายตัวแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน

ที่มา: Timothy S. Ryan (2006)

2.3.2.4 Heat Transfer ปริมาตรของก้อนมวลจะเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในก้อนมวลต่ำกว่าแผ่นบางทางด้านล่าง จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นบางมายังก้อนมวลของของไหล ซึ่งจะครบรอบการทำงานของวัฏจักร

### 4) Isobaric Heat Transfer



รูปที่ 2.9 การถ่ายเทความร้อน

ที่มา: Timothy S. Ryan (2006)

กระบวนการที่อธิบายข้างต้น ก้อนมวลของของไหลทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง สำหรับกระบวนการที่เกิดขึ้นในแผ่นบางจะเกิดขึ้นแบบต่อเนื่อง โดยมีก้อนมวลของของไหลตัวอื่นมาทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนต่อจากจุดนั้นไปยังอีกจุดหนึ่ง ตลอดทั้งความยาวแผ่นบางของสแต็ก



## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.1 อุปกรณ์

ชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย อุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งเครื่องมือที่จำเป็นในการทดลองดังต่อไปนี้

##### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณและแสดงผล

3.1.1 คอมพิวเตอร์ (โปรแกรม Microsoft Office Excel)

##### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดลอง

###### 3.2.1 ชุดทดสอบ

3.2.1.1 ลำโพง

3.2.1.2 ท่อพลาสติกใส

3.2.1.3 สแต็กแบบกั้นหอย

3.2.2 เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน (Function Generator)

3.2.3 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

3.2.4 เครื่องขยายกำลัง (Power Amplifier)

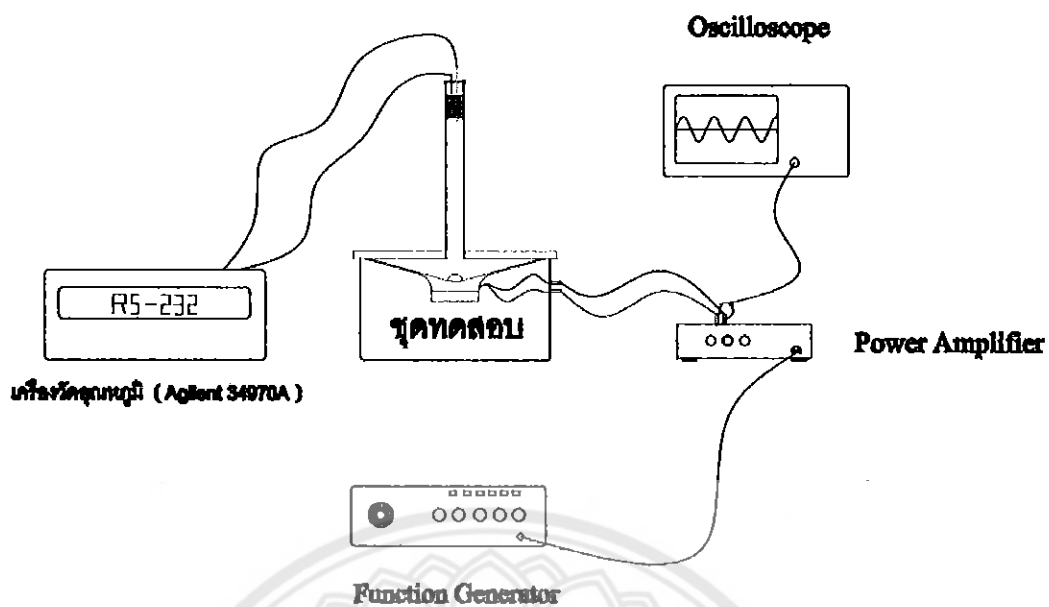
3.2.5 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)

3.2.5.1 สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples type K)

3.2.6 อุปกรณ์วัดความดันเสียง

3.2.6.1 ไมโครโฟน

3.2.6.2 คอมพิวเตอร์ (โปรแกรม TrueRTA)



รูปที่ 3.2 แผนผังการต่อสายสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ สำหรับการทดลอง

### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

#### 3.3.1 ชุดทดสอบ

ชุดทดสอบใช้อากาศเป็นสารทำงานที่ความดันบรรยากาศ ชุดทดสอบนี้ประกอบไปด้วยท่ออะคริลิกที่มีความยาว 25 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ประกอบเข้ากับแผ่นอะคริลิก และวางติดอยู่กับลำโพงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 เซนติเมตร โดยมีการอุดรอยรั่วระหว่างลำโพงกับแผ่นอะคริลิกด้วยกาวซิลิโคน ภายในท่อจะมีสแต็ควางอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม และปลายท่อมีฝาปิดเพื่อรักษาแรงดันภายในท่อ



รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบ

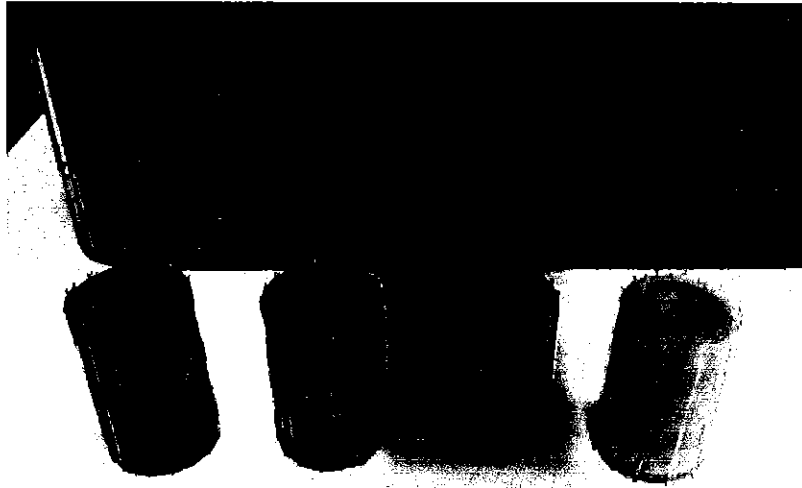
### 3.3.2 สแต็ก (Stack)

สแต็กทำจากแผ่นบาง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D_s$ , กว้าง  $L_s$ , ใช้เอ็นตปลาขนาด  $2y_0$  ยาว  $L_s$  ขึ้นระหว่างแผ่น โดยวางเอ็นตปลาให้มีระยะห่างกัน 5 มิลลิเมตร บนแผ่นบาง สแต็กที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบก้นหอย สำหรับสแต็กที่ใช้ในการทดลองมี 4 แบบ แสดงในตารางที่ 3.1 และ ภาพที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสแต็กแบบก้นหอยที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	วัสดุ	$D_s$ (ซม.)	$L_s$ (ซม.)	$2y_0$ (มม.)
1	ฟิล์ม	2.5	3.5	0.4
2	ฟิล์ม	2.5	3.5	0.5
3	ฟิล์ม	2.5	3.5	0.6
4	พลาสติก	2.5	3.5	0.6





รูปที่ 3.4 สแตกแบบกันหอยที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 แบบ

### 3.3.3 เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน (Function Generator)

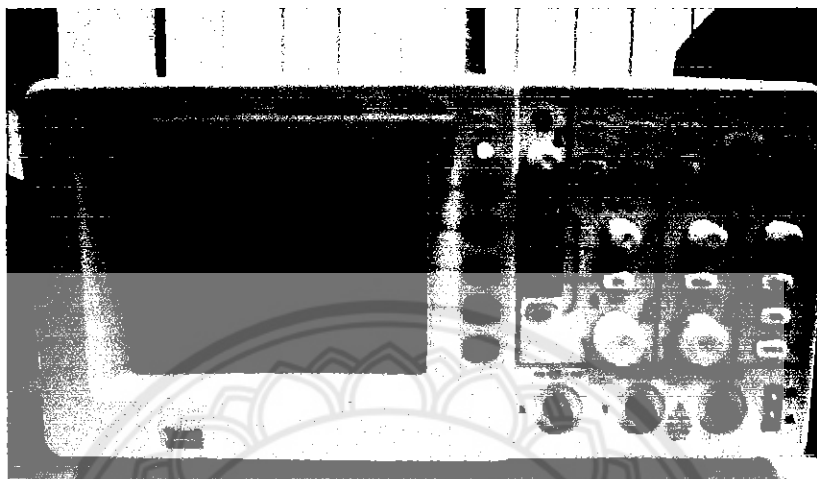
เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณรูปไซน์ โดยมีคุณลักษณะคือ สร้างสัญญาณรูปไซน์



รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน

### 3.3.4 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

เครื่องออสซิลโลสโคป ทำหน้าที่รับสัญญาณจากเครื่องขยายกำลังก่อนเข้าลำโพง เพื่อใช้ดูการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้า สำหรับควบคุมพลังงานที่จ่ายให้ชุดทดสอบ



รูปที่ 3.6 เครื่องออสซิลโลสโคป

### 3.3.5 เครื่องขยายกำลัง (Power Amplifier)

เครื่องขยายกำลัง ทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน แล้วส่งสัญญาณไปยังลำโพงของชุดทดสอบ



รูปที่ 3.7 เครื่องขยายกำลัง

### 3.3.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)

เครื่องวัดอุณหภูมิ และสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทั้งสองด้านของสแต็ก



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดอุณหภูมิ

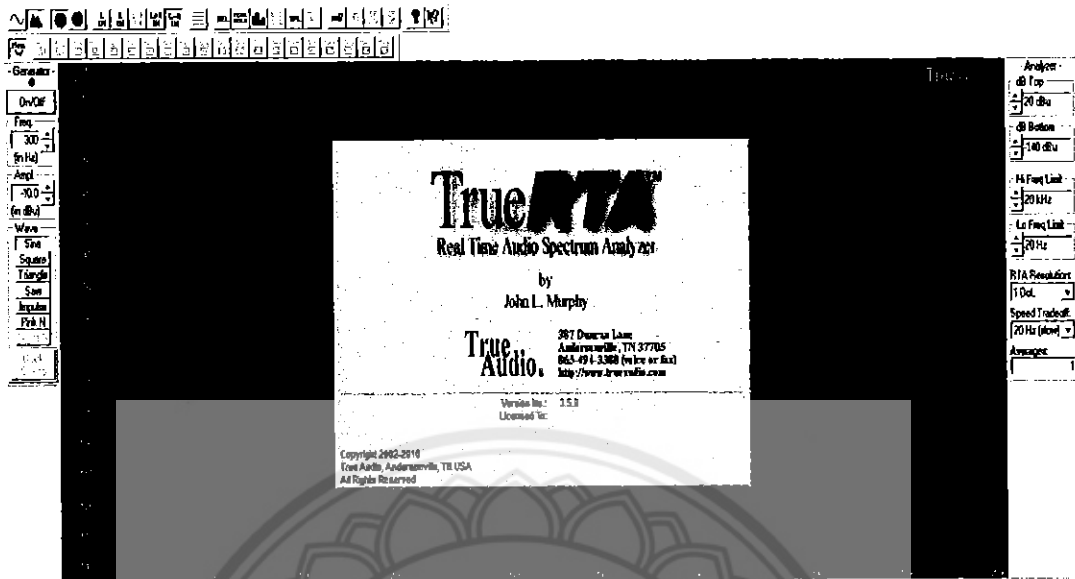
### 3.3.7 อุปกรณ์วัดความดันเสียง

อุปกรณ์วัดความดันเสียง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อหาค่าความดันของเสียงในขั้นตอนการเลือกความถี่คลื่นเสียง ประกอบด้วย ไมโครโฟนที่ทำหน้าที่รับสัญญาณเสียง และโปรแกรม TrueRTA ที่ทำหน้าที่แสดงผลการวัดสัญญาณคลื่นเสียง



รูปที่ 3.9 ไมโครโฟน

### 3.3.8 โปรแกรม True RTA



รูปที่ 3.10 โปรแกรม True RTA

### 3.4 วิธีการดำเนินงาน

ในการทำการทดลองมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

3.4.1 ออกแบบ สร้าง คัดตั้งอุปกรณ์การทดลอง และวางแผนการทดลอง เพื่อจะได้ชุดทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกสำหรับทดลองตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา

3.4.2 เก็บข้อมูลผลการทดลองอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างสองด้านของสแต็ก จากการทดลองในตัวแปรต่างๆ ทั้งหมด ได้แก่ ตำแหน่งการวางของสแต็กภายในท่อ ระยะห่างของแผ่นบาง และความถี่ของคลื่นเสียง

3.4.3 วิเคราะห์ข้อมูล โดยแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆข้างต้นในรูปแบบของกราฟ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ต่อชุดทดสอบนี้

3.4.4 สรุปผลการทดลองที่ได้



### 3.5 การออกแบบชุดทดสอบ

3.5.1 เริ่มจากการออกแบบช่วงอุณหภูมิของการทำงานของเครื่อง (Temperature Difference,  $\Delta T_m$ ) ที่ 20 K และความสามารถทำความเย็นที่ 0.2 W

3.5.2 เลือกความถี่ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องในช่วงความถี่ 300-400 เฮิรตซ์ (ภาวิชญ์, 2552 สว่างทิพย์, 2549 Newman, 2006) ในที่นี้เลือกที่ 350 เฮิรตซ์ และจะสามารถคำนวณหาความยาวท่อของชุดทดสอบได้จากสมการ

$$f = \frac{a}{4L_t} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $a$  = Sound velocity (346 m/s)

แทนค่าในสมการ (3.1) จะได้

$$L_t \approx 25 \text{ cm}$$

ซึ่งความยาวท่อที่นิยมใช้กันทางทฤษฎีมีขนาด  $\lambda/4$  และ  $\lambda/2$  ส่วนมากมักเลือก  $\lambda/4$  เพราะการกระจายพลังงานมากกว่าครึ่งหนึ่งของ  $\lambda/2$  (Tijani, 2002)

3.5.3 Drive Ratio โดยทั่วไปแล้วมีค่าไม่ควรเกิน 0.03 (Tijani, 2002) เพื่อไม่ให้เกิด Nonlinear Effects ในการออกแบบชุดทดสอบนี้จะประมาณที่ 0.02 แทนค่าเพื่อคำนวณหา Dynamic Pressure ( $P_o$ ) จากสมการ

$$D = \frac{p_o}{p_m} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $D$  = Drive Ratio

$p_o$  = Dynamic Pressure

$p_m$  = Average Pressure

Average Pressure คือ ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 100000 Pa

แทนค่าในสมการ (3.2) จะได้

$$P_o = 2000 \text{ Pa}$$

3.5.4 เลือกอากาศเป็นสารทำงานภายในท่อ

3.5.5 Mean Temperature ( $T_m$ ) เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นภายในท่อ โดยกำหนดให้เท่ากับ 300 K แล้วคำนวณหา  $\Delta T_{mn}$  จากสมการ

$$\Delta T_{mn} = \frac{\Delta T_m}{T_m} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\Delta T_{mn}$  = Normalized temperature difference  
 $\Delta T_m$  = Temperature gradient  
 $T_m$  = Mean temperature

แทนค่าในสมการ (3.3) จะได้

$$\Delta T_{mn} = 0.0667$$

ตารางที่ 3.2 ตารางค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

Operating Parameters	
Operating frequency :	$f = 350 \text{ Hz}$
Average pressure :	$p_m = 100000 \text{ Pa}$
Dynamic Pressure :	$p_o = 2000 \text{ Pa}$
Drive Ratio :	$D = 0.02$
Mean Temperature :	$T_m = 300 \text{ K}$
Temperature gradient:	$\Delta T_m = 20 \text{ K}$
Normalized temperature difference :	$\Delta T_{mn} = 0.0667$
Cooling power:	$Q_{cn} = 0.2 \text{ W}$

15516122

ร/ร.

176710

2553

ตารางที่ 3.3 ตารางค่าคงที่ของสารทำงาน

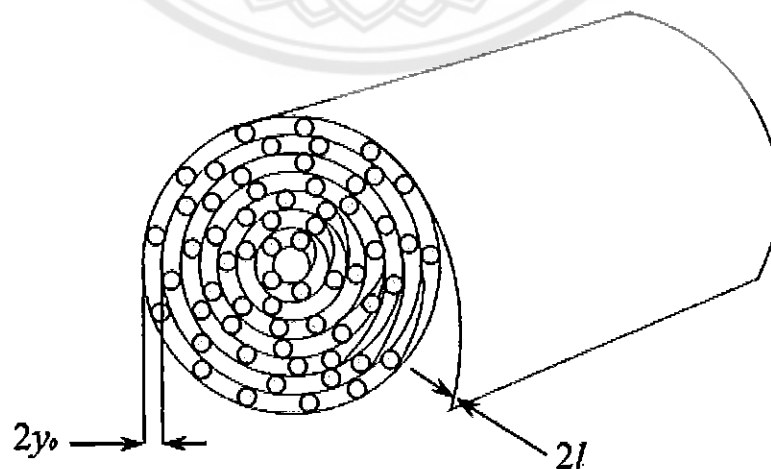
Working gas parameters	
Thermal Conductivity :	$K = 0.02619 \text{ w/m.K}$
Sound velocity :	$a = 346 \text{ m/s}$
Specific heats Ratio:	$\gamma = 1.4$
Heat capacity :	$C_p = 1.005 \text{ kJ/kg.K}$
Gas density :	$\rho_m = 1.23 \text{ kg/m}^3$
Dynamics viscosity :	$\mu = 1.79 \text{E-5 kg/s.m}$
Prandtl Number :	$\sigma (\text{Pr}) = 0.7123$

### 3.6 การออกแบบสแต็ค

สำหรับชุดทดสอบนี้ใช้สแต็คแบบก้นหอย วัสดุที่ใช้ทำสแต็คนั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือ  $K$ , ต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นบางของสแต็ค โดยระยะห่างระหว่างชั้นแผ่นบางของสแต็ค หรือ  $2y_0$  อยู่ในช่วง  $2\delta_k$  ถึง  $4\delta_k$  ซึ่งระยะที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่  $3\delta_k$  (Tijani, 2001) เพราะฉะนั้นจะได้

$$2y_0 = 3\delta_k \quad (3.4)$$

นำค่า  $\delta_k$  ที่คำนวณได้จากสมการ (3.5) มาแทนในสมการ (3.4) จะได้  $2y_0 = 0.42 \text{ mm}$



ภาพที่ 3.11 รูปแบบสแต็คแบบก้นหอย  
ที่มา: ภาวิชญ์ (2552)



The thermal penetration depth ( $\delta_k$ ) and viscous penetration depth ( $\delta_v$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2K}{\rho_m c_p \omega}} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $K$  = Gas thermal Conductivity

$\rho_m$  = Gas density

$c_p$  = Gas heat capacity

$\omega$  = angular frequency

แทนค่าในสมการ (3.5) จะได้

$$\delta_k = 0.14 \text{ mm}$$

และ

$$\omega = 2\pi f \quad (3.6)$$

เมื่อ  $f$  = Operating frequency

แทนค่าในสมการ (3.6) จะได้

$$\omega = 2,198 \text{ rad/sec}$$

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho_m \omega}} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\mu$  = Gas Viscosity

แทนค่าในสมการ (3.7) จะได้

$$\delta_v = 0.12 \text{ mm}$$

Normalized thermal penetration depth  $\delta_{kn}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.8)

$$\delta_{kn} = \frac{\delta_k}{y_0} \quad (3.8)$$

แทนค่าในสมการ (3.8) จะได้

$$\delta_{kn} = 0.667$$

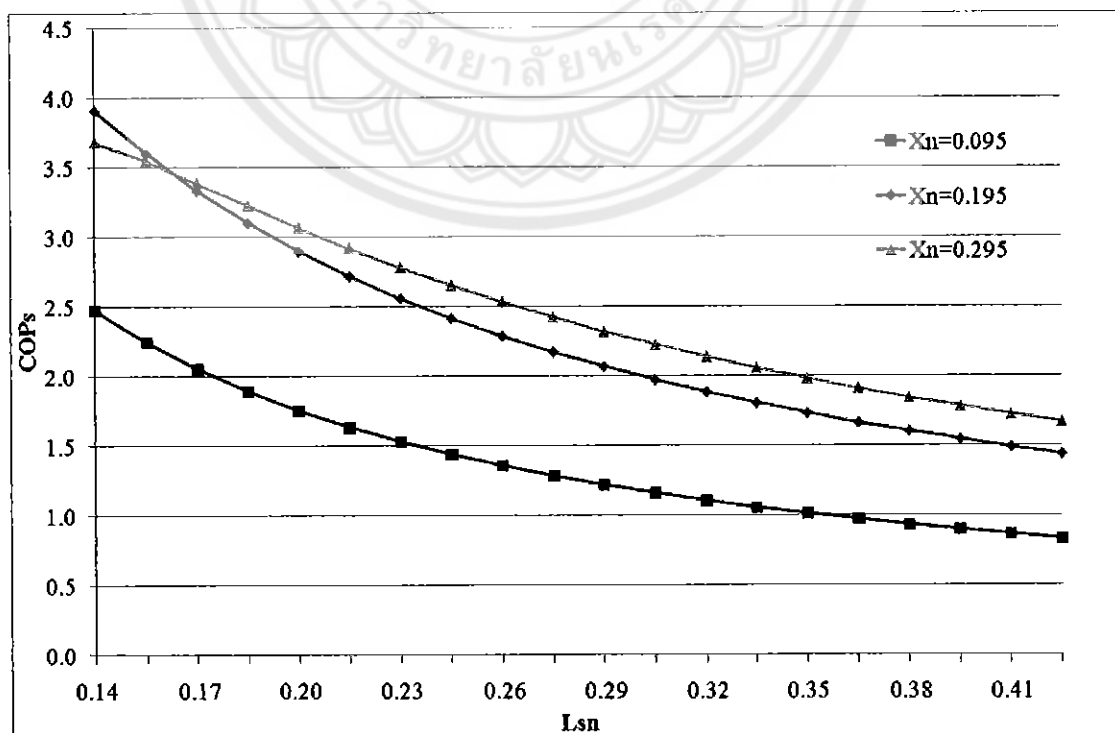
The blockage ratio ใช้คำนวณหา  $l$  จากสมการ (3.9) โดยใช้  $B = 0.8$  เพราะเป็นค่าที่นิยมใช้มาก (Tijani, 2001) แทนค่าลงในสมการ

$$B = \frac{y_0}{y_0 + l} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $l = \text{Half stack plate thickness}$   
แทนค่าในสมการ (3.9) จะได้

$$l = 0.0525 \text{ mm}$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสแต็ก (COP<sub>s</sub>) กับ Normalized Center Position ( $x_n$ ) และ Normalized Stack Length ( $L_{sn}$ ) ใช้พิจารณาเลือก  $x_n$  และ  $L_{sn}$  ได้อย่างเหมาะสม (ภาวิชัย, 2552)



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสแต็ก (COP<sub>s</sub>) กับ  $x_n$  และ  $L_{sn}$

การเลือก  $x_n$  และ  $L_{sn}$  ให้เลือกสองตัวแปรนี้ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และเลือกค่า  $COP_s$  มากที่สุดที่เป็นไปได้ ในรูปที่ 3.11 นั้นเส้นกราฟ  $x_n = 0.195$  ที่ตำแหน่ง  $L_{sn} = 0.210$  เป็นค่าที่เหมาะสม (ภาวิชญ์, 2552)

หลังจากเลือก  $x_n$  และ  $L_{sn}$  แล้ว นำค่าที่ได้มาหาความยาวของสแตกหรือ  $L_s$  จากสมการ (3.10) และหาตำแหน่งวางสแตกที่ระยะจากจุดกึ่งกลางสแตกถึงปลายท่อหรือ  $x_s$  จากสมการ (3.11)

$$L_{sn} = kL_s \quad (3.10)$$

เมื่อ  $L_{sn}$  = normalized stack length

$L_s$  = Stack length

$k$  = Wave number

แทนค่าในสมการ (3.10) จะได้

$$L_s = 35 \text{ mm}$$

$$x_n = kx_s \quad (3.11)$$

เมื่อ  $x_n$  = normalized stack center

$x_s$  = stack center

$k$  = Wave number

แทนค่าในสมการ (3.11) จะได้

$$x_s = 31 \text{ mm}$$

$$k = \frac{\omega}{a} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $\omega$  = angular frequency

