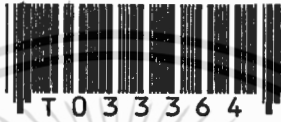


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมรรถนะของเครื่องลดเสียงชนิด HELMHOLTZ

ACOUSTICAL PERFORMANCE OF HELMHOLTZ RESONATOR



บุญชัย ศิลปกิจวงษ์กุล

BOONCHAI SILAPAKIJWONGKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

เลขหมู่เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน ISBN 974-622-486-7 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เลขทะเบียน 33364 หักดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วัน, เดือน, ปี - 2 ส.ค. 2542

ACOUSTICAL PERFORMANCE OF HELMHOLTZ RESONATOR



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-622-486-7
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะของเครื่องลดเสียงชนิด HELMHOLTZ
นักศึกษา	นายบุญชัย ศิลปกิจวงษ์กุล
รหัสประจำตัว	36061196
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.อัครเดช สินธุภัก

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการหาสมรรถนะ การลดเสียง ของ Resonator ชนิด Helmholtz โดยวัดความสามารถในการลดเสียง จากค่าการลดเสียง(Transmission loss, TL) ที่ความถี่ 0-600 Hz มีการต่อ Resonator แบบ อนุกรม และขนานหลายแบบ ซึ่งใช้ท่อนำเสียงแบบต่าง ๆ กัน แบ่งเป็น ที่ไม่มีความเร็วลม และมีความเร็วลม 0-30 m/s อาศัยการคำนวณจากทฤษฎีพื้นฐานเชิงเส้นแบบมิติเดียว (One Dimension Linearized Theory) โดยพิจารณาคลื่นเสียง ในรูปของคลื่นมิติเดียว (Plane-Wave) มีแหล่งกำเนิดเสียงเดียว และความดันของเสียงคงที่ ซึ่งใช้ทฤษฎี D.D. Davis หาลักษณะของเสียงที่ลดลง ได้จากการทดลอง รวมทั้งหาคุณลักษณะของเครื่องลดเสียง(Resonator) ผลการทดลอง เครื่องลดเสียงที่ต่ออนุกรมจะมีผลต่อการลดเสียงได้ดีกว่าแบบขนาน เมื่อมีการต่อเครื่องลดเสียงแบบอนุกรมและขนานร่วมกันจำนวนมากขึ้นจะทำให้สามารถลดเสียงได้เพิ่มขึ้นเครื่องลดเสียง ที่ต่อกับท่อลดจะมีสมรรถนะในการลดเสียงดีกว่าแบบขยาย ถ้าพื้นที่หน้าตัดรู Connector ของเครื่องลดเสียงมีพื้นที่หน้าตัดรูไม่เปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลต่อการลดเสียง แต่เมื่อพื้นที่หน้าตัดของรู Connector เพิ่มขึ้นจะทำให้สมรรถนะการลดเสียงเพิ่มขึ้นและที่ความเร็วลมสูงขึ้นสมรรถนะการลดเสียงของเครื่องลดเสียงจะลดลง.

Thesis Title	Acoustical Performance of Helmholtz Resonator
Student	Mr. Boonchai Silapakijwongkul
Student ID.	36061196
Degree	Master of Engineering
Programme	Machanical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Associate professor Akradech Sindhuphak

ABSTRACT

This thesis is aiming at finding the value of the sound reduction's performance of the resonator-Helmholtz by measuring the sound reduction capacity form the transmission loss value, TL at the frequency of 0-600 Hz by having the resonator connected by various styles of series and parallel connections and use different types of tail pipes which can be divided into no-velocity flow and velocity flow at 0-30 m/s based on the One Dimension Linearized Theory's calculation. This theory considers the sound wave in the form of Plane-Wave which having a single sound source and having the constant sound pressure. After that , D.D. Davis theory is used to find out the specification of the reduced sound from the experiment and search for the characteristic of the resonator. Test results are that the resonator which is connected in series has the effect on the sound reduction more than connected in parallel. When many of the connection in series and parallels are made together, it has the greater help to increase the sound reduction capacity The resonator that is connected with the sound-reduced-pipe has the better performance in sound reduction more than using with the expansion pipe. If there is no change in the cress-section hole area of the resonator's connector, no effect in the reduction-of the sound occurs. But if there is an enlargement in the cross-section hole area of the resonator's connector, it could achieve the greater performance in sound reduction. At the high velocity flow, the performance of the resonator will be diminished.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าต้องใช้ความพยายามเป็นอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์อัครเดช สันรภูัก ที่ได้รับความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และเป็นที่ปรึกษาและแนะนำข้าพเจ้า รวมทั้งนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลหลายรุ่นที่มีส่วนร่วมในผลงานชุดนี้ และโครงการ JICA ซึ่งสนับสนุนเครื่องมือวัดและทุนวิจัย

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้อุปการะคุณที่ช่วยให้คำปรึกษา Associate Professor Minoru Meada , Associate Professor Shunro Murakami , Mr. Sanni Hagi , Professor Dr.Toshio Iijma

ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณบิดาและมารดา และน้องทุกคน ที่สนับสนุนส่งเสริมพร้อมเป็นกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ของข้าพเจ้า ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณจุฑารัตน์ สบ่ม่วง , คุณฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน , คุณปริญญ์ ปริญญาปัจจุจรงค์ , คุณสมชาย ทองพร , คุณชาญชัย อมรสกุล , คุณกนกชาติ ทวีพันธุ์สานต์ , คุณฤทัยรัตน์ พูพวง ที่ช่วยเหลืองานวิจัยนี้ตลอดมา.

ขอขอบคุณ บริษัทไทยพีเอ็น จำกัด , คุณบัญชา คุณชมภู และ Mr. Kashuhiko Ota ที่สนับสนุนในการให้เวลาจัดทำวิจัยครั้งนี้

บุญชัย ศิลปกิจวงษ์กุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
สัญลักษณ์.....	XII
สัญลักษณ์ตัวห้อยข้างใต้ตัวอักษร.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 จุดประสงค์และความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วิธีการในการลดเสียงรบกวน.....	2
1.3 คำนิยามของค่าที่ใช้ในการลดเสียง.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 ความคิดพื้นฐานของสมการคลื่นทั่วไป.....	7
2.1.1 ชนิดของคลื่น.....	7
2.1.2 การเคลื่อนที่ของคลื่น.....	9
2.1.3 หลักการซ้อนกันของคลื่น.....	13
2.1.4 คลื่นเชิงซ้อน.....	14
2.1.5 คลื่นสถิติ.....	17
2.1.6 การกำร.....	17
2.1.7 คลื่นออกซิเบิ้ล อุลตราโซนิก และอินฟราโซนิก.....	20
2.1.8 การแพร่ขยายและความเร็วของคลื่นตามแนวยาว.....	20
2.1.9 คลื่นสถิติตามยาว.....	23
2.2 สมการ Plane Wave One Dimension Linearized Theory.....	24
2.3 ทฤษฎี GOVERNING EQUATION ของD.D.DAVIS.....	25
2.4 หลักการนำสมการไปใช้เป็นทฤษฎีพื้นฐาน.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การสร้างอุปกรณ์ทดลอง.....	34
3.1 สร้างอุปกรณ์ประกอบในการทดลอง.....	34
3.1.1 ห้องเก็บเสียงและท่อไม้วาทรงปากแตร.....	34
3.1.2 ระบบท่อ.....	35
3.1.3 อุปกรณ์ประกอบอื่นและเครื่องมือวัด.....	36
3.2 การคำนวณการสร้าง Resonators แบบต่าง ๆ.....	36
3.3 ลักษณะของท่อทดลอง.....	37
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	39
4.1 การประกอบอุปกรณ์ทดลอง.....	39
4.2 ลักษณะการต่อ Resonator แบบต่าง ๆ.....	39
4.2.1 การต่ออนุกรม.....	40
4.2.2 การต่อขนาน.....	40
4.2.3 การต่อ Resonators แบบอนุกรมและขนานบนท่อขยาย.....	40
4.2.4 การต่อ Resonators แบบอนุกรมและขนานบนท่อลด.....	40
4.3 วิธีทดลอง.....	41
4.4 การบันทึกผลการทดลอง.....	41
4.5 ผลการทดลอง.....	41
4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	66
บทที่ 5 บทสรุป.....	68
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	68
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	69
5.3 แนวทางการวิจัยในอนาคต.....	69
บรรณานุกรม.....	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก	72
ส่วน A การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ชนิด EXPANSION CHAMBER.....	72
ส่วน B การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ชนิด RESONATOR.....	79
ส่วน C การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ใน TAIL PIPE.....	84
ส่วน D การรวมกัน.....	89
ภาคผนวก ข วิธีการใช้งานโปรแกรมต่าง ๆ.....	99
ภาคผนวก ค การหาค่า SOUND PRESSURE LEVEL (SPL).....	113
ประวัติผู้เขียน.....	121



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

ก.1 ค่าที่ได้จากการคำนวณการแก้ ATTENUATION ที่ได้จากการวัด.....	94
ก.2 เปรียบเทียบค่า C_0 ที่ได้จากการคำนวณกับค่า C_0 ที่มาจากรายการตัวเลข 12 ถึง 14.....	95
ก.3 เปรียบเทียบสองวิธีการคำนวณค่า ATTENUATION ของ SINGLE –RESONATOR MUFFLER กับ TAIL PIPE.....	96
ก.4 ความถี่ CUT-OFF สำหรับ EXPANSION CHAMBERS แบบคู่.....	98



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

1.1 แสดงการสะท้อนและดูดกลืนของคลื่นเสียง.....	2
1.2 Some cases of sound interruption.....	3
1.3 Wall (or barrier) with absorptive material.....	3
1.4 แสดง Flow duct with silencer.....	4
1.5 แสดง Expansion Chamber type.....	4
1.6 แสดง Resonance type.....	4
1.7 แสดง Absorption type.....	5
1.8 แสดงลักษณะการหาค่าของ Transmission Loss (TL).....	5
1.9 แสดงลักษณะการหาค่าของ Attenuation (Att).....	6
1.10 แสดงลักษณะการหาค่าของ Insertion Loss (IL).....	6
2.1 (a) คลื่นตามขวาง.....	7
2.1 (b) คลื่นตามยาว.....	8
2.2 (a) แสดงคลื่นแนวระนาบ.....	9
2.2 (b) แสดง spherical wave.....	9
2.3 รูปร่างของเส้นเชือก (กรณีคลื่นเดี่ยว).....	10
2.4 รูปร่างของคลื่นเป็นรูป sin curve.....	11
2.5 (a) เส้นไขปลาคือเป็นคลื่นแบบพินเลื้อย.....	14
2.5 (b) แสดง 6 พจน์แรกของอนุกรม Fourier.....	14
2.6 การรวมคลื่นขบวนที่มีความถี่เป็นอัตราส่วน 3:1.....	15
2.7 การรวมคลื่น 3 ขบวนที่มีความถี่ต่างกันเข้าด้วยกัน.....	15
2.8 คลื่นรวม ของคลื่น 2 ขบวนซึ่งมีความถี่แตกต่างกัน.....	15
2.9 คลื่นรวม ของคลื่น 2 ขบวนซึ่งมีความถี่ใกล้เคียงกัน.....	16
2.10 คลื่นสถิตยในเส้นเชือกที่ถูกกระตุ้นเมื่อความถี่ตามธรรมชาติ และความถี่ที่เกิดจากการกระตุ้นมีค่าเกือบเท่ากัน.....	19
2.11 คลื่นเสียงถูกทำให้เกิดขึ้นในท่อโดยการชักลูกสูบเข้าออกเส้ดิ่งแบ่งตัวกลางออกเป็นส่วน เล็กๆ แต่ละส่วนมีมวลเท่ากัน.....	20
2.12 pulse ที่เกิดจากการอัดกำลังเคลื่อนที่ตามท่อซึ่งบรรจุไว้ด้วยก๊าซ.....	21

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่

2.13 เพลวไฟแสดงให้เห็นว่าเกิดคลื่นสถิตย์ภายในท่อที่บรรจุไว้ด้วยก๊าซ.....	23
2.14 ระบบท่อส่งที่มี Resonators.....	25
2.15 วงจรเทียบเคียงของระบบท่อส่งที่มี Resonators.....	25
2.16 ระบบท่อที่มี Resonators 2 ชุด.....	30
2.17 ระบบท่อที่ไม่มี Resonators.....	30
2.18 ทฤษฎี Davis Curve.....	33
3.1 แสดงการทดลองหาประสิทธิภาพ ของห้องเก็บเสียงตามทฤษฎี PLANE WAVE	34
3.2 แสดงการทดลองหาประสิทธิภาพของห้องเก็บเสียงระบบตามทฤษฎี STANDING WAVE....	35
3.3 แสดงระบบท่อ (PIPING SYSTEM).....	35
3.4 Resonator แบบ Helmholtz's type.....	36
3.5 แสดงconnector แสดงขนาดรูต่างกันแต่พื้นที่หน้าตัดรวมแต่ละแบบเท่ากัน.....	37
3.6 แสดง connectorขนาดรูคงที่จำนวนรูต่างกัน.....	37
3.7 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำเสียงเท่ากับท่อทั้งระบบ.....	37
3.8 แสดงท่อทดลองที่ Resonator ใหญ่กว่าท่อทั้งระบบ.....	37
3.9 แสดงท่อทดลองที่ Resonator เล็กกว่าท่อทั้งระบบ.....	38
4.1 ประกอบอุปกรณ์ทดลอง.....	39
4.2 การต่อ Resonator แบบอนุกรม.....	40
4.3 การต่อ Resonator แบบขนาน.....	40
4.4 การต่อ Resonator แบบอนุกรมและขนานบนท่อขยาย.....	40
4.5 การต่อ Resonator แบบอนุกรมและแบบขนานบนท่อลด.....	40
4.6 การทดสอบ Helmholtz Resonator แบบเดี่ยว.....	45
4.7.1 การทดสอบ Helmholtz Resonator ที่ต่ออนุกรมและขนานหลายชุด เป็นการเปรียบเทียบ การเพิ่มชุดขนาน โดยจำนวน Resonator ในทางอนุกรมเท่ากันจำนวน $n = 2$	46
4.7.2 การทดสอบ Helmholtz Resonator ที่ต่ออนุกรมและขนานหลายชุด เป็นการเปรียบเทียบ การเพิ่มชุดขนาน โดยจำนวน Resonator ในทางอนุกรมเท่ากันจำนวน $n = 9$	47

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่	
4.7.3 การทดสอบ Helmholtz Resonator ที่ต่ออนุกรมและขนานหลายชุด เป็นการเปรียบเทียบ	
การเพิ่มชุดขนาน โดยจำนวน Resonator ในทางอนุกรมเท่ากัน จำนวน $n = 13$	48
4.8 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่ออนุกรมหลายแบบ	49
4.9 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่อขนานหลายแบบ.....	50
4.10 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่ออนุกรมและขนานหลายชุด ซึ่งมีจำนวน	
Resonators เท่ากัน	51
4.11 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อขยายและท่อลดโดยการเปรียบเทียบผลของท่อ	
ขยายและท่อลด	52
4.12.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อขยายและท่อลด	
โดยต่ออนุกรมเปรียบเทียบขนาน(ผลบนท่อลด).....	53
4.12.2 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อขยายและท่อลด	
โดยต่ออนุกรมเปรียบเทียบขนาน(ผลบนท่อขยาย).....	54
4.13.1 การทดสอบ Helmholtz Resonator โดยการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด Connector ของ	
Resonators เท่ากัน (พื้นที่หน้าตัด connector = 0.0001 m^2 , แบบอนุกรม $n = 2$)	55
4.13.2 การทดสอบ Helmholtz Resonator โดยการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด Connector ของ	
Resonators เท่ากัน (พื้นที่หน้าตัด connector = 0.0001 m^2 , แบบอนุกรม $n = 12$)	56
4.13.3 การทดสอบ Helmholtz Resonator โดยการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด Connector ของ	
Resonators เท่ากัน (พื้นที่หน้าตัด connector = 0.0001 m^2 , แบบขนาน)	57
4.13.4 การทดสอบ Helmholtz Resonator โดยการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด Connector ของ	
Resonators เท่ากัน (พื้นที่หน้าตัด connector = 0.0001 m^2 , ผลบนท่อลด)	58
4.13.5 การทดสอบ Helmholtz Resonator โดยการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด Connector ของ	
Resonators เท่ากัน (พื้นที่หน้าตัด connector = 0.0001 m^2 , ผลบนท่อขยาย).....	59
4.14.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อขยายและท่อลดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้า	
ตัด Connector ของ Resonators (ผลบนท่อลด).....	60
4.14.2 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อขยายและท่อลดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้า	
ตัด Connector ของ Resonators (ผลบนท่อลด).....	61

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.15.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด(แบบอนุกรม).....	62
4.15.2 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด(แบบขนาน)	63
4.15.3 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด(ผลบนท่อลด).....	64
4.15.4 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด (ผลบนท่อขยาย).....	65
ก.1แสดงไดอะแกรม Expansion chamber ชนิดเดี่ยว.....	73
ก.2 แสดงไดอะแกรม Expansion chamber ชนิดคู่.....	75
ก.3 แสดงไดอะแกรม Expansion chamber ชนิดคู่ที่ต่อ internal connecting tube.....	77
ก.4 แสดงไดอะแกรม single resonator muffler.....	80
ก.5 แสดงไดอะแกรมกรณี connector ตื้นและ chamber ยาว.....	82
ก.6 แสดงไดอะแกรมของ single-resonator muffler กับ tail pipe.....	85
ก.7 แสดงไดอะแกรมที่ใช้ Resonators 2 ชุด ที่ความถี่แตกต่างกัน.....	89
ก.8 แสดงไดอะแกรมส่วนประกอบของ muffler ร่วมกับ expansion chamber.....	91
ข.1.....	101
ข.2.....	102
ค.1 $n = 9, M = 1$	113
ค.2 $n = 9, M = 2$	114
ค.3 $n = 9, M = 3$	114
ค.4 $n = 9, M = 4$	115
ค.5 $n = 9, M = 4, no = 1$	116
ค.6 $n = 9, M = 4, no = 8$	116
ค.7 $n = 5, M = 2, no = 1$	117
ค.8 $n = 5, M = 2, no = 3$	117
ค.9 $n = 5, M = 2, \text{บนท่อขยาย}$	118
ค.10 $n = 5, M = 2, \text{บนท่อลด}$	118
ค.11 $n = 9, M = 2, u = 0 \text{ m/s}$	119
ค.12 $n = 9, M = 2, u = 30 \text{ m/s}$	119

สัญลักษณ์

- l_1 = ความยาวของท่อระหว่าง connector แบบ branches สองตัวในส่วน resonator แบบหลายตัวหรือความยาวของท่อระหว่าง chamber สองตัวของ muffler แบบรวม
- l' = ความยาวของ connector รูปกรวย, ซึ่งวัดความยาวที่ผิวหน้า
- l_e = ความยาวของ expansion chamber
- l_2 = ความยาวของ resonant chamber
- l_t = ความยาวของท่อนำเสียง
- l_c = หนึ่งส่วนกับอีกครึ่งหนึ่งของผลกระทบของความยาว connector ระหว่าง expansion chamber สองตัว หรือ ความยาวของ connector ระหว่าง ท่อไอเสีย กับ branch chamber
- ξ = การแทนค่าส่วนค่ากลาง (particle of the medium) ของคลื่นเสียงในแนวระนาบ ขณะถูกส่งผ่าน
- ω = ความเร็วเชิงมุม, $2\pi f$
- λ = ความยาวคลื่น, c/f
- ρ = ความหนาแน่นเฉลี่ยของการนำเสียงระดับกลาง(sound-conducting medium) $\sigma = 4\pi \frac{e'}{\lambda}$
- β = ค่าคงที่ในสมการค่าความนำ(conductivity equation)
- ξ = ค่าความเร็วส่วนค่ากลาง (velocity particle of the medium) ของคลื่นเสียงในแนวระนาบขณะถูกส่งผ่าน
- μ = สัมประสิทธิ์ของความหนืดของการนำเสียงระดับกลาง (sound-conducting medium)
- a = รัศมีของ connector ระหว่างท่อไอเสียกับ branch chamber
- A = แทนค่า จุดสูงสุดของคลื่นตกกระทบ
- B = แทนค่า จุดสูงสุดของคลื่นสะท้อน
- C = ความเร็วของเสียง
- C_0 = ค่าความนำของ connector ระหว่างท่อไอเสียกับ branch chamber, $\frac{\pi a^2}{l_e + \beta a}$
- d = เส้นผ่านศูนย์กลางของ expansion chamber
- f = ความถี่

สัญลักษณ์(ต่อ)

f_c	=	ความถี่ช่วง cut-off
F_r	=	ค่าความถี่สูงสุดของการทดลองนี้มีหน่วยเป็น Hz เฮิรท์
I	=	กระแสเสียง
k	=	ค่าคงที่ของความยาวคลื่น, $2\pi f / c$
L_c	=	ความยาวของ connector มีหน่วยเป็นเมตร (m)
L_p	=	ระยะระหว่าง Resonator แต่ละตัวมีหน่วยเป็นเมตร (m)
M	=	จำนวนของ chamber ใน muffler แบบ multiple-resonator
m	=	จำนวนแถวทางขนานของการต่อ Resonator
n	=	จำนวน Resonator ที่ต่อเป็นแถวเรียงทางอนุกรม
n_o	=	จำนวนรูที่ connector
p	=	ความดันเสียง
R	=	ความต้านทาน หรือ impedance
S	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อ(ถ้าจำนวนทางขนานมากขึ้นพื้นที่หน้าตัดก็จะแบ่งเป็นส่วนตามจำนวนการต่อขนาน) มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
t	=	เวลา
u	=	ความเร็วลมมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)
V	=	ปริมาตรของ Resonator มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร(m^3)
X	=	ความต้านทาน หรือ impedance
x	=	ระยะทางที่ใช้ในการวัด
Z	=	impedance
Z_0	=	คุณลักษณะของ impedance , ความต้านทานเสียง ในการส่งผ่านของคลื่นในขณะถูกส่งผ่านแนวระนาบ ภายในท่อ, $\rho c / S$

สัญลักษณ์ตัวห้อยข้างใต้ตัวอักษร

b	=	branch
c	=	connector
i	=	คลื่นตกกระทบ
r	=	resonant
re	=	คลื่นสะท้อน
t	=	ท่อนำเสียง
tr	=	คลื่นส่งผ่าน

หมายเหตุ : แถบ | | จะใช้แสดงถึงค่าสัมบูรณ์ (modulus) ของจำนวนเชิงซ้อน



บทที่ 1

บทนำ

1.1 จุดประสงค์ ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

เสียงเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลางที่มีการสั่นสะเทือนเสียงจะเคลื่อนที่เป็นลูกคลื่น (wave motion) เสียงเคลื่อนที่ไปได้ทั้งในอากาศ ของเหลวและของแข็ง ระดับของเสียง หรือความดัง จะมีหน่วยวัดเป็นเดซิเบล (dB) เสียง (sound) มักหมายถึง เสียงที่คนเราชอบ ซึ่งอาจเป็นเสียงเพลง หรือเสียงดนตรี แต่เสียงรบกวน (noise) มักเป็นเสียงที่มีน้ำเสียงซ้ำ ๆ กัน เช่น เสียงพัดลมในเครื่องปรับอากาศ เสียงเครื่องจักรหรือเสียงเครื่องยนต์ อีกนัยหนึ่งเสียงรบกวนมักหมายถึง เสียงที่เราไม่ต้องการนั่นเอง

ปัญหาเสียงรบกวนที่มีต่อมนุษย์ โดยเสียงรบกวนจะมีผลต่อร่างกายและจิตใจมนุษย์ในทางตรงและทางอ้อม ผลของมันอาจแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1. ก่อให้เกิดการสูญเสียการรับฟัง (หูตึงแลหูหนวก)
2. ก่อให้เกิดความเหนื่อยล้า
3. ลดประสิทธิภาพในการทำงาน
4. ก่อกวนการสนทนา
5. ก่อให้เกิดความรำคาญ

การสูญเสียการรับฟังนี้ จะเกิดจากการที่อยู่ในบริเวณที่มีเสียงดังเป็นเวลานาน การสูญเสียการรับฟังอาจเป็นการสูญเสียเพียงชั่วคราว คือ หูอื้อ หรืออาจจะเป็นการสูญเสียอย่างถาวร คือ หูตึงหรือหูหนวก นอกจากการสูญเสียการรับฟังแล้ว เสียงรบกวนยังมีผลต่อการหมุนเวียนของโลหิต ก่อให้เกิดความเครียดและหงุดหงิด และทำให้เกิดอาการเหนื่อยล้า เมื่อสุขภาพทั้งทางร่างกายและจิตใจของผู้ที่ทำงาน ภายใต้อิทธิพลของเสียงรบกวนเสื่อมลง ประสิทธิภาพในการทำงานของเขาย่อมเสื่อมลงตามไปด้วย ซึ่งอาจทำให้เกิดการผิดพลาดในการทำงานมากขึ้น อาจเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายขึ้นและทำให้ผลผลิตที่ผลิตออกมาอาจมีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากสิ่งกล่าวเบื้องต้นนี้แล้วเสียงรบกวนยังก่อให้เกิดความรำคาญ และก่อกวนการสนทนา การสนทนาภายใต้อิทธิพลของเสียงรบกวนก็ต้องตะเบ็งเสียงเข้าหากัน

สำหรับโครงการการลดเสียงรบกวน (Noise Reduction) ในท่อโดยใช้มัพเฟอร์แบบ Helmholtz Resonator เป็นแนวทางหนึ่งที่ศึกษาการลดเสียงที่มีความถี่ต่าง ๆ กันโดยใช้ Helmholtz Resonator แบบต่าง ๆ ซึ่งการทดสอบมัพเฟอร์ชนิดนี้ แบ่งเป็นสองกรณี คือในกรณีที่มีอากาศไหลผ่าน และกรณีไม่มีอากาศไหลผ่าน โดยในกรณีที่มีอากาศไหลผ่านนั้น เราได้ทดสอบที่มีความเร็วต่าง ๆ กัน ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบ จะเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ลดเสียงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการประยุกต์ใช้เราจะพบในการลดเสียงที่ออกมาจากท่อไอเสียของ

1.2 วิธีการในการลดเสียงรบกวน

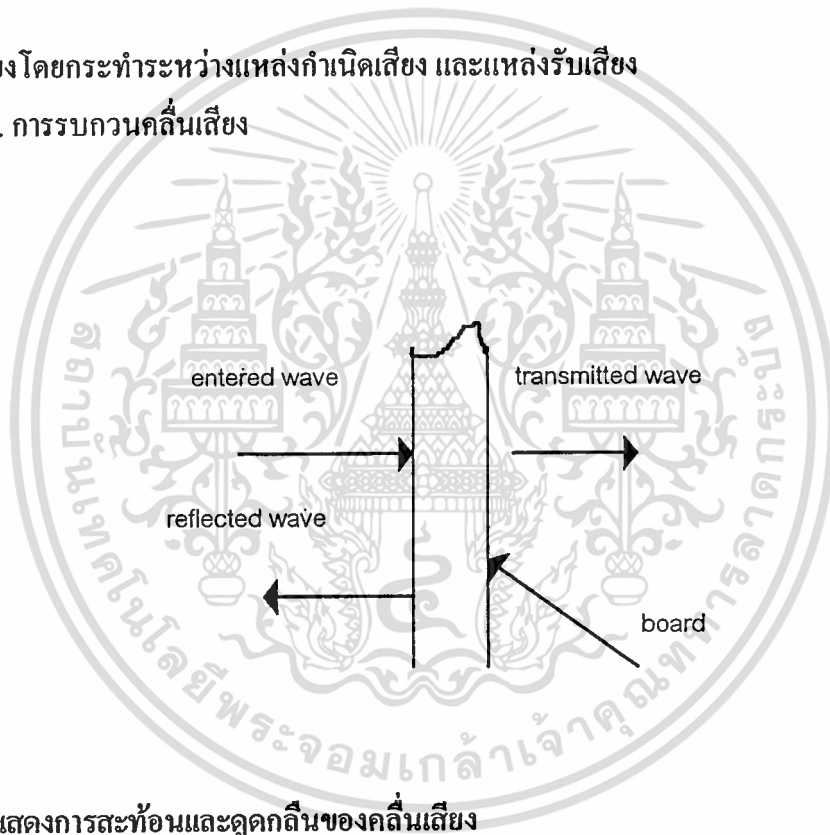
กระทำได้ 2 ลักษณะดังนี้

การลดเสียง ณ จุดกำเนิดเสียง

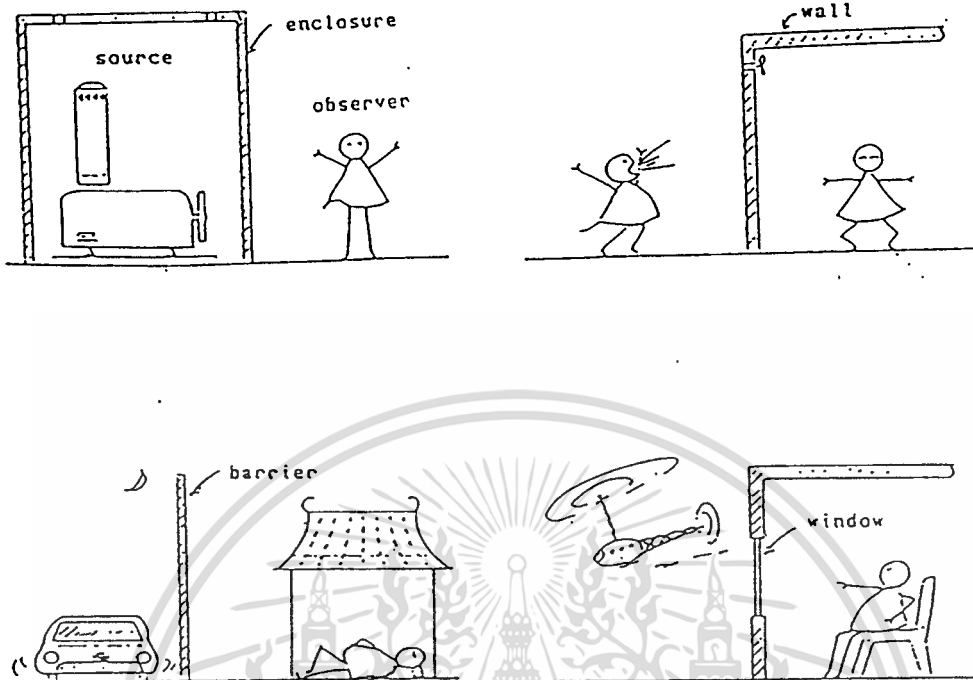
1. การปรับปรุงแก้ไขโครงสร้างของเครื่องจักร เพื่อให้เกิดเสียงน้อยลง คือ การปรับปรุงจากการจับยึดเครื่องจักร เพื่อให้การสั่นสะเทือนลดลง
2. การเปลี่ยนแปลงบางส่วนของเครื่องจักร คือ การพยายามลดชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวของเครื่องจักรให้น้อยลง
3. การใช้ดีมปีเปอร์ (damper) เพื่อลดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรให้น้อยลง