$a$  = sound velocity

แทนค่าในสมการ (3.12) จะได้

$$k = 6.35 \text{ m}^{-1}$$

หาพื้นที่หน้าตัดของสเต็มจากสมการ Normalized Cooling Power ( $Q_{cn}$ )

$$Q_{cn} = \frac{Q_c}{p_m a A} \quad (3.13)$$

แทนค่าในสมการ (3.13) จะได้

$$A = 0.00064 \text{ m}^2$$

และนำไปหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D_t$  จากสมการ (3.14)

$$D_t = 2 \cdot \left( \sqrt{\frac{A}{\pi}} \right) \quad (3.14)$$

แทนค่าในสมการ (3.14) จะได้

$$D_t = 0.028 \text{ m}$$

หาระยะของสเต็มห่างจากปลายท่อ

$$x_h = x_s - \frac{L_s}{2} \quad (3.15)$$

แทนค่าในสมการ (3.15) จะได้

$$x_h = 0.014 \text{ mm}$$

สมการ Normalized Cooling Power ( $Q_{cn}$ )

$$Q_{cn} = -\frac{\delta_{kn} D^2 \sin(2X_n)}{8\gamma(1+\sigma)\Lambda} \times \left[ \frac{\Delta T_{mn}(1+\sqrt{\sigma}+\sigma) \tan(x_n)}{BL_{sn}(\gamma-1)(1+\sqrt{\sigma})} - (1 + \sqrt{\sigma} - \sqrt{\sigma}\delta_{kn}) \right] \quad (3.16)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการ (3.16) จะได้

$$Q_{cn} = 8.97 \times 10^{-6}$$

สมการ Normalized Acoustic Power

$$W_n = \frac{\delta_{kn} L_{sn} D^2}{4\gamma} \left[ B(\gamma - 1) \cos^2 x_n \left( \frac{\Delta T_{mn} \tan(x_n)}{B L_{sn} (\gamma - 1) (1 + \sqrt{\sigma}) \Lambda} \right) - \frac{\sqrt{\sigma} \sin^2 x_n}{B \Lambda} \right] \quad (3.17)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการ (3.17) จะได้

$$W_n = -3.19 \times 10^{-6}$$

โดยที่

$$\Lambda = 1 - \delta_{kn} \sqrt{\sigma} + \frac{\sigma \delta_{kn}^2}{2} \quad (3.18)$$

แทนค่าจะได้

$$\Lambda = 0.595$$

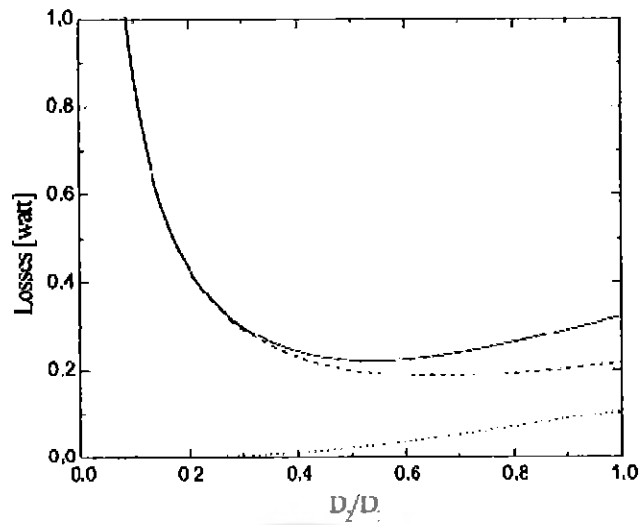
สัมประสิทธิ์สมรรถนะของสเด็ก (COPs)

$$COP_s = \left| \frac{Q_{cn}}{W_n} \right| \quad (3.19)$$

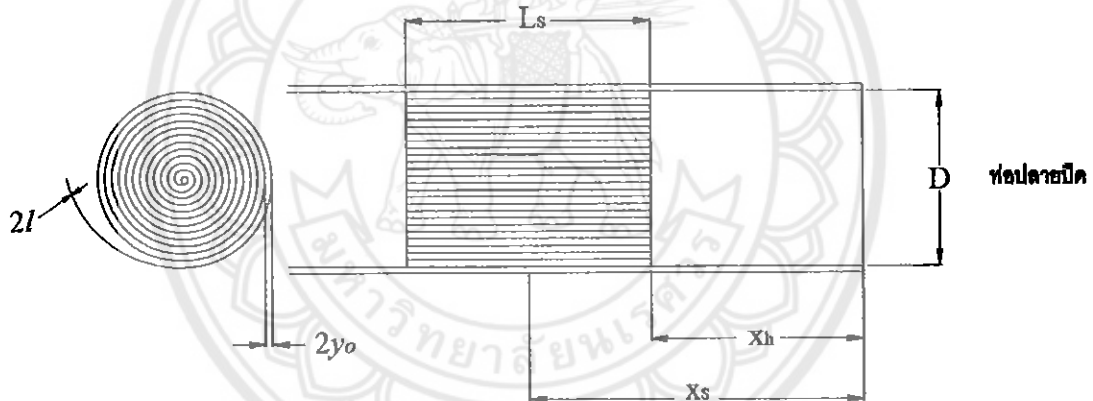
แทนค่าในสมการ (3.19) จะได้

$$COP_s = 2.81$$

ในภาพที่ 3.13 Hoffer แสดงกราฟพลังงานที่สูญเสียจากการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ จากกราฟจะเห็นได้ว่าการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่มีผลดี ซึ่งสามารถลดการสูญเสียพลังงานได้มากกว่าท่อที่มีขนาดเท่าเดิม ขนาดศูนย์กลางของท่อ  $D_1$  และ  $D_2$  พิจารณาจากภาพที่ 3.13 แต่ในการทดลองนี้ไม่ได้ลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจึงไม่ได้คำนวณในส่วนนี้



รูปที่ 3.13 พลังงานที่สูญเสียจากการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
ที่มา: Hofler (1986)



รูปที่ 3.14 รูปแบบของท่อและสแตกที่ใช้ประกอบการคำนวณ

นำข้อมูล และสมการที่เกี่ยวข้องคำนวณผ่าน โปรแกรม Microsoft Office Excel เพื่อหาค่า  
ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของชุดทดสอบ แสดงในภาพที่ 3.15

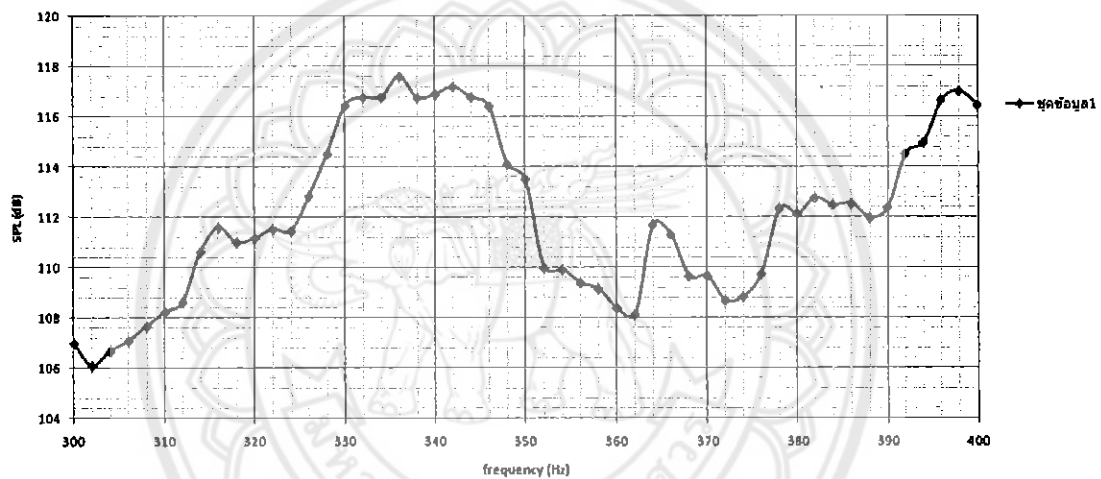
## THERMOACOUSTIC REFRIGERATOR

Operating parameter			Working gas parameters		
$f$	350	hz	$k$	0.0207	w/m.K
$P_m$	100000	Pa	$a$	0.0000	m/s
$P_0$	2000	Pa	$\gamma$		
$T_m$	300	K	$c_p$	0.0000	J/kg.K
$\Delta T_m$	20	K	$\rho_m$	0.0000	kg/m <sup>3</sup>
$Q_c$	0.2	W	$\mu$	0.0000	kg/s.m
$D$	0.02		$\sigma$ (Pr)	0.0000	
$R$	0.287	kJ/kg.K	Stack		
$\Delta T_{mn}$	0.0667		$2y_0$	0.42	mm
$\omega$	2198	rad/s	$y_0$	0.21	mm
$\lambda$	0.99	m	$l$	0.0525	mm
$k(w-n)$	6.35	m <sup>-1</sup>	$2l$	0.105	mm
$\delta_x$	0.14	mm	$L_s$	0.033	m
$\delta_v$	0.12	mm	Resonator		
$\delta_{cn}$	0.667		$L_t$		m
$B$	0.8		$A$		m <sup>2</sup>
$L_{zn}$	0.21		$D_t$		m
$x_n$	0.195		$Q_{cn}$		
$x_s$	0.031	m	$W_n$		
$x_h$	0.014	m	$\Lambda$		
$COP_s$	2.81				

รูปที่ 3.15 แสดงผลการคำนวณผ่านโปรแกรม Microsoft Office Excel

### 3.7 การหาความถี่เสียงรีโซแนนซ์

การหาความถี่เสียงรีโซแนนซ์ (Resonance) ต้องอาศัยการวัดความดันเสียงจากการปรับความถี่เพื่อหาความถี่เสียงรีโซแนนซ์ (ภาวิษฐ์, 2552) โดยควบคุมไฟฟ้าที่จ่ายให้กับลำโพงให้คงที่ที่  $V_{rms}$  เท่ากับ 7 โวลต์ ซึ่งคูแอมพลิจูดจากเครื่องออสซิลโลสโคปที่วัดจากสายสัญญาณก่อนเข้าลำโพงในชุดทดสอบ แล้วค่อยๆเปลี่ยนความถี่ทีละค่า (ช่วงความถี่ 300 ถึง 400 เฮิรตซ์) วัดความดันเสียงที่เกิดขึ้นด้วยไมโครโฟนที่บริเวณปลายท่อ แล้วบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงความดันเสียง (Sound Pressure Level Difference) ที่เกิดขึ้น จากนั้นนำข้อมูลไปทำกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.16 เพื่อหาค่าความถี่เสียงรีโซแนนซ์ จากกราฟสังเกตได้ว่าความดันเสียงมีค่าสูงที่สุดอยู่สองช่วง คือที่ประมาณ 336 และ 398 เฮิรตซ์



รูปที่ 3.16 การเปลี่ยนแปลง  $\Delta$ SPL (dB) ที่ความถี่ 300 ถึง 400 Hz



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

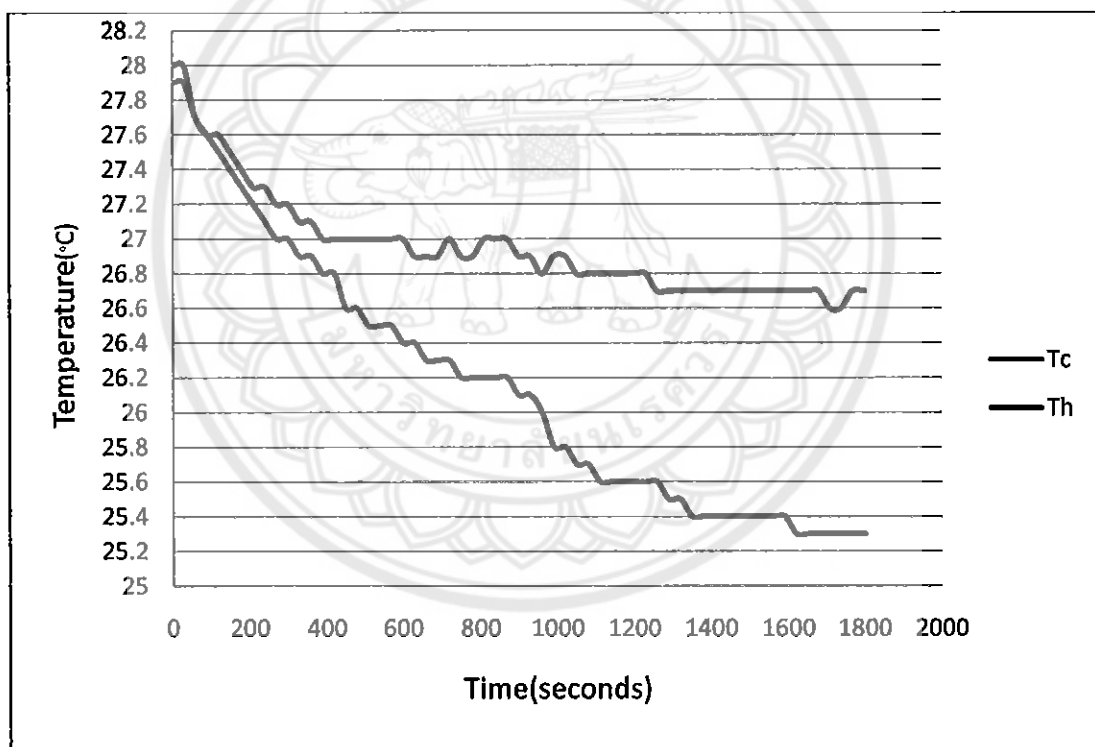
#### 4.1 ผลการทดลองโดยใช้สแต็กที่ทำจากฟิล์ม

จากผลการทดสอบสแต็กที่ทำมาจากฟิล์ม จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยจะแสดงความถี่ และระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็ก ดังนี้

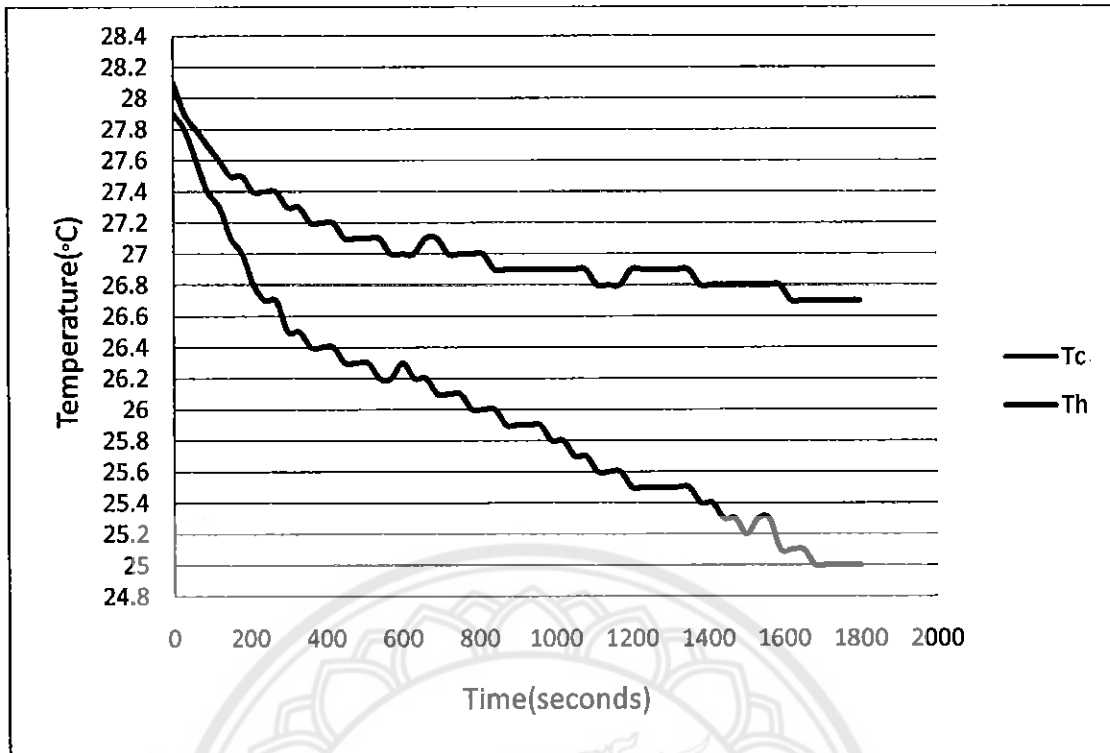
##### 4.1.1 ทดลองที่ความถี่ 336 เฮิรตซ์

กราฟแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อน ( $T_h$ ) และอุณหภูมิด้านเย็น ( $T_c$ ) โดยที่แกนตั้งแสดงค่าอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) แกนนอนแสดงค่าเวลา (วินาที)

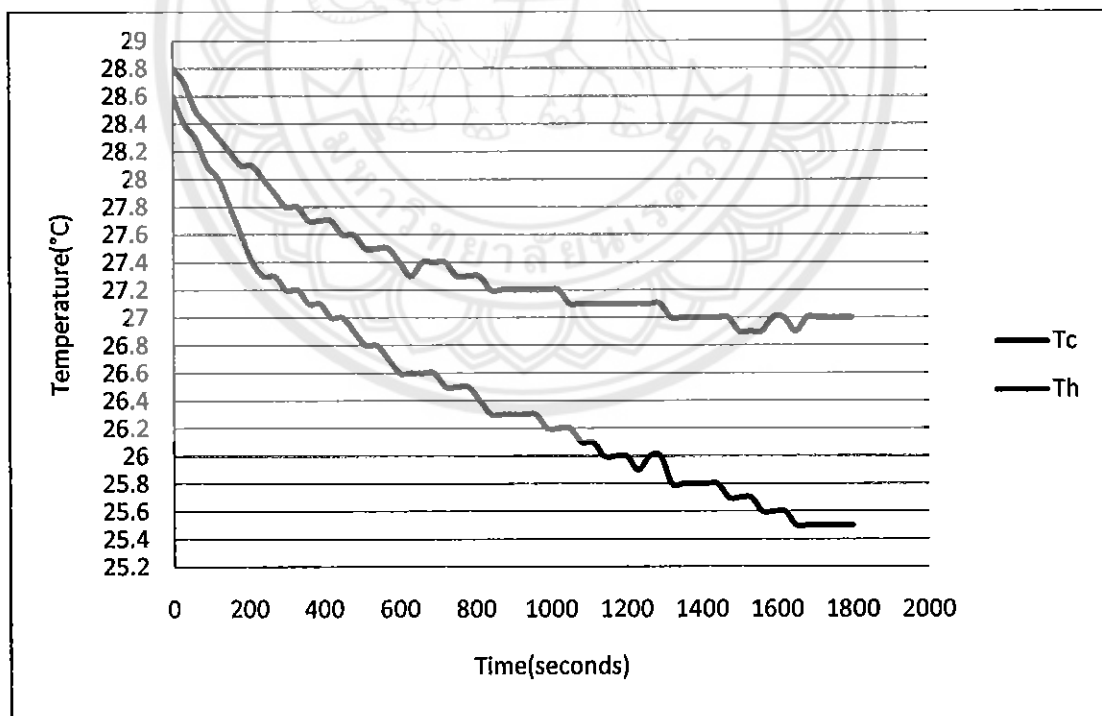
4.1.1.1 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.4 มม.



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 1.4^{\circ}\text{C}$

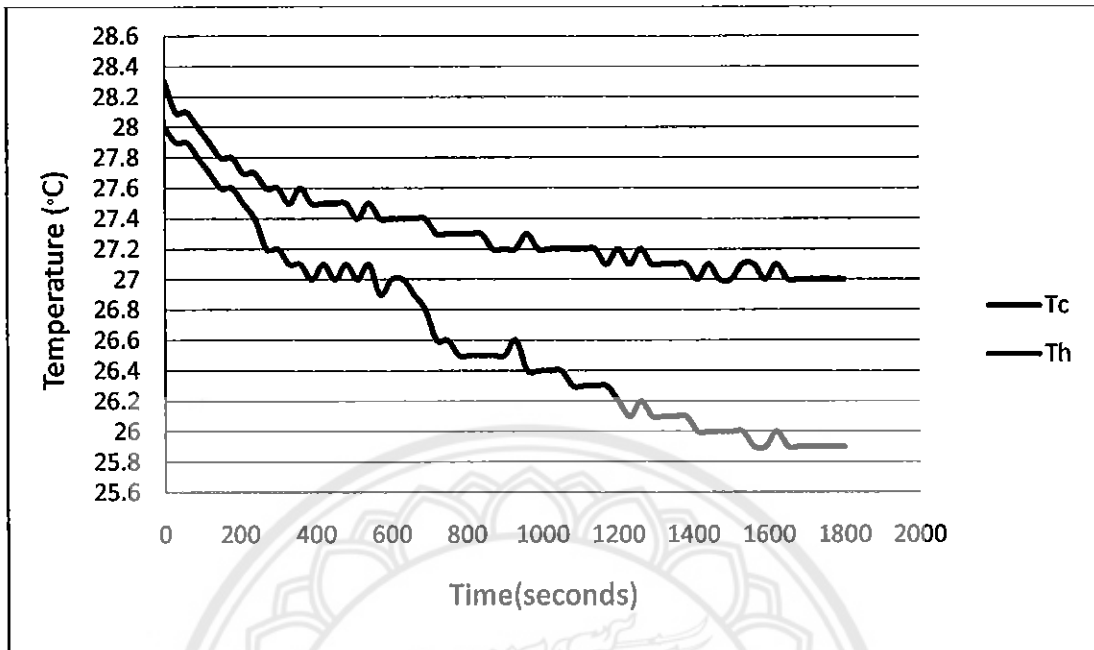


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 1.7^\circ\text{C}$

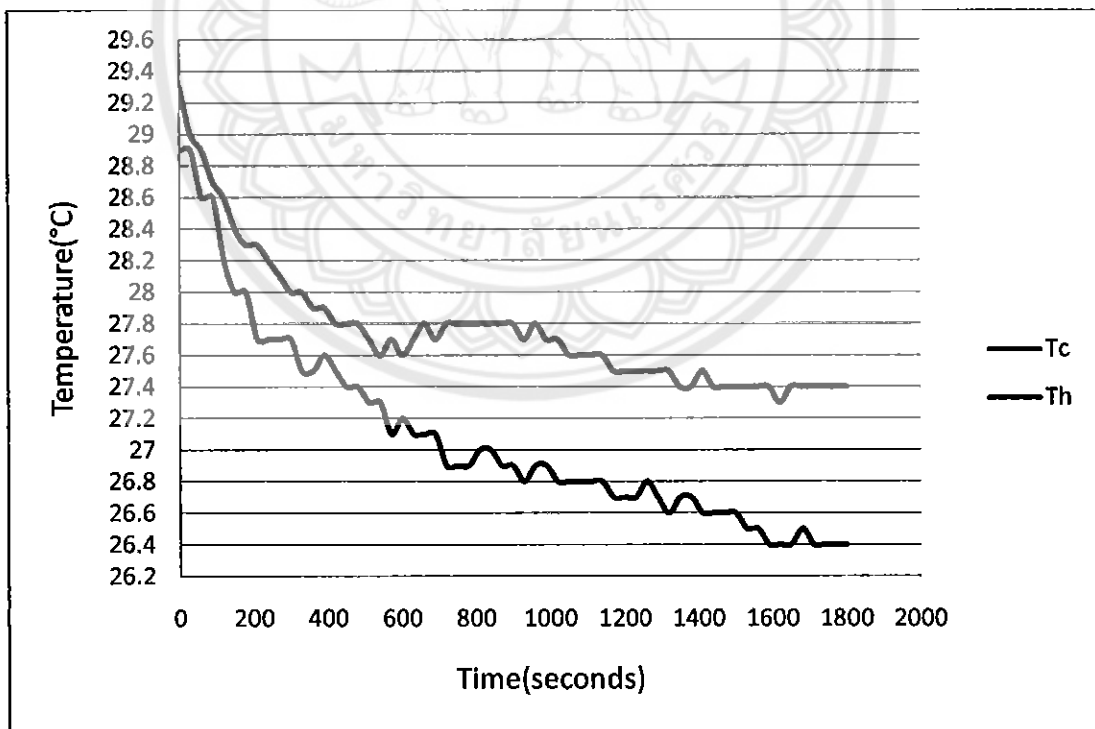


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 1.5^\circ\text{C}$

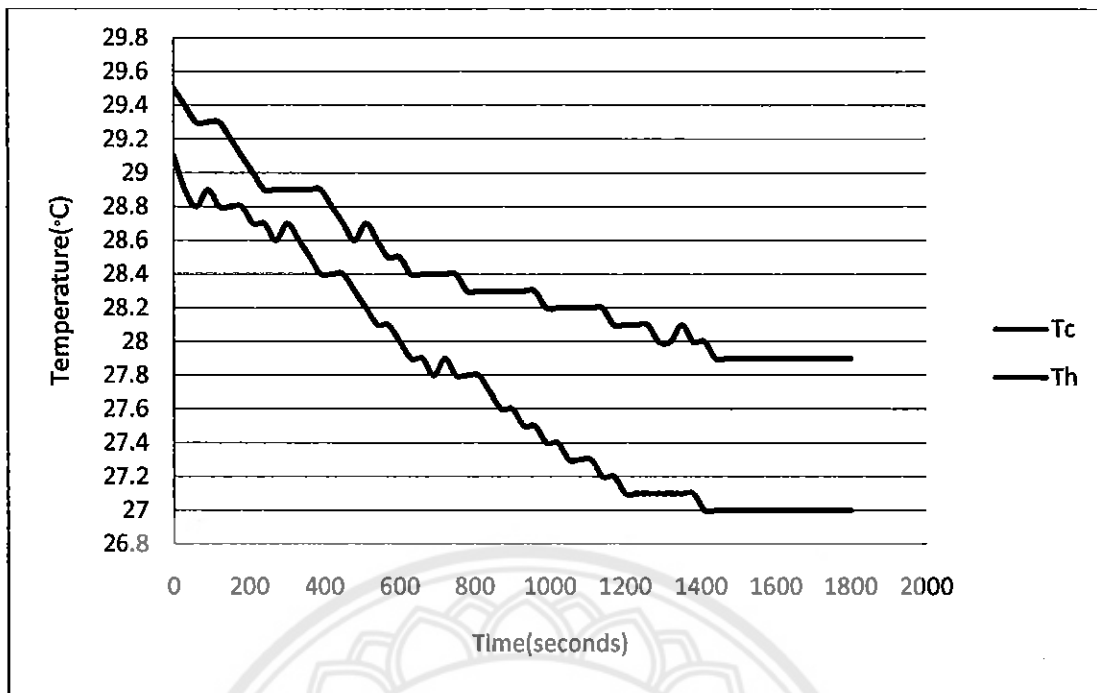
4.1.1.2 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.5 มม.



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{max} = 1.1^\circ\text{C}$

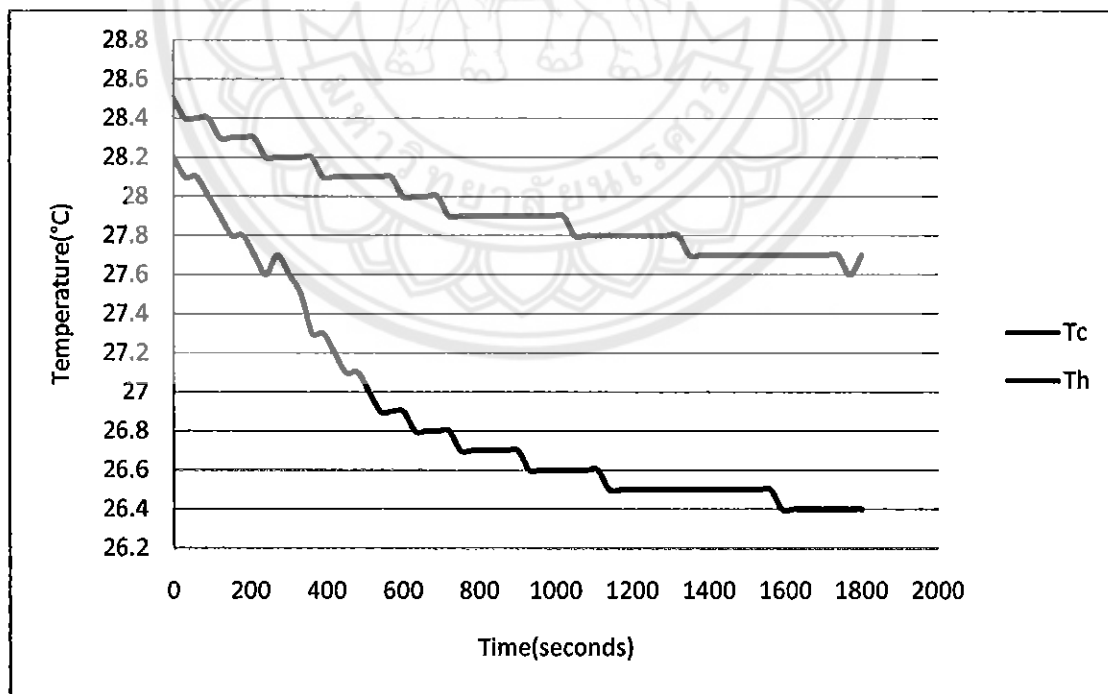


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{max} = 1.0^\circ\text{C}$

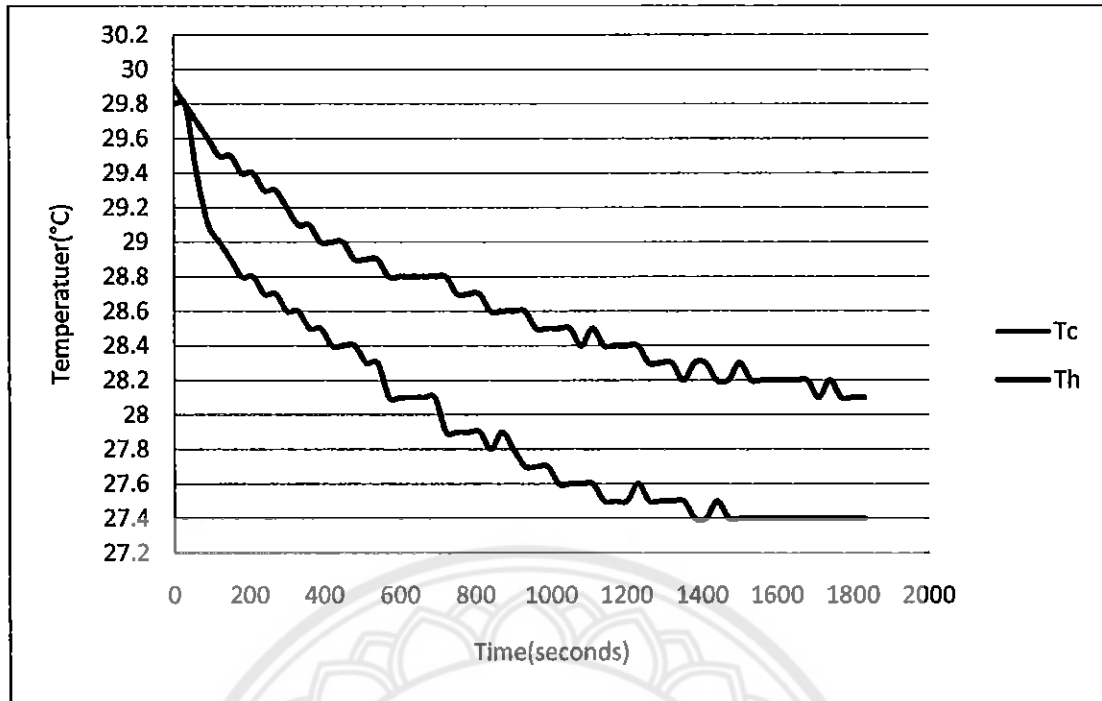


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.9^\circ\text{C}$

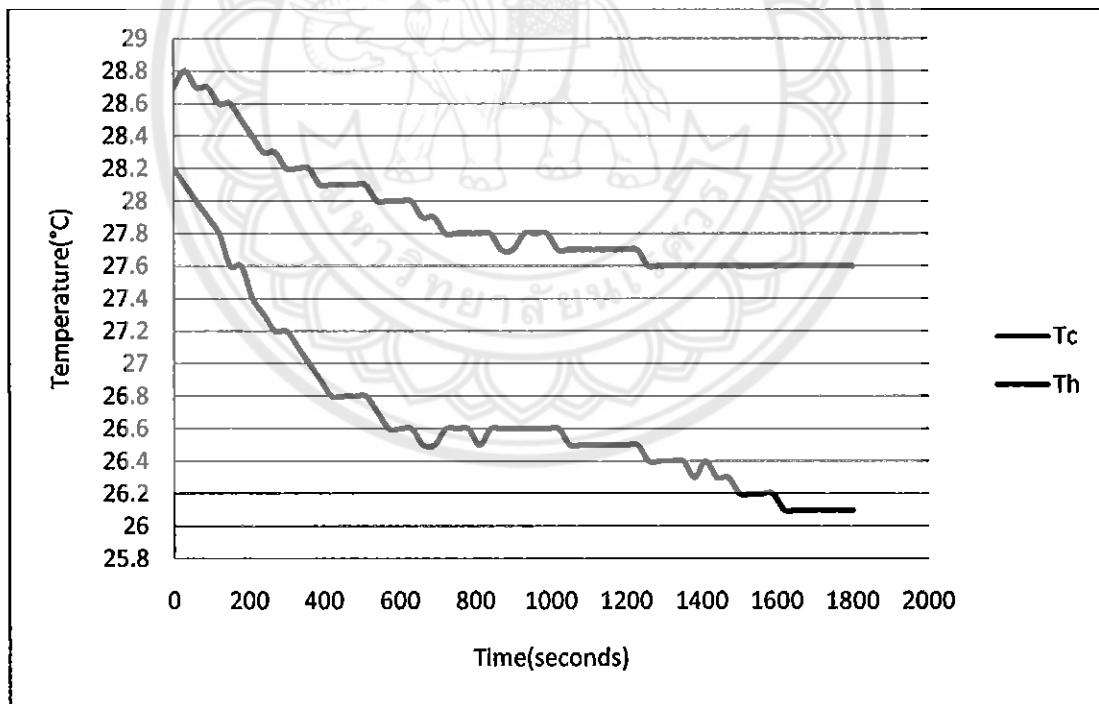
4.1.1.3 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.6 มม.



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{max} = 1.3^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกัน ที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 0.7^\circ\text{C}$

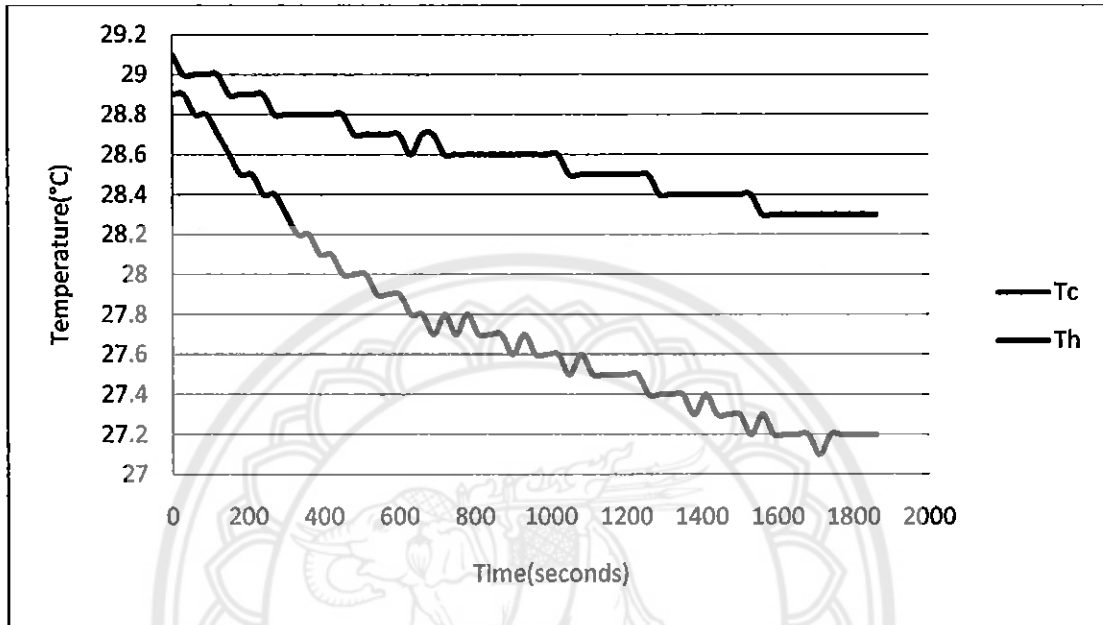


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกัน ที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 1.5^\circ\text{C}$

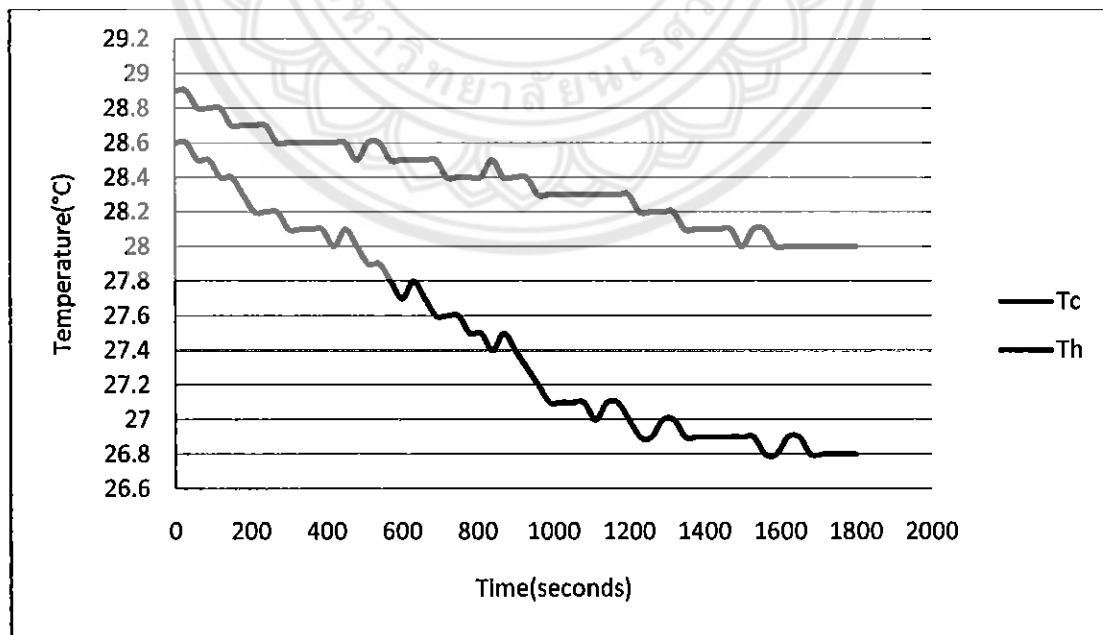
#### 4.1.2 ทดลองที่ความถี่ 350 เฮิรตซ์

กราฟแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อน ( $T_h$ ) และอุณหภูมิด้านเย็น ( $T_c$ ) โดยที่แกนตั้งแสดงค่าอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) แกนนอนแสดงค่าเวลา (วินาที)

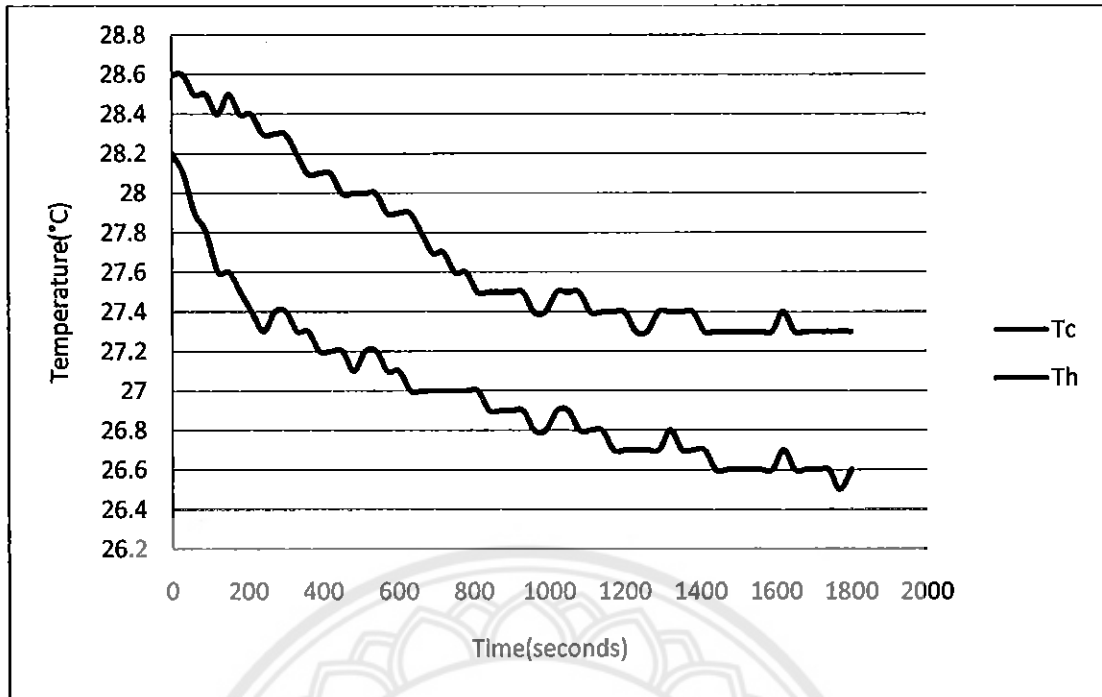
4.1.2.1 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.4 มม.



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 1.1^{\circ}\text{C}$

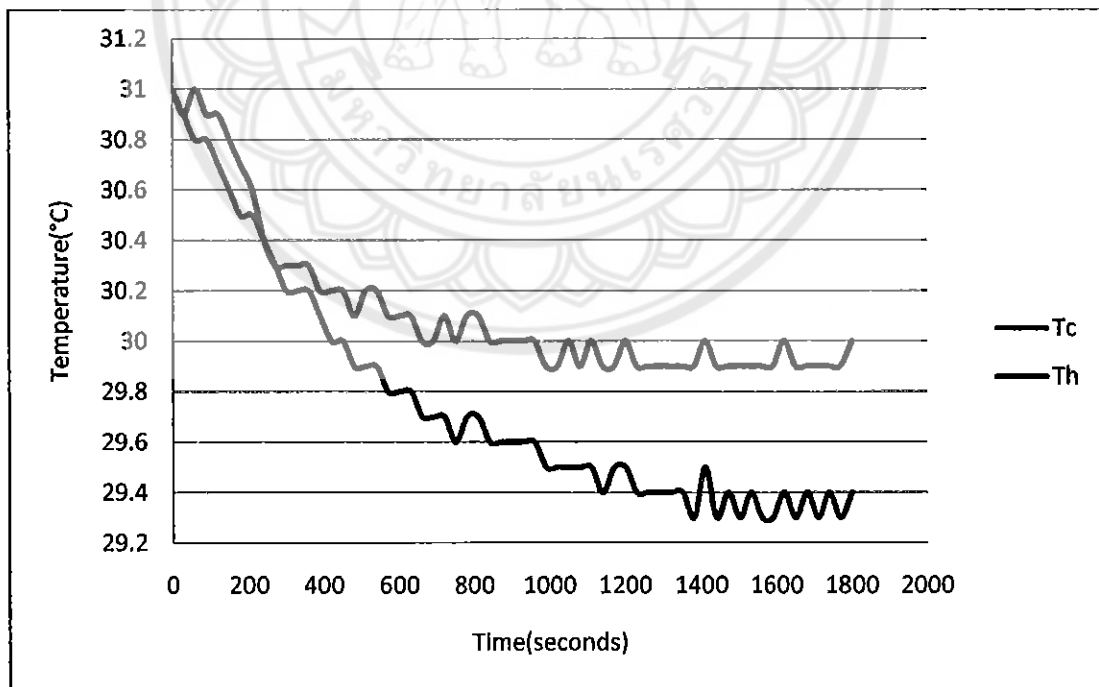


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 1.2^{\circ}\text{C}$

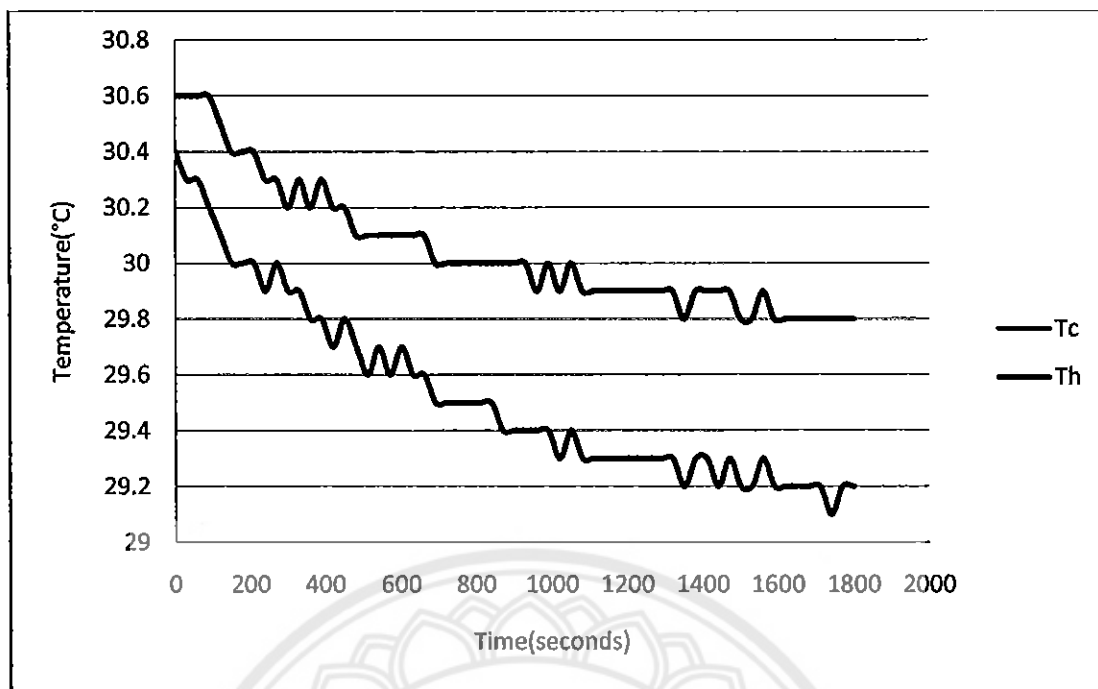


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกันที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 0.7^\circ\text{C}$

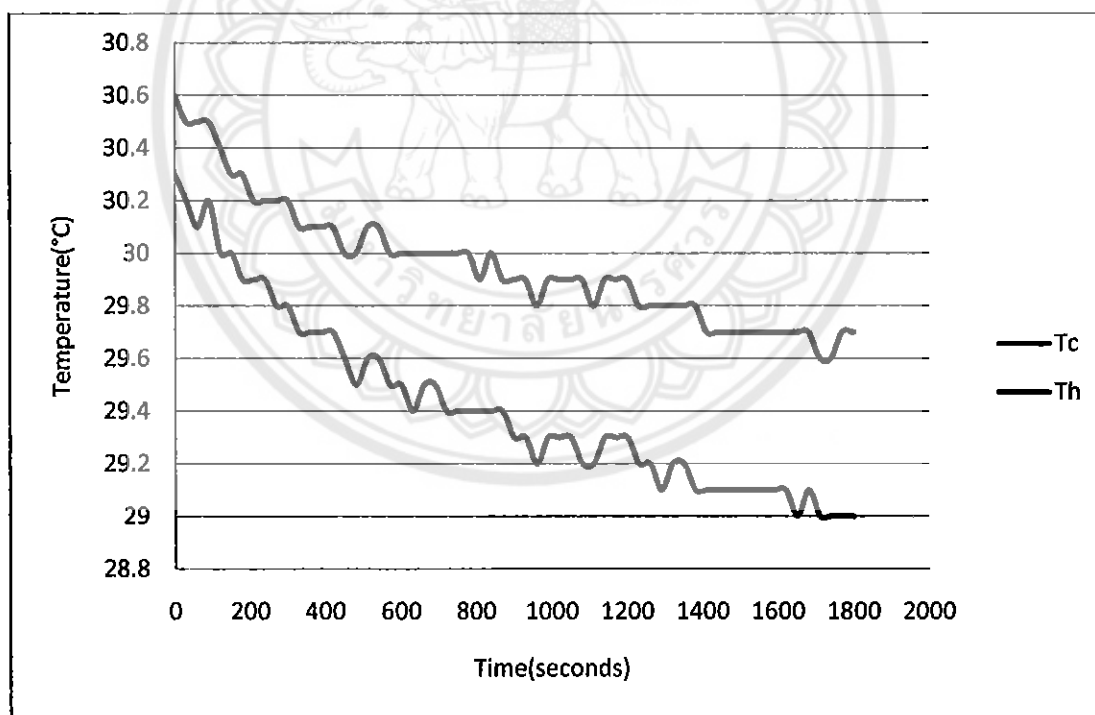
#### 4.1.2.2 ระยะห่างช่องว่างของสเต็มเท่ากับ 0.5 มม.