การลดเสียงโดยกระทำระหว่างแหล่งกำเนิดเสียง และแหล่งรับเสียง

1. การรบกวนคลื่นเสียง

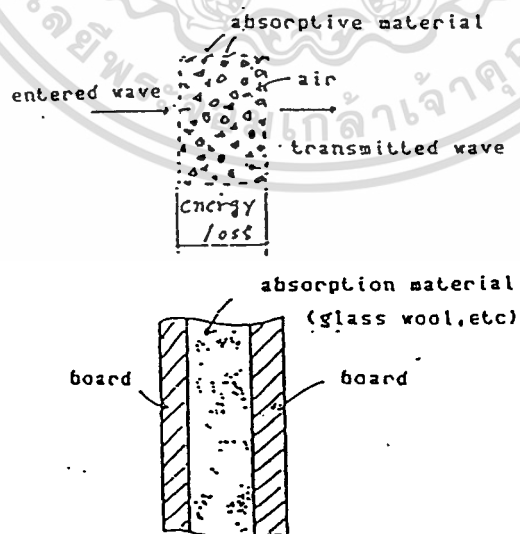


รูปที่ 1.1 แสดงการสะท้อนและดูดกลืนของคลื่นเสียง



รูปที่ 1.2 Some cases of sound interruption

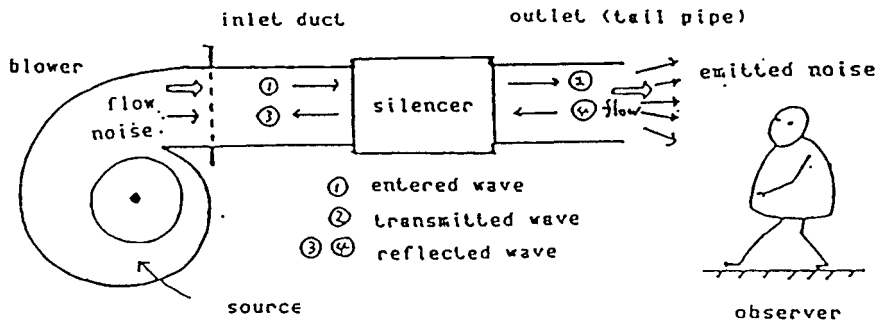
2. การดูดคลื่นเสียง



รูปที่ 1.3 Wall (or barrier) with absorptive material

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทางโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การใช้ตัวลดเสียง (silencer)



รูปที่ 1.4 แสดง Flow duct with silencer

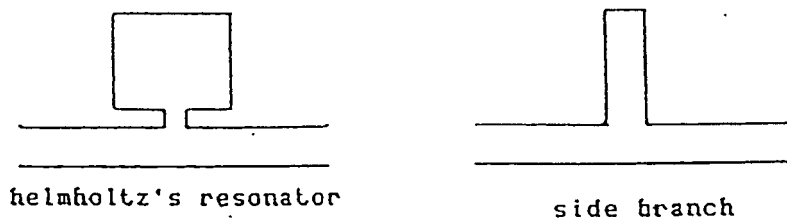
ชนิดของตัวลดเสียง (Kinds of Silencer)

1. แบบ Expansion Chamber type



รูปที่ 1.5 แสดง Expansion Chamber type

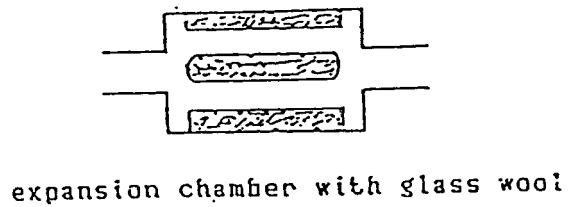
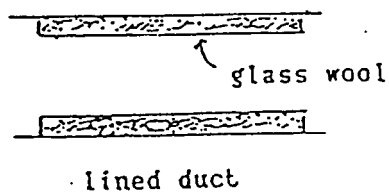
2. แบบ Resonance type



รูปที่ 1.6 แสดง Resonance type

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบ Absorption type



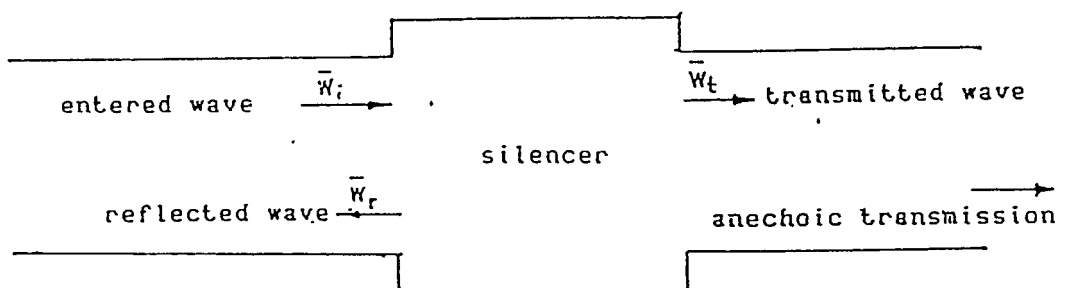
รูปที่ 1.7 แสดง Absorption type

ลักษณะของตัวลดเสียงที่ดีแบ่งตามจุดประสงค์

1. สำหรับการลดของเสียง
 - ลด ณ จุดความถี่ที่แน่นอน
 - สามารถลดเสียงรบกวนได้เป็นจำนวนมาก
2. ทางด้านแอโรไดนามิกส์
 - ต้องมีการสูญเสียความดันต่ำ
 - ต้องกำเนิดเสียง (เนื่องจากการไหลของของไหล) ต่ำ
3. ทางด้านเครื่องจักรกล
 - ต้องมีโครงสร้างง่าย ๆ
 - ต้องมีขนาดเล็ก

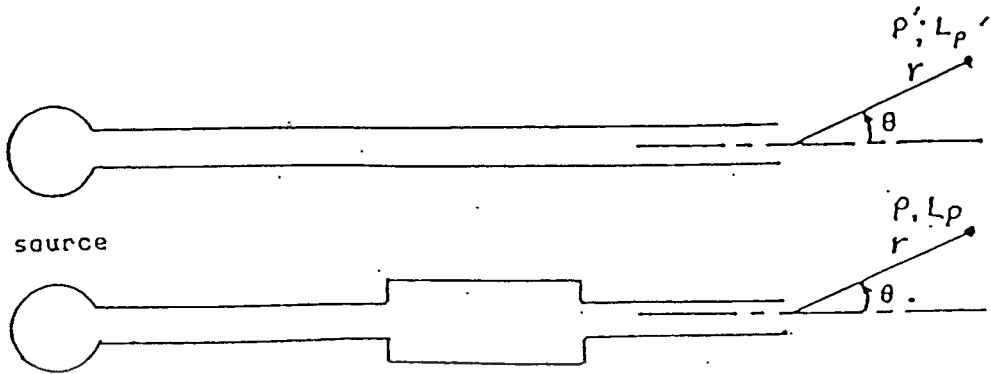
1.3 คำนิยามของค่าที่ใช้ในการลดเสียงรบกวน (Definition of Noise - reduction Amount)

1. Transmission Loss (TL)



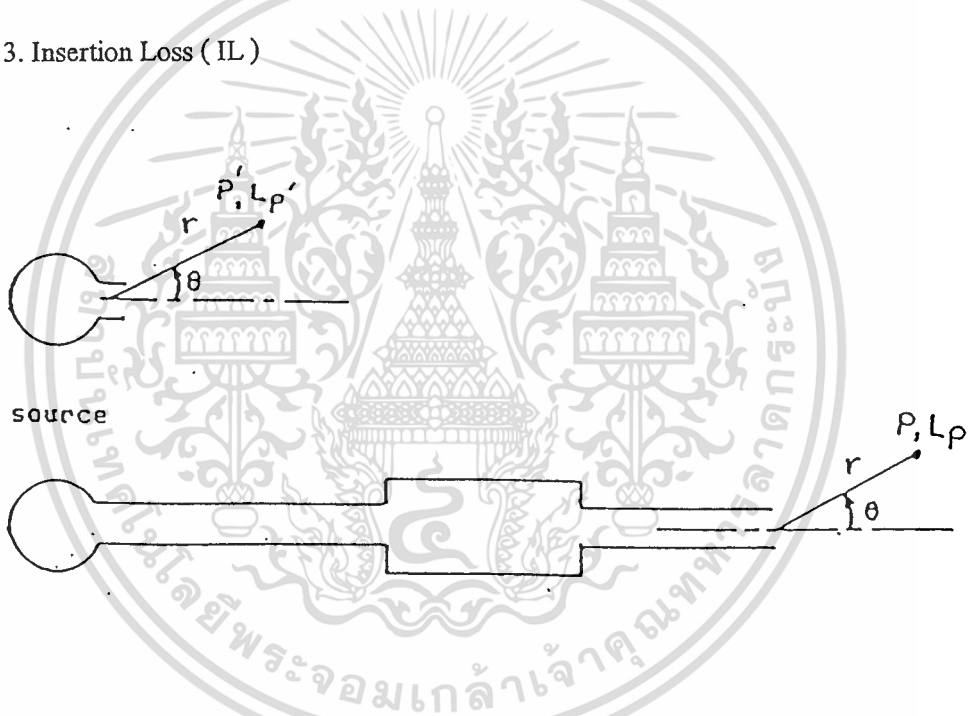
รูปที่ 1.8 แสดงลักษณะการหาค่าของ Transmission Loss (TL) $TL = 10 \log (\bar{W}_i / \bar{W}_t)$

2. Attenuation (Att)



รูปที่ 1.9 แสดงลักษณะการหาค่าของ Attenuation (Att) $IL = L_{p'} - L_p = 20 \log (p'/p)$

3. Insertion Loss (IL)



รูปที่ 1.10 แสดงลักษณะการหาค่าของ Insertion Loss (IL) $IL = L_{p'} - L_p = 20 \log (p'/p)$

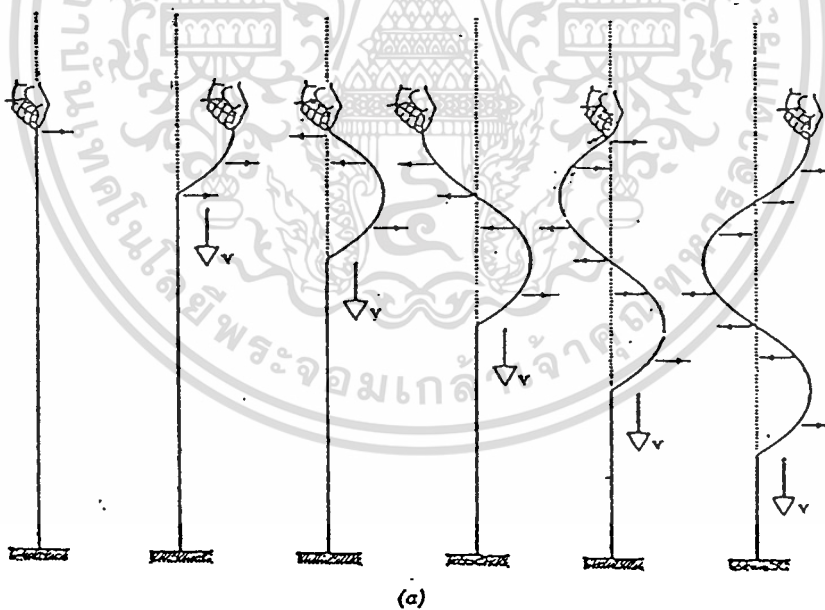
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความคิดพื้นฐานของสมการคลื่นทั่วไป

2.1.1 ชนิดของคลื่น (Types of Waves)

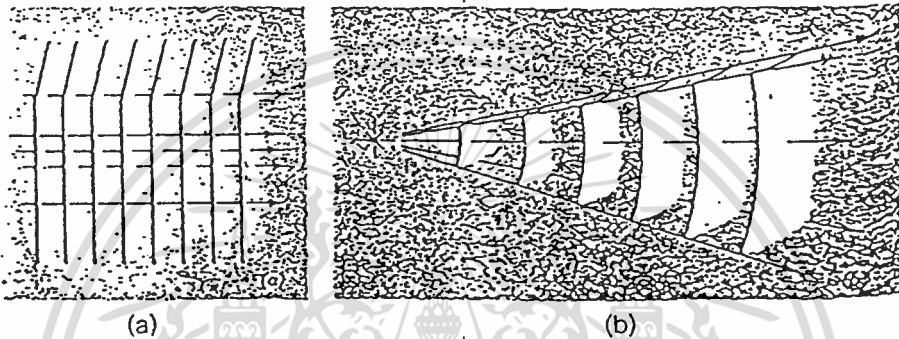
ความแตกต่างของคลื่นแต่ละชนิด พิจารณาว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสสารมีความสัมพันธ์กับทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น เราเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า “คลื่นตามขวาง” (transverse wave) ตัวอย่างเช่น เชือกที่ขึงตึงในแนวดิ่งถูกทำให้สั่นไปมาที่ปลายข้างหนึ่ง คลื่นตามขวางจะเคลื่อนลงไปตามเชือกแต่อนุภาคของเชือกจะสั่นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (รูปที่ 2.1a)



รูปที่ 2.1(a) คลื่นตามขวาง

อย่างง่าย (SHM)

พิจารณาคลื่นเดี่ยวใน 3 มิติ เราสามารถเขียนผิวหน้า (surface) ของทุก ๆ จุดของคลื่นเดี่ยวกันในช่วงเวลาที่กำหนดให้ได้ ขณะที่เวลาผ่านไปผิวหน้านี้อาจเคลื่อนที่ขยายออกไปเรื่อย ๆ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าคลื่นเดี่ยวนี้แผ่ขยายออกไปอย่างไร สำหรับคลื่นเดี่ยวอื่น ๆ ที่ตามมาเราก็สามารถเขียนผิวหน้าของคลื่นโดยที่ทุก ๆ จุดบนผิวนี้มีเฟส (phase) ของการเคลื่อนที่เป็นเฟสเดียวกัน ผิวหน้าเหล่านี้เราเรียกว่า “หน้าคลื่น” (wavefronts) ถ้าเป็นตัวกลางแบบเอกพันธ์และมีคุณสมบัติเหมือนกัน ทิศทางของการแผ่ขยายจะต้องตั้งฉากกับหน้าคลื่นเสมอ เส้นที่ตั้งฉากกับหน้าคลื่นซึ่งแสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเรียกว่า “แนวคลื่น” (ray)



รูปที่ 2.2 (a) แสดงคลื่นแนวระนาบ , 2.2 (b) แสดง spherical wave

รูปที่ 2.2 (a) แสดงคลื่นแนวระนาบ พื้นระนาบแทนหน้าคลื่นซึ่งห่างกันเท่ากับความยาวช่วงคลื่นและลูกศรแทนแนวคลื่น (b) แสดง spherical wave แนวคลื่นพุ่งออกตามแนวรัศมีและหน้าคลื่นเป็นรูปทรงกลมกลวงแต่ละทรงกลมห่างกันเท่ากับความยาวช่วงคลื่น ยิ่งห่างจากต้นกำเนิดมากเท่าใด ส่วนเล็ก ๆ ของหน้าคลื่นหน้ามีลักษณะเข้าใกล้กับระนาบมากขึ้นทุกที.

หน้าคลื่นมีรูปร่างหลายแบบ ถ้าคลื่นแผ่ขยายออกไปในทิศทางเดียว เราเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า คลื่นแนวระนาบ ในช่วงเวลาที่กำหนด ระนาบของหน้าคลื่นจะตั้งฉากกับทิศทางของการแผ่ขยายของคลื่น หน้าคลื่นจะเป็นพื้นระนาบและแนวคลื่นจะเป็นเส้นขนาน (รูปที่ 2.2a) กรณีง่าย ๆ อีกกรณีหนึ่งได้แก่ spherical wave ซึ่งคลื่นจะแผ่ขยายออกไปทุกทิศทางจากต้นกำเนิดคลื่น หน้าคลื่นเป็นรูปทรงกลมและแนวคลื่นพุ่งออกจากต้นกำเนิดในทุกทิศทาง (รูปที่ 2.2b) ยิ่งห่างจากต้นกำเนิด หน้าคลื่นรูปทรงกลมจะโค้งน้อยลงทุกทีและเราสามารถถือว่ามันเป็นพื้นราบได้ถ้าหน้าคลื่นอยู่ห่างจากต้นกำเนิดไกลเพียงพอ จะเห็นได้ว่าหน้าคลื่นมีรูปร่างเป็นไปได้อย่างหลายแบบ

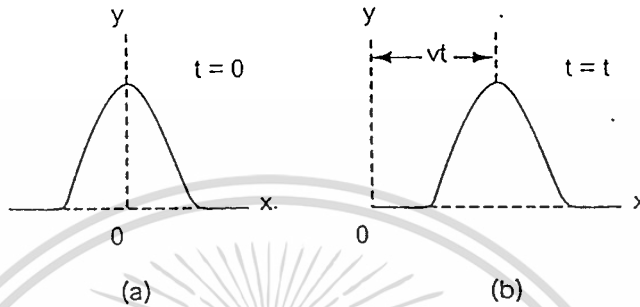
2.1.2 การเคลื่อนที่ของคลื่น (Travelling Waves)

พิจารณาเส้นเชือกขึงที่ถูกขึงตั้งอยู่ในแนวแกน x คลื่นตามขวางถูกหนึ่งกำลังเคลื่อนที่อยู่บนเส้นเชือกนี้ ที่เวลา $t = 0$ รูปร่างของเชือกสามารถแทนได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $y = f(x)$ ซึ่งงานเพื่อการ $t = 0$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ต่าง (2.1) คำ
ไม่ว่าเมื่อ y เป็นการขจัด (displacement) ตามขวางของเส้นเชือก ณ ตำแหน่ง x ในรูปที่ 2.3a ที่แสดงรูป

คลื่น (คลื่นเดี่ยว) ที่เกิดขึ้นบนเส้นเชือกที่เวลา $t = 0$ การทดลองแสดงให้เห็นว่าขณะที่เวลาผ่านไป คลื่นนี้จะเดินทางไปตามเส้นเชือกโดยไม่เปลี่ยนรูปร่างเลย ถ้าหากว่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานภายในน้อยมาก ที่เวลา t ต่อมาคลื่นจะเคลื่อนที่ไปทางขวาได้ระยะทาง vt เมื่อ v เป็นขนาดของความเร็วคลื่นซึ่งสมมติว่าคงที่ สมการของรูปที่เวลา t จะเขียนได้เป็น

$$y = f(x-vt) \quad t = t \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.3 รูปร่างของเส้นเชือก(กรณีคลื่นเดี่ยว)

รูปที่ 2.3 (a) รูปร่างของเส้นเชือก (กรณีคลื่นเดี่ยว) ที่เวลา $t = 0$ ที่เวลา t ต่อมาคลื่นเดี่ยวเคลื่อนที่ไปทางขวาเป็นระยะทาง $x = vt$ สมการนี้จะให้รูปคลื่นรอบ ๆ จุด $x = vt$ ที่เวลา t แบบเดียวกันกับที่เราได้รอบ ๆ จุด $x = 0$ ที่เวลา $t = 0$ (รูปที่ 2.2) เป็นสมการทั่วไปแทนคลื่นที่มีรูปร่างใด ๆ ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวา ในการอธิบายถึงรูปร่างของคลื่นโดยเฉพาะเราต้องกำหนดให้แน่นอนลงไปว่า f เป็นฟังก์ชันของอะไร.

ขอให้เราพิจารณาสมการนี้ให้ละเอียดรอบคอบขึ้นอีก ถ้าเราสังเกตส่วนเฉพาะ [หรือเรียกว่า เฟส (phase)] ของคลื่นขณะที่เวลาผ่านไป จากสมการพิจารณาค่าเฉพาะค่าหนึ่งของ y (ในที่นี้พิจารณาที่ยอดของคลื่นเดี่ยว) โดยทางคณิตศาสตร์หมายความว่าเรากำลังพิจารณาว่า x เปลี่ยนตาม t อย่างไร เมื่อ $(x-vt)$ มีค่าคงที่ เราจะเห็นว่าขณะที่ t เพิ่มขึ้น x จะต้องเพิ่มขึ้นด้วยเพื่อทำให้ $(x-vt)$ คงที่ ถ้าเป็นเช่นนั้นสมการ (2.2) ที่จริงก็แทนคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางซ้าย เราจะต้องเขียนว่า

$$y = f(x+vt) \quad (2.3)$$

เพราะว่าค่า x ใน $(x+vt)$ ของเฟสของคลื่นซึ่งคงที่ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความเร็วของเฟสของคลื่นจะหาได้ง่ายมาก สำหรับเฟสใดเฟสหนึ่งโดยเฉพาะของคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางขวาเราจะได้ว่า

$$x - vt = \text{ค่าคงที่}$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับเวลาจะได้

$$\frac{dx}{dt} - v = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{dx}{dt} = v \quad (2.4)$$

ดังนั้น v จึงเป็นความเร็วของเฟส (phase velocity) ของคลื่น สำหรับคลื่นที่เคลื่อนที่ไปทางซ้ายเรา

จะได้ความเร็วของเฟสของคลื่นเป็น $-v$

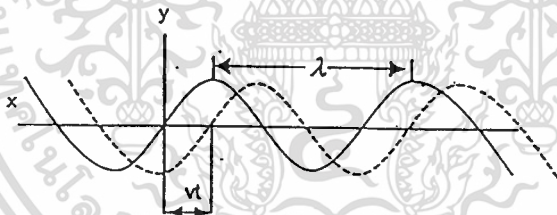
สำหรับสมการทั่วไปของคลื่นเราจะเห็นว่าค่าคงที่ใด ๆ ของเวลา t จากสมการจะได้ y เป็นฟังก์ชันของ x สมการนี้จะให้เส้นโค้งและเส้นโค้งนี้แทนรูปร่างแท้จริงของเส้นเชือกที่เวลาที่กำหนดให้สมมติว่าเราสนใจจุด ๆ หนึ่งบนเส้นเชือก ซึ่งค่าของ x มีค่าคงที่ เราจะได้สมการ โดยมี y เป็นฟังก์ชันของเวลา t ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งตามขวางของจุดนี้บนเส้นเชือกเปลี่ยนแปลงตามเวลา t อย่างไร.

สำหรับคลื่นตามขวางก็เช่นเดียวกันกับคลื่นตามขวาง ตัวอย่างที่คล้ายคลึงกันของคลื่นตามขวางได้แก่ท่อตรงยาว ภายในบรรจุไว้ด้วยก๊าซซึ่งวางให้แกนอยู่ในแนวแกน x และคลื่นเดี่ยวหรือ pulse ก็คือความดันที่เปลี่ยนแปลงได้ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปตามท่อ ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันเราจะได้สมการเดียวกับสมการ (2.2) และ (2.3) ทำให้เราทราบถึงความดันของก๊าซที่แปรผันกับเวลาที่ทุก ๆ จุดภายในท่อ (ดูหัวข้อ 3-3).