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกันที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 0.6^\circ\text{C}$



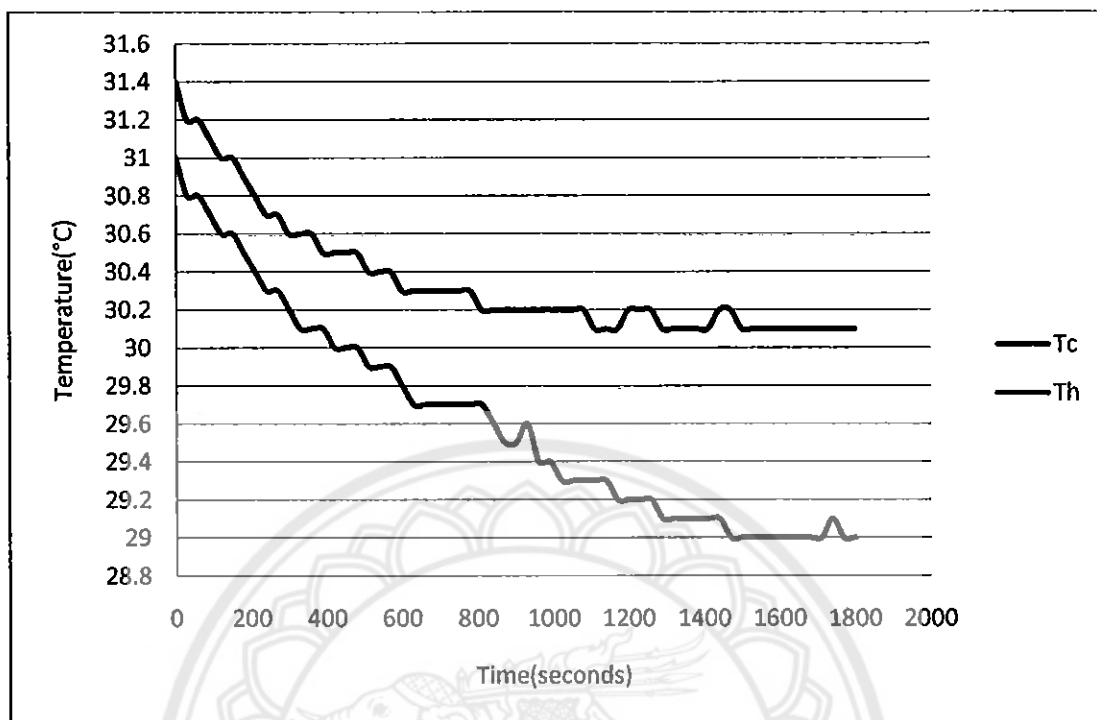
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกัน ที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$



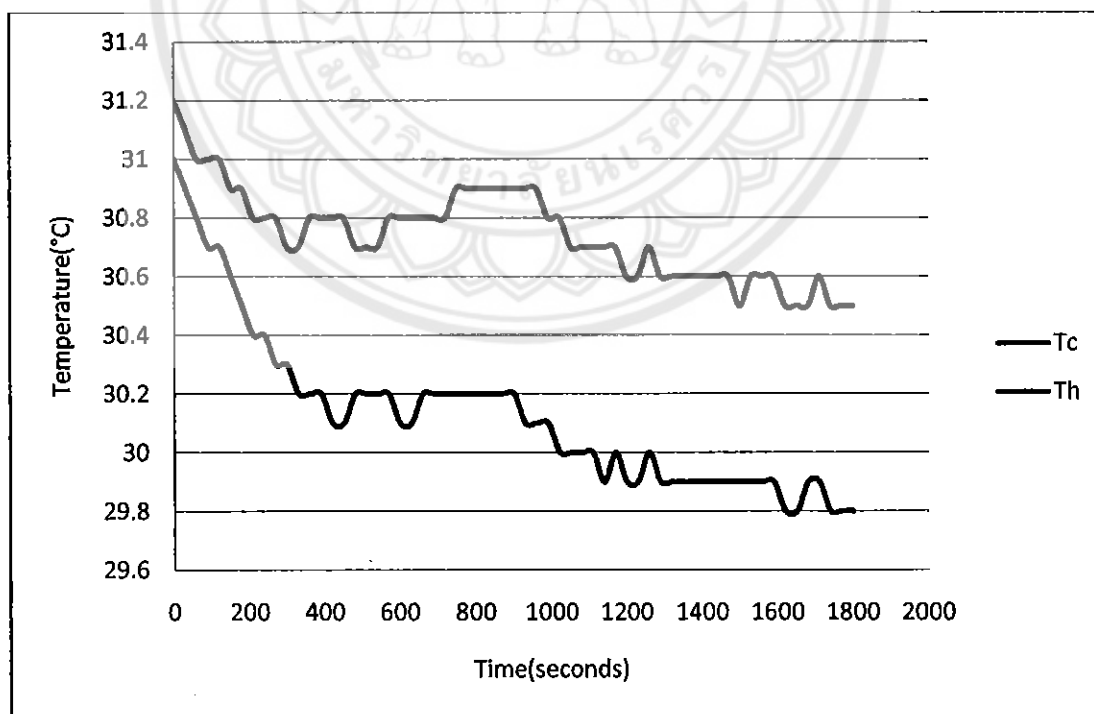
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกัน ที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$



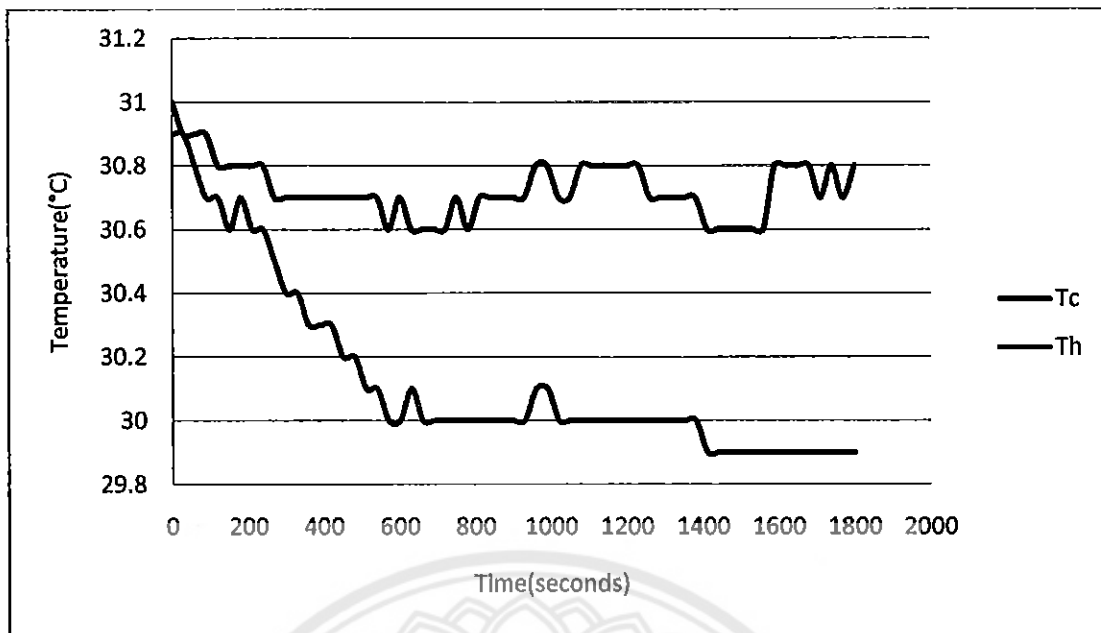
#### 4.1.2.3 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.6 มม.



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกันที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 1.1^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกันที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 0.7^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.9^\circ\text{C}$

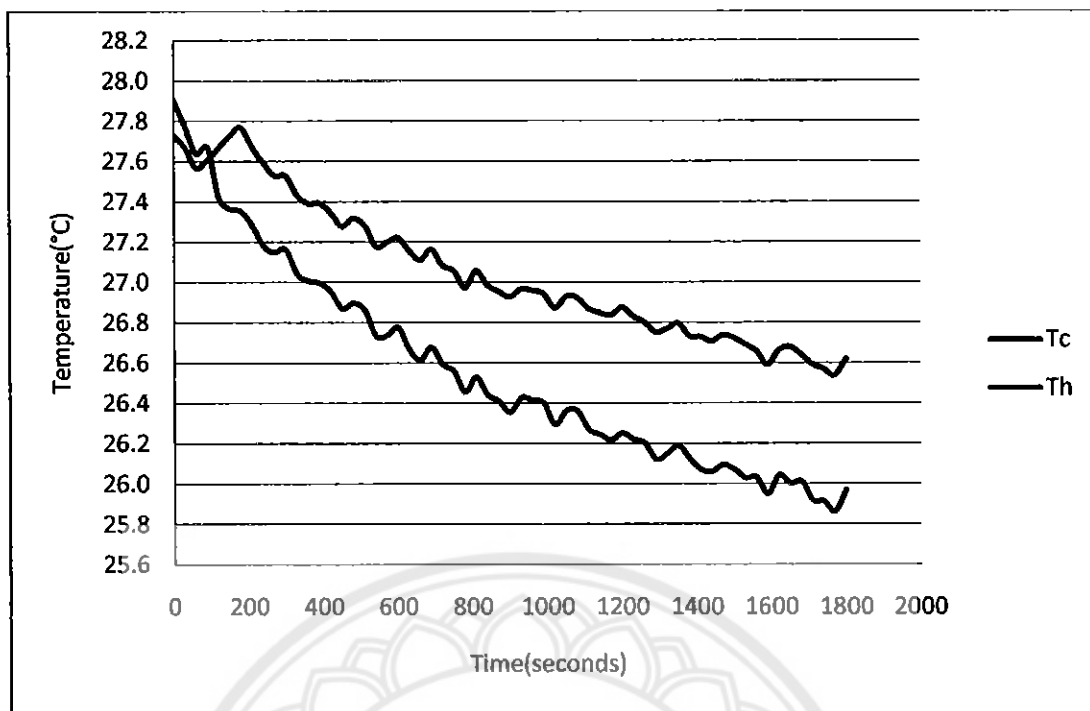
4.1.3 ทดลองที่ความถี่ 398 เฮิรตซ์

กราฟแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อน ( $T_h$ )และอุณหภูมิด้านเย็น( $T_c$ ) โดยที่ แกนตั้งแสดงค่าอุณหภูมิ ( $^\circ\text{C}$ ) แกนนอนแสดงค่าเวลา (วินาที)

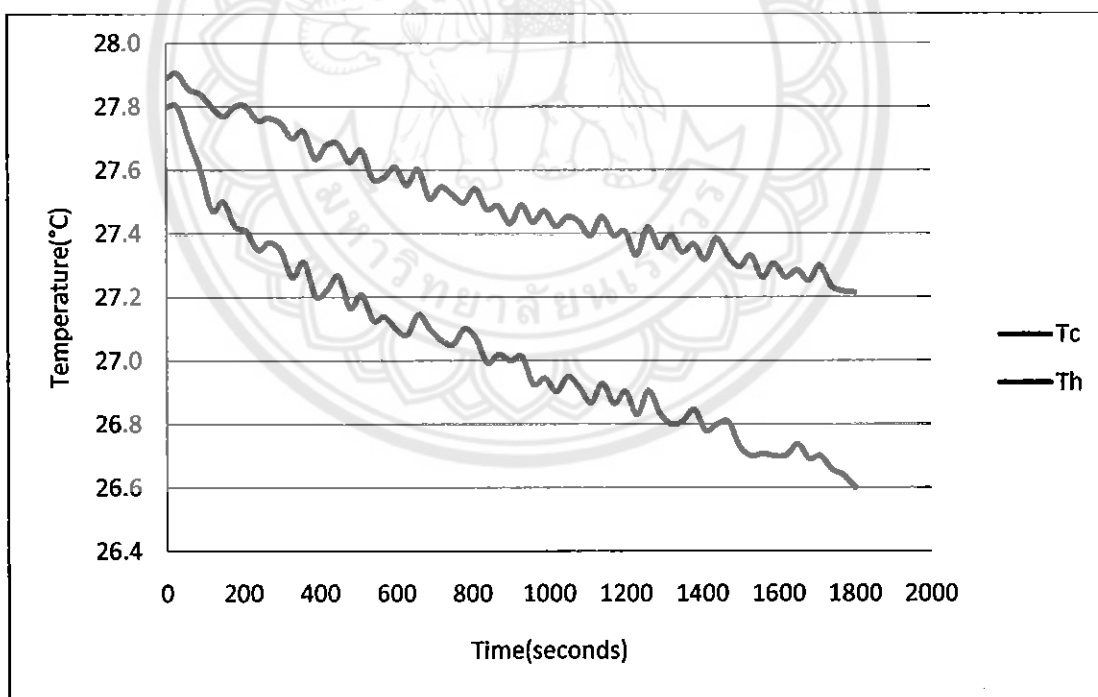
4.1.3.1 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.4 มม.



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกัน ที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 0.7^{\circ}\text{C}$

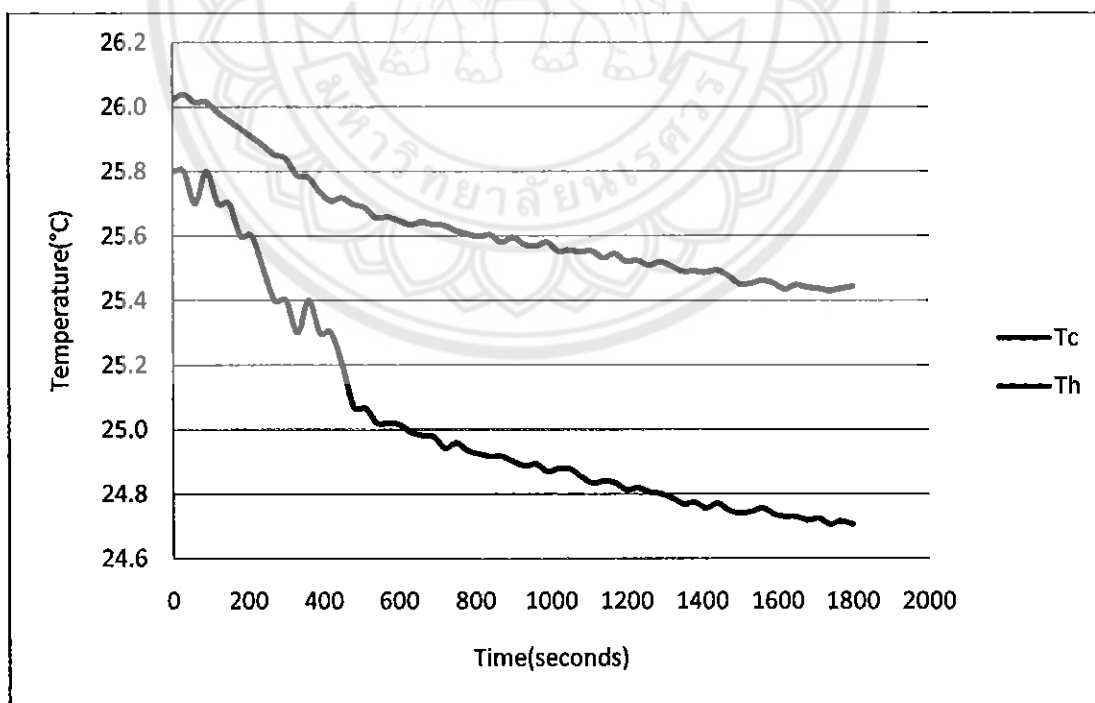


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่างกัน ที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 0.6^{\circ}\text{C}$

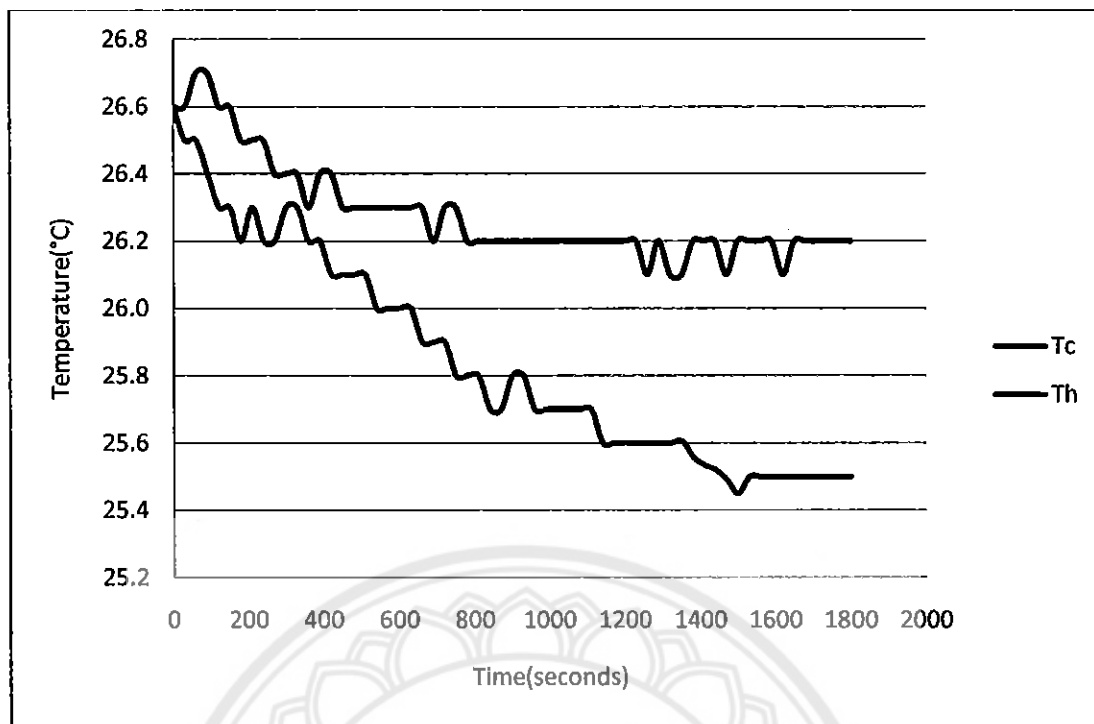
### 4.1.3.2 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.5 มม.



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.8^\circ\text{C}$

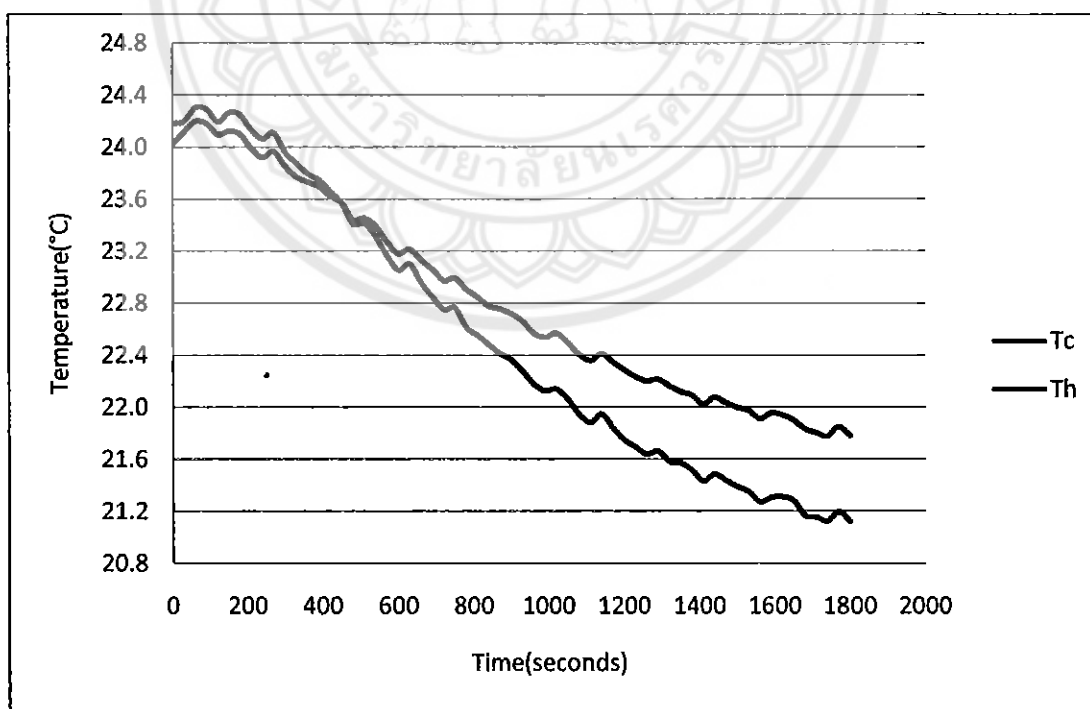


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$

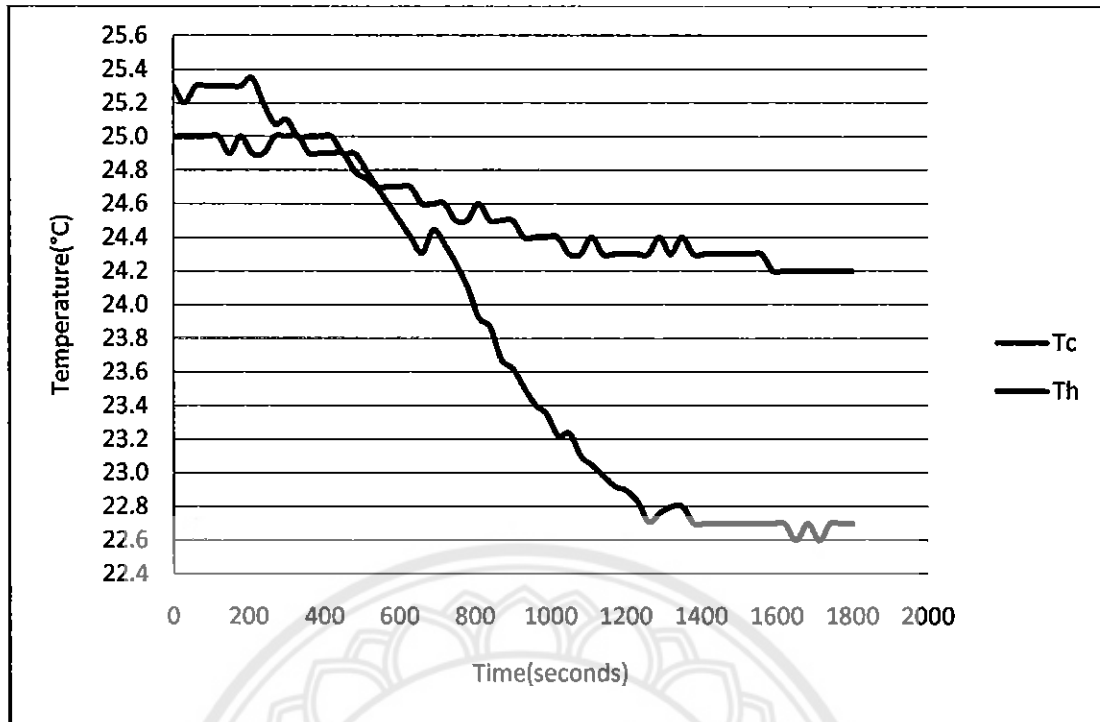


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 0.7^\circ\text{C}$

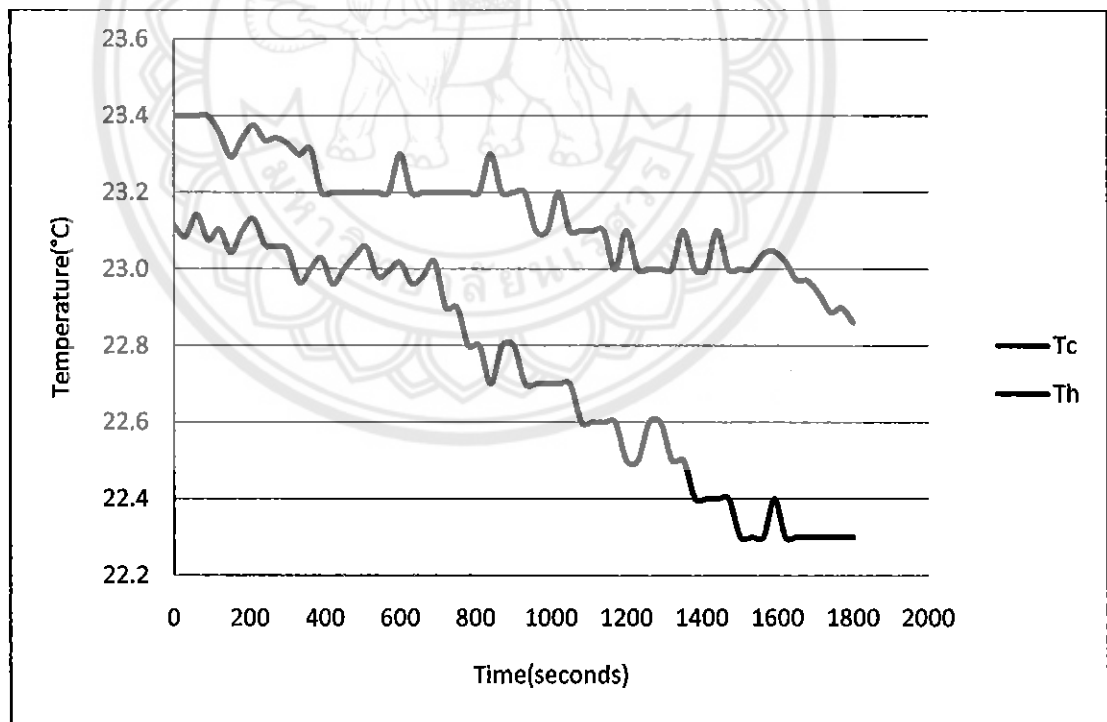
4.1.3.3 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.6 มม.



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.0$  ซม.  $\Delta T_{\max} = 0.7^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 1.5$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.8^\circ\text{C}$

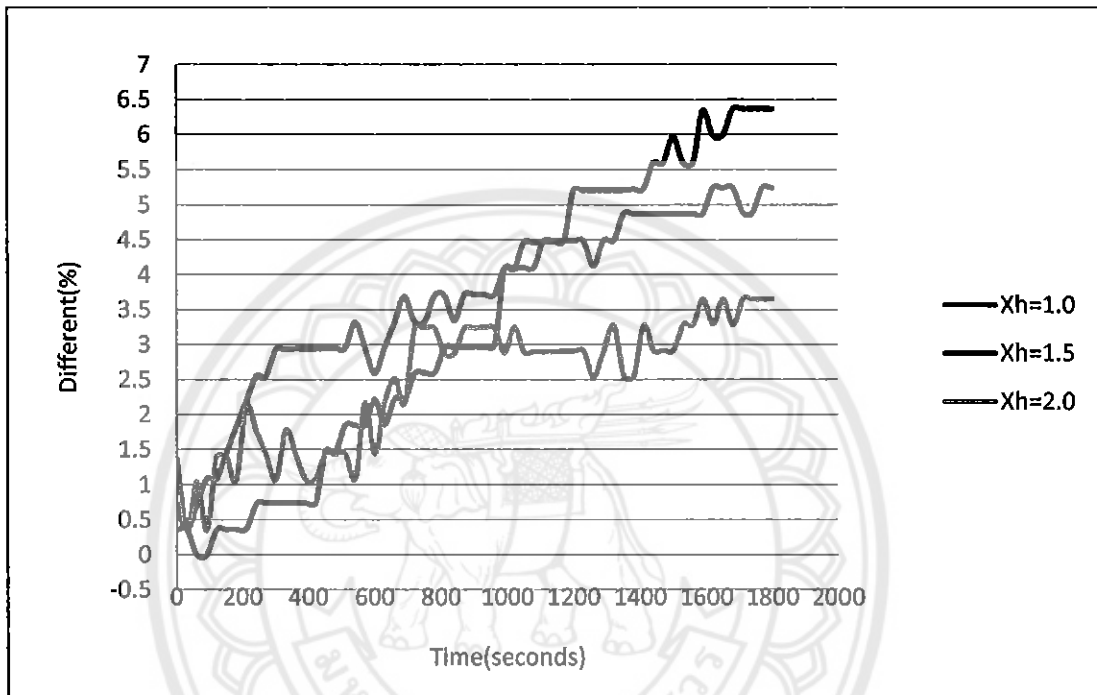


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงอุณหภูมิแตกต่าง ที่ระยะ  $x_h = 2.0$  ซม.  $\Delta T_{max} = 0.7^\circ\text{C}$

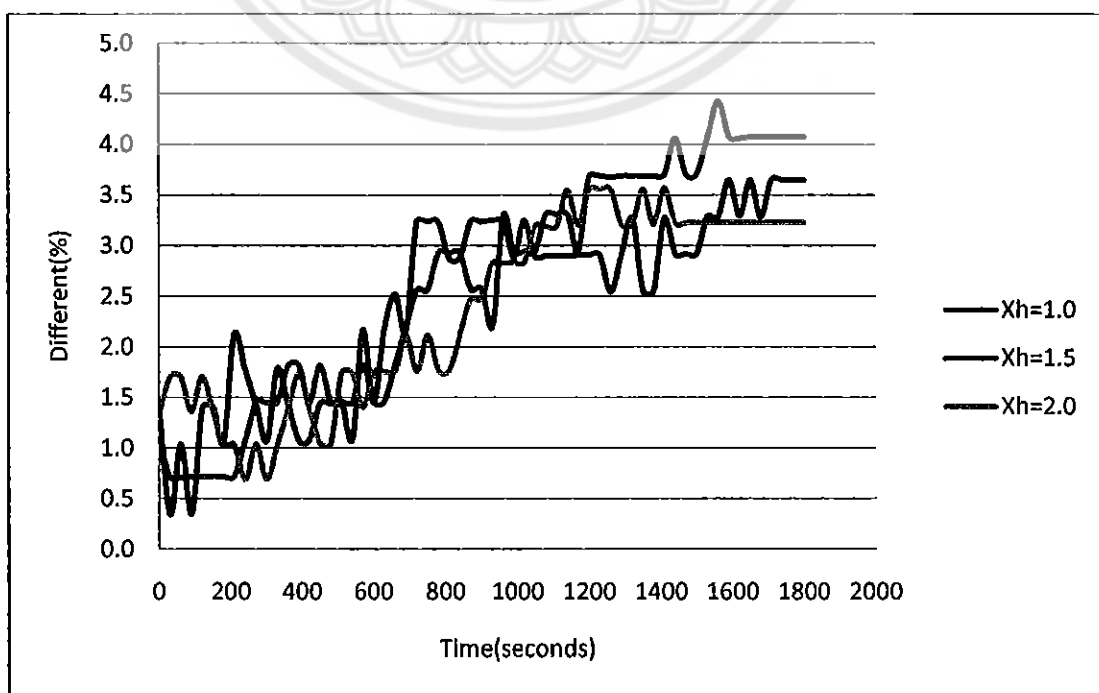
#### 4.1.4 การเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกราฟของแต่ละ ความถี่แล้วจะได้ค่าอนุหภูมิที่แตกต่างกันมากที่สุดของ ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะ  $x_h$  ต่างๆ ได้ดังนี้

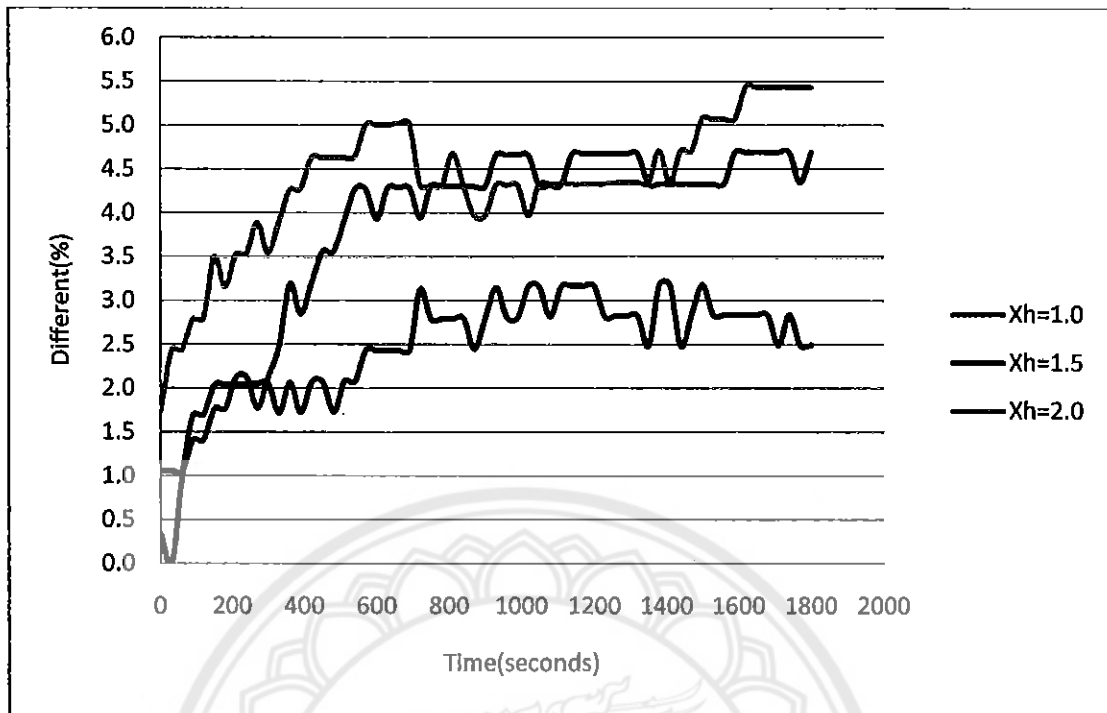
##### 4.1.4.1 กราฟที่ความถี่ 336 เฮิรตซ์ แบ่งตามระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็ก



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กเท่ากับ 0.4 มม

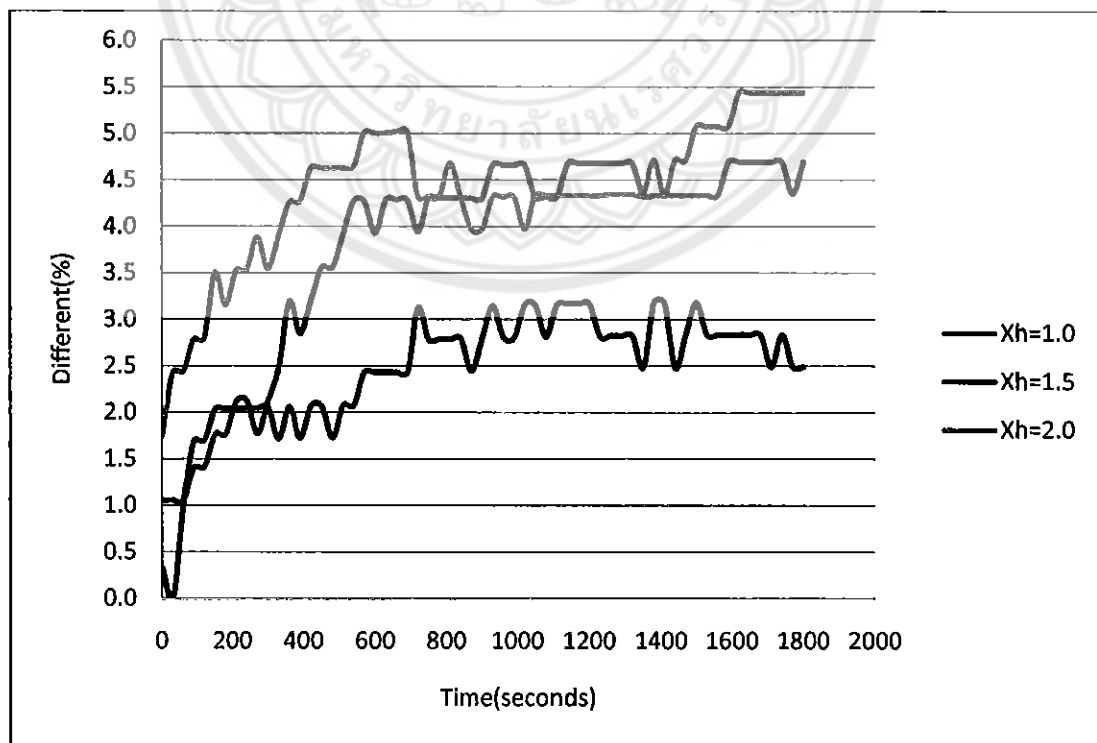


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.5 มม.



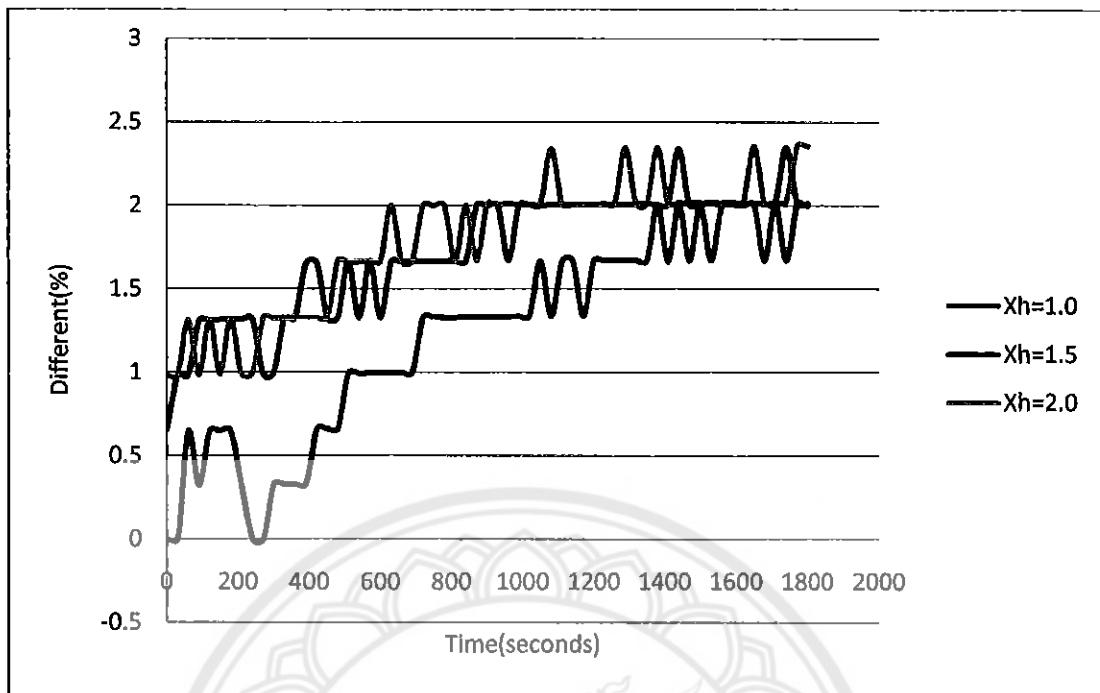
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.6 มม.

#### 4.1.4.2 กราฟที่ความถี่ 350 เฮิรตซ์ แบ่งตามระยะห่างระหว่างชั้นของสแตก

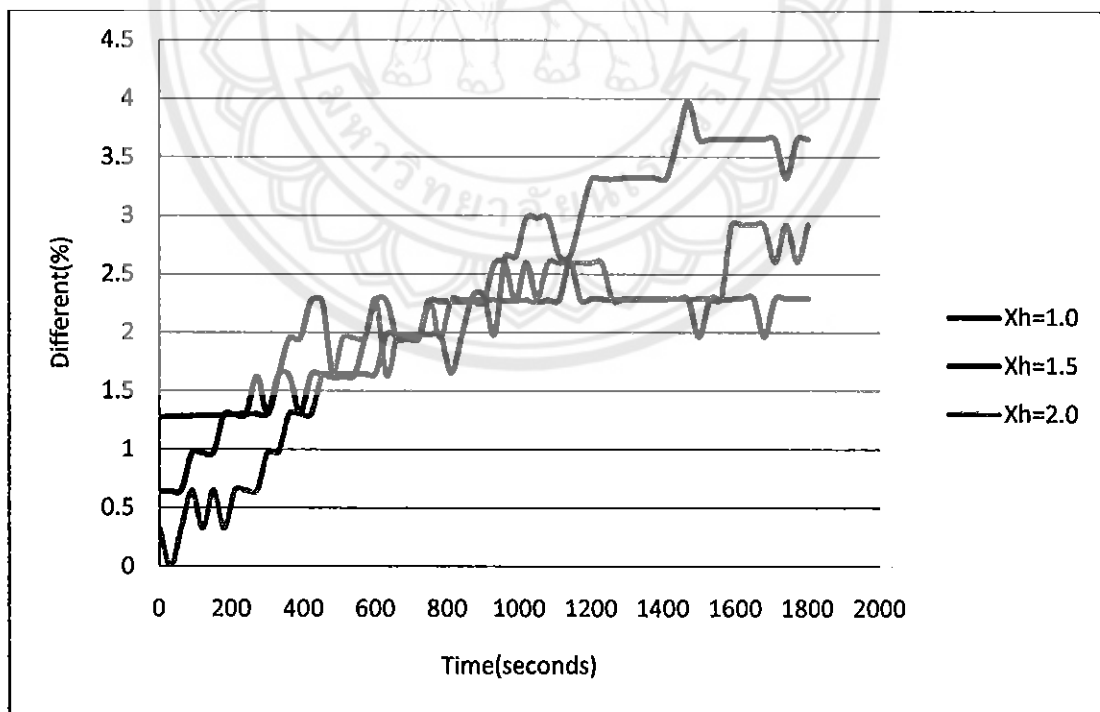


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.4 มม.



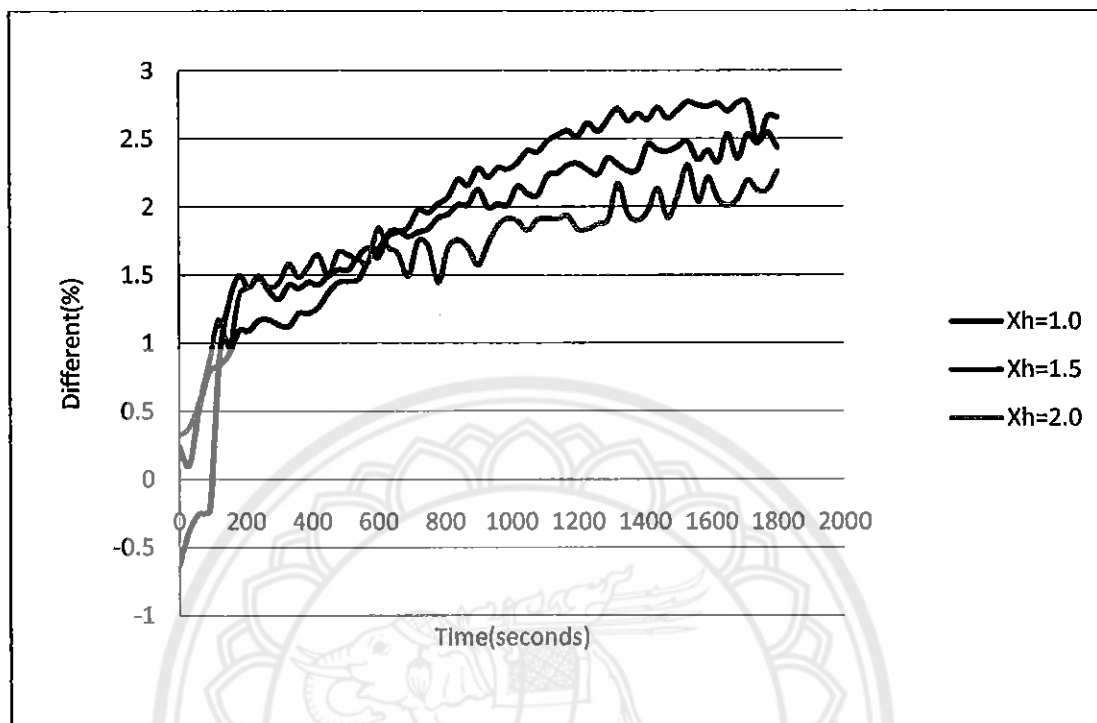


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.5 มม.