ขอให้เราพิจารณาถึงรูปคลื่นโดยเฉพาะ ดังจะให้เห็นความสำคัญต่อไป สมมติว่าที่เวลาเท่ากับ 0 เรามีขบวนคลื่น (wave train) ขบวนหนึ่งในเส้นเชือกเขียนได้เป็น

$$y = y_m \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (2.5)$$

รูปร่างของคลื่นเป็นรูป sin curve (รูปที่ 2.4) การขจัดมากที่สุด y_m คือแอมพลิจูด (amplitude)



รูปที่ 2.4 รูปร่างของคลื่นเป็นรูป sin curve

รูปที่ 2.4 ที่ $t = 0$ เส้นเชือกมีรูปร่าง $x = y_m \sin 2\pi x / \lambda$ ที่เวลา t ต่อมาคลื่นของ sine เคลื่อนไปทางขวาเป็นระยะทาง $v = vt$ และเส้นเชือกจะมีรูปร่างดังสมการ $y = y_m \sin 2\pi x (x - vt) / \lambda$ ของ sine curve ระยะทางตามขวาง y มีค่าเดียวกันหมดที่ $x + \lambda$, $x + 2\lambda$, ... สัญลักษณ์ λ เรียกว่า “ความยาวคลื่น” (wavelength) ของขบวนคลื่นใช้แทนระยะทางระหว่างจุดสองจุดที่อยู่ติดกันในคลื่นที่มีเฟสเดียวกัน ขณะที่เวลาผ่านไป สมมติให้คลื่นเคลื่อนที่ผ่านไปทางขวาด้วยความเร็วของเฟส $= v$ ดังนั้นสมการของคลื่นที่เวลา t คือ

$$y = y_m \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \quad (2.6)$$

เวลาแกว่งครบรอบ (period) T เป็นเวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่เป็นระยะทางเท่ากับ ความยาวคลื่น λ ดังนั้น

$$\lambda = vT \quad (2.7)$$

แทนความสัมพันธ์นี้ลงในสมการของคลื่นจะได้

$$y = y_m \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (2.8)$$

จากสมการเห็นชัดว่าที่เวลาใด ๆ y มีค่าคงที่ที่ $x + \lambda, x + 2\lambda, \dots$ และที่ตำแหน่งใด ๆ y มีค่าคงที่ที่ $t + T, t + 2T, \dots$

เมื่อทำสมการ (2.8) ให้กระชับยิ่งขึ้น เราให้ k เป็นเลขคลื่น (wave number) และ ω เป็นความถี่เชิงมุม (angular frequency) (ดูสมการ 15-12)

ซึ่ง
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ และ } \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.9)$$

แทนพจน์เหล่านี้ลงในสมการ (2.8) จะได้สมการ sine wave ของคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางขวา

เป็น
$$y = y_m \sin 2\pi (kx - \omega t) \quad (2.10a)$$

สำหรับสมการ sine wave ของคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางซ้ายเขียนได้เป็น

$$y = y_m \sin 2\pi (kx + \omega t) \quad (2.10b)$$

เปรียบเทียบสมการ (2.7) กับสมการ (2.9) เราจะเห็นว่าความเร็วของเฟส v ของคลื่นเป็น

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (2.11)$$

สำหรับคลื่นในสมการ (2.10a) และ (2.10b) เราได้สมมติว่า ระยะ $y = 0$ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมื่อเวลา $t = 0$ รูปสมการทั่วไปของขบวนคลื่นรูป sine ที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางขวา คือ

$$y = y_m \sin (kx - \omega t - \phi)$$

ϕ เรียกว่าค่าคงที่ของเฟส (phase constant) ตัวอย่างเช่น ถ้า $\phi = -90^\circ$ ระยะ y ที่ $x = 0$ และ $t = 0$ เป็น y_m สำหรับตัวอย่างนี้

$$y = y_m \cos (kx - \omega t)$$

เพราะ $\sin 90^\circ = \cos 0^\circ = 1$

ถ้าเราสนใจจุดที่กำหนดให้บนเส้นเชือกเช่นที่ $x = \frac{\pi}{k}$ ระยะ y ที่จุดนั้นจะเขียนได้เป็น

$$y = y_m \sin (\omega t + \phi)$$

สำหรับการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย เหตุนี้ส่วนต่าง ๆ ของเส้นเชือกจะเคลื่อนที่

แบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย ๆ รอบตำแหน่งสมดุลของมัน ขณะที่ขบวนคลื่นเคลื่อนที่ไปตามเส้นเชือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

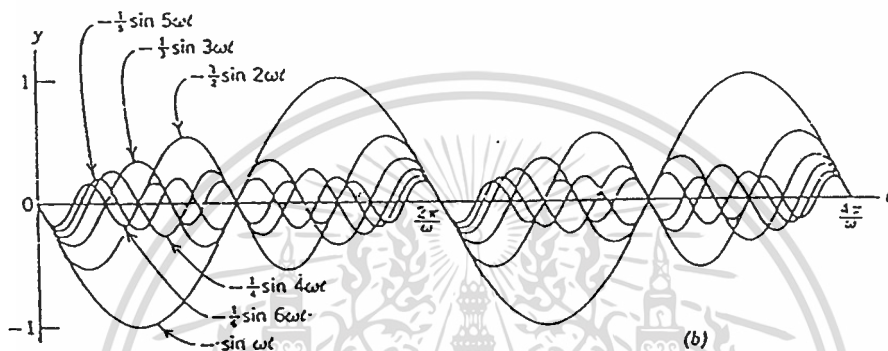
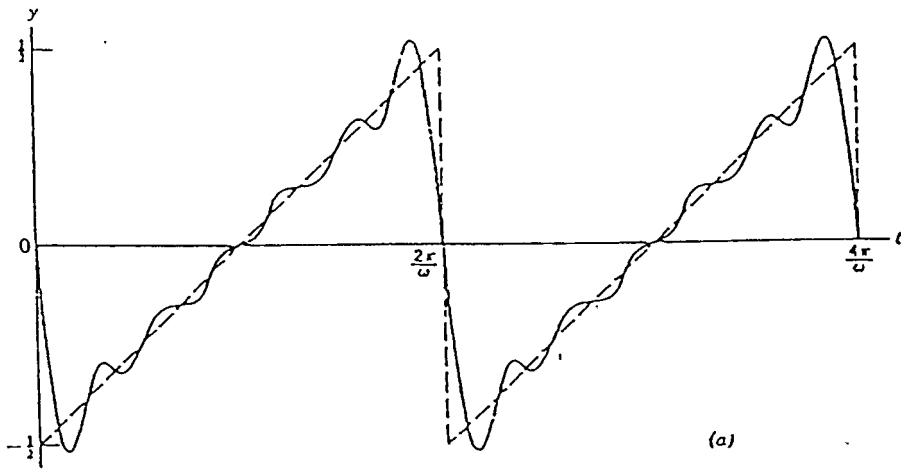
2.1.3 หลักของการซ้อนกันของคลื่น (The Superposition Principle)

จากการทดลองพบว่าคลื่นตั้งแต่สองหรือมากกว่าสองชนิดสามารถเคลื่อนผ่านที่แห่งเดียวกันได้โดยไม่ขึ้นต่อกัน ที่ว่าคลื่นแต่ละคลื่นไม่ขึ้นต่อกันนี้หมายความว่า การขจัด (displacement) ของอนุภาคใด ๆ ในเวลาที่กำหนดเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของการขจัดของแต่ละคลื่น การรวมการขจัดของอนุภาคทางเวกเตอร์นี้เรียกว่า การซ้อน (superposition) ตัวอย่างเช่น คลื่นวิทยุที่มีหลายความถี่ผ่านเข้าไปในเสาอากาศวิทยุจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเสาอากาศนี้เนื่องจากการซ้อนกันของคลื่นทั้งหมด ซึ่งยุ่งยากและซับซ้อนมาก อย่างไรก็ตามเราสามารถปรับเครื่องรับให้รับสถานีใดสถานีหนึ่งโดยเฉพาะได้ สัญญาณที่เราได้รับจากสถานีนี้จะชัดเจนราวกับว่าสถานีอื่น ๆ หยุดทำการกระจายเสียงหมดแล้ว ทำนองเดียวกันกับคลื่นเสียงเราสามารถฟังโน้ตดนตรีจากเครื่องดนตรีแต่ละชิ้นของวงออร์เคสตราได้ ถึงแม้ว่าคลื่นเสียงที่มากกระทบโสตประสาทของเรามาจากวงออร์เคสตราที่ซับซ้อนทั้งวงก็ตาม.

สำหรับคลื่นในตัวกลางที่ยืดหยุ่นได้ หลักการของการซ้อน (superposition) ยังคงเป็นจริงเมื่อความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างการยืดหยุ่นและแรงนำกลับหรือแรงสะสม (restoring force) เป็นสัดส่วนอย่างง่าย ๆ คือ ความสัมพันธ์ต้องเขียนทางคณิตศาสตร์ได้ในรูปของสมการเชิงเส้น (linear equation) นอกจากนี้หลักการซ้อนก็ยังใช้ได้กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะว่าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น

หลักการของการซ้อน (superposition) ใช้ได้ไม่เสมอไป มันจะใช้ไม่ได้ก็ต่อเมื่อสมการของการเคลื่อนที่ของคลื่นไม่เป็นเชิงเส้น โดยทางกายภาพเหตุการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการรบกวนของคลื่นค่อนข้างมากและกฎตามปกติทางกลศาสตร์ใช้ไม่ได้อีกต่อไป ตัวอย่างเช่น ถ้าเกิดขีดจำกัดแห่งความยืดหยุ่น (elastic limit) ของ Hooke's law ความสัมพันธ์เชิงเส้น $F = -kx$ จะไม่เป็นจริง

สำหรับคลื่นเสียง การระเบิดอย่างรุนแรงทำให้เกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ถึงแม้ว่าคลื่นกระแทกเป็นคลื่นตามยาวที่ยืดหยุ่นได้ในอากาศ แต่มันก็ประพฤติตัวแตกต่างจากคลื่นเสียงธรรมดา สมการของการแผ่ขยายของคลื่นกระแทกเป็นแบบกำลังสอง ฉะนั้น หลักการซ้อน (superposition) จึงใช้กับคลื่นกระแทกไม่ได้.



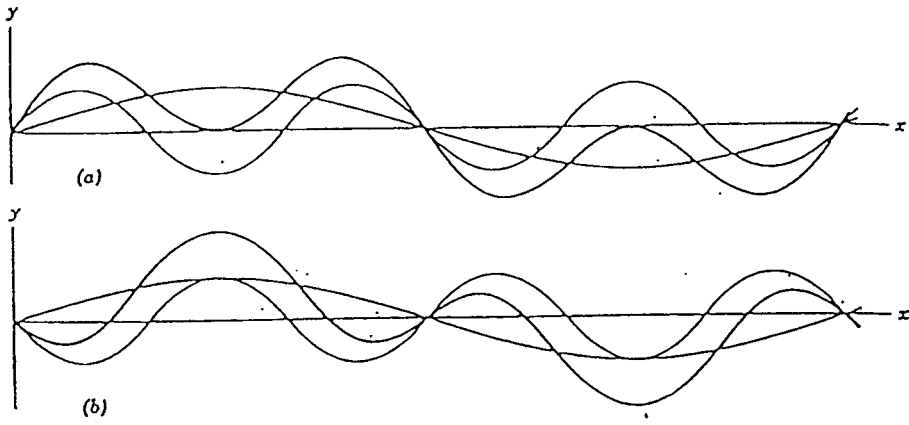
รูปที่ 2.5 (a) เส้นไขว้ปลาเป็นคลื่นแบบฟันเลื่อย , 2.5 (b) แสดง 6 พจน์แรกของอนุกรม Fourier

รูปที่ 2.5(a) เส้นไขว้ปลาเป็นคลื่นแบบฟันเลื่อย ส่วนใหญ่พบในทางไฟฟ้า สมการของมันคือ $y(t) = (\omega/2\pi) t - \frac{1}{2}$ เมื่อ $0 < t < 2\pi/\omega$, ขณะที่ $y(t) = (\omega/2\pi) t - 3/2$ เมื่อ $2\pi/\omega < t < 4\pi/\omega$ เป็นต้น อนุกรม Fourier สำหรับฟังก์ชันนี้ คือ $y(t) = -\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t - \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \dots$ เส้นที่บเป็นผลรวมของพจน์แรกของอนุกรมนี้และเขียนได้เป็นแบบฟันเลื่อยโดยประมาณ ยิ่งมากพจน์รวมกันการประมาณจะเข้าใกล้ความจริงยิ่งขึ้น (b) แสดง 6 พจน์แรกของอนุกรม Fourier ซึ่งเมื่อนำมารวมกันเข้าจะได้เส้นโค้งที่บใน (a)

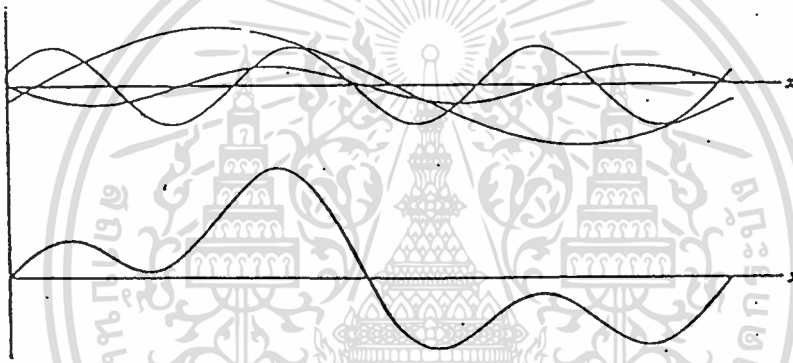
2.1.4 คลื่นเชิงซ้อน (Complex Waves)

เราได้พิจารณาคลื่นแบบฮาร์โมนิคอย่างง่ายซึ่งการขจัด (displacement) ที่เวลาใด ๆ สามารถเขียนแทนด้วย sine curve เราได้เห็นแล้วว่าจากหลัก superposition คลื่นหลายขบวนที่มีความถี่และความเร็วของคลื่นเท่ากัน แต่มีแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นต่างกันคลื่นรวมที่ได้ยังคงมีรูปแบบฮาร์โมนิคอย่างง่ายเช่นเดิม อย่างไรก็ตาม ถ้าคลื่นเหล่านี้มีความถี่ไม่เท่ากัน คลื่นรวมที่ได้เรียกว่าคลื่นเชิงซ้อน ในคลื่นเชิงซ้อนการเคลื่อนที่ของอนุภาคไม่เป็นแบบฮาร์โมนิคอย่างง่ายและรูปคลื่นไม่เป็นเส้นโค้งรูป sine อีกต่อไป ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาเฉพาะลักษณะของคลื่นเชิงซ้อน

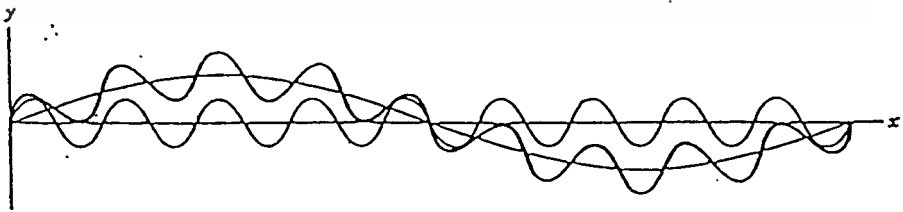
เอกเท่านั้น การวิเคราะห์คลื่นชนิดนี้เราพิจารณาสถานะศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การรวมคลื่นขบวนที่มีความถี่เป็นอัตราส่วน 3:1 (เส้นบาง) เข้าด้วยกันจะได้คลื่นใหม่ (เส้นทึบ) ซึ่งมีรูปร่างขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของแต่ละคลื่นจงเปรียบเทียบกับ(a) กับ (b)

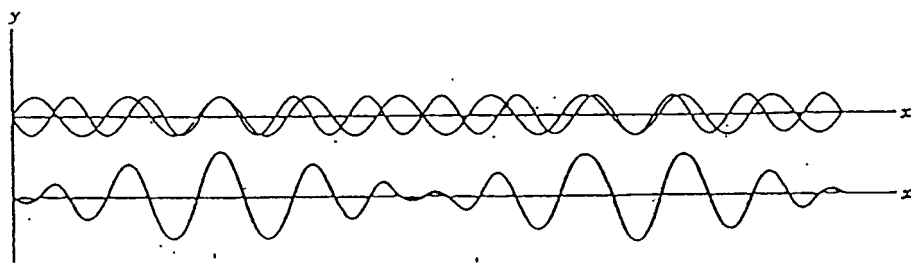


รูปที่ 2.7 การรวมคลื่น 3 ขบวน (บน) ที่มีความถี่ต่างกันเข้าด้วยกัน จะได้คลื่นใหม่มีรูปร่างซับซ้อน (ล่าง)



รูปที่ 2.8 คลื่นรวม (เส้นหนัก) ของคลื่น 2 ขบวนซึ่งมีความถี่แตกต่างกันมาก (เส้นบาง) ของมันทางกายภาพเกี่ยวกับการรวมคลื่นตั้งแต่ 2 ขบวนขึ้นไปซึ่งกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในทิศทางเดียวกัน แต่มีความถี่ แอมพลิจูดและเฟสแตกต่างกันโดยวิธีการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 คลื่นรวม (ล่าง) ของคลื่น 2 ขบวนซึ่งมีความถี่ใกล้เคียงกัน (บน) แสดงให้เห็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าบีท (beat)

ในรูปที่ 2.6a และ 2.6b เรารวมคลื่น 2 ขบวนซึ่งมีแอมพลิจูดเท่ากันแต่มีความถี่เป็นอัตราส่วน 3 ต่อ 1 เข้าด้วยกัน ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเปลี่ยนจาก (a) และ (b) และเราจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสจะทำให้เกิดคลื่นรวมใหม่ที่มีรูปร่างแตกต่างจากคลื่นรวมเดิม ถ้าคลื่นนี้เป็นคลื่นเสียง เชื้อแก้วหูของเราจะตื่นตามความถี่ของคลื่นรวมในทุกกรณี แต่จากที่เราได้ยิน เราสามารถตีความหมายของความถี่ของคลื่นลัพธ์นี้ว่า เป็นความถี่เดิมของคลื่นทั้งสองนั้นแม้ว่าจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเฟส อย่างไร ถ้าคลื่นรวมนี้เป็นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามันจะมองเห็นเป็นสีของแสงสองสีผสมกัน โดยไม่คำนึงว่าความสัมพันธ์ระหว่างเฟสจะเป็นอย่างไรเช่นกัน

ในรูปที่ 2.7 เป็นการรวมคลื่น 3 ขบวนซึ่งมีความถี่และแอมพลิจูดของคลื่นต่างกันเข้าด้วยกัน คลื่นรวมแบบเชิงซ้อนที่ได้จะมีรูปร่างไม่เหมือนกับคลื่น periodic แบบเดิมเลย แต่จะมีรูปคลื่นเหมือนกับรูปคลื่นที่เกิดจากเครื่องดนตรี ในรูปที่ 2.8 เป็นการรวมคลื่นขบวนหนึ่งซึ่งมีความถี่สูงมากเข้ากับคลื่นอีกขบวนหนึ่งซึ่งมีความถี่ต่ำมาก ความถี่รวมของคลื่นทั้งสองจะมองเห็นได้จากคลื่นรวม ในรูปที่ 2.9 เป็นการรวมคลื่น 2 ขบวนซึ่งมีความถี่เกือบเท่ากันเข้าด้วยกัน คลื่นรวมประกอบด้วยกลุ่มซึ่งในกรณีของเสียงถือว่าเป็นปรากฏการณ์ของบีท (beats)

ในรูปเหล่านี้คลื่นรวมหาได้จากหลักการซ้อน (superposition) โดยการรวมระยะทางที่อนุภาคของแต่ละคลื่นเลื่อนไปตามแนวตั้งที่ทุก ๆ จุด เนื่องจากคลื่นย่อยแต่ละขบวนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกัน ฉะนั้นคลื่นรวมจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วนี้ด้วยและรูปคลื่นไม่เปลี่ยนแปลงขณะที่เคลื่อนที่

cathode-ray oscilloscope จะแสดงถึงวิธีง่าย ๆ ในการสังเกตว่าเราสามารถสังเคราะห์และวิเคราะห์คลื่นเชิงซ้อนในเทอมของคลื่นฮาร์โมนิกอย่างง่ายได้อย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 คลื่นสถิตย (Standing Waves)

ในหนึ่งมิติวัตถุที่มีขนาดจำกัด เช่น เส้นเชือกที่ถูกขึงตึงอยู่ระหว่างคีมหนีบ 2 อัน ซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง ℓ คลื่นในเส้นเชือกจะสะท้อนกลับที่ขอบเขต (boundaries) ของวัตถุซึ่งก็คือจากคีมหนีบ(clamp) นั่นเอง การสะท้อนกลับทุกครั้งทำให้คลื่นเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเดิม คลื่นที่สะท้อนกลับจะรวมกับคลื่นเดิมตามหลักของการซ้อน (superposition)

พิจารณาคลื่น 2 ขบวนที่มีความถี่ ความเร็วและแอมพลิจูดของคลื่นเท่ากันซึ่งกำลังเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกันในเชือก คลื่น 2 ขบวนนี้อาจเขียนได้ด้วยสมการ

$$y_1 = y_m \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2 = y_m \sin(kx + \omega t)$$

สมการของคลื่นรวม จะเขียนได้ดังนี้

$$y = y_1 + y_2 = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx + \omega t) \quad (2.12a)$$

หรือจากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติสมการ (2.16) เขียนใหม่ได้เป็น

$$y = 2y_m \sin kx \cos \omega t$$

สมการ (2.16b) นี้เราเรียกว่าสมการของคลื่นสถิตย (standing wave) จะสังเกตเห็นว่าอนุภาคที่จุด x ใด ๆ เคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกอย่างง่ายขณะที่เวลาผ่านไปและทุก ๆ อนุภาคแกว่งด้วยความถี่เดียวกัน อย่างไรก็ตามลักษณะพิเศษของคลื่นสถิตย (standing wave) คือ แอมพลิจูดของคลื่นจะไม่คงที่สำหรับอนุภาคที่ต่างกัน แต่จะแปรตามตำแหน่ง x ของอนุภาค และจากสมการจะเห็นว่าแอมพลิจูดของคลื่น $2y_m \sin kx$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ $2y_m$ ที่ตำแหน่งซึ่ง

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$$

หรือ

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots$$

จุดเหล่านี้เรียกว่า ปฏิบัพ (antinodes) และอยู่ห่างกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น และแอมพลิจูดของคลื่นมีค่าต่ำสุดเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งซึ่ง

$$kx = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

หรือ

$$x = \frac{\lambda}{2}, \pi, \frac{3\lambda}{2}, 2\pi, \dots$$

จุดเหล่านี้เรียกว่า บัพ (nodes) และอยู่ห่างกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเช่นกัน ระยะทางระหว่าง node และ antinode ที่ติดกันมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคลื่น

2.1.6 การกำทร (Resonance)

โดยทั่ว ๆ ไปในระบบใด ๆ ที่ถูกทำให้แกว่งด้วยแรงกระตุ้นแบบ periodic ให้มีความถี่

เท่าหรือ เกือบเท่ากับความถี่ของการแกว่งตามธรรมชาติของระบบนั้น ระบบนั้นจะแกว่งด้วย

ไม่ว่าการถี่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมพลิจูดค่อนข้างกว้างปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกำธร และกล่าวได้ว่าระบบนั้นจะกำธรด้วยแรงกระตุ้นที่ใส่เข้าไป

พิจารณาเส้นเชือกที่ถูกตรึงที่ปลายทั้งสองข้าง เราสามารถทำให้เกิดการแกว่งหรือคลื่นสถิตย์ ขึ้นในเส้นเชือกได้ ในกรณีเช่นนี้จะทำให้ปลายทั้งสองข้างเป็น node ซึ่งยังอาจจะมี node หรือไม่มีระหว่างปลายเชือกทั้งสองข้างก็ได้ ซึ่งจะทำให้ความยาวคลื่นมีได้มากมายหลายค่าแตกต่างกันไประยะทางระหว่าง node ที่อยู่ติดกัน $= \frac{\lambda}{2}$ เพื่อว่าเส้นเชือกที่ยาว ℓ จะได้มีระยะครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น $\frac{\lambda}{2}$ อยู่ครบ m จำนวน

ดังนั้น
$$\frac{n\lambda}{2} = \ell$$

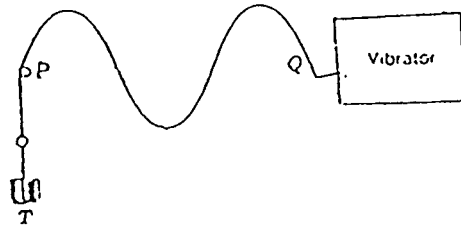
หรือ
$$\lambda = \frac{2\ell}{n} ; n = 1, 2, 3, \dots$$

แต่ $v = v/v$ และ $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ ดังนั้นความถี่ของการแกว่งตามธรรมชาติของระบบจะเป็น

$$v = \frac{n}{2\ell} \sqrt{\frac{F}{\mu}} ; n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.13)$$

ถ้าเส้นเชือกถูกทำให้แกว่งแล้วปล่อยทิ้งไว้ การแกว่งจะค่อย ๆ หดไปทีละน้อย ๆ เนื่องจากกระจายของพลังงานไปยังจตุรกรรณซึ่งยึดหยุ่นได้ที่ปลายของเชือก และเนื่องจากความต้านทานของอากาศ เราสามารถเพิ่มพลังงานให้แก่ระบบได้โดยใส่แรงกระตุ้นแก่เส้นเชือกถ้าความถี่เนื่องจากแรงกระตุ้นนี้เข้าใกล้กับความถี่ตามธรรมชาติของเส้นเชือก เส้นเชือกจะแกว่งที่ความถี่นี้โดยมีแอมพลิจูดกว้างมาก เนื่องจากเส้นเชือกมีความถี่ตามธรรมชาติหลายค่า ฉะนั้นการกำธรจึงสามารถเกิดที่หลาย ๆ ความถี่แตกต่างกันแต่ในระบบมวล-สปริงมีความถี่ตามธรรมชาติอยู่เพียงความถี่ตามธรรมชาติอยู่เพียงความถี่เดียวเท่านั้น ความแตกต่างนี้เกี่ยวเนื่องกับความจริงที่ว่าในระบบมวล-สปริง ความเฉื่อยจะรวมกัน (lumped) ที่ส่วนหนึ่งของสปริงคือมวลและความยืดหยุ่นจะอยู่ในอีกส่วนหนึ่งของระบบคือ สปริง เราเรียกระบบนี้ว่ามี lumped element สำหรับเส้นเชือกที่ซึ่งตั้งเราเรียกว่ามี distributed element เพราะทุก ๆ ส่วนของเส้นเชือกมีคุณสมบัติของความเฉื่อยและความยืดหยุ่นทั้งสองอย่างอยู่ด้วยกันในระบบมวล-สปริง มีอยู่วิธีเดียวเท่านั้นที่จะเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างพลังงานศักย์กับพลังงานจลน์ในขณะที่ระบบกำลังแกว่งคือ พลังงานจลน์จะเกี่ยวข้องเฉพาะกับการเคลื่อนที่ของมวลและพลังงานศักย์จะเกี่ยวข้องเฉพาะกับการเปลี่ยนรูปของสปริง อย่างไรก็ตามในเส้นเชือกที่ซึ่งตั้ง ความเฉื่อย (masslike) และความยืดหยุ่น (springlike) จะกระจายเท่ากันหมดในเส้นเชือกมีวิธีที่เป็นไปได้อยู่หลายวิธีที่จะเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ในขณะที่ระบบกำลังแกว่งซึ่งขึ้นตามอันดับของค่า n ในสมการ (2.13)

การกำธรในเส้นเชือก มักแสดงให้เห็นได้โดยใช้เส้นเชือกที่ปลายข้างหนึ่งผูกติดกับก้อนน้ำหนักแล้วคล้องอยู่เหนือรอก และปลายอีกข้างหนึ่งผูกติดกับ vibrator ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 คลื่นสถิตยในเส้นเชือกที่ถูกกระตุ้นเมื่อความถี่ ตามธรรมชาติ และความถี่ที่เกิดจากการกระตุ้นมีค่าเกือบเท่ากัน.

การสั่นตามขวางของ vibrator ทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือกซึ่งสะท้อนกลับที่ปลายที่ถูกตรึงไว้ ความถี่ของคลื่นคือความถี่ของ vibrator และความยาวช่วงคลื่นหาได้จากสูตร $\lambda = v/v$ ปลาย P ที่ถูกตรึงไว้เป็น mode แต่ปลาย Q จะแกว่งและไม่เป็น mode ในตอนนี้ถ้าเราเปลี่ยนความตึงในเส้นเชือกโดยเปลี่ยนน้ำหนักที่ห้อยแขวนอยู่ จะทำให้ความยาวช่วงคลื่นเปลี่ยนไป การเปลี่ยนความตึงในเส้นเชือกทำให้ความเร็วคลื่นเปลี่ยนและความยาวคลื่นจะเปลี่ยนเป็นสัดส่วนกับความเร็ว แต่ความถี่คงที่ เมื่อใดก็ตามที่ความถี่มีค่าเกือบเท่ากับ $\frac{2\ell}{\lambda}$ ซึ่ง ℓ เป็น ความยาวของเส้นเชือก เราจะได้คลื่นสถิตยที่มีแอมพลิจูดกว้างมาก ในตอนนี้ vibrator ทำให้เส้นเชือกแกว่งด้วยความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่งและเกิดกำธรรขึ้น งานที่มันทำให้แก่เชือกนี้ก็เพื่อต่อต้านการสูญเสียพลังงานเนื่องจาก damping และทำให้แอมพลิจูดในเส้นเชือกเพิ่มขึ้น เราอาจถือได้ว่าจุด Q เป็น mode เพราะว่าแอมพลิจูดของการสั่นของ vibrator น้อยมากเมื่อเทียบกับของเชือก

ถ้าความถี่ของการสั่นของ vibrator มีค่าแตกต่างจากความถี่ตามธรรมชาติของระบบมาก ดังสมการ (2.13) คลื่นที่สะท้อนจากจุด P กลับไปยังจุด Q จะอยู่คนละเฟสกับ vibrator และมันจะทำงานให้แก่ vibrator นั่นก็คือเส้นเชือกสามารถจ่ายพลังงานให้กับ vibrator เหมือนกับที่มันได้รับจาก vibrator รูปร่างของคลื่นสถิตยจะไม่คงที่ แต่จะขยักขยิกไปมา โดยเฉลี่ยแล้วจะมีแอมพลิจูดของคลื่นน้อยและไม่แตกต่างจากความเฉลี่ยของ vibrator เท่าใดนัก สภาวะอันนี้เหมือนกับการแกว่งอย่างไม่ปกติของชิงช้าซึ่งถูกผลักให้แกว่งแบบ periodic ด้วยความถี่ค่าหนึ่งที่ไม่ใช่ความถี่ตามธรรมชาติของมัน แอมพลิจูดของการแกว่งของชิงช้าจะค่อนข้างน้อย

เส้นเชือกสามารถดูดพลังงานจาก vibrator ได้มากที่สุดขณะที่เกิดการกำธรร การปรับเครื่องรับวิทยุที่มีขบวนการที่เหมือนกันโดยการปรับความถี่ของกระแสสลับที่หน้าปัดของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เครื่องรับ ให้มีความถี่ตรงกับความถี่จากสถานีวิทยุที่เราต้องการฟังวงจรจะเกิดการกำธรรกับสัญญาณ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

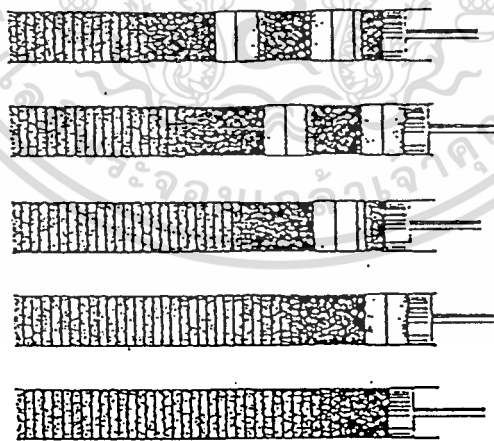
ที่ผ่านเข้ามาและจะดูดพลังงานจากสัญญาณนี้ไว้ทั้งหมด เราจะพบการกำธรอีกในเสียง แม่เหล็กไฟฟ้า แสง อะตอมและนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ซึ่งระบบของมันสามารถดูดพลังงานจากต้นกำเนิดไว้ทั้งหมด ขณะเกิดการกำธรและจะดูดพลังงานได้น้อยมาก เมื่อไม่มีการกำธร

2.1.7 คลื่นออติเบิล อุลตราโซนิกและอินฟราโซนิก (Audible Ultrasonic Infrasonic Waves)

คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาว (longitudinal wave) สามารถเดินทางผ่านไปมาของแข็ง เหลว และก๊าซได้อนุภาคของสสารที่คลื่นเดินทางผ่านจะสั่นในแนวเดียวกับการแผ่ขยายของคลื่น ระหว่างประสาทหูและสมองของมนุษย์สามารถรับฟังคลื่นเสียงที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 รอบ/วินาที ถึง 20,000 รอบ/วินาทีได้ ช่วงความถี่ของเสียงที่มนุษย์ฟังได้ยินนี้เรียกว่า “ออติเบิล” (audible) คลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าออติเบิลเรียกว่า “คลื่นอินฟราโซนิก” (infrasonic waves) และคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่าช่วงออติเบิลเรียกว่า “คลื่นอุลตราโซนิก” (ultrasonic waves).