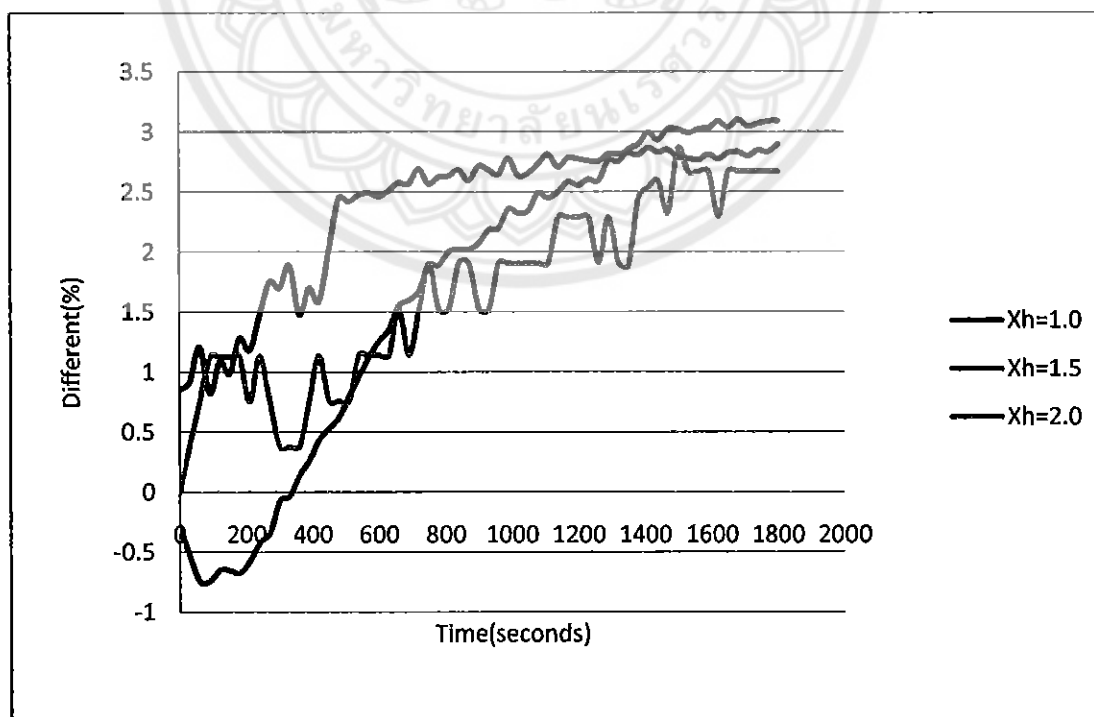


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.6 มม.

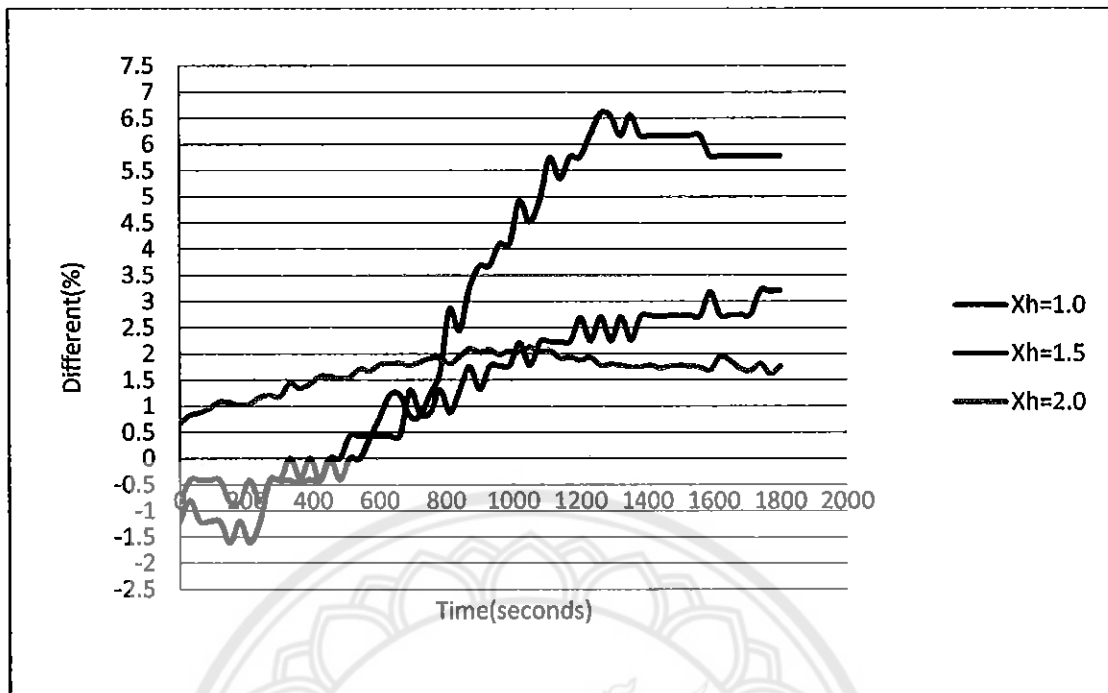
#### 4.1.4.3 กราฟที่ความถี่ 398 เฮิรตซ์ แบ่งตามระยะห่างระหว่างชั้นของสแตก



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.4 มม.



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.5 มม.



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ที่ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.6 มม.

#### 4.1.4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ดีที่สุดของแต่ละความถี่

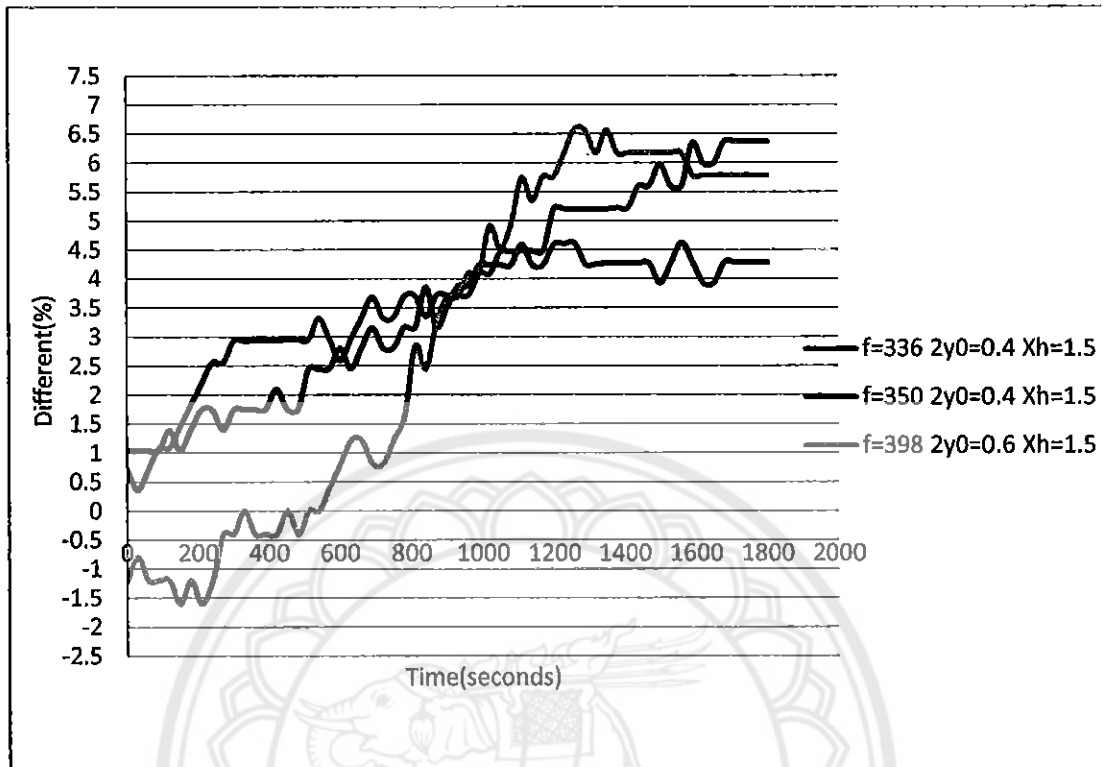
เมื่อพิจารณากราฟในหัวข้อ 4.4 จะทราบค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอุณหภูมิที่มากที่สุดของแต่ละความถี่ ดังนี้

ที่ความถี่ 336 เฮิรตซ์ ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.4 มม.  $x_h = 1.5$  ซม.

ที่ความถี่ 350 เฮิรตซ์ ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.4 มม.  $x_h = 2.0$  ซม.

ที่ความถี่ 398 เฮิรตซ์ ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกเท่ากับ 0.6 มม.  $x_h = 1.5$  ซม.

เมื่อนำค่าที่ดีที่สุดของแต่ละความถี่ทั้ง 3 ค่ามาเขียนเป็นกราฟ เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุด จะได้กราฟที่แสดง ระยะห่างระหว่างชั้นของสแตกที่ดีที่สุด และความถี่ที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้



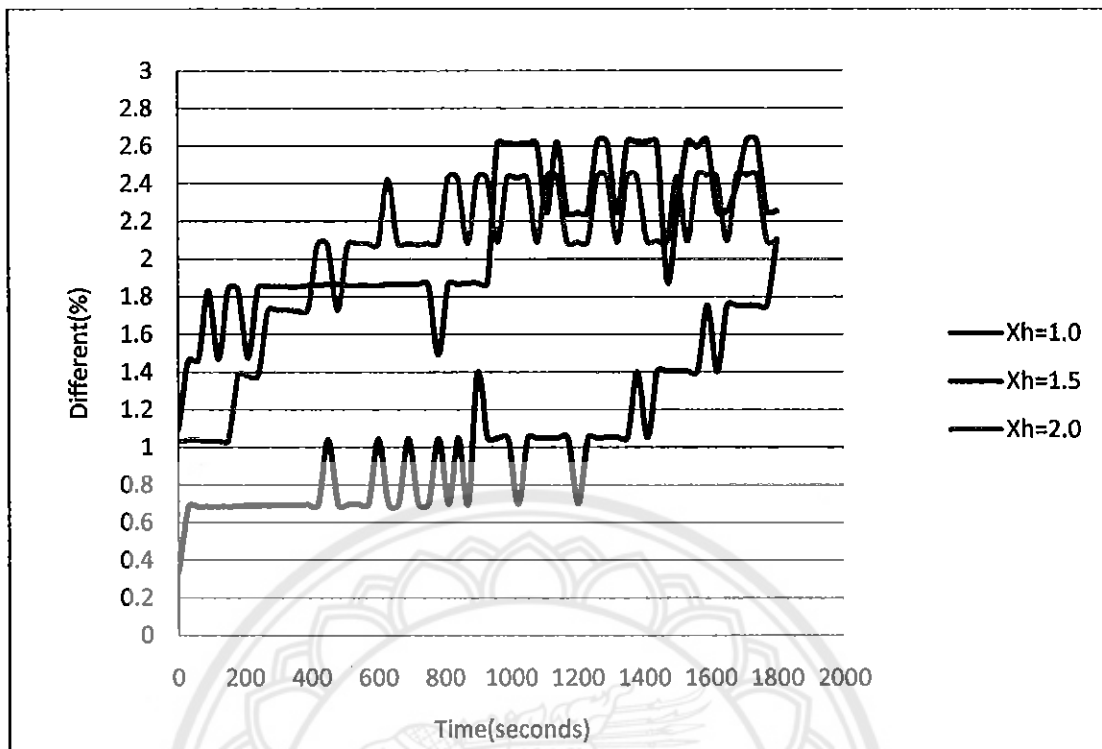
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าที่ดีที่สุดของการทดลอง

## 4.2 การทดลองเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการทำสแต็ก

เมื่อเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำสแต็ก จากฟิล์มเป็นแผ่นพลาสติก เพื่อดูว่าการเปลี่ยนวัสดุจะมีผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยจะแสดงความถี่ และระยะ  $x$ , ดังนี้

### 4.2.1 ทดลองที่ความถี่ 336 เฮิรตซ์

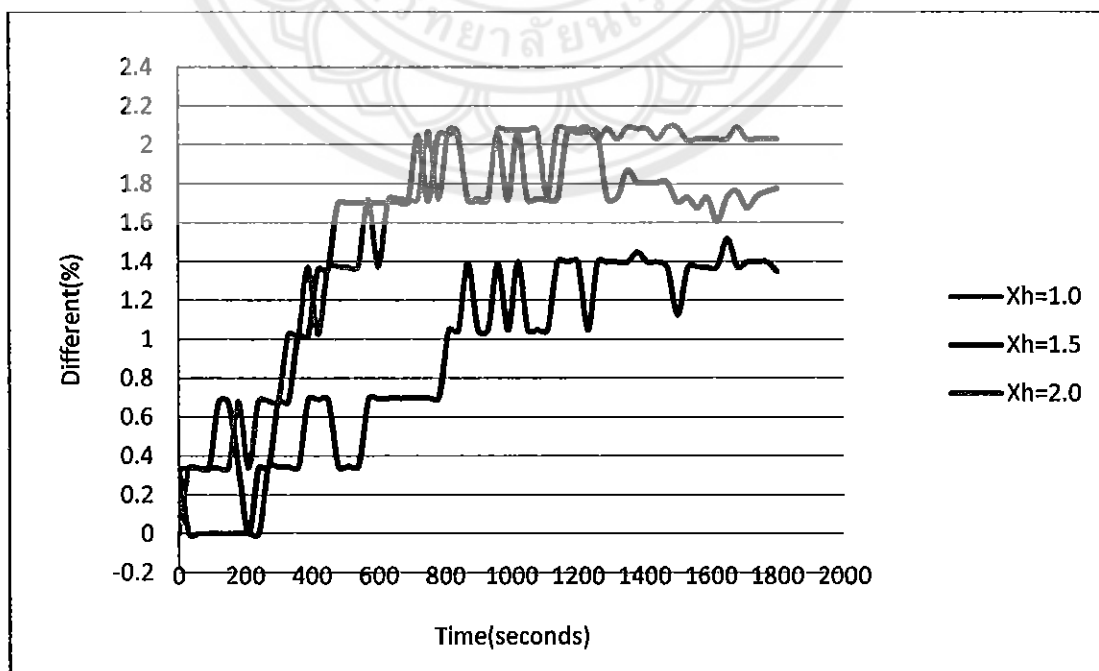
โดยที่แกนตั้งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (%) แกนนอนแสดงค่าเวลา (วินาที)



รูปที่ 4.38 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสแต็กที่ทำจากแผ่นพลาสติกที่  $f=336$  Hz

#### 4.2.2 ทดลองที่ความถี่ 350 เฮิรตซ์

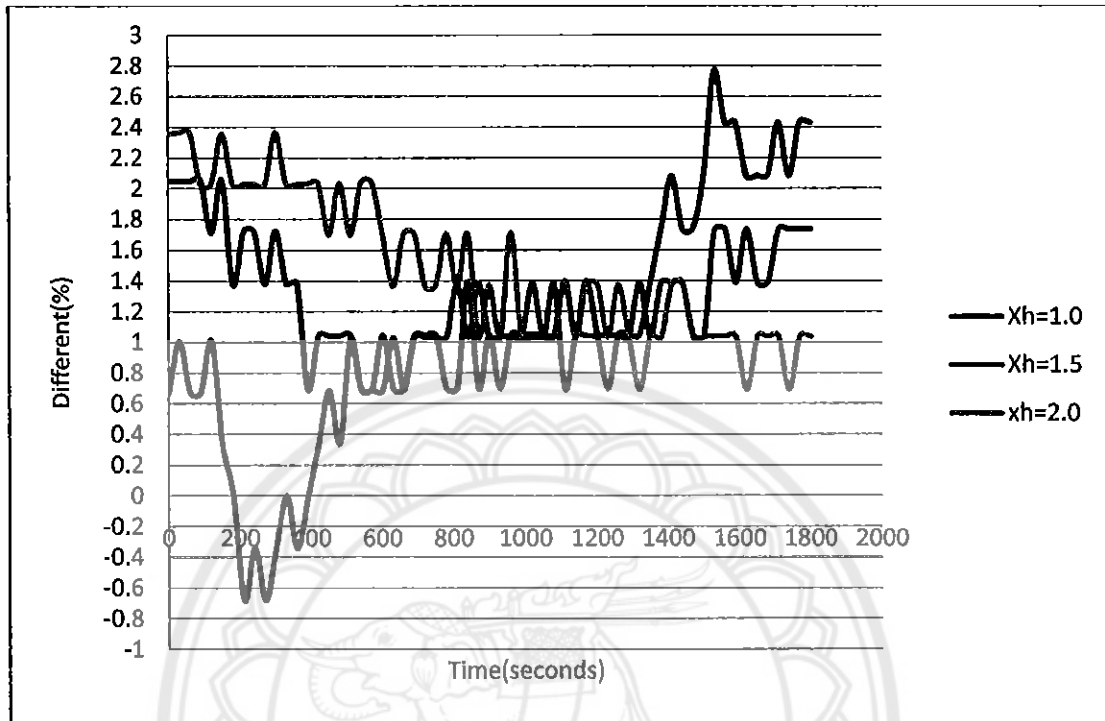
โดยที่แกนตั้งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (%) แกนนอนแสดงค่าเวลา (วินาที)



รูปที่ 4.39 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสแต็กที่ทำจากแผ่นพลาสติกที่  $f=350$  Hz

### 4.2.3 ทดลองที่ความถี่ 398 เฮิรตซ์

โดยที่แกนตั้งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง(%) แกนนอนแสดงค่าเวลา (วินาที)



รูปที่ 4.40 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสแต็กที่ทำจากแผ่นพลาสติกที่  $f=398$  Hz

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ความถี่ที่ใช้ในการทดลองแล้วทำให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างสแต็กด้านร้อนและด้านเย็นมากที่สุดคือที่ 336 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ได้จากการวัดความดันเสียงที่ปลายท่อ เรียกว่า ความถี่รีโซแนนซ์ ซึ่งความถี่ที่ได้เป็นความถี่เฉพาะของชุดทดสอบนี้ และความถี่ที่ไม่ใช่ความถี่รีโซแนนซ์ จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างสแต็กด้านร้อนและด้านเย็นหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย

5.1.2 ตำแหน่งระยะการวางของสแต็กจากปลายท่อที่เหมาะสมที่สุดคือที่ระยะ 1.5 ซม. ซึ่งเป็นระยะที่มีการกระจายตัวของความดันเสียงที่ดีที่สุดของชุดทดสอบนี้

5.1.3 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กที่ดีที่สุดคือ 0.4 มม. เป็นระยะที่ใกล้เคียงกับที่คำนวณได้ และเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุดในทางทฤษฎี วัสดุที่ใช้ทำสแต็กนั้นทำจากฟิล์มถ้ำรูป

5.1.4 การเปลี่ยนวัสดุของสแต็กเป็นพลาสติกให้ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างสแต็กด้านร้อนและด้านเย็นไม่ต่างจากสแต็กที่ทำจากฟิล์มถ้ำมาก

5.1.5 อุณหภูมิด้านเย็นของสแต็กค่อยๆลดลง เมื่อถึงระดับหนึ่งก็เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิแตกต่างของสแต็กฝั่งร้อนและเย็นไม่ค่อยแตกต่างกันมากเป็นผลมาจากการเสียดทานของอากาศที่เคลื่อนที่ไป-กลับ กับแผ่นบาง แทนที่อุณหภูมิจะลดลงแต่ผลของการเสียดทานทำให้อุณหภูมิกลับสูงขึ้นมาแล้วหักล้างกับอุณหภูมิที่ลดลงจึงทำให้อุณหภูมิลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

5.1.6 ระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กมีผลอย่างมากต่อการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กน้อยเกินไปก็ทำให้เกิดการเสียดทานของอากาศกับแผ่นบางมากแต่ถ้าระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็กมากเกินไปก็ทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับแผ่นบางของสแต็กน้อยลงไป การเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกก็จะน้อยไปด้วย

## 5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นได้ว่า โดยภาพรวมแล้วอุณหภูมิด้านเย็นของสแต็กยังคงลดลงได้ไม่มาก ทั้งนี้เป็นเนื่องมาจากการคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ของชุดทดสอบและค่าที่คลาดเคลื่อนจากการคำนวณ ดังต่อไปนี้

5.2.1 Drive ratio มีผลอย่างมากต่อการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะลูสติก เพราะว่า Drive ratio เปรียบเสมือนเป็นตัวขับให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับข้อมูลที่ได้ศึกษามา โดยส่วนใหญ่แล้วค่า Drive ratio ดีที่สุดอยู่ 0.02 แต่ในชุดทดสอบนี้ค่า Drive ratio ที่เหมาะสมที่สุดไม่ใช่ 0.02 เพราะว่าทางผู้ศึกษาได้ใช้ค่า Drive ratio อ้างอิงตามเอกสารที่ได้ศึกษามา แต่ผลการทดลองก็ได้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิไม่มากนัก ในการหา Drive ratio อย่างละเอียดนั้นจะต้องใช้ไมโครโฟนขนาดเล็กที่มีความแม่นยำสูงวัดความดันภายในท่อแต่ละจุดแล้วนำค่ามาเฉลี่ยจะได้ค่า  $p_0$  แล้วนำมาคำนวณตามสมการ (3.2) ก็จะได้ค่า Drive ratio

5.2.2 สภาพของสแต็กที่ไม่เรียบร้อย ทำให้ระยะ  $2y_0$  บางจุดในสแต็ก ไม่คงที่ จึงมีผลต่อค่า  $3\delta_k$  ตามสมการที่ (3.4) เมื่อ  $\delta_k$  ไม่คงที่ก็มีผลทำให้สภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของสแต็กกับมวลอากาศที่ไหลผ่านชั้นของสแต็กไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวัฏจักรการทำงานทำให้อุณหภูมิที่ได้หักล้างกันไป

5.2.3 คราบกาบข้าง มีผลโดยตรงกับสแต็ก เพราะทางทฤษฎีแล้ววัสดุที่ใช้ทำสแต็ก จะต้องมามีค่า Thermal conductivity ต่ำเพื่อไม่ให้ความร้อนกระจายไปทั่วสแต็ก คราบกาบข้างที่ไปเคลือบผิวสแต็กจะทำให้ค่า Thermal conductivity เปลี่ยนไป และไปเพิ่มความหนาให้กับสแต็กทำให้ระยะ  $2y_0$  เปลี่ยนไป และคลาดเคลื่อนจากที่คำนวณได้

5.2.4 ในการปรับความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน ขณะทำการทดลองไม่สามารถปรับความถี่ตามที่ต้องการได้และความถี่ที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคปมีการขยับขึ้นลงอยู่ตลอดเวลาเพราะฉะนั้นความถี่ที่นำไปใช้จริงจึงไม่ใช่ค่าที่ได้จากการคำนวณ



### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน ควรใช้เครื่องที่มีความละเอียดและความแม่นยำของสัญญาณที่ปล่อยออกมาเป็นอย่างมาก เพราะความถี่ที่ใช้ในชุดทดสอบจะต้องเป็นความถี่ที่เที่ยงตรง ไม่มีการคลาดเคลื่อน หรือมีการคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด

5.3.2 การทำสแต็ก ในขั้นตอนของการคิดสายเอ็นควอร์ใช้กาวทาลงบนพื้นที่ผิวของวัสดุให้น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้กาวเคลือบบนผิวของวัสดุ ถ้ามีการเคลือบผิวของวัสดุมากจะทำให้ความหนาเปลี่ยนไป ค่า  $K$  (thermal conductivity) เปลี่ยนไปจากค่าเดิมของวัสดุ อาจทำให้ผลของอุณหภูมิคลาดเคลื่อนไปจากที่คำนวณไว้ด้วย และในขั้นตอนของการม้วนสแต็กควรทำการม้วนด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดการบวมหรือการไม่เท่ากันของระยะห่างระหว่างชั้นของสแต็ก

5.3.3  $V_{rms}$  ที่จ่ายให้กับลำโพง เมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจึงต้องทำการควบคุม  $V_{rms}$  ให้คงที่ตลอดการทดลอง โดยการดูจากเครื่องออสซิลโลสโคปแล้วดูการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของคลื่นแล้วควบคุมให้คงที่

5.2.4 การอุดรอยรั่วของชุดทดสอบ ต้องทำการอุดรอยรั่วให้สนิททั้งบริเวณรอยต่อของชุดทดสอบทั้งหมด โดยเฉพาะท่อที่มีสแต็กบรรจุอยู่ เพื่อเป็นการควบคุมความดันภายในท่อให้คงที่และเป็นการลดเสียงรบกวนจากการทดลอง ปลายท่อควรปิดด้วยวัสดุที่มีค่า  $K$  (thermal conductivity) สูงๆ เพื่อเป็นการนำเอาความร้อนของสแต็กฝั่งร้อนออกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- ภาวิษฐ์ กาญจนาวดี. (2552). การปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกที่ใช้สแต็กแบบกันหอย. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ, ปุณยศ วัลลิกุล และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา. (2547). การศึกษาเชิงทดลอง การทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก, ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18.
- Bammann T. C , Howard C.Q , Cazzolato B.S. (2005). **Reviwe of flow through design in thermoacoustic refrigeration** .University of Adelaide , Australia .
- Dev Doshi, Thomas Fenwick. Amanda Gaetano. Christine Lee. Carlita Shields. Bryan van Saders and Yiwen Zhan . (2006) . **Thermoacoustic Refrigeration** . Rutgers University.
- Emmanuel C. Nsofor. (2008) . **Experimental study on the performance of the thermoacoustic refrigerating system**. Southern Illinois University.
- Herman, C. and M. Wetzel. 1996. Design optimization of thermoacoustic refrigerators. **International Journal of Refrigeration** 1997.
- Hofler, T.J. (1986). **Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance**. Ph.D. thesis, California San Diego University.
- Jonathan Newman, Bob Cariste, Alejandro Queiruga, Isaac Davis, Ben Plotnick, Michael Gordon, and Sidney San Martin . (2006). **Thermoacoustic Refrigeration** . GSET Research Journal 2006.
- Luke Zootjens , Carl Howard , Anthony Zander and Ben Cazzolato . (2005). **Feasibility Study of an Adtomotive Thermoacoustic Refrigeration** . University of Adelaide , South Australia .
- Masoud Akhavanbazaz , M.H. Kamran Siddiqui and Rama B. Bhat . (2007). **The impact of gas blockage on the performance of a thermoacoustic refrigerator** . Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University , Canada.
- M.E.H. Tijani, J.C.H. Zeegers, A.T.A.M. de Waele. (2001). **Construction and performance of a thermoacoustic refrlgerator** . Eindhoven University of Technology, Netherland .
- M. E. H. Tijani,a) J. C. H. Zeegers, and A. T. A. M. de Waele .(2001). **The optimal stack spacing for thermoacoustic refrigeration** . Eindhoven University of Technology, Netherland .