2.1.8 การแผ่ขยายและความเร็วของคลื่นตามยาว (Propagation and Speed of Longitudinal Waves)

ถ้าไม่มีสิ่งกีดกั้นแล้ว คลื่นเสียงจะแผ่ขยายออกไปทุกทิศทางจากต้นกำเนิด อย่างไรก็ตาม การพิจารณาการแผ่ขยายของคลื่นในหนึ่งมิติจะง่ายกว่าในสามมิติมากซึ่งในหนึ่งมิติเราจะได้พิจารณาถึงการส่งผ่านของคลื่นตามยาวในท่อเป็นหัวข้อแรก



รูปที่ 2.11 คลื่นเสียงถูกทำให้เกิดขึ้นในท่อโดยการชักลูกสูบเข้าออก เส้นดิ่งแบ่งตัวกลางออกเป็น ส่วนเล็ก ๆ แต่ละส่วนมีมวลเท่ากัน

รูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นลูกสูบซึ่งอยู่ที่ปลายข้างหนึ่งของท่อยาวที่บรรจุไว้ด้วยของไหลซึ่งเป็นตัวกลางที่สามารถอัดให้มีปริมาตรลดลงได้ เส้นดิ่งในรูปแสดงถึงการแบ่งตัวกลางนี้ออกเป็น ส่วนบาง ๆ แต่ละชั้นมีมวลของของไหลเท่ากัน ในขณะนี้ความดันและความหนาแน่นของของไหล

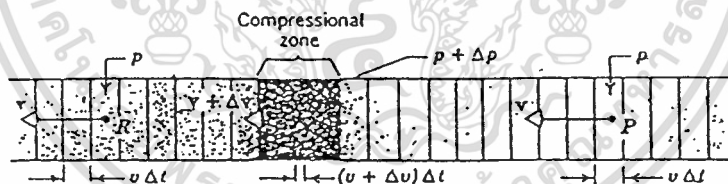
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมากกว่าเมื่อของไหลกระจายอยู่ตามปกติ เราจะถือว่าของไหลเป็นตัวกลางที่ต่อเนื่องกันและไม่ใส่ใจต่อความจริงที่ว่า ของไหลประกอบด้วยโมเลกุลซึ่งกำลังเคลื่อนที่อย่างเปะปะ (random) อยู่ตลอดเวลา

ถ้าเราดันลูกสูบในรูปที่ 2.11 เข้าไป ของไหลที่อยู่หน้าลูกสูบจะถูกอัด ความดันและความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่าปกติ ของไหลส่วนที่ถูกอัดจะเคลื่อนที่ไปตามท่อและอัดของไหลที่อยู่ในชั้นต่อ ๆ ไป ถ้าเราดึงลูกสูบออก ของไหลที่อยู่หน้าลูกสูบขยายตัว ความดันและความหนาแน่นของมันจะลดต่ำกว่าค่าปกติของไหลส่วนที่ถูกทำให้ขยายตัว จะทำให้ของไหลในชั้นต่อ ๆ ไป ในท่อขยายตัวตามไปด้วย การอัดและการขยายนี้ก็เหมือน ๆ กันกับคลื่นตามขวาง (transverse wave) ในเส้นเชือก แต่การแกว่งของส่วนเล็ก ๆ ในของไหลอยู่ในทิศทางเดียวกับการแผ่ขยาย (ตามยาว) ในขณะที่เส้นเชือกมันจะแกว่งทำมุมฉากกับทิศทางนี้(ตามขวาง)

ถ้าลูกสูบเคลื่อนเข้าออก จะเกิดขบวนการของการอัดและการขยายเคลื่อนไปตามท่อ (รูปที่ 2.11) เช่นเดียวกับคลื่นตามขวางในเส้นเชือก ในกรณีของไหล เราสามารถใช้หลักการเคลื่อนที่ของนิวตันมาใช้ในการหาความเร็วของแผ่ขยายของคลื่นตามยาวในเทอมของความยืดหยุ่น(elasticity) และความเฉื่อย (inertial property) อันเป็นคุณสมบัติของตัวกลางได้ ดังจะให้เห็นต่อไป

ขอให้สมมติว่าท่อนี้นยาวมาก เพื่อว่าจะได้ไม่คำนึงถึงการสะท้อนกลับที่ปลายอีกข้างหนึ่ง เราจะพิจารณาถึงการอัดเพียงครั้งเดียว (simple compressional pulse) ที่เกิดจากการกระแทกลูกสูบในรูปที่ 2.11 เข้าไปเล็กน้อยอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.12 pulse ที่เกิดจากการอัดกำลังเคลื่อนที่ตามท่อซึ่งบรรจุไว้ด้วยก๊าซ ในแกนอ้างอิงของก๊าซ

ส่วนที่อยู่นิ่ง pulse จะเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาด้วยความเร็ว v อย่างไรก็ดีตามในแกนอ้างอิงซึ่ง pulse อยู่ในสถานะหยุดนิ่ง ก๊าซที่อยู่นอก pulse จะไหลไปตามท่อจากขวาไปซ้ายด้วยความเร็ว v ดังแสดงในรูป โปรดสังเกตว่า Δv มีค่าเป็นลบ.

รูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่า pulse นี้ (ส่วนที่เป็น compressional zone) กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไปตามท่อจากซ้ายไปขวา เพื่อให้ง่ายขึ้น จะขอสมมติว่า pulse นี้มีความดันและความหนาแน่นเท่ากันตลอด เมื่อเราทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวางในเส้นเชือก เราพบว่ามันจะง่ายขึ้นมาก ถ้าเราเลือกเอาแกนอ้างอิง ซึ่งทำให้ pulse อยู่ในสถานะที่หยุดนิ่ง ในที่นี้เราจะทำแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกัน ในรูปที่ 2.12 compressional zone อยู่ในภาวะหยุดยั้งในแกนอ้างอิง ซึ่งของไหลกำลังเคลื่อนที่จากขวาไปซ้ายด้วยความเร็ว v ดังแสดงไว้ในรูป.

พิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหลส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นดิ่งที่จุด p ในรูปที่ 2.12 ของไหลส่วนนี้จะเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมันชนกับ compressional zone ขณะที่มันกำลังจะผ่านเข้าไปใน zone นี้ มันจะพบกับความแตกต่างในความดัน Δp ระหว่างส่วนหน้าและส่วนท้ายของ zone ของไหลส่วนนี้จะถูกอัดและความเร็วของการเคลื่อนที่ใน zone นี้ลดลงเป็น $v + \Delta v$ ฉะนั้นปริมาณ Δv จะต้องมีค่าเป็นลบ เมื่อของไหลนี้เคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าทางซ้ายของ zone ปริมาตรจะขยายเพิ่มขึ้น ความดัน Δp จะทำให้มันเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ซึ่งเป็นความเร็วเดิมอีก จากรูปแสดงให้เห็นว่า ส่วนของของไหลที่จุด R ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านพื้น compressional zone แล้วกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v เหมือนเมื่อมันอยู่ที่จุด p

เราจะใช้กฎของนิวตันกับส่วนของของไหลในขณะที่มันเคลื่อนที่เข้าไปใน compressional zone แรงรวมที่กระทำต่อทุกจุดของของไหลที่ผ่านเข้าไปทางขวาในรูปที่ 2.12 มีขนาด

$$F = (p + \Delta p) A - pA = \Delta p A$$

โดยที่ A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อ

ความยาวของส่วนของของไหลที่อยู่ภายนอก compressional zone (กล่าวเสียว่าที่จุด P) เป็น $v\Delta t$ เมื่อ Δt เป็นเวลาที่ส่วนของของไหลใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านจุดใด ๆ ที่กำหนด ปริมาตรของของไหลส่วนนี้เป็น $vA \Delta t$ และมวลของมันเป็น $\rho_0 vA \Delta t$ เมื่อ ρ_0 เป็นความหนาแน่นของของไหลภายนอก compressional zone ความหนาแน่น a ของของไหลเมื่อมันผ่านเข้าไปใน zone เป็น $-\Delta v/\Delta t$ เพราะว่า Δv เป็นลบ ฉะนั้น a จะต้องเป็นบวก ซึ่งให้ความหมายตรงกับแรง ΔpA ในรูปที่ 2.12 ซึ่งมีทิศทางไปทางขวา ดังนั้นจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$F = ma$$

จะได้
$$\Delta p A = \rho_0 v A \Delta t - \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

ซึ่งจะเขียนใหม่ได้ว่า
$$\rho_0 v^2 = \frac{-\Delta p}{\Delta v/v}$$

ในตอนนี้ของไหลซึ่งมีปริมาตร $V = Av \Delta t$ ที่จุด P จะถูกอัดให้มีปริมาตรลดลง $A(\Delta v)\Delta t = \Delta v$ เมื่อมันผ่านเข้าไปใน compressional zone ดังนั้น

$$\frac{\Delta v}{V} = \frac{A\Delta v\Delta t}{Av\Delta t} = \frac{\Delta v}{v}$$

และเราจะได้
$$\rho_0 v^2 = \frac{-\Delta p}{\Delta v/v}$$

อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของความดันในวัตถุ Δp กับเศษส่วนของการเปลี่ยนแปลงในปริมาตร $-\Delta v/v$ เรียกว่า “มอดูลัสของความยืดหยุ่นบี” (bulk modulus of elasticity) คำนี้ว่ากรณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของของวัตถุ นั่นคือ $B = -v\Delta p/\Delta V$ B เป็นบวกเพราะเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ปริมาตรจะลดลง
 ฉะนั้นความเร็วของคลื่น (pulse) ตามยาวในตัวกลางของรูปที่ 2.12 ในเทอมของ B จะเขียนได้เป็น

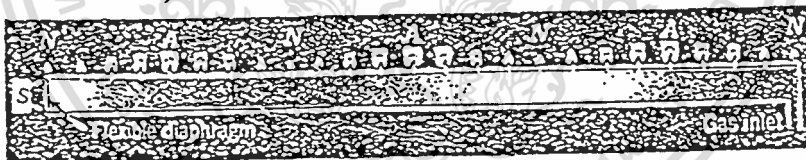
$$v = \sqrt{B/\rho_0} \quad (2.14)$$

การวิเคราะห์ต่อไปจะแสดงให้เห็นว่าสมการ(2.14)ใช้ได้กับคลื่นและขบวนคลื่นทุกแบบโปรดสังเกต
 ว่าความเร็วของคลื่นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางได้แก่ ความยืดหยุ่น B และความเฉื่อย ρ_0

2.1.9 คลื่นสถิตยตามยาว (standing Longitudinal Waves)

คลื่นตามยาวที่เคลื่อนที่ในท่อจะสะท้อนกลับที่ปลายท่อ เช่นเดียวกับการสะท้อนกลับที่
 ปลายเชือกของคลื่นตามขวางในเส้นเชือก การสอดแทรกระหว่างคลื่น 2 ขบวนที่เคลื่อนที่ในทิศทาง
 ตรงข้ามกันทำให้เกิดคลื่นสถิตยตามยาว

ถ้าเราปิดปลายท่อเสีย คลื่นสะท้อนจะมีเฟสต่างกับคลื่นเดิม 180° และการจัดของส่วน
 ข้อยที่ปลายท่อที่ปิดเป็นศูนย์เสมอ ดังนั้นปลายท่อที่ปิดนี้จึงถือว่าเป็น node ได้ ถ้าปลายท่อเปิด ส่วน
 ข้อยของของไหลจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ อย่างไรก็ตามธรรมชาติของการสะท้อนที่ปลายท่อนั้น
 ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นถ้าท่อแคบเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นดังเช่นเครื่อง
 ดนตรีทั่ว ๆ ไป คลื่นสะท้อนและคลื่นเดิมเกือบจะอยู่ในเฟสเดียวกัน ส่วนปลายท่อด้านที่เปิดถือว่า
 ว่าเป็น antinode ตามปกติ antinode ที่แท้จริงอยู่ใกล้กับปลายท่อที่เปิด แต่ความยาวที่แท้จริงของลำ
 อากาศในเครื่องดนตรีประเภทเป่าไม่ได้คิดแบบเดียวกับเส้นเชือกที่ปลายทั้งสองถูกตรึง



รูปที่ 2.13 เพลวไฟแสดงให้เห็นว่าเกิดคลื่นสถิตยภายในท่อที่บรรจุไว้ด้วยก๊าซที่ติดไฟได้ A และ N
 แทนการจัดของ antinode และ node ตามลำดับ

สำหรับคลื่นสถิตยตามยาวในลำของก๊าซที่แสดงไว้ในรูปที่ 3-3 ต้นกำเนิดของคลื่นตาม
 ยาว ได้แก่ลำโพงซึ่งต่อกับ audio oscillator S ทำให้ ใคอะแอมป์ที่ติดอยู่กับปลายท่อสั้น ก๊าซไหลเข้า
 ไปในท่อทาง inlet และไหลออกอย่างช้า ๆ ตามรูที่เจาะเรียงกันไว้ด้านบนของท่อ เมื่อก๊าซที่ไหล
 ออกมาติดไฟเราจะได้เปลวไฟเรียงกัน เมื่อเราให้ความถี่ที่ทำให้ลำก๊าซเกิดกำธร แอมป์ลิจูดของคลื่น
 สถิตยตามยาวจะกว้าง เราจะเห็นความเปลี่ยนแปลงในคลื่นได้จากความสูงและความกว้างของเปลว
 ไฟตามท่อ จะเห็นช่วงระหว่าง node และ antinode ได้อย่างชัดเจน โดยการเปลี่ยนความถี่เรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารของพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากความยาวที่แท้จริงของลำก๊าซและ ความเร็ว ความยาวคลื่น λ ขณะเกิดกำรแทรกกับ 2 เท่าของระยะทางระหว่าง node (หรือ antinode) ที่ติดกัน และถ้ารู้ความถี่ V ของต้นกำเนิดขณะเกิดกำรว่ามีค่าเท่าใด เราจะสามารถหาความเร็วของก๊าซภายใต้สภาวะดังกล่าวได้จากสูตร $v = V\lambda$

ในรูปที่ 2.13 node และ antinode, N และ A หมายถึงการจัดของอนุภาคในคลื่นสถิตย์ที่ displacement node การเปลี่ยนแปลงความดัน (ที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ย) จะมีค่าสูงสุด ด้วยเหตุนี้ displacement node จะตรงกับ pressure antinode ที่ displacement antinode ความดันจะมีค่าคงที่ไม่ว่าเวลาใด ๆ ด้วยเหตุนี้ displacement antinode จึงตรงกับ pressure node

ในทางกายภาพเราจะเข้าใจยิ่งขึ้นถ้าคิดว่าส่วนย่อย (element) ของก๊าซที่อยู่คนละข้างของ displacement node กำลังแกว่งโดยมี เฟสตรงข้ามกัน ด้วยเหตุนี้เมื่อมันเคลื่อนที่เข้าหากัน ความดันที่ node นี้จะมีค่าสูงสุดและเมื่อมันเคลื่อนที่ออกจากกัน ความดันที่จุดนี้จะมีต่ำสุด สำหรับส่วนย่อยของก๊าซซึ่งอยู่คนละข้างของ displacement antinode จะแกว่งในเฟสเดียวกัน ฉะนั้นจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในความดันและ antinode

2.2 สมการ Plane wave one Dimension Linearized Theory

จากทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงที่ไหลผ่านในระบบท่อจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (\text{เป็นสมการคลื่นหนึ่งมิติ}) \quad (2.15)$$

โดยให้

U = การขจัดอย่างรวดเร็ว

C = อัตราเร็วของการแพร่ของคลื่น

$$C^2 = B / \rho$$

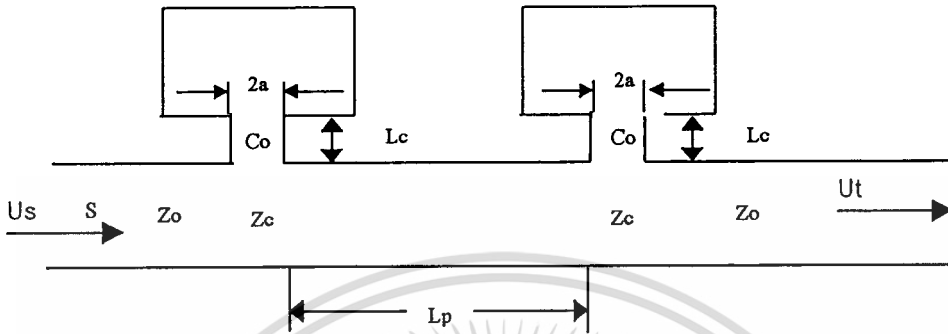
B = BULK MODULUS

ซึ่งได้นำมาวิเคราะห์ การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในระนาบของท่อ ซึ่งเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid tube) โดยกำหนดให้สมมุติว่า

- 1) ความหนืดมีค่าเป็นศูนย์ ($\mu = 0$)
- 2) มีการไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow)
- 3) ไม่มีการสูญเสียความร้อน (Adiabatic)
- 4) ความดันคงที่ ($P=C$)
- 5) อุณหภูมิคงที่ ($T=C$)

2.3 ทฤษฎี Governing Equation ของ D.D. DAVIS

จากรูป 2.14 เป็นระบบท่อส่งหรือท่อนำเสียงแบบที่มี Resonators 2 ชุดที่สมมติให้คุณลักษณะ (characteristic) ของเสียงที่ลดลงในแต่ละช่วง เป็นค่าความต้านทาน (impedance, Z)



รูปที่ 2.14 ระบบท่อส่งที่มี Resonators

โดยที่

Z_o = Characteristic impedance ของ ท่อ

Z_c = Characteristic impedance ของ inlet resonator

Co = Conductivity

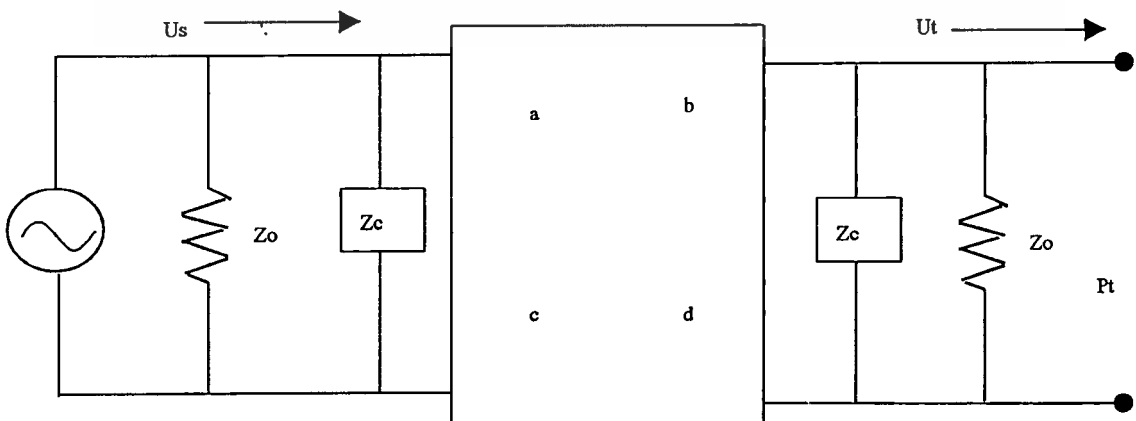
L_p = ระยะระหว่าง Resonator

S = พื้นที่หน้าตัดท่อ

a = รัศมีของรู connector

L_c = ความยาวของ connector

จากรูปที่ 2.14 สามารถนำไปเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรเทียบเคียงของระบบท่อส่งที่มี Resonators

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะความต้านทานแต่ละช่วงมีลักษณะดังนี้

$$Z_o = \frac{\rho c}{s}$$

$$Z_c = j \left(\frac{w\rho}{C_o} - \frac{\rho c^2}{wv} \right) = j\rho \left(\frac{cw}{cC_o} - \frac{c^2}{wv} \right)$$

$$= j\rho c \left(\frac{\omega}{cC_o} - \frac{1}{\frac{\omega}{v}} \right) = j\rho c \left(\frac{k}{C_o} - \frac{1}{kv} \right)$$

$$= j\rho c \frac{\sqrt{C_o v}}{\sqrt{C_o v}} \left(\frac{k}{C_o} - \frac{1}{kv} \right) = \frac{j\rho c}{\sqrt{C_o v}} \left(k \sqrt{\frac{v}{C_o}} - \frac{1}{k} \sqrt{\frac{C_o}{v}} \right)$$

$$= j \frac{\rho c}{\sqrt{C_o v}} \left(\frac{k}{\sqrt{\frac{C_o}{v}}} - \frac{\sqrt{\frac{C_o}{v}}}{k} \right) = j \frac{\rho c}{\sqrt{C_o v}} \left(\frac{k}{kv} - \frac{kv}{k} \right)$$

$$= j \frac{\rho c}{\sqrt{C_o v}} \left(\frac{2\pi f}{2\pi f_r} - \frac{2\pi f_r}{2\pi f} \right)$$

$$j = \sqrt{C_o v} \quad F = \left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right)$$

$$= j \frac{\rho c}{\sqrt{C_o v}} \left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right) = j \frac{\rho c}{\sigma} F$$

จากสมการแพร่กระจายของคลื่นจะได้ค่าคงที่ 4 เทอม

$$a = \cosh l_p \quad b = j \frac{\rho c}{S} \sinh l_p \quad c = j \frac{S}{\rho c} \sinh l_p \quad d = \cosh l_p$$

จากวงจรเทียบเคียงในรูปที่ 2.15 สามารถเขียนเป็นสมการ matrix ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_c} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_c} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_c} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} a \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + c & b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \\ \frac{1}{Z_c} & \frac{1}{Z_o} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} a + b \frac{1}{Z_o} & b \\ a \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + c + \frac{1}{Z_c} \left\{ b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \right\} & b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} a + b \frac{1}{Z_o} + b \frac{1}{Z_c} & b \\ a \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + c + \frac{1}{Z_c} \left\{ b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \right\} + \frac{1}{Z_o} \left\{ b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \right\} & b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \end{pmatrix}$$

$$\frac{Z_o C}{2} = \frac{Z_o}{2} \left[a \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + c + \frac{1}{Z_c} \left\{ b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \right\} + \frac{1}{Z_o} \left\{ b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \right\} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[a \left(1 + \frac{Z_o}{Z_c} \right) + c Z_o + \frac{1}{Z_c} \left\{ b \left(1 + \frac{Z_o}{Z_c} \right) + d Z_o \right\} + b \left(\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_c} \right) + d \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\frac{\rho c}{S}}{j \frac{\rho c}{\sigma} F} \cosh l_p - \frac{\rho c}{S} j \frac{S}{\rho c} \sinh l_p \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \frac{j \rho c}{S} \sinh l_p \left(1 + \frac{\rho c}{j S F} \right) + \frac{\rho c}{j S F} \cosh l_p$$

$$+ \left(\frac{dS}{\rho c} + \frac{1}{j \rho c F} \right) \rho c S \sinh l_p + \cosh l_p$$

$$Z_o C = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma}{j F} \right) \cos l_p + j \sin l_p + \frac{\sigma}{F} \left(1 + \frac{\sigma}{j F} \right) \sinh l_p \right]$$

$$+ \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c} \rho \\ \cos l_p - j \frac{S}{F} \cos l_p + j \sinh l_p \\ \sigma \\ -j \frac{S}{F} \cosh l_p + \sin l_p + j \frac{S}{F} \sin l_p + \cosh l_p \end{array} \begin{array}{c} \sigma \\ \cos l_p + j \sinh l_p \\ \sigma \\ \sin l_p - j \left(\frac{\sigma}{F} \right)^2 \sin l_p \end{array} \right]$$

$$= \cos l_p + \frac{\sigma}{F} \sin l_p - j \left\{ \frac{S}{F} \cosh l_p - \left(\frac{\sigma}{F} \right)^2 \sinh l_p \right\}$$

เพราะฉะนั้น จะได้ค่า Transmission Loss(TL) ดังนี้

$$TL = 10 \log \frac{Z_o C^2}{Z}$$

$$= \left[\cosh l_p + X \sinh l_p \right]^2$$

(2.17)

โดยที่

$$X = \frac{2s}{f - f_r}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{C_o}{v}$$

$$C_o = \frac{\pi a^2}{l_c + \beta a} \left(\beta = \frac{\pi}{c} \right)$$

$$= \frac{2a}{1 + \frac{2lc}{\pi a}}$$

2.4 หลักการนำสมการไปใช้เป็นทฤษฎีพื้นฐาน

Transmission loss (TL.) ของ Resonators เป็นการประเมินค่าการเก็บเสียงอันเนื่องมาจาก อัตราส่วนของพลังงานคลื่นเสียงที่เข้าไปใน Resonators กับพลังงานคลื่นเสียงที่ส่งออกมาจาก Resonators

$$TL = 10 \log \frac{\text{Average incident sound power}}{\text{Average transmitted sound power}} \quad (2.18)$$

$$\text{Average sound pressure} = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 S A^2$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

c = Sound velocity $\approx 340 \text{ m/s}$

ω = angular frequency, rad/sec , $2\pi f$

S = พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

A = displacement amplitude.

ถ้าสมมุติว่าเสียงที่ตกลงระหว่างจุด 2 จุด (1 และ 2) โดยที่ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของท่อเท่ากันและไม่มีการสะท้อน ของเสียงที่ตำแหน่ง 2

จากสมการที่ 2.16 จะได้

$$TL = 10 \log \frac{A_1^2}{A_2^2} \quad (2.19)$$

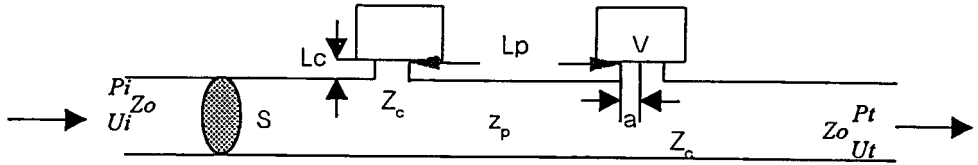
ในการหาสมการ TL กำหนดให้อยู่ในข้อจำกัดดังนี้

1. ความดันของเสียงมีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันเฉลี่ยในระบบ
2. ไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงที่ปลายท่อ
3. Phase of sound wave ที่ผ่านเข้าไปในท่อมีค่าคงที่
4. ผนังท่อ, ข้อต่อ และห้องเก็บเสียงไม่เป็นสื่อในการส่งพลังงานเสียง
5. ไม่คิดผลที่เกิดจากความหนืด

สมการที่ใช้ในการคำนวณเครื่องลดเสียงแบบ Helmholtz จำนวน 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในการแก้ไข ให้เห็น เมื่อผู้ดูแลเห็นชอบใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ระบบท่อที่มี Resonators 2 ชุด

V = ปริมาตรของห้องกลเสียง

a = รัศมี Connector ของเครื่องกลเสียง

L_c = ความสูงของ CONNECTOR ของเครื่องรับเสียง

L_p = ระยะระหว่างเครื่องรับเสียง m

Z_o = Characteristic Impedance ของท่อ = $\frac{\rho c}{S}$

Z_c = Characteristic Impedance Resonance = $\frac{\omega \rho}{C_o} - \frac{\rho}{\omega} \cdot \frac{c^2}{V}$

C_o = Conductivity = $\frac{\Pi a^2}{L_c + \beta a}$

β = empirical constance มีค่าอยู่ระหว่าง $\frac{\Pi}{4}$ และ $\frac{\Pi}{2}$

$$\begin{bmatrix} P_i \\ U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t \\ U_t \end{bmatrix}$$

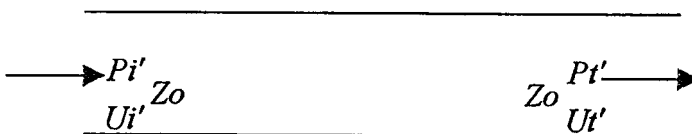
(2.20)

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_c} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos kL_p & j \frac{\rho c}{S} \sin kL_p \\ j \frac{\rho c}{S} \sin kL_p & \cos kL_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_c} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t \\ U_t \end{bmatrix}$$

เมื่อ A, B, C, D = 4 Terminal Constance

P = Sound pressure, U = Volume Velocity

สมการ matrix ของท่อตรงที่ไม่มี Resonator



เอกสารรูปที่ 2.17 ระบบท่อที่ไม่มี Resonator ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_i' \\ U_i' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t' \\ U_t' \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_o} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t' \\ U_t' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.18) และ (2.19) จะได้ว่า

$$U_t = 0, \quad U_t' = 0$$

ดังนั้น

$$U_i = C P_t$$

และ

$$U_i' = C' P_t'$$

(2.22)

สมมติ ให้ Volume velocity ที่ทางเข้าของท่อมมีค่าคงที่
ดังนั้นจากสมการ(2.20) จะได้

$$\begin{aligned} C P_t &= C' P_t' \\ \frac{P_t'}{P_t} &= \frac{c}{c'} = \frac{c}{\frac{2S}{\rho c}} \\ TL &= 10 \log \left| \frac{C}{\frac{2S}{\rho c}} \right|^2 \end{aligned} \quad (2.23)$$

ค่า c หาได้จากสมการ (2.18)

สมการ TL ของ Resonator 2 ชุด คือ

$$TL = 10 \log \left[\left(\cos kL_p + 2x \sin kL_p \right)^2 + \left(2x \cos kL_p - \left(1 - 2x^2 \right) \sin kL_p \right)^2 \right] \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } x &= \frac{\sqrt{C_o V}}{\frac{2S}{\frac{f}{fr} - \frac{fr}{f}}}, \quad k = \frac{2\pi f}{c} \\ fr &= \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{C_o}{V}} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันสมการ TL ที่ใช้ใน Resonator 3 ชุด จะได้ดังนี้

$$TL = 10 \log \left[\left(\frac{\cos^2 kL_p + 6x \sin kL_p - (1 - 4x^2) \sin^2 kL_p}{(1 - 4x^2) \sin^2 kL_p} \right)^2 + \left(\frac{3x \cos^2 kL_p - (2 - 8x^2) \sin^2 kL_p \cos kL_p}{(3 - 4x^3) \sin kL_p} \right)^2 \right] \quad (2.25)$$

และสำหรับ Single Resonator

$$TL = 10 \log (1 + x^2) \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นทั้งหมด สามารถนำมาสรุปรูปแบบสมการ ให้ง่ายเพื่อใช้ในการเขียน อัลกอริทึมในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการคำนวณหาค่า TL.นี้ไม่คิดผลของความหนืดของอากาศที่ connector สมการ Matrix ในการหาค่าคงที่ “C” ตามสมการที่ 2.25

จากรูปที่ 2.16 เขียนเป็นสมการ Matrix ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_c & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_c & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_c & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

ตามสมการที่ (2.25) เมื่อ Resonator มีจำนวน “n” แถวจำนวน Matrix(1,0,1/Z₀,1) และ (A_p, B_p, C_p, D_p) จะมี “n” และ “(n-1)” แถวตามลำดับ

Z_p = ค่า Impedance ระหว่าง Resonator = (A_p, B_p, C_p, D_p)

เมื่อ A_p = D_p = cos kL_p,

B_p = j Z₀ sin kL_p,

C_p = j sin kL_p/Z₀

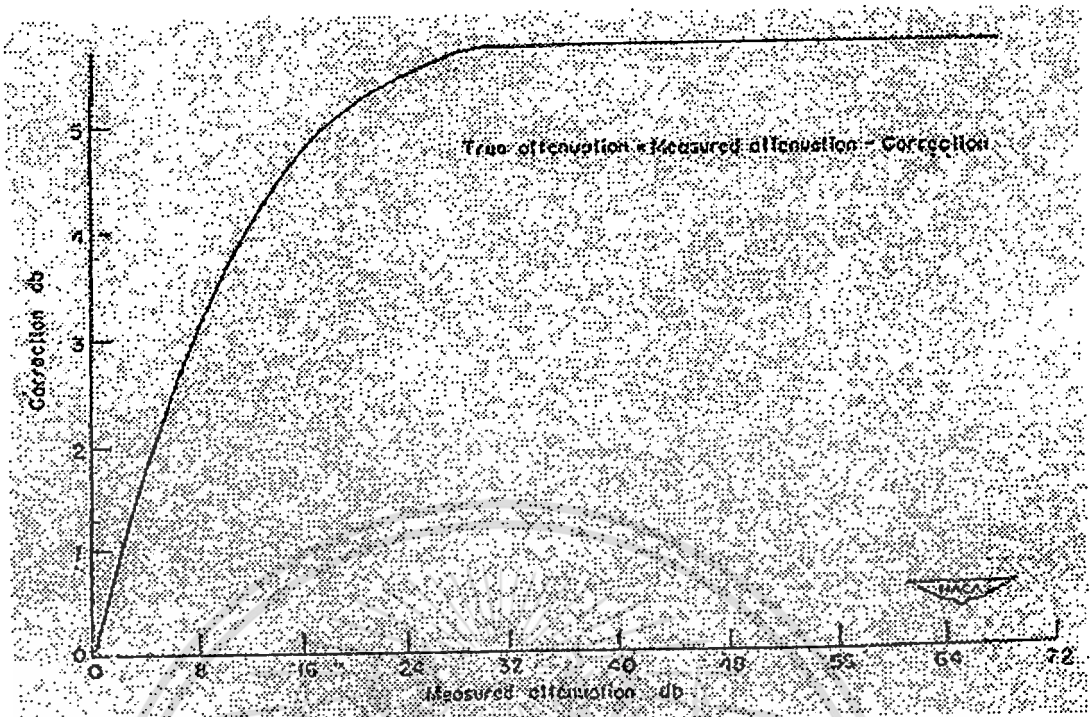
f = ความถี่ ; j = imaginary number unit

$$Z_c = j \left(\frac{\omega}{C_0} \right) - \left(\frac{C^2}{\omega V} \right) \quad (2.28)$$

ค่าคงที่ “C” หาได้จากสมการ (2.25) และ (2.26) ดังนั้น TL. ของ Resonator คำนวณได้ ดังนี้

$$TL = 10 \log \left| \frac{Z_0 C}{2} \right|^2 \quad (2.29)$$

ในการทดลองหาค่า Transmission loss (T.L) ต้องใช้เครื่องมือวัดหาค่า SPL ซึ่งมีหน่วยเป็น dB นั้น เมื่อเราค่าที่วัดได้ ก่อนเข้าและหลังออกจาก Resonators นั้น มาลบกันซึ่งจะได้ค่าไม่ถูกต้องนักจึงต้องมาแก้ไขให้ถูกต้องเสียก่อน(corrective) โดยใช้ทฤษฎีของ Davis curve



รูปที่ 2.18 ทฤษฎี Davis Curve

เมื่อได้ค่าถูกต้องแล้วจึงนำค่า TL ที่ได้ Plot ร่วมไปในกราฟทฤษฎีการหาค่า SPL ซึ่งจะแสดงให้เห็นความดังของเสียง ที่ก่อนเข้า Resonator และออกมาจาก Resonator มีการลดลงเล็กน้อยเพียงใด สามารถหาได้จากสมการ

$$SPL = 20 \log \left| \frac{A^2}{A_1} \right|^2 \quad (2.30)$$

$$\therefore SPL = -20 \log \left| \frac{Z_0 C}{2} \right|^2 \quad (2.31)$$

นำสมการ ไปเขียนโปรแกรมใช้งาน

บทที่ 3

การสร้างอุปกรณ์ทดลอง

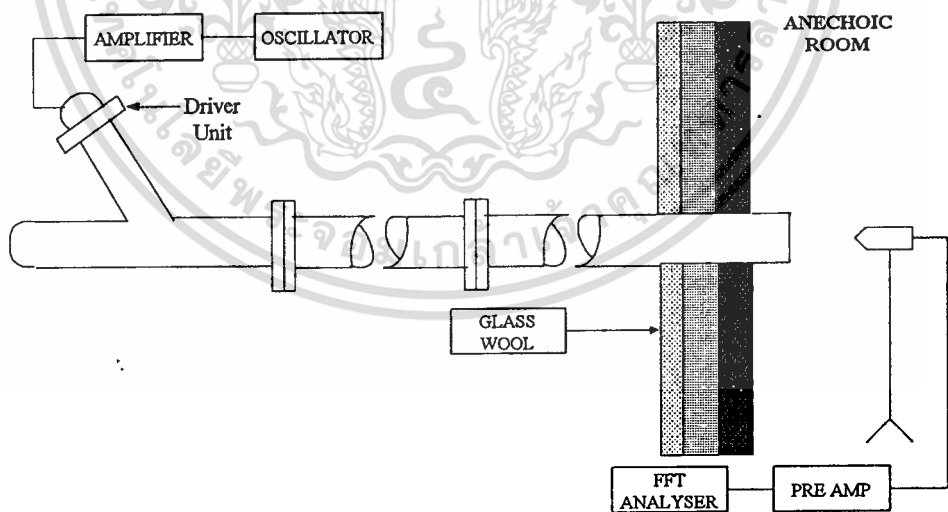
3.1 สร้างอุปกรณ์ประกอบในการทดลอง

3.1.1 ห้องเก็บเสียง (Anechoic Room) และท่อม้วนทรงปากแตร (Involte tube)

ห้องเก็บเสียง (ANECHOIC ROOM) และท่อม้วนทรงปากแตร(Involte tube)จะต้องมีคุณสมบัติในการดูดกลืนเสียง(Absorption)และป้องกันการสะท้อนกลับ(Reflection)ซึ่งคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของ Plane wave และทฤษฎีของ Standing wave ลักษณะโครงสร้างของห้องเก็บเสียงจะเป็นห้องที่บุผนังด้วยGrass wool 3 ชั้น ชั้นนอกความหนาแน่น 24 kg/m^3 หนา 15 cm ชั้นกลางความหนาแน่น 30 kg/m^3 หนา 15 cm ชั้นในสุด ความหนาแน่น 48 kg/m^3 หนา 15 cm ทั้ง 6 ด้าน ขนาด ของห้องเก็บเสียง $3 \times 4 \times 3$ เมตร

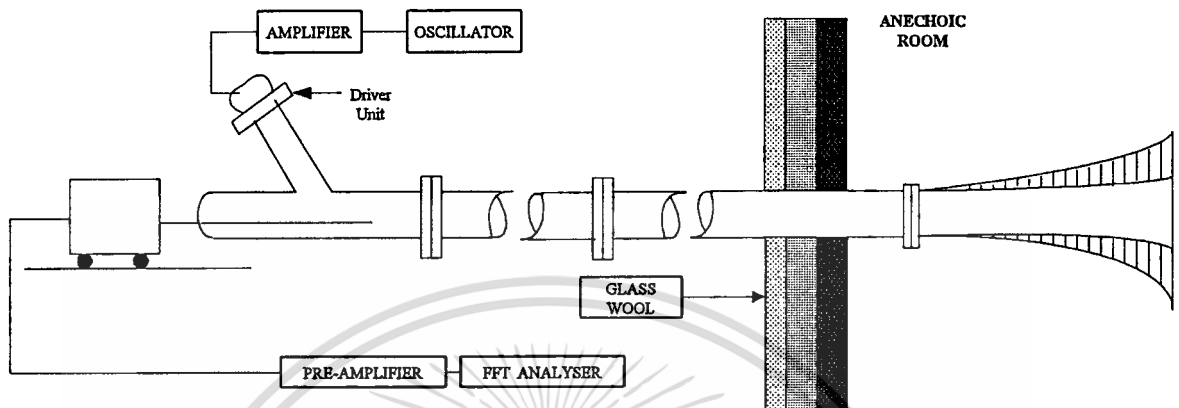
การทดสอบ แบ่งเป็น 2 การทดลอง

1.การทดลองตามทฤษฎี Plane wave เป็นการทดสอบห้องเก็บเสียง



รูปที่ 3.1 แสดงการทดลองหาประสิทธิภาพ ของห้องเก็บเสียงตามทฤษฎี PLANE WAVE

2. การทดลองตามทฤษฎีของ STANDING WAVE เป็นการทดสอบห้องเก็บเสียงและท่อทรงปากแตร(INVOLTE TUBE)

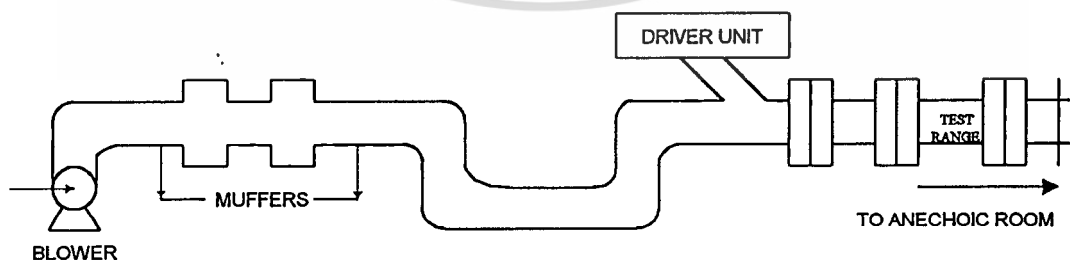


รูปที่ 3.2 แสดงการทดลองหาประสิทธิภาพของห้องเก็บเสียงระบบตามทฤษฎี STANDING WAVE

ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ความถี่สูงกว่า 200 Hz ขึ้นไป ค่าของ AMPLITUDE PEAK TO PEAK ของรูปคลื่น SINE จะมีค่าไม่เกิน 5 dB และที่ย่านความถี่ 1,600 Hz ไม่มีการสะท้อนกลับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าท่อม้วนทรงปากแตร (INVOLUTE TUBE) เป็นท่อไร้การสะท้อนกลับของคลื่นเสียงและไม่มีการสะท้อนกลับภายในห้องเก็บเสียง

3.1.2 ระบบท่อ(PIPING SYSTEM)

เป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.054 เมตร มี muffler อยู่สองช่วง เพื่อลดเสียงรบกวนในระบบท่อ ที่เกิดจาก BLOWER และกระแสลม และมี TEST RANGE 1 เมตรก่อนเข้าห้องเก็บเสียง



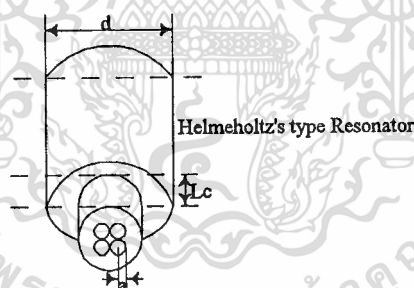
รูปที่ 3.3 แสดงระบบท่อ (PIPING SYSTEM)

3.1.3 อุปกรณ์ ประกอบอื่น และเครื่องมือวัด

- BLOWER ก่ำนัดกระแสลมความเร็วสูงสุด 40 m/s
- MANOMETER ใช้วัดความเร็วลมโดยใช้ของเหลวเป็นแอลกอฮอล์
- DRIVER UNIT เป็นแหล่งกำเนิดเสียง
- OSCILLATOR เป็นแหล่งกำเนิดความถี่สูง ปรับค่าได้
- AMPLIFIER ใช้ในการขยายสัญญาณ ความถี่เสียง
- MICROPHONE ใช้วัดสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้น
- PROBE TUBE ท่อนำเสียง
- PRE-AMPLIFIER ขยายสัญญาณเสียงที่ได้รับจาก Microphone
- FFT ANALYSER เป็นเครื่องมือวัดที่แปลงสัญญาณความถี่เสียงให้มีหน่วยเป็น dB โดยผ่านการปรับแต่งจากเครื่องมือมาตรฐานที่กำเนิดความถี่ 1,000 Hz ความดังของเสียง 90 dB

3.2 การคำนวณการสร้าง Resonator แบบต่าง ๆ

Resonator แบบ Helmholtz's type มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมี connector



รูปที่ 3.4 Resonator แบบ Helmholtz's type

ส่วนขนาดของ Helmholtz's type Resonator โดยการทดลองป้อนค่าลงในโปรแกรมที่ใช้ทฤษฎีพื้นฐาน One Dimensional linearized theory หาขนาดของ Resonator ตรงตามต้องการแล้วนำไปสร้าง Helmholtz's type Resonator

- ขนาดของ Helmholtz's type Resonator ในที่นี้ เราจะทดลองกับขนาดของวัตถุที่วางยาก่อนเพื่อสะดวกในการทดลอง

- รูของ connector จำนวนรูที่ connector ของ resonator มีจำนวนรูและขนาดรูตามรูป ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ขนาดรูต่างกัน แต่พื้นที่หน้าตัดรวมกันเท่ากันทั้งหมด



รูปที่ 3.5 แสดงconnector แสดงขนาดรูต่างกันแต่พื้นที่หน้าตัดรวมแต่ละแบบเท่ากัน

2) ขนาดรูคงที่ แต่จำนวนรูต่างกัน



รูปที่ 3.6 แสดง connector ขนาดรูคงที่จำนวนรูต่างกัน

3.3 ลักษณะของท่อทดลอง

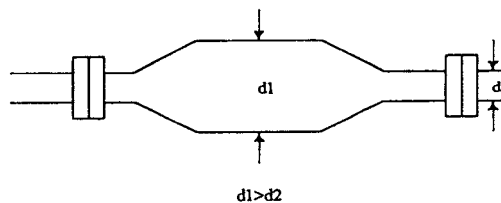
ในการทดลองกับ Helmholtz's type Resonator ความถี่ต่ำจะมีทั้งหมด 3 แบบ คือ

1)แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทดลองเท่ากับท่อทั้งระบบ



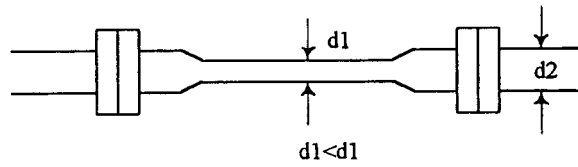
รูปที่ 3.7 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำเสียงเท่ากับท่อทั้งระบบ

2) ท่อเพิ่มขนาด จะมีลักษณะท่อทดลอง Resonator ใหญ่กว่าท่อทั้งระบบ



เอกสารรูปที่ 3.8 แสดงท่อทดลองที่ Resonator ใหญ่กว่าท่อทั้งระบบ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3)ท่อลดขนาด จะมีลักษณะท่อทดลองที่ Resonator เล็กกว่าท่อทั้งระบบ



รูปที่ 3.9 แสดงท่อทดลองที่ Resonator เล็กกว่าท่อทั้งระบบ

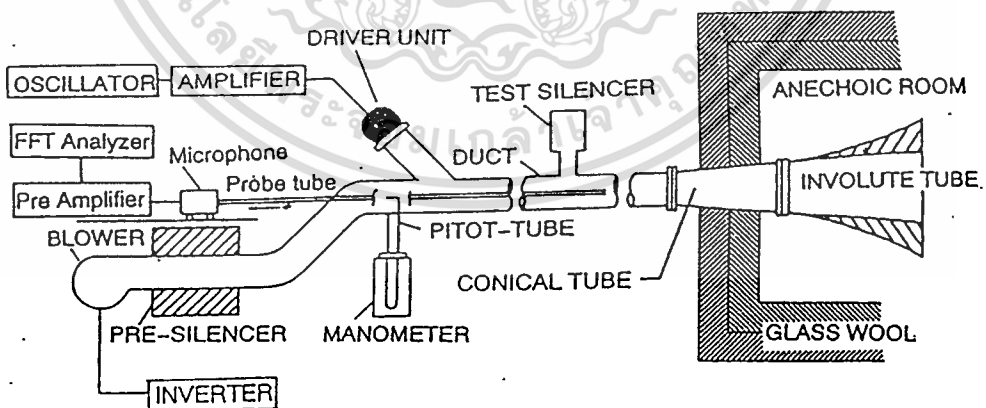


บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การประกอบอุปกรณ์ทดลอง

การประกอบอุปกรณ์ ดังรูป 4.1 เริ่มต้นจาก BLOWER ซึ่งใช้ในการทดลองกรณีที่มีความเร็วลมซึ่งสามารถกำเนิดความเร็วลมได้สูงสุด 40 m/s ใช้ Transistor Inverter ควบคุมความเร็วลมโดย Transistor Inverter จะไปควบคุมความเร็วของ BLOWER โดยตรง อุปกรณ์ถัดมาคือ Pre-Silencer หรือ Pre-muffer ใช้ลดเสียงรบกวนจาก BLOWER แล้วให้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.054 เมตรเป็นระบบท่อส่ง circular duct แล้วใช้ Manometer วัดความเร็วลมในระบบท่อ กรณี การทดลองเป็นแบบมีความเร็วลม อุปกรณ์ถัดมาเป็นอุปกรณ์กำเนิดเสียงที่สามารถปรับความถี่เสียงได้โดยใช้ Oscillator ส่งสัญญาณเสียงไปขยายที่ Amplifier แล้วส่งสัญญาณขยายไปยัง Driver unit ซึ่งจะส่งสัญญาณความถี่เสียงเข้าไปในระบบท่อ ซึ่งจะวัดความดังของเสียงโดยใช้ท่อนำเสียง (Tail tube) ซึ่งต่อกับไมโครโฟน ท่อนำเสียง(Tail tube) นั้นเป็นตัวนำเสียงจากจุดที่ต้องการวัดภายในท่อส่งมายังไมโครโฟน สัญญาณจากไมโครโฟนจะส่งไปขยายใน Pre amplifier แล้วส่งสัญญาณไป FFT Analyzer จะวัดสัญญาณเป็น dB ,ส่วนที่ใช้ในการติดตั้ง Resonator เรียกว่า Test Silencer ซึ่งจะมี Resonator ติดตั้งบนท่อทดลองตัว conical tube และ Involute tube เป็นอุปกรณ์ป้องกันเสียงสะท้อนกลับเข้าท่อ ห้องเก็บเสียง(Anechoic Room)จะต้องเป็นห้องที่มีการสะท้อนเสียงภายในห้องน้อยที่สุด



รูปที่ 4.1 ประกอบอุปกรณ์ทดลอง

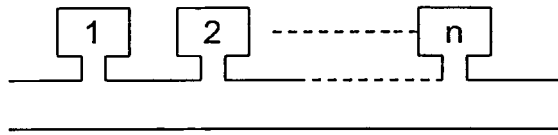
4.2 ลักษณะการต่อ Resonator แบบต่าง ๆ

Resonator ที่เราใช้เป็นชนิด Helmholtz's type ซึ่งมีรูปแบบการต่อเรียงบนท่อทดลอง

แบบต่าง ๆ ดังนี้

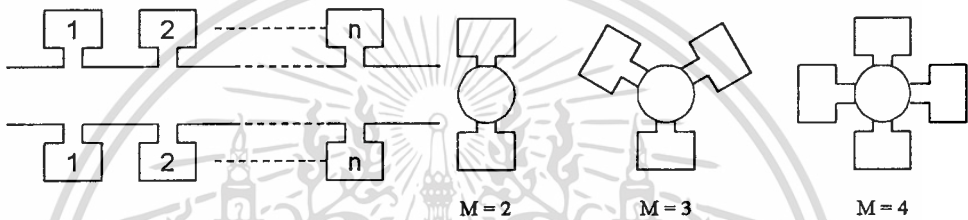
เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การต่อแบบอนุกรม เป็นการต่อ Resonator แบบเรียงแถวเดียว



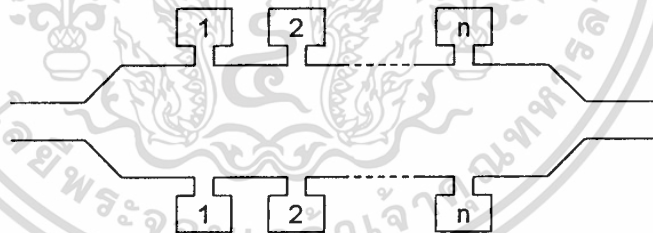
รูปที่ 4.2 การต่อ Resonator แบบอนุกรม

4.2.2 การต่อแบบขนาน เป็นการต่อ Resonator แบบ เรียงขนานหลายแบบที่ใช้ในการทดลองจะขนานตั้งแต่ 2,3 และ 4 แถว



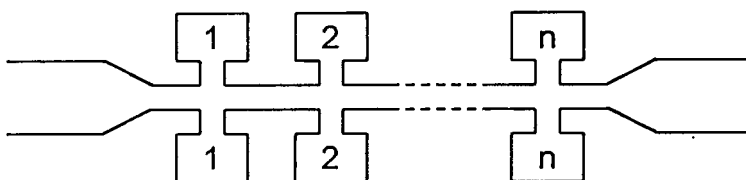
รูปที่ 4.3 การต่อ Resonator แบบขนาน

4.2.3 การต่อ Resonator แบบอนุกรมและขนานบนท่อขยาย



รูปที่ 4.4 การต่อ Resonator แบบอนุกรมและขนานบนท่อขยาย

4.2.4 การต่อ Resonator แบบอนุกรมและแบบขนานบนท่อลด



รูปที่ 4.5 การต่อ Resonator แบบอนุกรมและแบบขนานบนท่อลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลอง Helmholtz Resonator จากรูปที่ 4.1 แบ่งการทดลอง 2 กรณี

- กรณีไม่มีอากาศไหลผ่าน

1. ติดตั้ง Helmholtz Resonator ลงบนท่อสำหรับทดสอบ
2. ปรับเครื่องกำเนิดความถี่ โดยเริ่มที่ ความถี่ 180 Hz (ที่ความถี่ต่ำกว่า 180 Hz ค่า TL จะน้อยมากจึงไม่น่ามาคิด)

3. เลื่อนรถไมโครโฟนเพื่อหาจุดที่มีระดับความเข้มเสียงสูงสุดโดยหา 2 จุดคือ จุดก่อนเข้า

Helmholtz Resonator และจุดหลังออกจาก Helmholtz Resonator

(ปลายท่อนำเสียง(Prob Tube) เป็นจุดอ้างอิงในการเลื่อนรถไมโครโฟนหาจุดที่มี

ความเข้มเสียงสูงสุด) โดยอ่านค่าจาก FFT Analyzer และบันทึกผลการทดลองไว้

4. เปลี่ยนความถี่ของคลื่นเสียงทีละ 10 Hz แล้วทำตามข้อ 3 เพื่อหาว่าช่วงไหนสามารถลดเสียงได้มาก

5. เปลี่ยนแบบของ Helmholtz Resonator เป็นแบบต่าง ๆ แล้วทำตามข้อ 1 ถึง 4

- กรณีอากาศไหลผ่าน

1. ปรับความเร็วรอบของ Blower เพื่อให้ความเร็วของอากาศในท่อตามที่ต้องการ โดยปรับความเร็วรอบที่ transistor Inverter และ ดูระดับความเร็วของอากาศที่ manometer

2. เมื่อได้ความเร็วรอบ ตามที่ต้องการแล้วปฏิบัติตามข้อ 1 ถึง 5 หรือข้อกรณีไม่มีอากาศไหลผ่าน

3. เปลี่ยนความเร็วลมของอากาศ แล้วปฏิบัติตามข้อ 2

4.4 การบันทึกผลการทดลอง

ค่าที่ได้จากการทดลอง จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าใน Davis curve เพื่อหาค่าที่ถูกต้อง แล้วจึงนำค่านี้ไปเปรียบเทียบกับกราฟทางทฤษฎี

4.5 ผลการทดลอง

- จากรูปที่ 4.6 การทดสอบ Helmholtz Resonator แบบเดี่ยว (Single Resonator) เป็นการทดสอบแบบมีเครื่องลดเสียง (Resonator) เพียงตัวเดียว คือ มีจำนวน resonator ทางด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 1 และทางด้านขนาน(m) เท่ากับ 1 มีขนาดรู Connector ต่างกัน แต่พื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากัน แสดงในรูปที่ 4.6 จำนวนรู connector (no) เท่ากับ 1,2,5 และ 8 ผลการทดลองสามารถลดเสียงลงได้ไม่ถึง 10 dB และค่าการลดเสียงที่ได้จากรูปที่ 4.6 มีค่าไม่แตกต่างกันมาก.