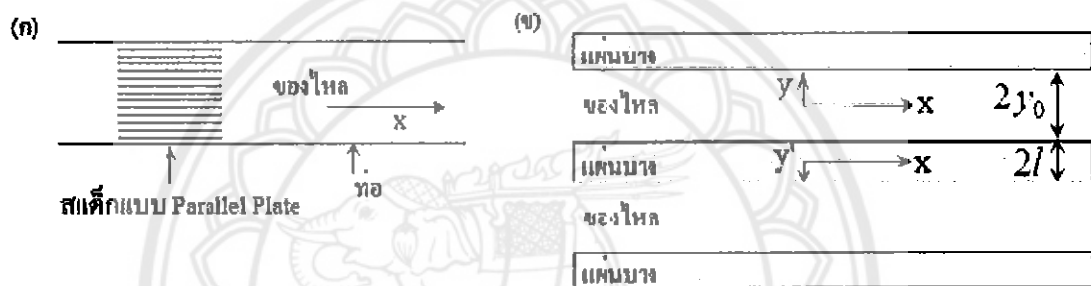
## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- M.E.H. Tijani, J.C.H. Zeegers, A.T.A.M. de Waele. (2002). **Design of thermoacoustic refrigerators** . Eindhoven University .
- Moulay El Hassan Tijani .(2001). **Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration** . Eindhoven University .
- N. MOHD. GHAZALI . (2004) . **THE RMOACOUSTIC HEAT ENGINE**. Teknologi University, Malaysia.
- Normah Mohd Ghazali. (2006). **ENVIRONMENTALLY FRIENDLY REFRIGERATION WITH THERMOACOUSTIC** . Fakulti Kejuruteraan Mekanikal ,University Teknologi, Malaysia .
- Russell, D.A. and P. Weibull. (2002). **Tabletop Thermoacoustic Refrigerator for Demonstrations**. Science and Mathematics Department , Kettering University.
- Ryan Lampe. (2008) . **Design and Testing of Rapid Prototyped Stacks for Thermoacoustic Applications** . NCUR 2008 Salisbury, Maryland April , 2008.
- Swift, G. and B. Ward. and J. Clark. (2007) **Design Environment for Low-amplitude ThermoAcoustic Energy Conversion**. Los Alamos National Laboratory. Available
- Source: <http://www.lanl.gov/thermoacoustics/>, October 17, 2007.
- Swift, G.W. 1988. **Thermoacoustics engine**. J. Acoust. Soc. Am.
- Timothy S. Ryan . (2006). **Design and Control of a Standing – wave Thermoacoustic Refrigerators**. B.S. in Mechanical Engineering, University of Pittsburgh .
- Tijani , M.E.H A.T.A.M. de Waele and J.C.H. Zeegers. (2002). **Design of Thermoacoustic Refrigerators**. Cryogenics .



## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการเทอร์โมอะคูสติก)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีการรวบรวมข้อมูล (Swift, 1988) และเรียบเรียงสมการทางคณิตศาสตร์ใหม่เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก (สว่างทิพย์, 2550) การสร้างสมการทางเทอร์โมอะคูสติกอาศัยภาพที่ 10 ในการอธิบาย จากภาพสแต็กเป็นแบบ Parallel Plates ที่อยู่ภายในท่อซึ่งบรรจุของไหลที่เป็นสารทำงาน โดยกำหนดขนาดของสแต็กให้มีความหนา  $2l$  และระยะห่างระหว่างแผ่น  $2y_0$  ซึ่ง  $x$  มีทิศทางตามการล้นของคลื่นเสียง และ  $y$  มีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นบางของสแต็กในสารทำงาน โดยที่  $y=0$  ที่จุดกึ่งกลางของของไหล และ  $y=y_0$  ที่ขอบเขตของของไหล และแกน  $y'$  มีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นบาง ด้านในแผ่นของสแต็กโดยที่  $y'=0$  ที่จุดกึ่งกลางของแผ่น และ  $y'=l$  ที่ขอบเขตของแผ่นบาง ซึ่ง  $y$  และ  $y'$  มีทิศทางตรงกันข้ามกัน



รูปที่ 1 (ก) ภาพรวมของสแต็ก และ (ข) ภาพขยายของแผ่นบาง  
ที่มา: ภาวิชญ์ (2552)

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการประมาณค่าปริมาณต่างๆ ที่สั้นด้วยความถี่  $\omega$  ซึ่งใช้การขยายเทอมอันดับหนึ่ง เช่น  $p \approx p_m + p_1 e^{i\omega t}$ ,  $\rho \approx \rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}$  และ  $T \approx T_m + T_1 e^{i\omega t}$  เป็นต้น และสมมุติว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วของของไหลในแนวความยาวท่อ  $u_m = 0$  สำหรับสมการทั่วไปที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกประกอบด้วย สมการคลื่น และสมการพลังงาน เป็นหลัก

### 1 สมการเทอร์โมอะคูสติก

#### 1.1 สมการความเร็วของของไหล

การหาความเร็วของของไหลใช้ในการอธิบายคลื่นนิ่งของของไหลที่วิ่งอยู่บนแผ่นบางตามแนวแกน  $x$  โดยอธิบายจากสมการการเคลื่อนที่ของของไหลแบบอัดตัวได้จากกลศาสตร์ของของไหลในสมการ (1) (ภาวิชญ์, 2552)

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \left( \xi + \frac{\mu}{3} \right) \nabla (\nabla \cdot v) \quad (1)$$

โดย  $\rho = \rho_m(x) + \rho_1(x, y)e^{i\omega t}$ ,  
 $v = \hat{x}u_1(x, y)e^{i\omega t} + \hat{y}v_1(x, y)e^{i\omega t}$   
 และ  $p = p_m + p_1e^{i\omega t}$

เมื่อแทนตัวแปรดังกล่าวแล้วเลือกเทอมอันดับหนึ่ง ที่มีเทอม  $x$  ได้

$$i\omega\rho_m u_1 = -\frac{dp_1}{dx} + \mu \nabla^2 u_1 + \left( \xi + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot v_1) \quad (2)$$

โดยที่  $\frac{u_1}{v_1} \geq \frac{\lambda}{\delta_v}, \frac{\partial}{\partial x}$  เป็นอันดับของ  $\frac{1}{\lambda}, \frac{\partial}{\partial y}$  เป็นอันดับของ  $\frac{1}{\delta_v}$

แทนเทอมของตัวแปรลงไปนสมการ (2) ได้

$$i\omega\rho_m u_1 = -\frac{dp_1}{dx} + \mu \nabla^2 u_1 + \left( \xi + \frac{\mu}{3} \right) \frac{1}{\lambda} \left( \frac{v_1}{\delta_v} \right) \quad (3)$$

ในเทอมที่สาม (Viscous Derivative)  $\delta_v = \lambda$  ดังนั้น เทอมนี้สามารถตัดออกได้ เพราะเมื่อเทียบกับเทอม  $\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2}$  จะน้อยกว่า และได้สมการลดรูปเป็นสมการ (4)

$$i\omega\rho_m u_1 = -\frac{dp_1}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \quad (4)$$

ด้วยเงื่อนไขของ  $u_1(y_0) = 0$  ในสมการ (4) และจัดรูปสมการใหม่ได้  $\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} - i\omega\rho_m u_1$

$$\text{รากของสมการคือ } \lambda_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{i\omega\rho_m}{\mu}} = \sqrt{\frac{i\omega\rho_m}{\mu}}$$

$$\text{ความเร็วของเสียงจะได้ } u_1 = c_1 e^{\sqrt{\frac{i\omega\rho_m}{\mu}} y} + c_2 e^{-\sqrt{\frac{i\omega\rho_m}{\mu}} y} + \frac{i}{\omega\rho_m} \frac{dp_1}{dx}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์โดยแทนค่าความเร็วที่ขอบของแผ่นบาง ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์หรือ  $u_1(y_0) = 0$  จะ

$$\text{ได้ } c_2 = 0 \text{ และ } c_1 = -\frac{i}{\omega\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega\rho_m}{\mu}} y_0\right)}$$

$$\text{ดังนั้น ความเร็วของเสียงจะได้ } u_1(y) = -\frac{i}{\omega\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega\rho_m}{\mu}} y\right)}{\cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega\rho_m}{\mu}} y_0\right)} + \frac{i}{\omega\rho_m} \frac{dp_1}{dx}$$

$$\text{จัดรูปใหม่ } u_1(y) = \frac{i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} \left( 1 - \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega \rho_m}{\mu}} y\right)}{\cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega \rho_m}{\mu}} y_0\right)} \right)$$

$$\text{โดยที่ } \delta_v = \sqrt{2\nu/\omega}, \quad \sqrt{\frac{i\omega \rho_m}{\mu}} = \frac{(1+i)}{\delta_v} \quad \text{และ } \nu = \frac{\mu}{\rho_m} \quad \text{แทนตัวแปรดังกล่าวลงใน}$$

สมการความเร็วเสียง จะได้ผลเฉลยในสมการ (5)

$$u_1 = \frac{i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} \left( 1 - \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \right) \quad (5)$$

### 1.2 สมการอุณหภูมิของแผ่นบางในสแต็ค $T_s$

สมการอุณหภูมิของแผ่นบางในสแต็คได้มาจากสมการการนำความร้อนของแผ่นบาง แสดงในสมการ (6) (ภาวิชัย, 2552)

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = K_s \nabla^2 T_s \quad (6)$$

$$\text{โดย } T_s = T_m(x) + T_{s1}(x, y') e^{i\omega t} \quad \text{และ } K_s = \frac{K_s}{\rho_s c_s}$$

แทนตัวแปรในสมการ (6) และเลือกเทอมอันดับหนึ่งที่มีเทอม  $x$  จะได้  $T_s$

$$i\omega T_{s1} = K_s \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial y'^2} \quad (7)$$

$$\text{จัดรูปสมการ ใหม่ได้ } K_s \left( \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial y'^2} \right) - i\omega T_{s1} = 0$$

$$\text{รากของสมการคือ } \lambda_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{i\omega}{K_s}}$$

$$\text{อุณหภูมิแผ่นบางคือ } T_{s1} = c_1 \cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega}{K_s}} y'\right) + c_2 \sinh\left(\sqrt{\frac{i\omega}{K_s}} y'\right)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์โดยแทนค่าที่ขอบเขตโดยอุณหภูมิ  $T_{b1}$  ที่ขอบเขต  $y' = l$  และ  $T_{s1}(y' = l) = T_{b1}$  จะได้  $c_2 = 0$  และ  $c_1 = \frac{T_{b1}}{\cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega}{K_s}} l\right)}$

ดังนั้นอุณหภูมิแผ่นบางจะได้

$$T_{s1} = T_{b1} \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega}{K_s}} y\right)}{\cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega}{K_s}} l\right)}$$

โดย  $\delta_s = \sqrt{2K_s/\omega}$ ,  $\sqrt{\frac{i\omega}{K_s}} = \frac{(1+i)}{\delta_s}$  แทนตัวแปรดังกล่าวลงในสมการอุณหภูมิของแผ่นบาง จะได้ผลเฉลยในสมการ (8)

$$T_{s1} = T_{b1} \frac{\cosh((1+i)y/\delta_s)}{\cosh((1+i)l/\delta_s)} \quad (8)$$

### 1.3 สมการอุณหภูมิของของไหล

สมการอุณหภูมิของของไหลได้มาจากสมการการถ่ายเทความร้อนของของไหลทั่วไป แสดงในสมการ (9) (ภาวิชัย, 2552)

$$\rho T \left( \frac{\partial s}{\partial t} + v \cdot \nabla s \right) = \nabla \cdot (K \nabla T) + (\text{terms quadratic in velocities}) \quad (9)$$

โดยแทนตัวแปร  $ds = \left(\frac{c_p}{T}\right) dT - \left(\frac{\beta}{\rho}\right) dp$  สมการ (9) และเลือกเทอมอันดับหนึ่งที่มีเทอม  $x$  ได้

$$\rho_m c_p \left( i\omega T_l + \mu_l \frac{dT_m}{dx} \right) - i\omega T_m \beta p_1 = K \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \quad (10)$$

แทนเทอม  $u_1$  จากสมการ (10) ลงในสมการ (11) และทำการจัดรูปใหม่ได้

$$K \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} - i\omega \rho_m c_p T_1 - \frac{i c_p}{\omega} \frac{dp_1}{dx} \left( 1 - \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \right) \frac{dT_m}{dx} + i\omega T_m \beta p_1 = 0$$



เงื่อนไขของ  $T_1(y_0) = T_{s1}(l) = T_{b1}$  แทนค่าได้ผลเฉลย

$$T_1 = \frac{T_m \beta}{\rho_m c_p} p_1 - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \times \left( 1 - \frac{\sigma \cosh\left[\frac{(1+i)y}{\delta_v}\right]}{(\sigma-1) \cosh\left[\frac{(1+i)y_0}{\delta_v}\right]} \right) \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} - \left[ \frac{T_m \beta}{\rho_m c_p} p_1 + \frac{\left(\frac{dp_1}{dx}\right) \left(\frac{dT_m}{dx}\right)}{(\sigma-1) \rho_m \omega^2} \left( 1 + \frac{\epsilon_s f_v}{f_k} \right) \right] \times \frac{\cosh\left[\frac{(1+i)y}{\delta_k}\right]}{(1+\epsilon_s) \cosh\left[\frac{(1+i)y_0}{\delta_k}\right]} \quad (11)$$

โดย  $\sigma = \frac{c_p \mu}{K} = \frac{v}{k}$  และ  $\delta_k = \sqrt{2K/\omega} k = K/\rho_m c_p$

ส่วน  $f_v$ ,  $f_k$  และ  $\epsilon_s$  แสดงในสมการ (12), (13) และ (14) ตามลำดับ

$$f_v = \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_v]}{(1+i)y_0/\delta_v} \quad (12)$$

$$f_k = \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_k]}{(1+i)y_0/\delta_k} \quad (13)$$

$$\epsilon_s = \frac{\sqrt{K \rho_m c_p} \tanh[(1+i)y_0/\delta_k]}{\sqrt{K_s \rho_s c_s} \tanh[(1+i)l/\delta_s]} \quad (14)$$

#### 1.4 สมการคลื่น

สมการคลื่นที่ใช้อธิบายของไหลได้มาจากสมการต่อเนื่อง และสมการการเคลื่อนที่ของของไหล โดยเริ่มจากใช้ค่าของสถานะของของไหลแทนลงในสมการต่อเนื่อง หรือสมการ (15) โดยเลือกเทอมอันดับหนึ่งที่มีเทอม  $x$  ได้สมการ (16) (ภาวิษฐ์, 2552)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (15)$$

$$i\omega \rho_1 + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_m u_1) + \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

รวมสมการ (16) กับสมการการเคลื่อนที่ของของไหล หรือสมการ (4) ได้

$$-\omega^2 \rho_1 - \frac{d^2 p_1}{dx^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) + i\omega \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

สมการสถานะของ  $\rho_1$  เขียนในเทอมของ  $T_1$  และ  $p_1$  นั่นคือ

$$\rho_1 = -\rho_m \beta T_1 + \left( \frac{\gamma}{a^2} \right) p_1 \quad (18)$$

แทนค่าสมการสถานะของ  $\rho_1$  ในสมการ (17) ลงในสมการ (17) จะได้

$$\omega^2 \rho_m \beta T_1 - \frac{\omega^2}{a^2} \gamma p_1 - \frac{d^2 p_1}{dx^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) + i\omega \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

แทนค่า  $u_1$  สมการความเร็วของของไหลจากสมการ (5) และ  $T_1$  สมการอุณหภูมิของของไหลจากสมการ (11) ลงในสมการ (19) และอินทิเกรต  $y$  ตั้งแต่ 0 ถึง  $y_0$  ได้  $p_1$  ที่เป็นฟังก์ชันที่มี  $x$  เท่านั้น โดย  $u_1$  เป็นศูนย์ทั้ง  $y = 0$  และสมมาตรค่าที่ขอบ  $y = y_0$

$$\left( 1 + \frac{(\gamma-1)f_K}{1+\epsilon_S} \right) p_1 + \frac{\rho_m a^2}{\omega^2} \frac{d}{dx} \left( \frac{1-f_V}{\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \right) - \beta \frac{a^2}{\omega^2} \frac{f_K-f_V}{(1-\sigma)(1+\epsilon_S)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0 \quad (20)$$

สมการ (20) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ โดยขนาดของความดันเสียง  $p_1(x)$  อธิบายโดยเทอมของการกระจายของอุณหภูมิเฉลี่ย  $T_m(x)$  คุณสมบัติของวัสดุ และรูปร่างของของไหลและของแข็งสำหรับก๊าซอุดมคติ และกับ  $\epsilon_S = 0$

ให้  $p_x = \frac{dp_1}{dx}$  เป็นฟังก์ชันช่วย โดย

$$\frac{dp_x}{dx} = -\frac{i\omega \rho_m}{1-f_V} u_1 \quad (21)$$

แทนค่าฟังก์ชันช่วยสมการ (21) ลงในสมการ (20) จะได้

$$\left(1 + \frac{(\gamma-1)f_K}{1+\epsilon_s}\right) p_1 + \frac{\rho_m a^2}{\omega^2} \frac{d}{dx} (-i\omega u_1) - \beta \frac{a^2}{\omega^2} \frac{f_K - f_v}{(1-\sigma)(1+\epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} \left(\frac{-i\omega \rho_m u_1}{1-f_v}\right) = 0 \quad (22)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้สมการ (23)

$$\frac{du_1}{dx} = -\frac{i\omega}{\rho_m a^2} \left(1 + \frac{(\gamma-1)f_K}{1+\epsilon_s}\right) p_1 + \beta \frac{f_K - f_v}{(1-\sigma)(1+\epsilon_s)(1-f_v)} \frac{dT_m}{dx} u_1 \quad (23)$$

ให้  $U_1 = u_1 \cdot A_{fluid}$  แทนในสมการ (21) และ (23) จะได้สมการ (24) และ (25) ตามลำดับ

$$\frac{dp_1}{dx} = -\frac{i\omega \rho_m}{(1-f_v)A_{fluid}} U_1 \quad (24)$$

$$\frac{dU_1}{dx} = -\frac{i\omega A_{fluid}}{\rho_m a^2} \left[1 + \frac{\gamma-1}{1+\epsilon_s} f_K\right] p_1 + \frac{\beta(f_K - f_v)}{(1-f_v)(1-\sigma)(1+\epsilon_s)} \frac{dT_m}{dx} U_1 \quad (25)$$

### 1.5 สมการฟลักซ์ของพลังงาน

สมการฟลักซ์ของพลังงาน (Energy Flux)  $\dot{H}_2$  คิดจากเวลาเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  โดยต้องไม่ขึ้นกับ  $x$  ซึ่งได้สมการฟลักซ์ของพลังงานที่เป็นสมการอันดับสองในขนาดของเสียง โดยเริ่มต้นจากสมการทรงพลังงานหรือ Conservation of Energy (ภาวิษฐ์, 2552)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \epsilon\right) = -\nabla \cdot \left[\rho v \left(\frac{1}{2} v^2 + h\right) - K \nabla T - v \cdot \Sigma\right] \quad (26)$$

โดย

$$\Sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right) + \xi \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \quad (27)$$

เทอมใน  $V \cdot v^2$  เป็นสมการอันดับสาม และถูกตัดออกไป อินทิเกรตเทอมที่เหลือในสมการ (26) ตาม  $y$  ถึง  $y' = 0$  ที่เวลาเฉลี่ย

$$\int_{y=0}^{y'=0} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \epsilon \right) dy = \int_{y=0}^{y'=0} -\nabla \cdot \left[ \rho v \left( \frac{1}{2} v^2 + h \right) - K \nabla T - v \cdot \Sigma \right] dy \quad (28)$$

$$\frac{d}{dx} \left[ \int_0^{y_0} \overline{puhdy} - \int_0^{y_0} K \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} dy - \int_0^l K_s \frac{\partial \bar{T}_s}{\partial x} dy' - \int_0^{y_0} (\overline{v \cdot \Sigma})_x dy \right] = 0 \quad (29)$$

ในสมการ (29) เครื่องหมายขีดด้านบนเป็นค่าที่เวลาเฉลี่ย ปริมาณที่อยู่ในเครื่องหมายวงเล็บเป็นค่าฟังก์ชันของพลังงานที่เวลาเฉลี่ยต่อหน่วยเส้นรอบรูป  $\dot{H}/\Pi$  ตาม  $x$

$$\frac{\dot{H}}{\Pi} = \int_0^{y_0} \overline{puhdy} - \int_0^{y_0} K \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} dy - \int_0^l K_s \frac{\partial \bar{T}_s}{\partial x} dy' - \int_0^{y_0} (\overline{v \cdot \Sigma})_x dy \quad (30)$$

ขยายเทอมใน  $\dot{H}$  ไปเป็นสมการอันดับสองในช่วงกว้างของเสียง อินทรีเกรคในเทอมแรกของสมการ (30) จะได้

$$\int_0^{y_0} \overline{puhdy} \approx \int_0^{y_0} (\rho_m \overline{u_1 h_m} + \rho_m \overline{u_2 h_m} + \overline{\rho_m u_1 h_m} + \rho_m \overline{u_1 h_1}) dy \quad (31)$$

ในสมการ (31) เทอมแรกทางขวาของสมการเป็นศูนย์เพราะ  $u_1 = 0$  อินทรีเกรคของเทอมที่สองและสามของสมการได้ผลรวมเป็นศูนย์เพราะมวลเฉลี่ยต่อเวลาเป็นศูนย์

$$\int_0^{y_0} (\rho_m \overline{u_2} + \overline{\rho_1 u_1}) dy = 0 \quad (32)$$