- จากรูปที่ 4.7 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่อทางด้านอนุกรมและขนานหลายชุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็นการเปรียบเทียบเฉพาะการเพิ่มทางด้านขนาน โดยจำนวน Resonators ทางด้านอนุกรมเท่ากัน ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการทดสอบนี้ กำหนดความเร็วลม $v = 0$ m/s วิเคราะห์ผลการทดลอง ที่จำนวน Resonators ทางด้านอนุกรมคงที่(n) เท่ากับ 2 ,ทางด้านขนาน(m) เท่ากับ 1, 2, 3, และ 4 เมื่อเปรียบเทียบดูแล้ว ถ้าจำนวนแนวทางขนาน(m)มากขึ้น เครื่องลดเสียง(Resonators) จะสามารถลดเสียงได้มากขึ้นตามลำดับแต่ไม่แตกต่างกันมาก เมื่อเพิ่มการต่อ Resonator ทางอนุกรมมากขึ้นโดยกำหนดชุด Resonators ทางด้านอนุกรมคงที่(n) เท่ากับ 3, 9 และ 13 โดยในแต่ละชุดอนุกรมมีการต่อเพิ่มทางด้านขนาน(m) เท่ากับ 2 , 3 และ 4 จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มจำนวน Resonators ในทางอนุกรมมากขึ้น พบว่า Resonators สามารถลดเสียงในระบบท่อได้มากขึ้นและเมื่อเพิ่ม Resonators ทางด้านขนานมากขึ้นก็ยิ่งลดเสียงได้มากขึ้นตามลำดับ

- จากรูปที่ 4.8 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่อแบบอนุกรมหลายชุดทดสอบที่ความเร็วลม $v = 0$ m/s และมีรูที่ connector 1 รู (no = 1) ผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี เมื่อจำนวน Resonators ทางด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 2, 5, 7 และ 12 พบว่า เมื่อ Resonators ต่ออนุกรมมากขึ้น ความสามารถในการลดเสียงในระบบท่อก็จะมากขึ้น ตามลำดับด้วย

- จากรูปที่ 4.9 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่อขนานหลายแบบ ทดสอบที่ความเร็วลม $v = 0$ m/s และมีรู connector 2 รู ผลการทดลอง ที่ได้เป็นไปตามเส้นทฤษฎี เมื่อต่อ Resonators ทางด้านอนุกรมคงที่(n) เท่ากับ 1 และทางด้านขนาน(m) เท่ากับ 2, 3 และ 4 เมื่อมี Resonators ที่ต่อแบบขนานมากขึ้น พบว่าความสามารถในการลดเสียงในระบบ ก็จะมีมากขึ้นตามลำดับด้วย

- จากรูปที่ 4.10 การทดลอง Helmholtz Resonators ที่ต่อแบบอนุกรมและขนาน หลายแบบ ซึ่งมีผลรวมทั้งหมดของจำนวน Resonators เท่ากัน คือ 12 ตัว โดยทดสอบที่ความเร็วลม $v = 0$ m/s และมีรูที่ connector (no) เท่ากับ 2 รู ทดสอบตามจำนวนชุดของ Resonators ดังนี้ ทางด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 12 และทางด้านขนาน(m) เท่ากับ 1 ,ทางด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 6 และทางด้านขนาน(m) เท่ากับ 2 , ทางด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 4 และ ทางด้านขนาน(m) เท่ากับ 3 , ทางด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 3 และทางด้านขนาน(m) เท่ากับ 4 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าถึงแม้ว่าผลรวมทั้งหมดของจำนวน Resonators จะเท่ากัน แต่ชุดของ Resonators ที่ต่อด้านอนุกรมจำนวนมากกว่า จะลดเสียงได้ดีกว่า แต่ไม่มากนัก เนื่องจากรูปแบบการต่อของ Resonators ที่ต่อแบบอนุกรมนั้นมีความยาวในระบบท่อกว่าแบบขนานมีผลทำให้คลื่นเสียงลดลง.

- จากรูปที่ 4.11 การทดสอบ Helmholtz Resonators แบบท่อขยายและท่อลด โดยการเปรียบเทียบ ผลของท่อลดและท่อขยาย โดยทดสอบที่ความเร็วลม $v = 0$ m/s และมีรูที่ connector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตในวงกว้าง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(no) เท่ากับ 1 โดยทดสอบบนท่อลด ที่มีชุด Resonators ต่อด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 5 และด้านขนาน(m) เท่ากับ 2 หลังจากนั้นเราทดสอบการต่อ Resonators แบบท่อขยาย โดยมีรูปแบบการต่อ Resonators แบบอนุกรมและขนาน เหมือนกับท่อขยาย ผลที่ได้จากการทดลองตรงกับทฤษฎี ว่าท่อลดสามารถลดเสียงได้ดีกว่าท่อขยาย เนื่องมาจากค่า S คือพื้นที่หน้าตัดของท่อลดมีขนาดเล็กลง จะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z_o, Z_p มีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่าพื้นที่หน้าตัด(S)ซึ่งเป็นตัวหารน้อยลง

- จากรูปที่ 4.12 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อขยายและท่อลด โดยต่อแบบอนุกรมเปรียบเทียบกับต่อขนาน โดยการทดสอบที่ความเร็วลม $v = 0$ m/s และมีรูที่ connector(no) เท่ากับ 1 โดยทดสอบบนท่อขยายที่มี Resonators ต่อด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 4 ต่อด้านขนาน(m) เท่ากับ 1 และต่อด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 2 ต่อด้านขนาน(m) เท่ากับ 2 และทดสอบบนท่อลดโดยทดสอบเหมือนกับท่อขยาย ผลที่ได้ตรงกับทฤษฎี ว่าการต่อด้านอนุกรมเปรียบเทียบกับด้านขนานบนท่อลดและท่อขยาย จะได้ผลเหมือนกับท่อธรรมดา คือต่ออนุกรมจะลดเสียงได้ดีกว่าขนาน ที่ Resonators จำนวนเท่ากัน แต่บนท่อลดจะลดเสียงได้ดีกว่าท่อขยาย

- จากรูปที่ 4.13 การทดสอบ Helmholtz Resonators โดยเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดรู connector ของชุด Resonators ที่เท่ากัน แต่จำนวนรูไม่เท่ากัน โดยทดสอบที่ความเร็วลม $v = 0$ m/s โดยมีรูปแบบการต่อแบบท่อธรรมดาที่ต่ออนุกรม โดยกำหนดจำนวน Resonators ด้านอนุกรม เท่ากับ 2 ด้านขนาน(m) เท่ากับ 1 และ ด้านอนุกรม เท่ากับ 12 ด้านขนาน(m) เท่ากับ 1 โดยกำหนดรู connector(no) เท่ากับ 1, 2, 5, 8 รูดมลำดับ รูปแบบการต่อแบบท่อธรรมดาที่ต่อขนาน โดยกำหนดจำนวน Resonators ด้านอนุกรม เท่ากับ 2 ด้านขนาน(m) เท่ากับ 2, ด้านอนุกรม เท่ากับ 2 ด้านขนาน(m) เท่ากับ 3 และด้านอนุกรม เท่ากับ 2 ด้านขนาน เท่ากับ 4 โดยกำหนดรู connector(no) ท่อขนาน $n = 2$ $m = 2$, $n = 2$ $m = 3$ และ $n = 2$ $m = 4$ โดยมีรู connector no = 1, 2, 5 และ 8 ตามลำดับ รูปแบบการต่อแบบท่อลด โดยกำหนดจำนวน Resonators ด้านอนุกรม เท่ากับ 5 ด้านขนาน(m) เท่ากับ 2 และ โดยกำหนดรู connector(no) เท่ากับ 1 และ 5 รูปแบบการต่อแบบท่อขยายมีจำนวน Resonators ที่ใช้ทดสอบชุดเดียวกับรูปแบบการต่อแบบท่อลด จากการทดลองเป็นไปตามเส้นทฤษฎี ว่าทั้งท่อธรรมดาที่ต่ออนุกรมและขนาน ท่อลดและท่อขยาย เปรียบเทียบจำนวนรูหลายรูแต่พื้นที่หน้าตัดรวมแล้วเท่ากับ 1 รู ผลการลดเสียงในระบบท่อที่ได้จะใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถสรุปได้ว่า แม้จำนวนรูต่างกันแต่พื้นที่หน้าตัดเท่ากันจะไม่มีผลต่อการลดเสียงในระบบท่อ.

- จากรูปที่ 4.14 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อลด และท่อขยาย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดรู connector ของ Resonators ที่ความเร็วลม $v = 0$ m/s รูปแบบการต่อ Resonators บนท่อลด ต่อด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 5 ด้านขนาน(m) เท่ากับ 2 โดยกำหนดจำนวนรู connector(no) เท่ากับ 1, 2 และ 3 ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของรู connector แต่ละรูเท่ากัน ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรูของ connector และกำหนดบนท่อขยายมีรูปแบบการต่อและจำนวนรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

connector เช่นเดียวกับท่อลด ผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดของ connector มากจะสามารถลดเสียงในระบบท่อได้เพิ่มมากขึ้น.

- จากรูปที่ 4.15 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด แบ่งเป็น

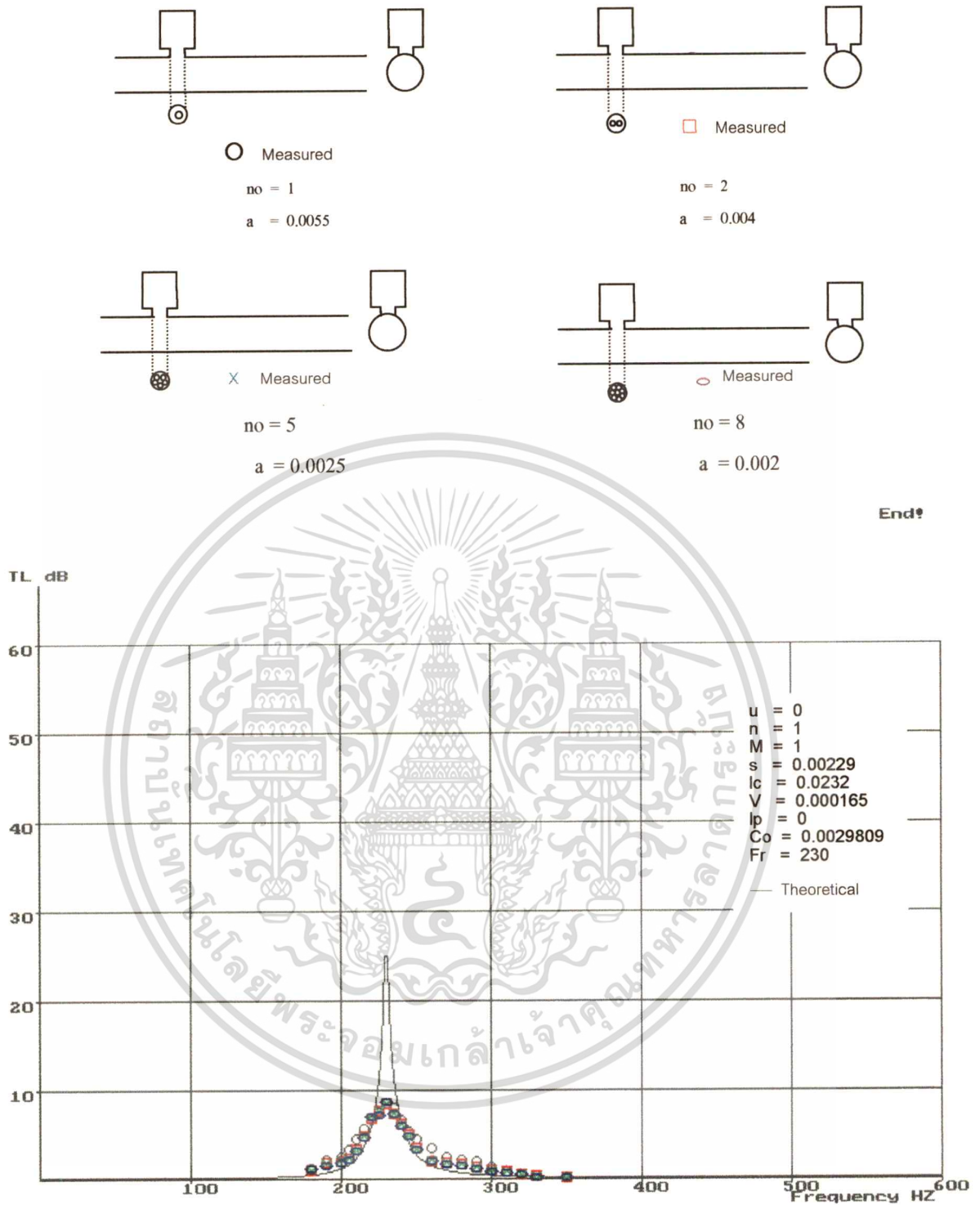
- รูปแบบการต่อแบบอนุกรม ต่ออนุกรม(n) เท่ากับ 12 โดยมีรู connector(n_o) เท่ากับ 1 และความเร็วลมตั้งแต่ 0 , 10 ,15 , 20 ,25 m/s

- รูปแบบการต่อแบบขนาน โดยมีรู connector(n_o) เท่ากับ 1 รู และความเร็วลมตั้งแต่ 0 , 10 , 20 , 30 m/s

- รูปแบบการต่อแบบท่อลด ต่ออนุกรม(n) เท่ากับ 5 ต่อขนาน(m) เท่ากับ 2 โดยมีรู connector(n_o) เท่ากับ 1 รู ความเร็วลมตั้งแต่ 0 ,10 ,15 ,20 m/s

- รูปแบบการต่อแบบท่อขยาย ต่ออนุกรม(n) เท่ากับ 5 ต่อขนาน(m) เท่ากับ 2 โดยมีรู connector(n_o) เท่ากับ 1 รู ความเร็วลมตั้งแต่ 0 ,10 ,15 ,20 m/s

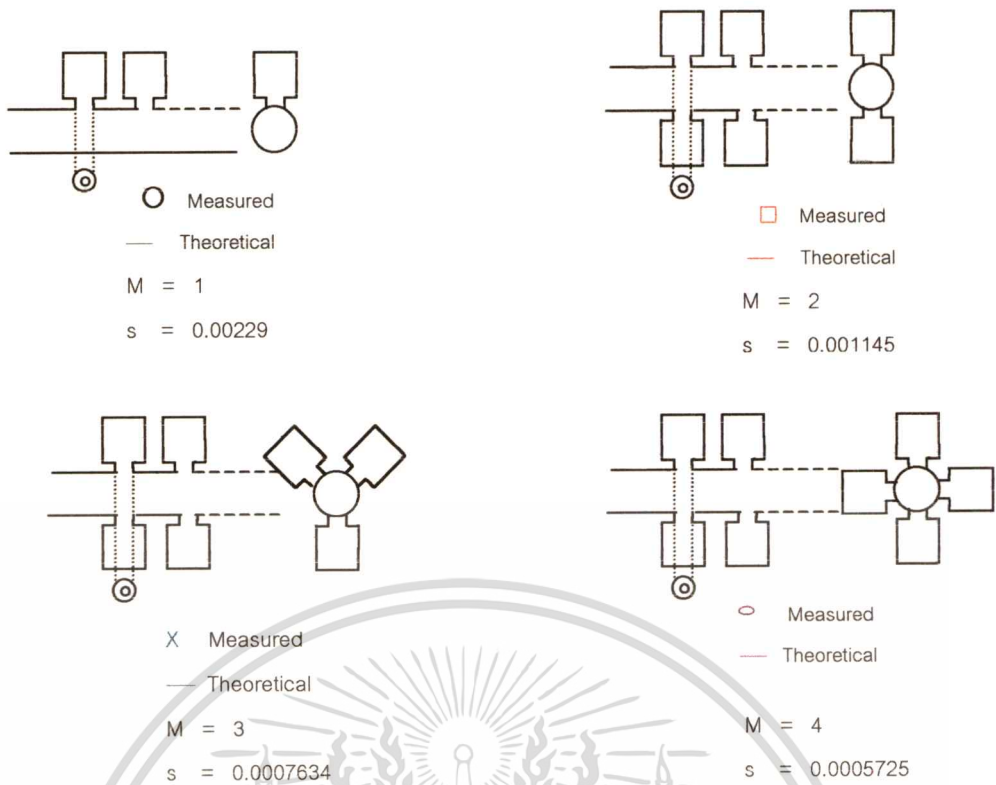
จากผลการทดลอง ที่ความเร็วลม $v = 0$ m/s นั้น พบว่าผลที่ได้ตรงตามทฤษฎี แต่เมื่อความเร็วลมเพิ่มมากกว่าศูนย์ ความสามารถในการลดเสียงของ Resonators ก็จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกระแสลมมีผลในการพาคลื่นเสียงผ่าน Resonators ไปได้บางส่วน และผลที่ได้อาจจะผิดเพี้ยนไปจากทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการลดเสียงของ Resonators ซึ่งในส่วนของการลดและท่อขยาย ความเร็วลมมีผลกระทบต่อท่อลดมากกว่าท่อขยาย



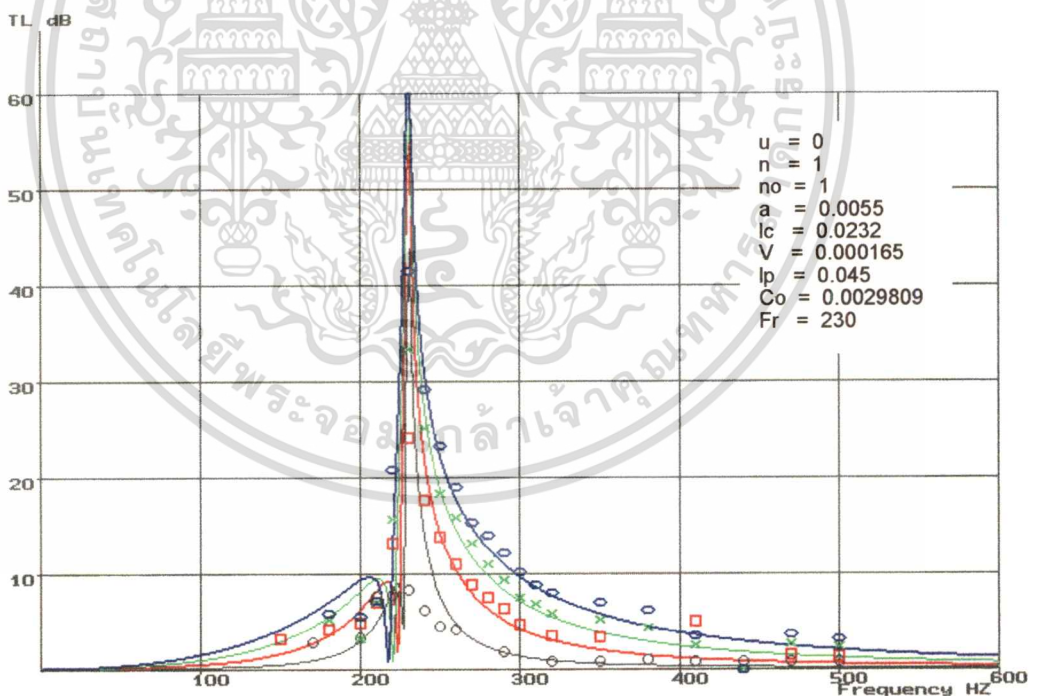
End!

รูปที่ 4.6 การทดสอบ Helmholtz Resonator แบบเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

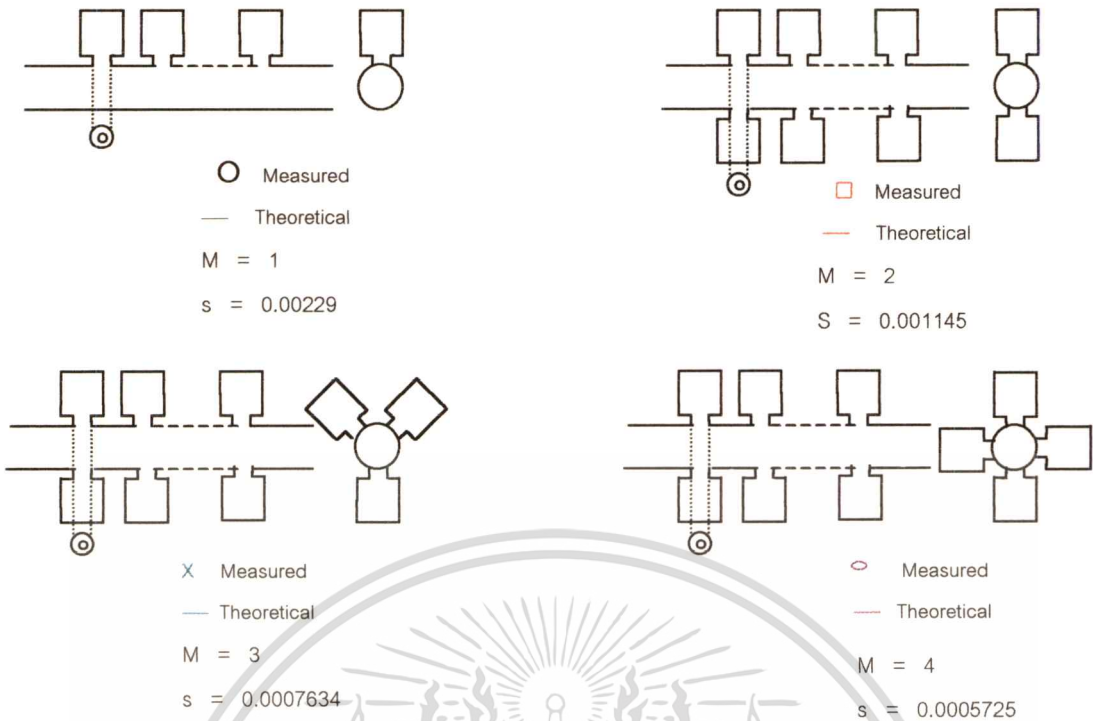


End!

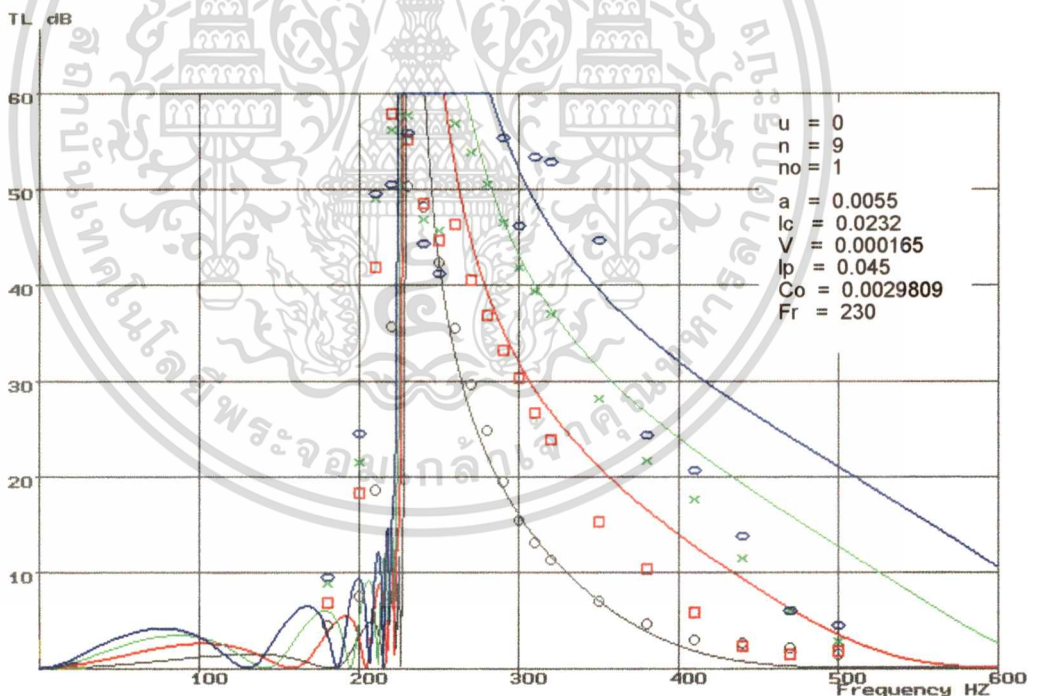


รูปที่ 4.7.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่ออนุกรมและขนานหลายชุดเป็นการเปรียบเทียบการเพิ่มชุดขนาน โดยจำนวน Resonators ในทางอนุกรมเท่ากันที่จำนวน $n = 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

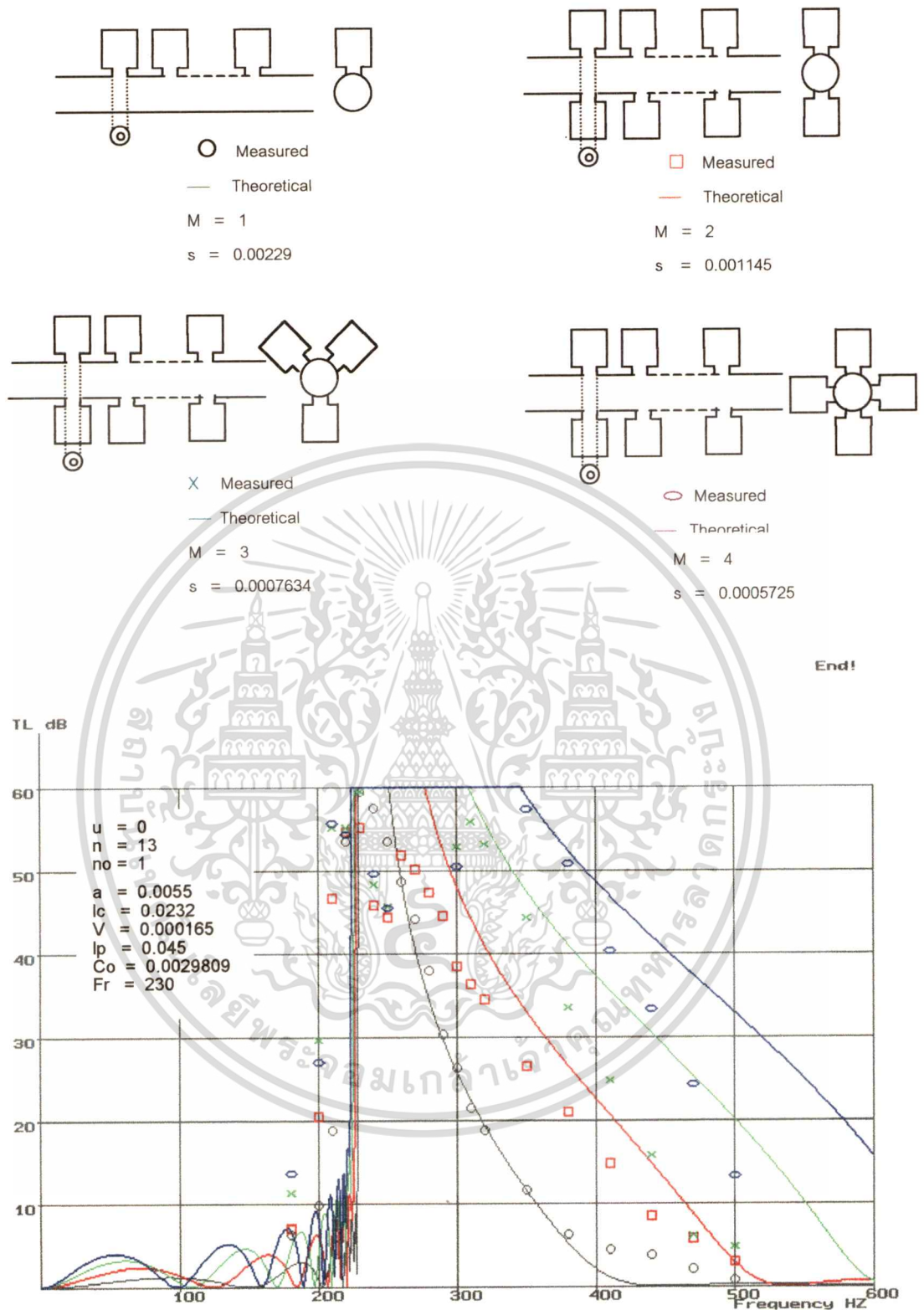


End!



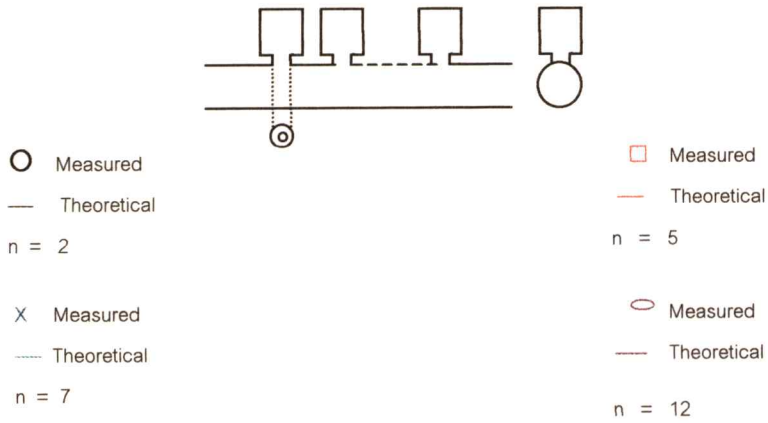
รูปที่ 4.7.2 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่ออนุกรมและขนานหลายชุดเป็นการเปรียบเทียบการเพิ่มชุดขนาน โดยจำนวน Resonators ในทางอนุกรมเท่ากันที่จำนวน $n = 9$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

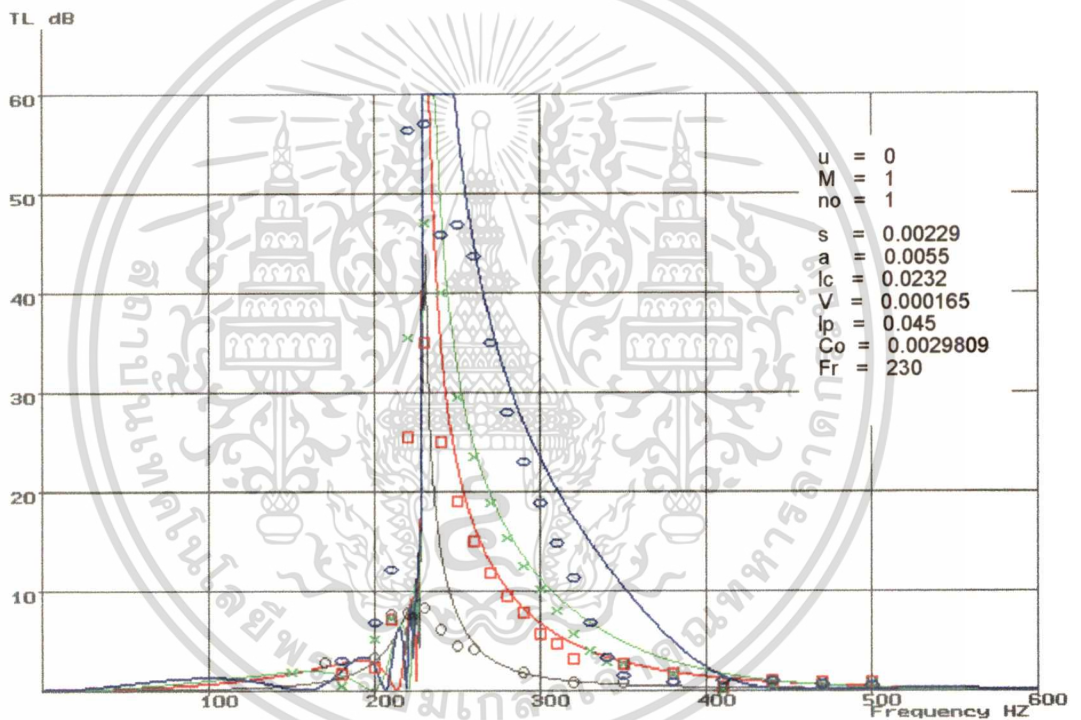


รูปที่ 4.7.3 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่ออนุกรมและขนานหลายชุดเป็นการเปรียบเทียบการเพิ่มชุดขนาน โดยจำนวน Resonators ในทางอนุกรมเท่ากันที่จำนวน $n = 13$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

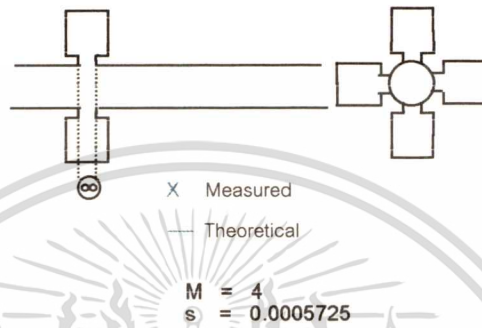
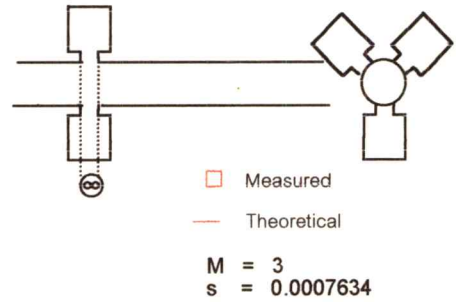
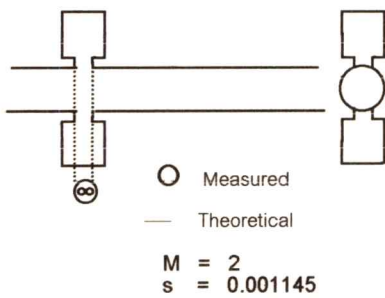


End!

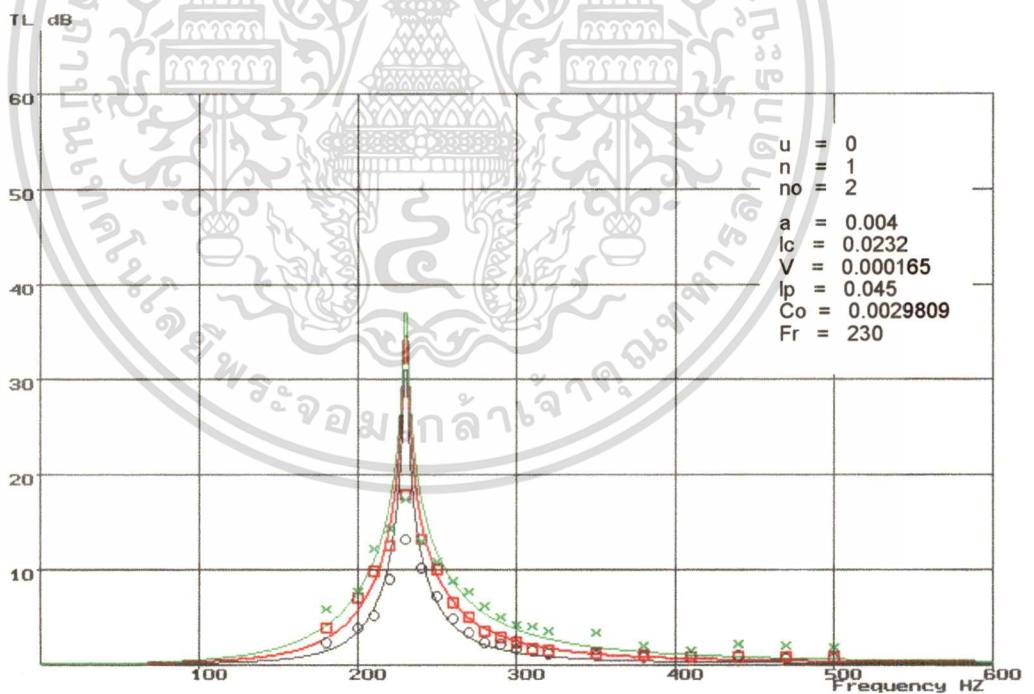


รูปที่ 4.8 การทดสอบ Helmholtz Resonator ที่ต่ออนุกรมหลายแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

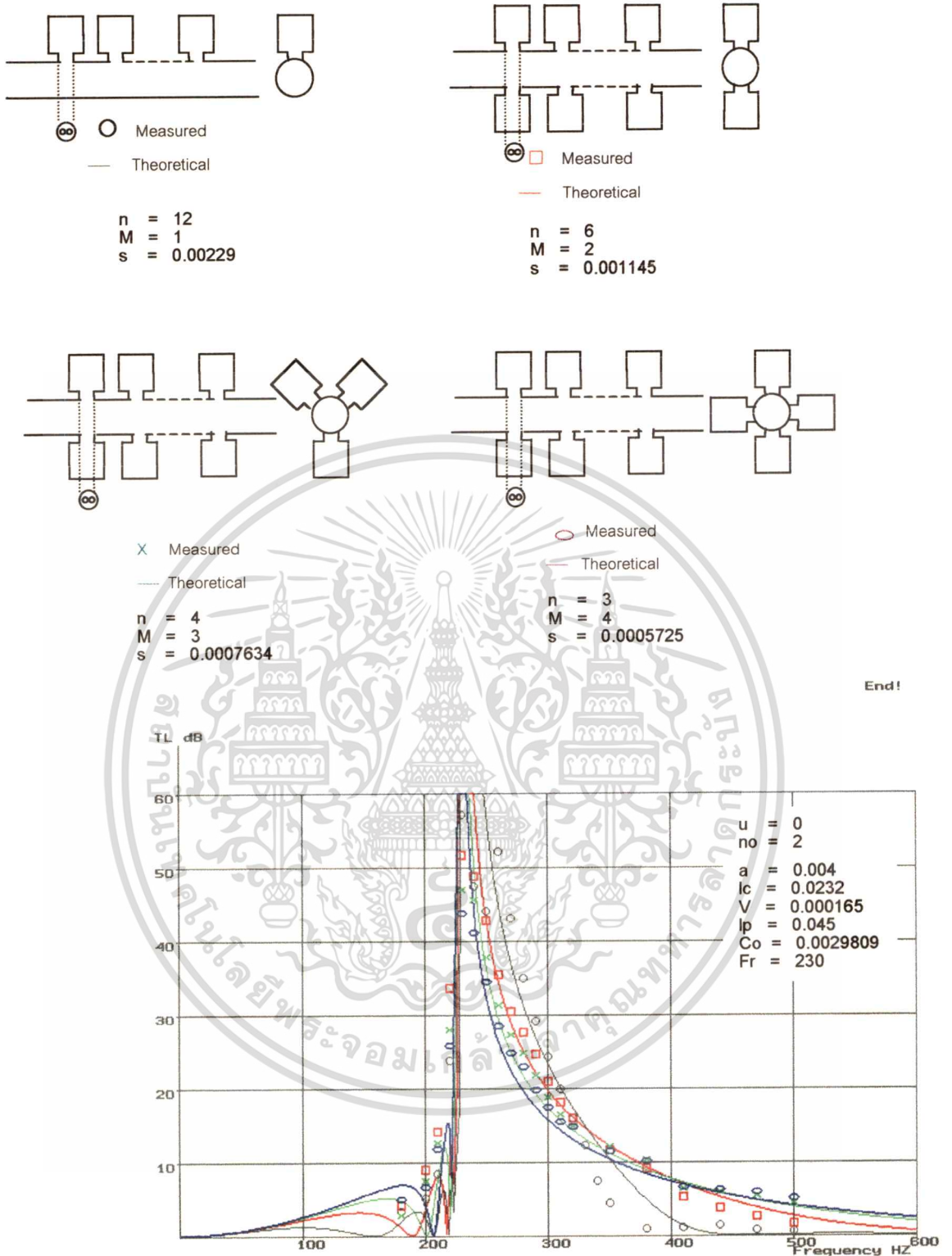


End!



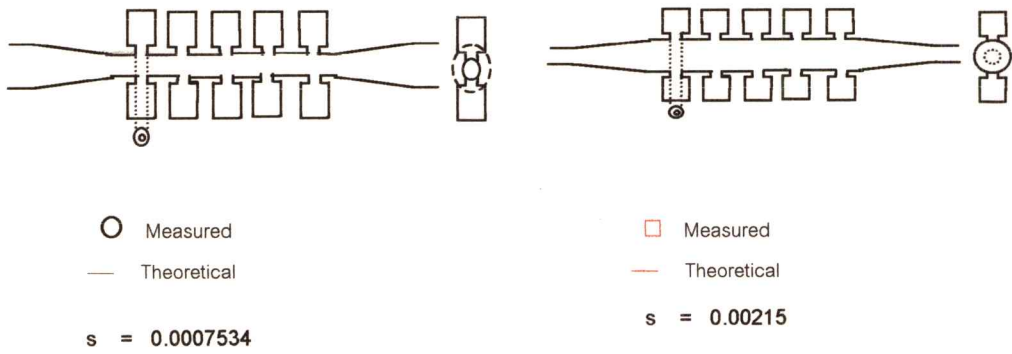
รูปที่ 4.9 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่อขนานหลายแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

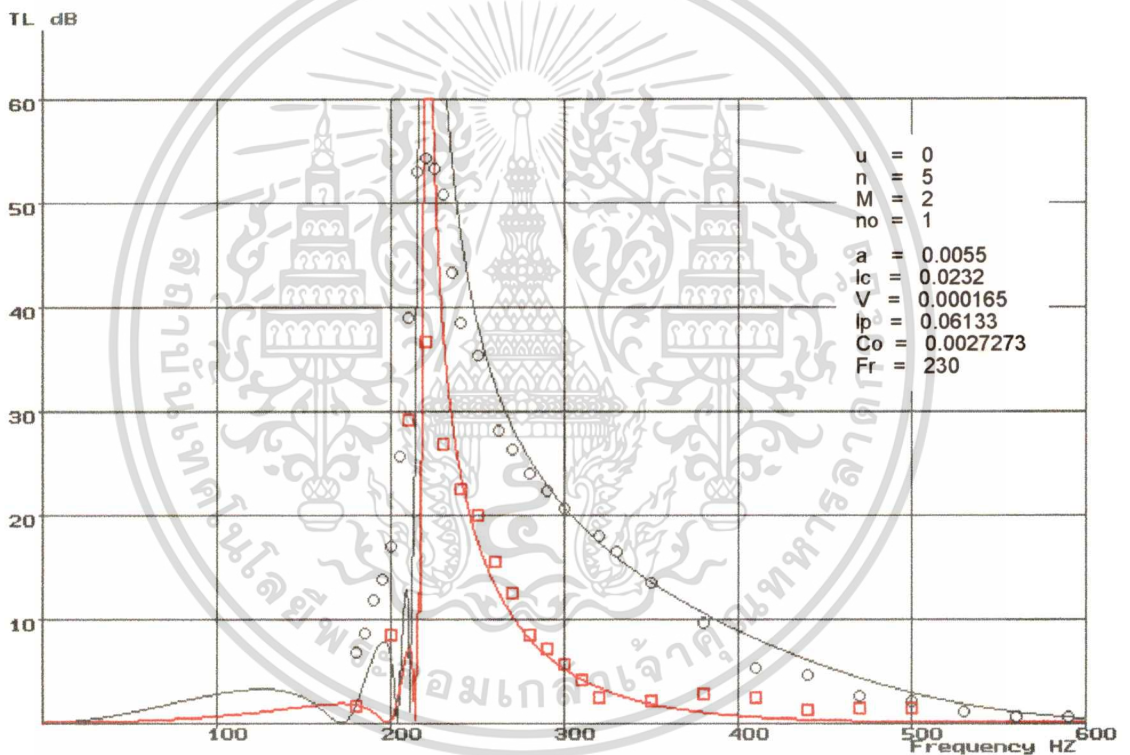


รูปที่ 4.10 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่ต่ออนุกรมและขนานหลายชุดที่มีจำนวน Resonators เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

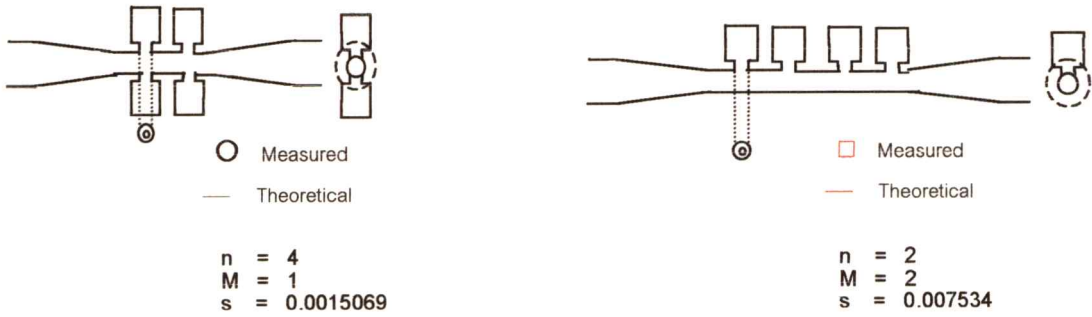


End!

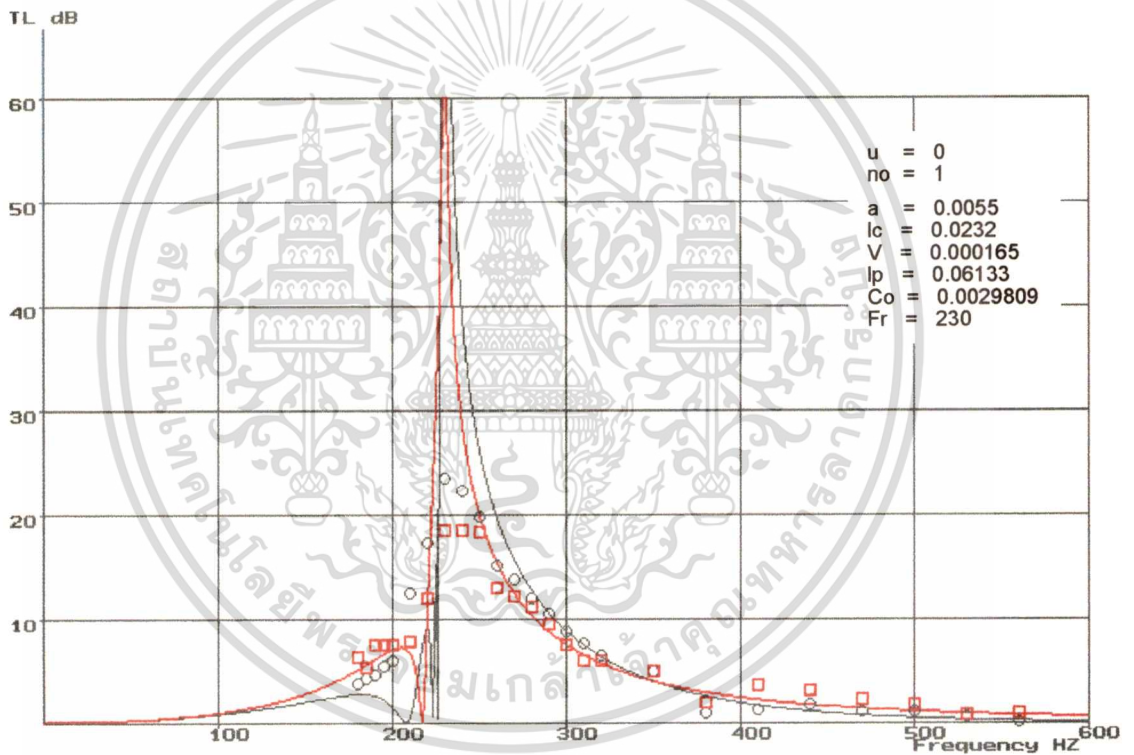


รูปที่ 4.11 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อลดและท่อขยาย โดยเปรียบเทียบผลของท่อลดและท่อขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

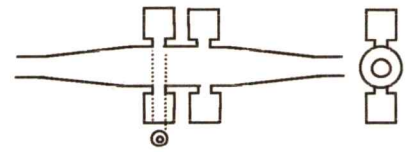
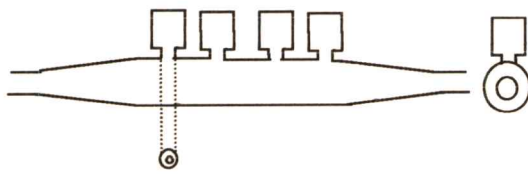


End!



รูปที่ 4.12.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อลดและท่อขยายโดยต่ออนุกรมเปรียบเทียบ
ขนาด(ผลบนท่อลด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



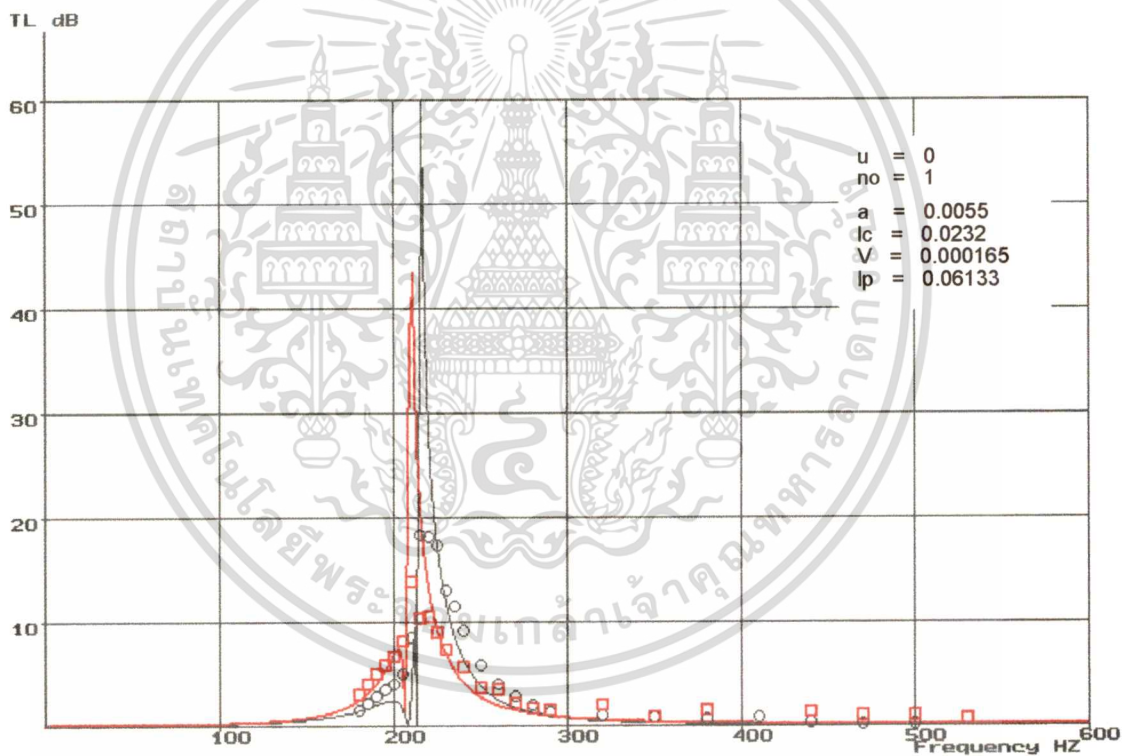
○ Measured
— Theoretical

□ Measured
— Theoretical

$n = 4$
 $M = 1$
 $s = 0.0043$
 $Co = 0.0026047$
 $Fr = 215$

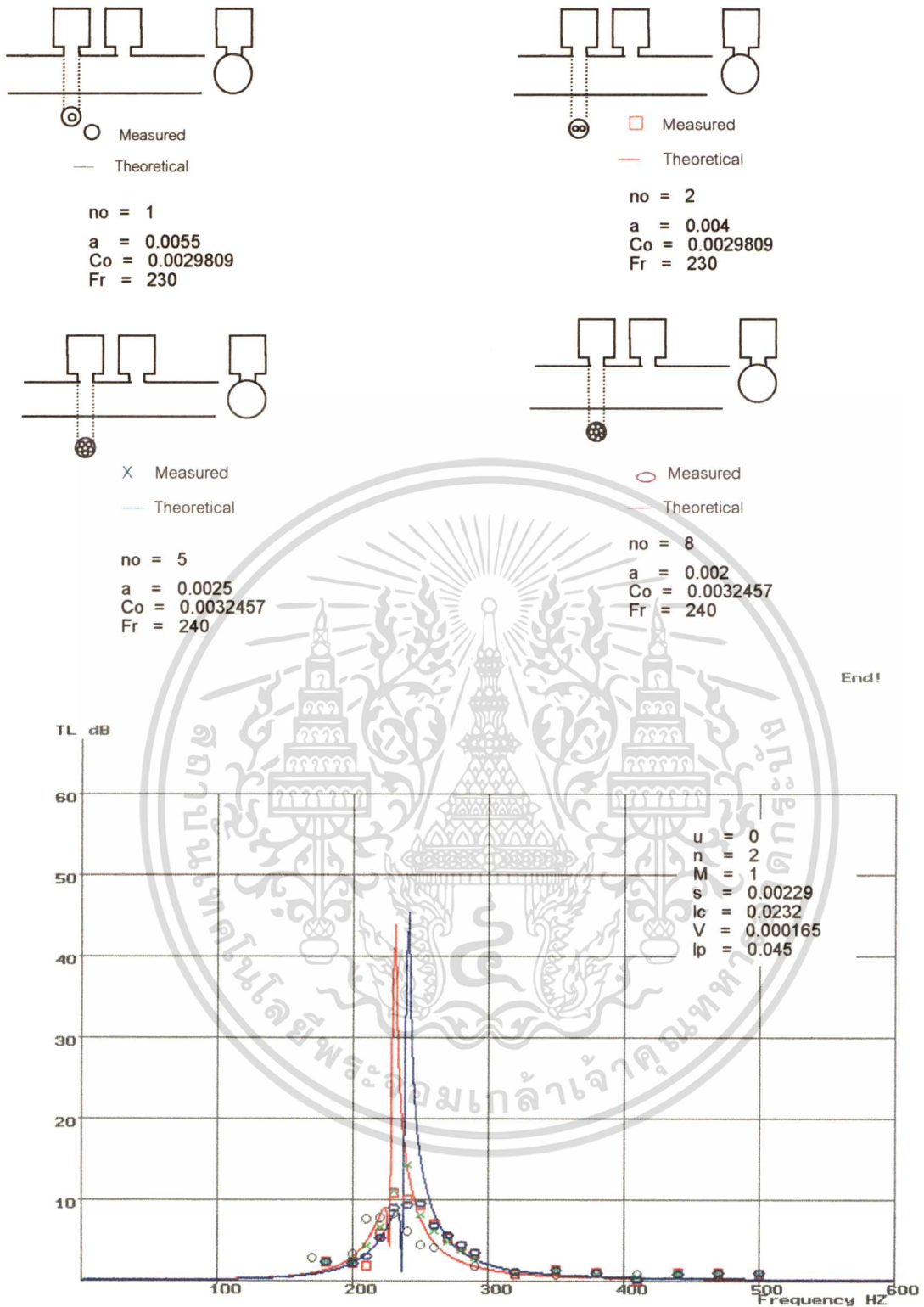
$n = 2$
 $M = 2$
 $s = 0.00215$
 $Co = 0.002485$
 $Fr = 210$

End!



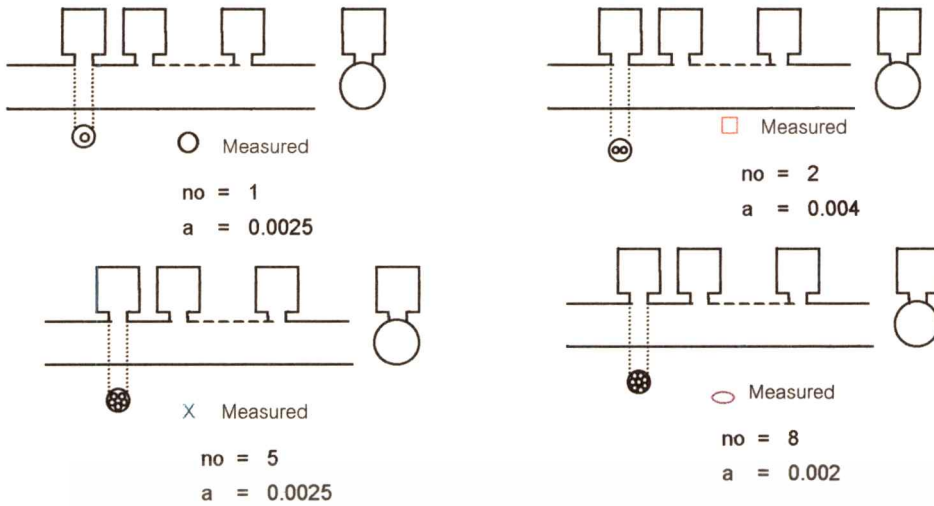
รูปที่ 4.12.2 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อลดและท่อขยายโดยต่ออนุกรมเปรียบเทียบ
ขนาน (ผลบนท่อขยาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

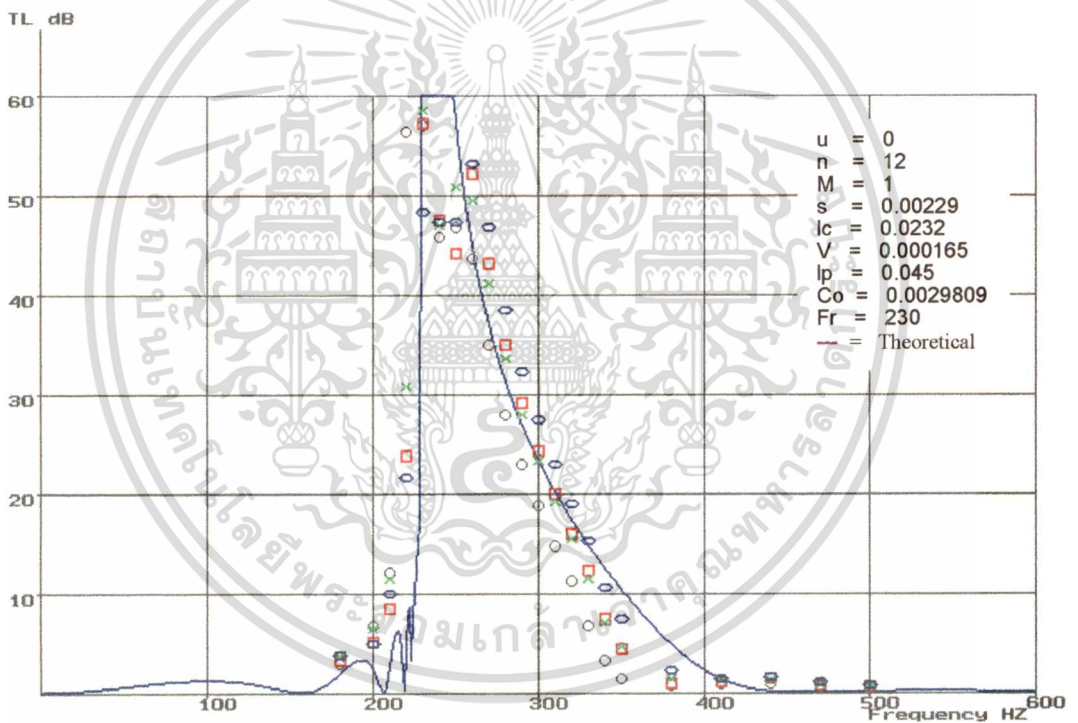


รูปที่ 4.13.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators โดยเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดรู Connector ของ Resonators (พื้นที่หน้าตัดรู connector = 0.0001 m^2 , แบบอนุกรม $n = 2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

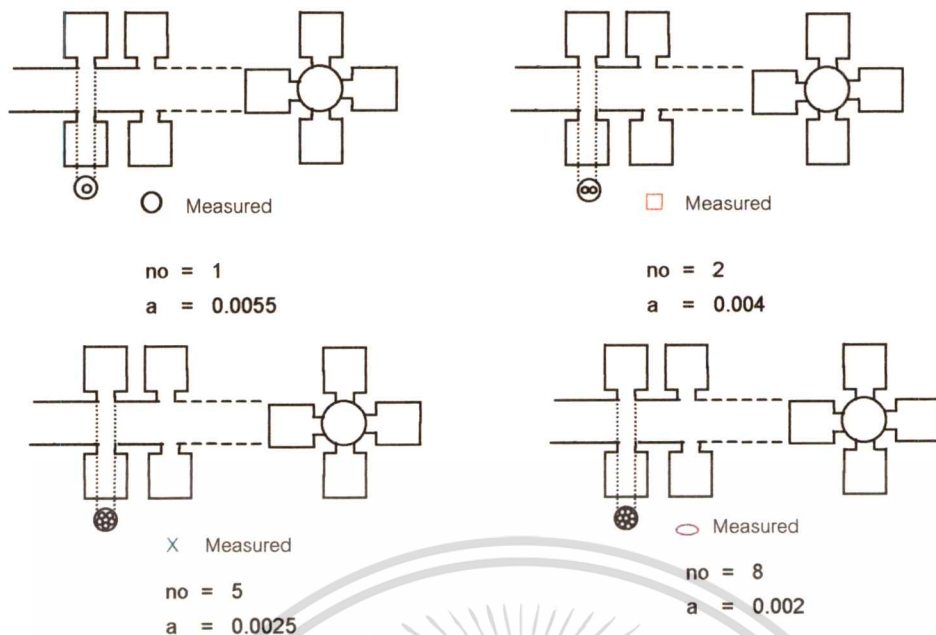


End!