ดังนั้นในสมการ (31) จึงเหลือเทอมที่ดี

$$\int_0^{y_0} \overline{puhdy} \approx \int_0^{y_0} \rho_m \overline{u_1 h_1} dy = \int_0^{y_0} [\rho_m c_p \overline{T_i u_i} + (1 - T_m \beta) \overline{p_i u_i}] dy \quad (33)$$

$$\text{เมื่อให้ } dh = T ds + (1/\rho) dp = c_p dT + (1/\rho)(1 - T\beta) dp$$

สำหรับสมการ (30) ในเทอมอินทรีเกรคสองและสาม ประกอบด้วยทุกอันดับ มีเพียงเทอมของอันดับศูนย์เท่านั้นที่เราสนใจ ดังนั้น

$$-\int_0^{y_0} K \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} dy - \int_0^l K_s \frac{\partial \bar{T}_s}{\partial x} dy' \approx -(y_0 K + l K_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (34)$$

เทอมสุดท้ายของสมการ (30) มีอยู่หลายเทอม ใช้ตัวแปรเหมือนกับที่ใช้กับสมการ (4) พบว่า

$\frac{y_0 \mu u_1^2}{\lambda_v}$  เป็นค่าอันดับของเทอมใหญ่ แต่  $\overline{puh}$  สามารถประมาณค่าอันดับได้  $p_1 u_1 \cong \rho_m a u_1^2$  ดังนั้น

$$\frac{\int_0^{y_0} (\overline{v \cdot \Sigma})_x dy}{\int_0^{y_0} \overline{puh} dy} = \frac{y_0 \mu u_1^2}{\lambda (\rho_m a u_1^2) y_0} = \frac{u}{\lambda \rho_m a} = \frac{v}{\lambda a} = \frac{1}{2} \frac{\delta_v^2}{\lambda^2} \ll 1 \quad (35)$$

เทอมของความหนืด (Viscous Term) หรือ  $(v \cdot \Sigma)_x$  สามารถตัดออกได้ ดังนั้น จะได้สมการ (30) เขียนใหม่เป็น

$$\frac{\dot{H}_2}{\Pi} = \int_0^{y_0} [\rho_m c_p \overline{T_1 u_1} + (1 - T_m \beta) \overline{p_1 u_1}] dy - (y_0 K + l K_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (36)$$

แทนค่า  $T_1$  และ  $u_1$  ด้วยสมการ (5) และ (11) ลงในสมการ (36) และอินทิเกรตกับ  $y$  ตั้งแต่ 0 ถึง  $y_0$  จะได้สมการพลักซ์ของพลังงานในสมการ (37)

$$\dot{H}_2 = \frac{\Pi y_0}{2\omega \rho_m} \text{Im} \left[ \frac{d\tilde{p}_1}{dx} p_l \left( 1 - \tilde{f}_v - \frac{T_m \beta (f_k - \tilde{f}_v)}{(1 + \epsilon_s)(1 + \sigma)} \right) \right] + \frac{\Pi y_0 c_p}{2\omega^3 \rho_m (1 - \sigma)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_l}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \times \text{Im} \left[ \tilde{f}_v + \frac{(f_k - \tilde{f}_v)(1 + \epsilon_s f_v / f_k)}{(1 + \epsilon_s)(1 + \sigma)} \right] - \Pi (y_0 K + l K_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (37)$$

โดย  $\text{Im}[\ ]$  เป็นจำนวนเชิงซ้อนส่วนจินตภาพ (Imaginary Part) และตัวแปรเป็นจำนวนเชิงซ้อนคอนจูเกต (Complex Conjugate) พลักซ์ของพลังงาน  $\dot{H}_2$  ตลอดแนว  $x$  อธิบายได้ด้วยเทอมของ  $T_m(x)$ ,  $p_1(x)$  และคุณสมบัติของวัสดุ และรูปร่างสำหรับก๊าซอุดมคติ และกับ  $\epsilon_s = 0$  เมื่อจัดรูปสมการ (37) สามารถใช้อธิบายอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในสแต็กที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติกเนื่องจากพลักซ์ของพลังงาน  $\dot{H}_2$  ที่ไหลคงที่ตลอดความยาวของสแต็กได้

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{H_2 - \frac{1}{2} Re \left[ p_l \bar{U}_l \left( 1 - \frac{T_m \beta (f_k - \tilde{f}_v)}{(1 + \epsilon_s)(1 + \sigma)(1 - \tilde{f}_v)} \right) \right]}{\frac{\rho_m c_p}{2 \omega A_{fluid}(1 - \sigma)} Im \left[ \tilde{f}_v + \frac{(f_v - \tilde{f}_v)(1 + \epsilon_s f_v / f_k)}{(1 + \epsilon_s)(1 + \sigma)} \right] - A_{fluid} K - A_{fluid} K_{solid}} \quad (38)$$

สมการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์เทอร์โมอะคูสติก และใช้ในการออกแบบได้

## 2 สมการอธิบายอุปกรณ์ของเครื่องเทอร์โมอะคูสติก

สมการที่ใช้อธิบายอุปกรณ์ต่างๆของเครื่อง จะประกอบด้วยสมการคลื่น และสมการพลังงานเป็นหลัก (ภาวิษฐ์, 2552)

### 2.1 ท่อ และท่อลดขนาด

สมการคลื่นของท่อสามารถใช้สมการคลื่นในสมการ (24) และ (25) แต่อุณหภูมิของของไหลขณะไหลผ่านท่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือ  $\frac{dT_m}{dx} = 0$  จะได้สมการ (39) และ (40)

$$\frac{dp_l}{dx} = - \frac{i \omega p_m}{(1 - f_v) A} U_l \quad (39)$$

$$\frac{dU_l}{dx} = - \frac{i A \omega}{\rho_m a^2} \left[ 1 + \frac{\gamma - 1}{1 + \epsilon_s} f_k \right] P_l \quad (40)$$

ถ้า  $R/\delta < 25$  สามารถคำนวณหา  $f_k$  และ  $f_v$  โดยใช้ฟังก์ชันเชิงซ้อนเบสเซล (Complex Bessel Functions)

$$f_k = \frac{2J_1[(i-1)r_0/\delta_k]}{(i-1)(r_0/\delta_k)J_0[(i-1)r_0/\delta_k]} \quad (41)$$

$$f_v = \frac{2J_1[(i-1)r_0/\delta_v]}{(i-1)(r_0/\delta_v)J_0[(i-1)r_0/\delta_v]} \quad (42)$$

และถ้า  $R/\delta > 30$

$$f_k = (1 - i)\Pi\delta_k/24 \quad (43)$$

$$f_v = (1 - i)\Pi\delta_v/24 \quad (44)$$

และ  $\epsilon_s$  ได้จากคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำท่อ

$$\epsilon_s = \sqrt{\frac{(K\rho_m c_p)}{K_s \rho_s c_s}} \quad (45)$$

สมการพลังงาน เป็นพลังงานที่ไหลออกมาในภาพรวมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขณะที่มีการไหลภายในท่อหรือ  $\frac{dT_m}{dx} = 0$  ดังนั้นจึงมีเพียงการสูญเสียพลังงานที่ผิวท่อเท่านั้น คือ กำลังเสียงสูญเสีย (Acoustic Power Dissipation) โดย

$$\frac{dW_2}{ds} = \frac{1}{4} \rho_m \quad (46)$$

สำหรับกรณีที่มีการนำความร้อน

$$\dot{H}_{out} = \dot{H}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (47)$$

ในสมการ (47) กรณีที่มีการหุ้มฉนวน จะไม่มีการสูญเสียพลังงาน

## 2.2 อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน

สมการคลื่นเป็นสมการเดียวกับสมการของท่อคือสมการ (39) และ (40) พิจารณาว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหลขณะไหลผ่านหรือ  $\frac{dT_m}{dx} = 0$  โดยที่  $f_v, f_k$  และ  $\epsilon$  ใช้สมการ (12), (13) และ (14) ตามลำดับ สมการคลื่นนี้ให้ปริมาณความร้อนที่ดึงเข้าหรือถ่ายเทได้อย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิในระบบไม่มีผลกระทบจากความร้อนที่ดึงหรือถ่ายเทความร้อนจากภายนอก (ภาวิชัย, 2552)

สมการพลังงานเป็นพลังงานที่ไหลออกมาในภาพรวมของปริมาณความร้อน  $\dot{H}$  โดยมีเครื่องหมายเป็นบวกเมื่อความร้อนดึงเข้าสู่ระบบ ส่วนพลังงานที่สูญเสียที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนถือว่าน้อยไม่นำมาคิดเมื่อเทียบกับประมาณความร้อน จึงได้สมการ (48)

$$\dot{H}_{out} = \dot{H}_{in} + Q \quad (48)$$

### 2.3 ปลายท่อปิด และ Compliance

สมการอัตราการไหล ใช้อธิบายกรณีท่อปลายปิด และกรณีของ Compliance คือสมการ (49) และ (50) ตามลำดับ (ภาวิชนม์, 2552)

$$U_{out} = U_{in} - \frac{\omega p_1 \gamma - 1}{\rho a^2 \gamma + \epsilon_s} A \frac{\delta k}{2} \quad (49)$$

โดยที่  $\epsilon$  คัดจากสมการ (45)

$$U_{out} = U_{in} - i \frac{\omega p_1}{\rho a^2} \left[ V - i \frac{\gamma - 1}{\gamma + \epsilon_s} A \frac{\delta k}{2} \right] \quad (50)$$

สมการพลังงานเป็นพลังงานที่ไหลถูกมองในภาพรวมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะที่มีการไหลภายในท่อหรือ  $\frac{dT_m}{dx} = 0$  ดังนั้นจึงมีเพียงการสูญเสียพลังงานที่ผิวท่อเท่านั้น คือกำลังเสียงสูญเสียเช่นเดียวกับท่อในสมการ (46) และ (47)



### สมการฟลักซ์ของพลังงาน

เริ่มจากสมการฟลักซ์ของพลังงานในสมการ (51) และสมการฟลักซ์ของงานในสมการ (52) (Swift, 1988) แล้วใช้วิธีสมการลดรูปเชิงเส้น แล้วแปลงสมการเป็น Normalized (ตารางที่ 1) โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวแปร Normalized ที่ใช้แทนค่าในสมการฟลักซ์ของพลังงาน และสมการฟลักซ์ของงาน

ตัวแปร Normalized	สมการ Normalized
Normalized Cooling Power	$Q_{cn} = Q_{cn} / p_m a A$
Normalized Acoustic Power	$W_n = W_2 / p_m a A$
Normalized Temperature Difference	$\Delta T_{mn} = \Delta T_m / T_m$
Normalized Thermal Penetration Depth	$\delta_{kn} = \delta_k / y_0$
Normalized Stack Length	$L_{sn} = \omega \Delta x / a$

$$\dot{H}_2 = -\frac{1}{4} \Pi \delta_k \frac{T_m \beta p_s u_s}{(1+\epsilon_s)(1+\sigma) \left(1 - \frac{\delta_v}{y_0} + \frac{\delta_v^2}{2y_0^2}\right)} \times \left[ \Gamma \frac{1+\sqrt{\sigma}+\sigma+\sigma\epsilon_s}{1+\sqrt{\sigma}} - \left(1 + \sqrt{\sigma} - \frac{\delta_v}{y_0}\right) \right] - \Pi (y_0 K + I K_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (51)$$

$$\dot{W}_2 = \frac{1}{4} \Pi \delta_k \Delta x \frac{(\gamma-1) \omega p_s^2}{\rho_m a^2 (1+\epsilon_s)} \times \left( \frac{\Gamma}{(1+\sqrt{\sigma}) \left(1 - \frac{\delta_v}{y_0} + \frac{\delta_v^2}{2y_0^2}\right)} - 1 \right) - \frac{1}{4} \Pi \delta_v \Delta x \frac{\omega \rho_m u_s^2}{1 - \delta_v/y_0 + \delta_v^2/2y_0^2} \quad (52)$$

โดยที่  $p_s = p_0 \cos(kx_s)$ ,  $u_s = \left(1 + \frac{l}{y_0}\right) \frac{p_0}{\rho_m a} \sin(kx_s)$ ,  $\Gamma = \frac{\Delta T_m n \tan(x_n)}{B L_{sn} (\gamma-1)}$ ,  
 $\Pi = \frac{A}{y_0 + l}$  และ  $\delta_v = \sqrt{\sigma} \delta_k$ ,  $a^2 = \frac{p_m}{\rho_m} \gamma$ ,  $B = \frac{y_0}{(y_0 + l)}$

สำหรับพลักซ์ของพลังงานให้แทนค่าตัวแปรข้างต้นในสมการ (51) ได้

$$\begin{aligned} \dot{H}_2 = & -\frac{A}{4(y_0 - 1)} \delta_k \frac{T_m \beta \left( p_0^2 / \rho_m \left( \frac{p_m}{a \rho_m} \gamma \right) \right) \left( \frac{y_0 + 1}{y_0} \right) \cos(kx_s) \sin(kx_s)}{(1 + \epsilon_s)(1 + \sigma)(1 - \sqrt{\sigma} \delta_k / y_0 + \sigma \delta_k^2 / 2y_0^2)} \\ & \times \left[ \frac{\Delta T_{mn} \tan(X_n)}{BL_{sn}(\gamma - 1)} \frac{1 + \sqrt{\sigma} + \sigma}{1 + \sqrt{\sigma}} - \left( 1 + \sqrt{\sigma} - \frac{\sqrt{\sigma} \delta_k}{y_0} \right) \right] - \frac{A}{(y_0 + 1)} (y_0 K + l K_s) \frac{dT_m}{dx} \end{aligned} \quad (53)$$

โดยที่  $T_m \beta = 1, l = 0, \epsilon_s = 0$  และ  $\frac{dT_m}{dx} < 0$  แล้วจัดรูปสมการใหม่

$$\begin{aligned} \dot{H}_2 = & -\frac{Ap_m a \delta_k D^2}{4\gamma y_0} \frac{\cos(kx_s) \sin(kx_s)}{(1 + \sigma)(1 - \sqrt{\sigma} \delta_k / y_0 + \sigma \delta_k^2 / 2y_0^2)} \\ & \times \left[ \frac{\Delta T_{mn} \tan(X_n)}{BL_{sn}(\gamma - 1)} \frac{1 + \sqrt{\sigma} + \sigma}{1 + \sqrt{\sigma}} - \left( 1 + \sqrt{\sigma} - \frac{\sqrt{\sigma} \delta_k}{y_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (54)$$

พลักซ์ของพลังงานเป็นพลังงานที่ทำความเย็น ( $\dot{Q}_c$ ) โดยตรง ดังนั้นจะได้สมการ Normalized Cooling Power ( $Q_{cn}$ )

$$\begin{aligned} Q_{cn} = & \frac{\dot{H}_2}{Ap_m a} \\ = & -\frac{\delta_{kn} D^2}{4\gamma} \times \frac{\cos(x_n) \sin(x_n)}{(1 + \sigma) \left( 1 - \delta_{kn} \sqrt{\sigma} + \frac{\sigma \delta_{kn}^2}{2} \right)} \times \left[ \frac{1 + \sqrt{\sigma} + \sigma}{1 + \sqrt{\sigma}} \times \right. \\ & \left. \frac{\Delta T_{mn} \tan(X_n)}{BL_{sn}(\gamma - 1)} - \left( 1 + \sqrt{\sigma} - \sqrt{\sigma} \delta_{kn} \right) \right] \end{aligned} \quad (55)$$

ให้  $\Lambda = 1 - \delta_{kn} \sqrt{\sigma} + \sigma \delta_{kn}^2 / 2$  และจัดรูปสมการใหม่

$$\begin{aligned} Q_{cn} = & -\frac{\delta_{kn} D^2 \sin(2X_n)}{8\gamma(1 + \sigma)\Lambda} \\ & \times \left[ \frac{\Delta T_{mn}(1 + \sqrt{\sigma} + \sigma) \tan(x_n)}{BL_{sn}(\gamma - 1)(1 + \sqrt{\sigma})} - \left( 1 + \sqrt{\sigma} - \sqrt{\sigma} \delta_{kn} \right) \right] \end{aligned} \quad (56)$$

สำหรับสมการพลังค์ของงาน โดยแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ (52) จะได้

$$\dot{W}_2 = \frac{A p_m a D^2 \delta_{kn}}{4\gamma} \left[ \times B(\gamma - 1) \cos^2(x_n) L_{sn} \times \left( \frac{\Delta T_{mn} \tan(x_n)}{B L_{sn} (\gamma - 1) (1 + \sqrt{\sigma}) \Lambda} - 1 \right) - \frac{\sqrt{\sigma} \sin^2(x_n) L_{sn}}{B \Lambda} \right] \quad (57)$$

โดย  $\Lambda = 1 - \delta_{kn} \sqrt{\sigma} + \sigma \delta_{kn}^2 / 2$  เนื่องจากพลังงานเสียงเป็นพลังงานเดียวที่ใส่ให้กับระบบ ดังนั้นพลังค์ของงานจึงเป็นค่าพลังงานเสียง และจะได้สมการ Normalized Acoustic Power

$$W_n = \frac{\dot{W}_2}{A p_m a} = \frac{\delta_{kn} D^2}{4\gamma} \left[ \frac{B L_{sn} (\gamma - 1) \cos^2 x_n \left( \frac{\Delta T_{mn} \tan(x_n)}{B L_{sn} (\gamma - 1) (1 + \sqrt{\sigma}) \Lambda} \right) - \frac{L_{sn} \sqrt{\sigma} \sin^2 x_n}{B \Lambda}}{B \Lambda} \right]$$

จัดรูปสมการใหม่

$$W_n = \frac{\delta_{kn} L_{sn} D^2}{4\gamma} \left[ B(\gamma - 1) \cos^2 x_n \left( \frac{\Delta T_{mn} \tan(x_n)}{B L_{sn} (\gamma - 1) (1 + \sqrt{\sigma}) \Lambda} \right) - \frac{\sqrt{\sigma} \sin^2 x_n}{B \Lambda} \right] \quad (58)$$

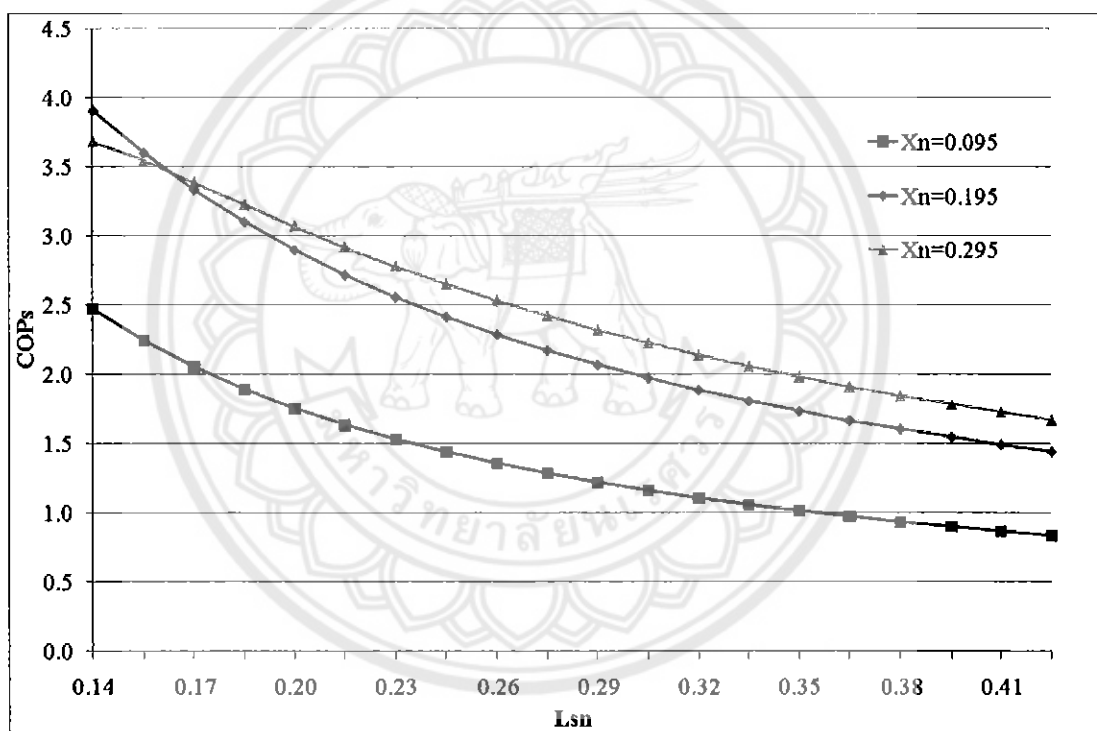
จากสมการ Normalized Cooling Power ( $Q_{cn}$ ) สมการ (55) และสมการ Normalized Acoustic Power สมการ (57) ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสแต็ก ( $COP_s$ ) ได้จากสมการ (58) โดยใช้ข้อมูลในการคำนวณจากตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสแต็ก

Operation Parameters	Gas Parameters
$p_m = 100,000 \text{ Pa}$	$a = 346 \text{ m/s}$
$T_m = 300 \text{ K}$	$\sigma = 0.7123$
$\Delta T_{mn} = 0.067$	$\gamma = 1.4$
$D = 0.02$	$B = 0.75$
$f = 336 \text{ Hz}, k = 5.99 \text{ m}^{-1}$	$\delta_{kn} = 0.67$

$$COP_s = \left| \frac{Q_{cn}}{W_n} \right| \quad (66)$$

สมการ  $COP_s$  ข้างต้น จะประกอบด้วยสองตัวแปรคือ  $Q_{cn}$  และ  $W_n$  ซึ่งสมการภายใน 2 ตัวแปรนี้มี  $x_n$  และ  $L_{sn}$  เป็นตัวแปรอิสระ ดังนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้  $x_n$  เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งแล้วเปลี่ยนค่า  $L_{sn}$  ที่เล็กลงเรื่อยๆ ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเส้นกราฟที่ต้องการ จากที่กล่าวมาข้างต้น จะได้เส้นกราฟ 1 เส้น เปลี่ยนค่าคงที่  $x_n$  เป็นค่าใหม่ แล้วทำแบบเดิม จะได้เส้นกราฟอีกเส้น เส้นกราฟที่หาได้นั้นนำมาพิจารณาเลือกค่า  $x_n$  และ  $L_{sn}$  แสดงในรูปที่ 2 การเลือก  $x_n$  และ  $L_{sn}$  ให้เลือกสองตัวแปรนี้ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และเลือกค่า  $COP_s$  มากที่สุดที่เป็นไปได้ ในรูปที่ 2 นั้นเส้นกราฟ  $x_n = 0.195$  ที่ตำแหน่ง  $L_{sn} = 0.210$  เป็นค่าที่เหมาะสม (ภาวิชัย, 2552)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสแตก ( $COP_s$ ) กับ  $x_n$  และ  $L_{sn}$

## ประวัติผู้เขียนโครงการ

ชื่อ-นามสกุล : นายกิตติ กิติเลิศ

รหัสนิติ : 50380034

ภูมิลำเนา : 359/1 หมู่ 1 ต. ขุนขวม อ. ขุนขวม จ.แม่ฮ่องสอน 58140

### ประวัติการศึกษา

จบระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนขุนขวม

จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนขุนขวมวิทยา

ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก



ชื่อ-นามสกุล : นายอนุรักษ์ ยาวิละ

รหัสนิติ : 50380683

ภูมิลำเนา : 401 หมู่ 2 ต. ลอ อ. จุน จ. พะเยา 56150

### ประวัติการศึกษา

จบระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนอนุบาลจุน

จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนจุนวิทยาคม

ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