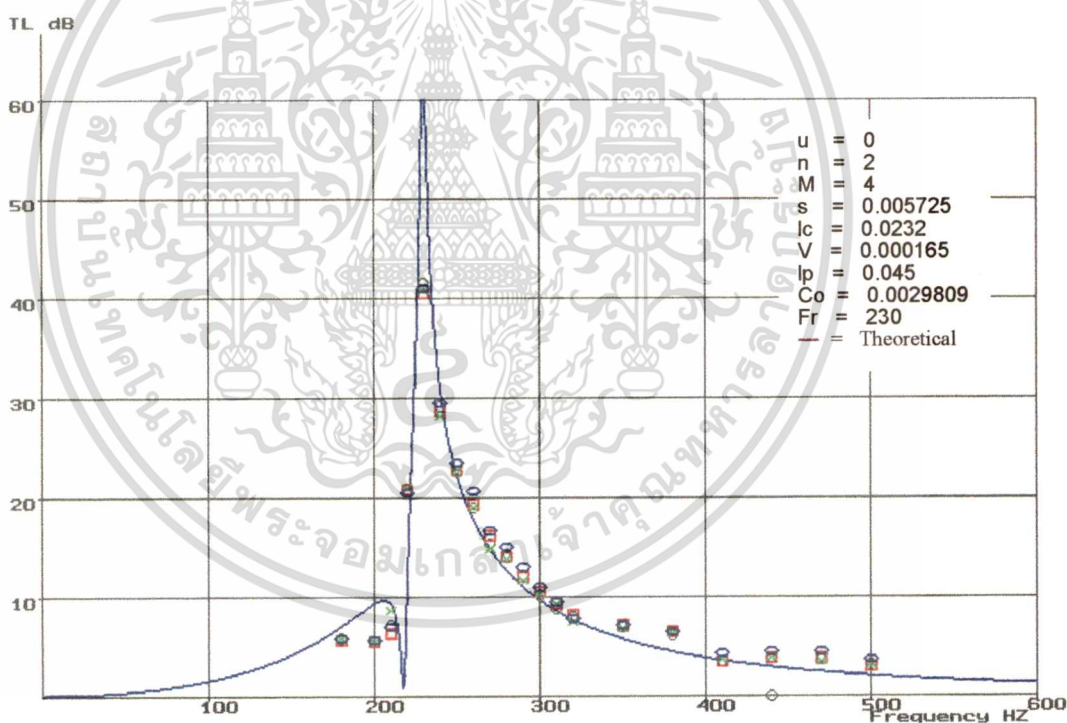


รูปที่ 4.13.2 การทดสอบ Helmholtz Resonators โดยเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดรู Connector ของ Resonators (พื้นที่หน้าตัดรู connector = 0.0001 m^2 , แบบอนุกรม $n = 12$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

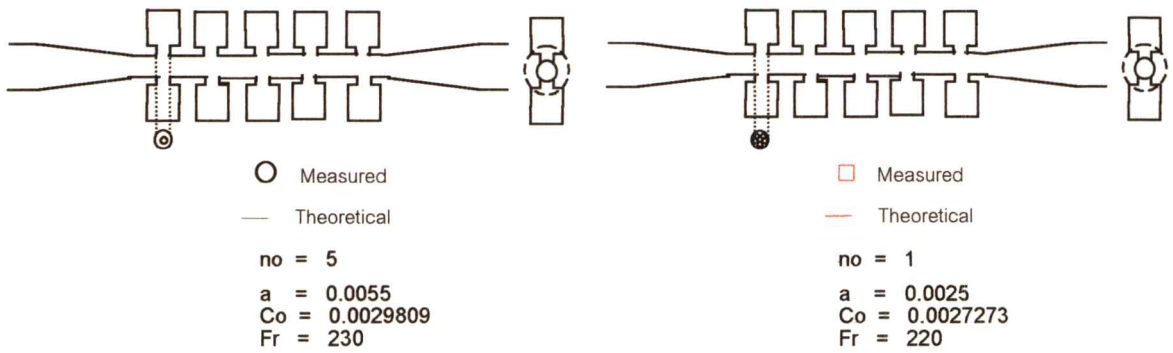


End!

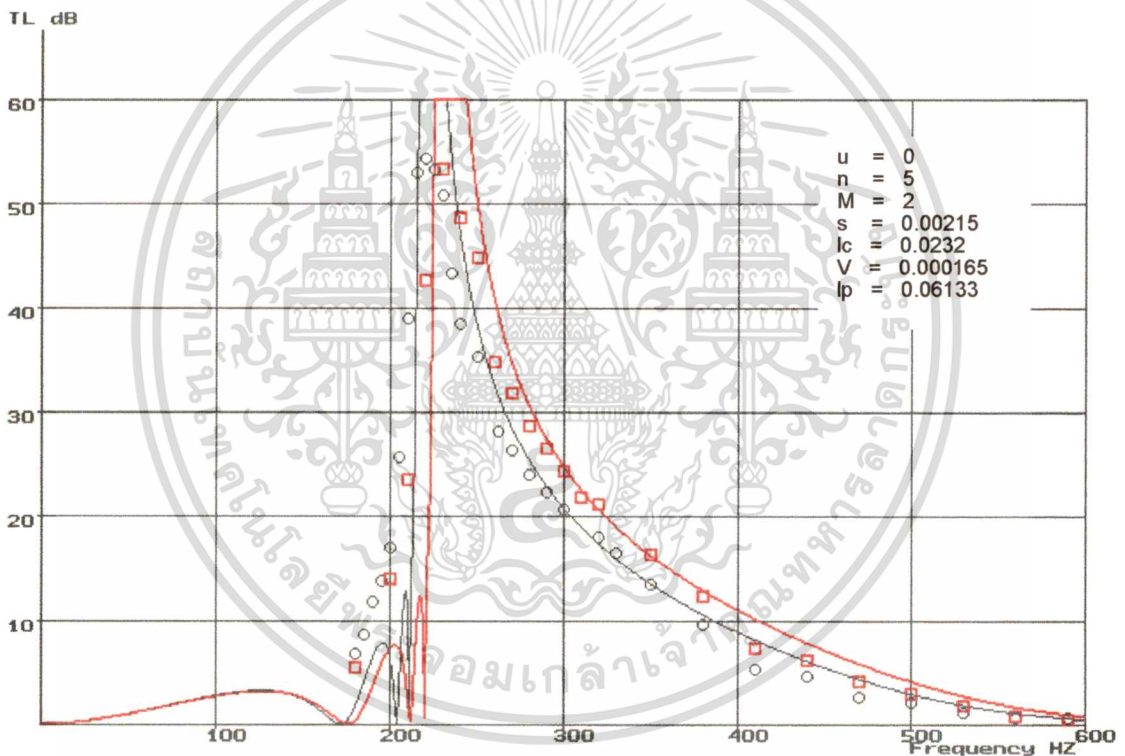


รูปที่ 4.13.3 การทดสอบ Helmholtz Resonators โดยเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดรู Connector ของ Resonators (พื้นที่หน้าตัดรู connector = 0.0001 m^2 , แบบขนาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

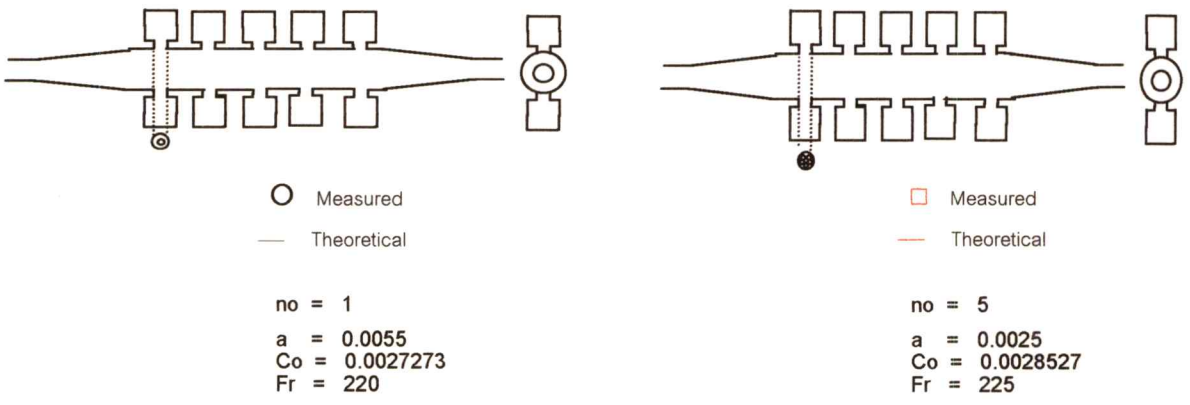


End!

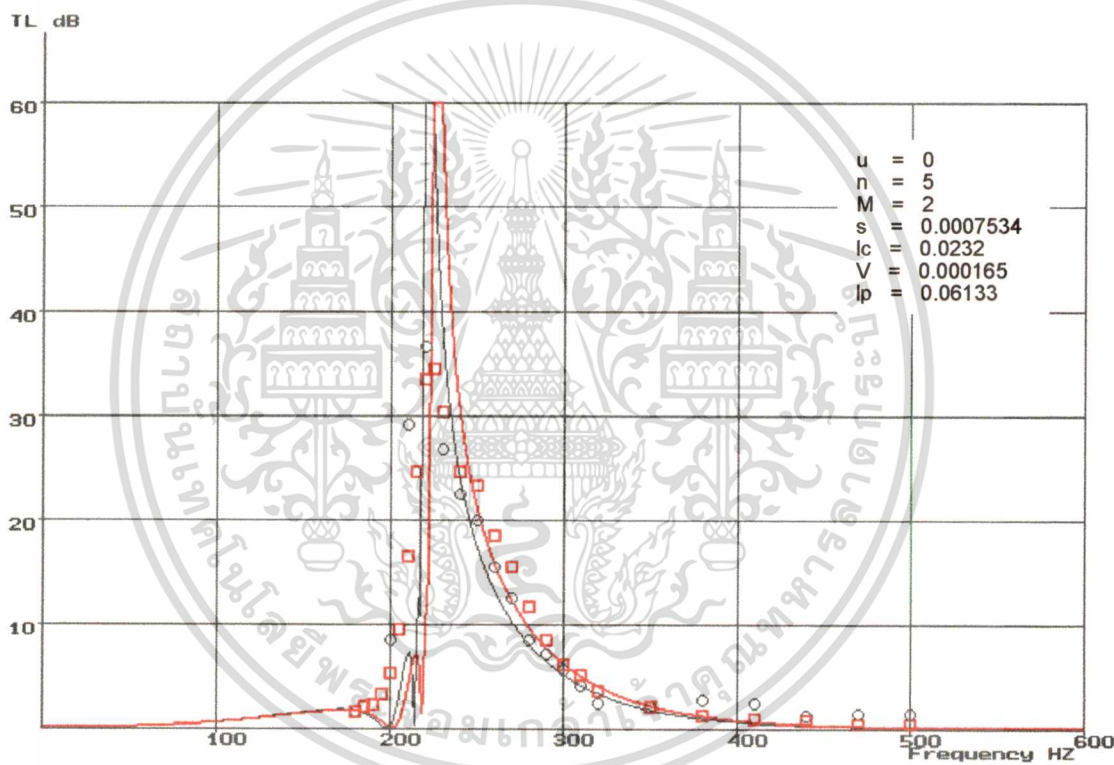


รูปที่ 4.13.4 การทดสอบ Helmholtz Resonators โดยเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด Connector ของ Resonators (พื้นที่หน้าตัด connector = 0.0001 m^2 , ผลบนทอสด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

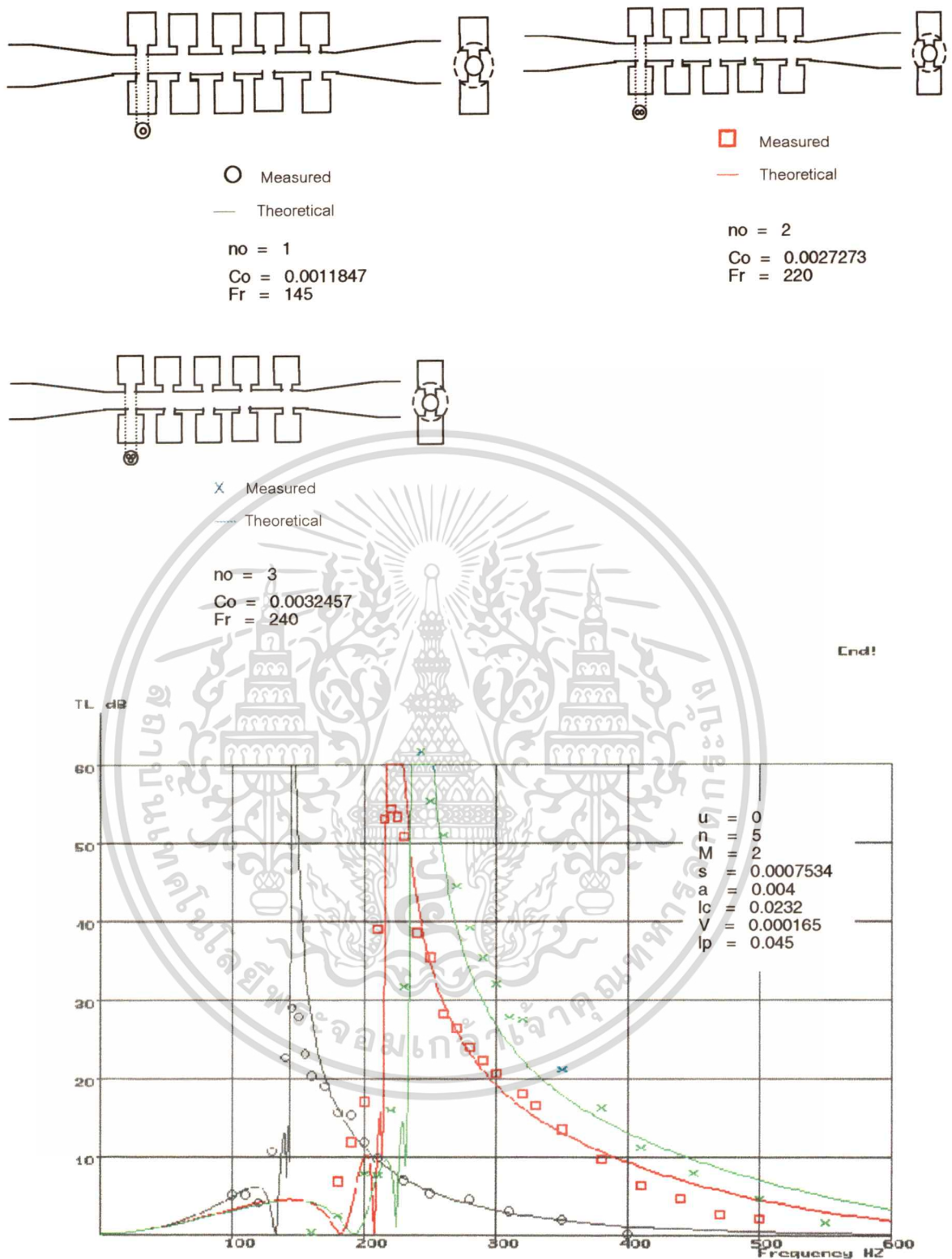


End!



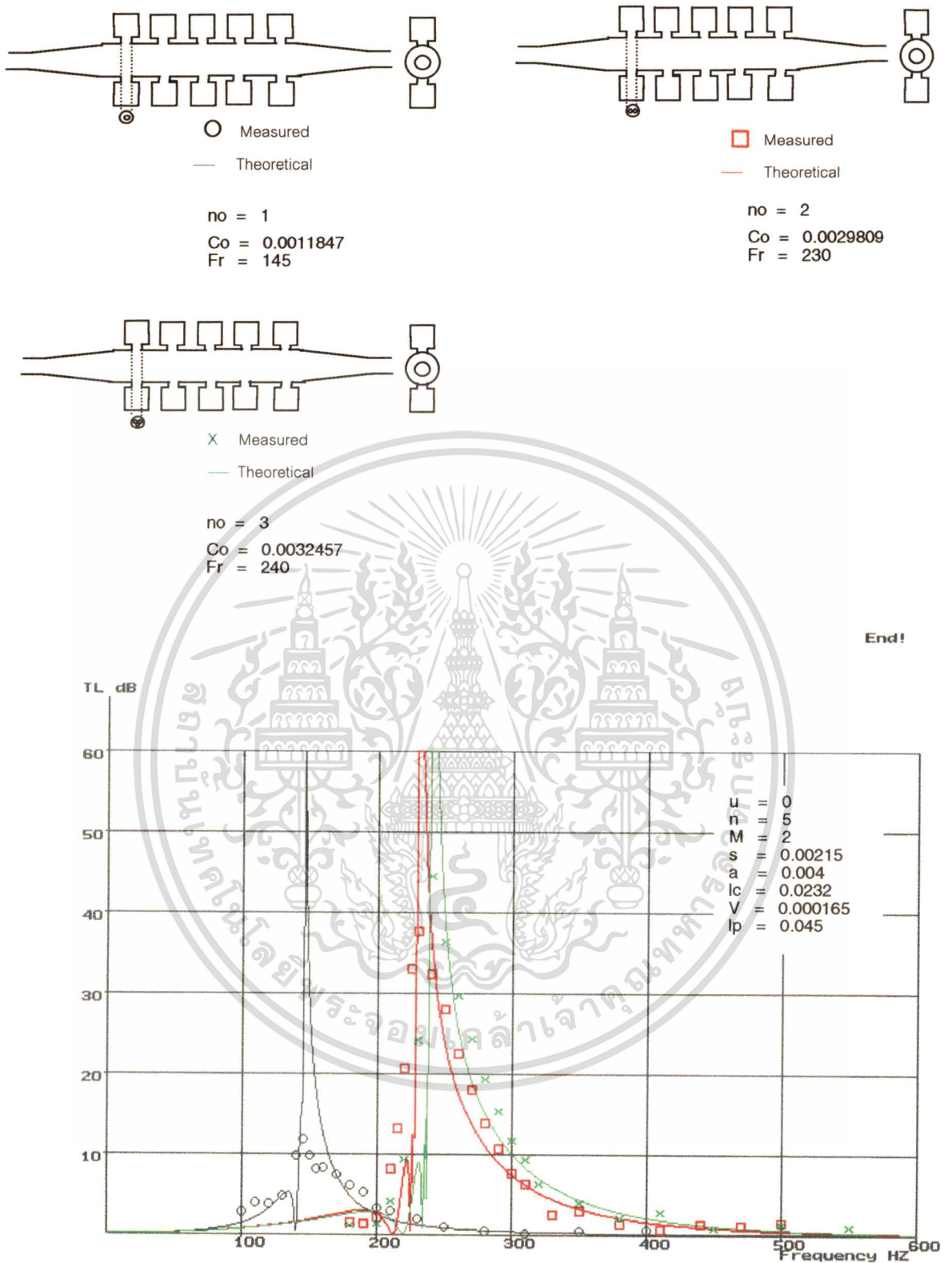
รูปที่ 4.13.5 การทดสอบ Helmholtz Resonators โดยเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด Connector ของ Resonators (พื้นที่หน้าตัด connector = 0.0001 m², ผลบนท่อย้าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



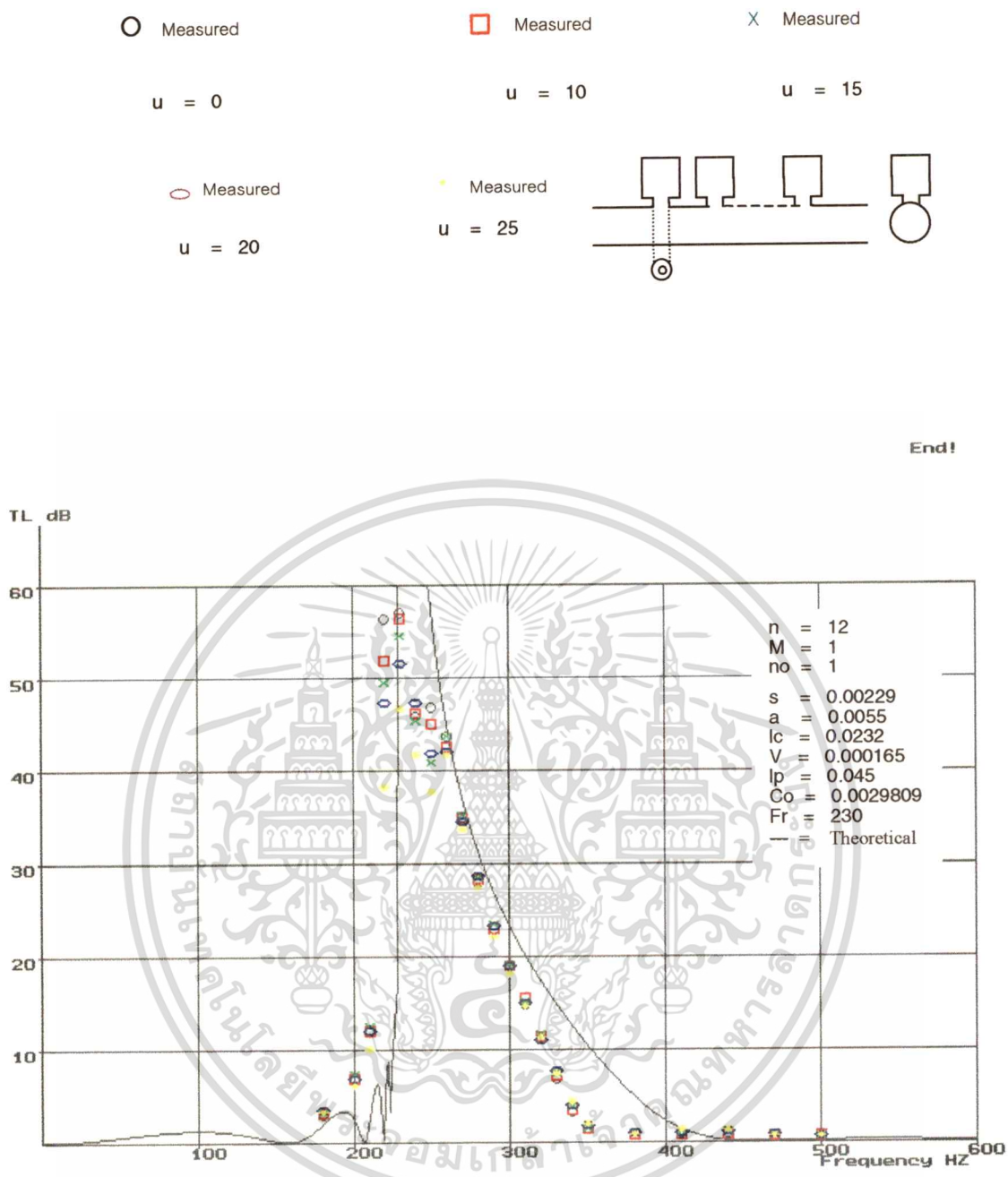
รูปที่ 4.14.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อลด และท่อขยายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดรู connector ของ Resonators (ผลของท่อลด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



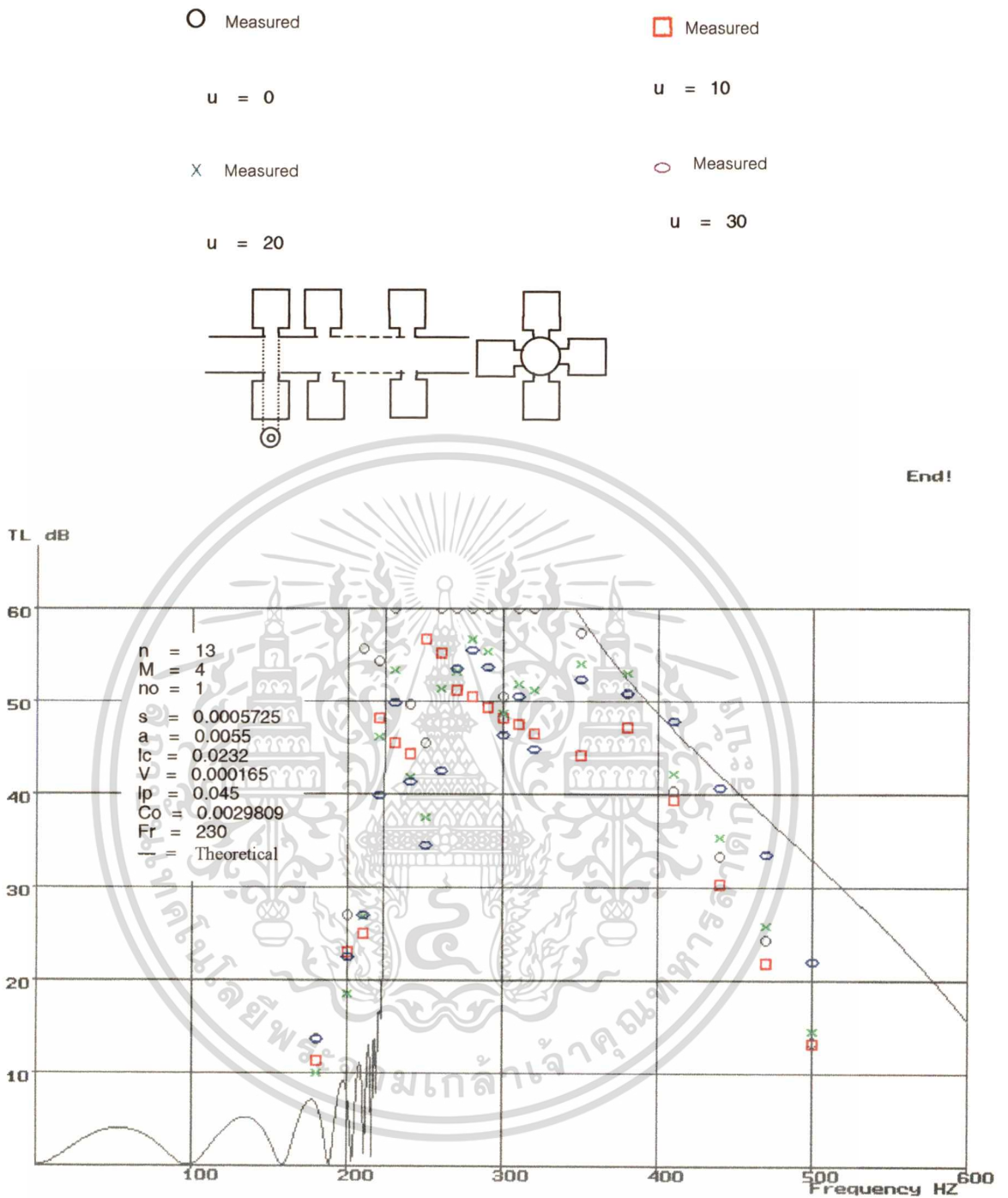
รูปที่ 4.14.2 การทดสอบ Helmholtz Resonators บนท่อลด และท่อขยายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดรู connector ของ Resonators (ผลบนท่อขยาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



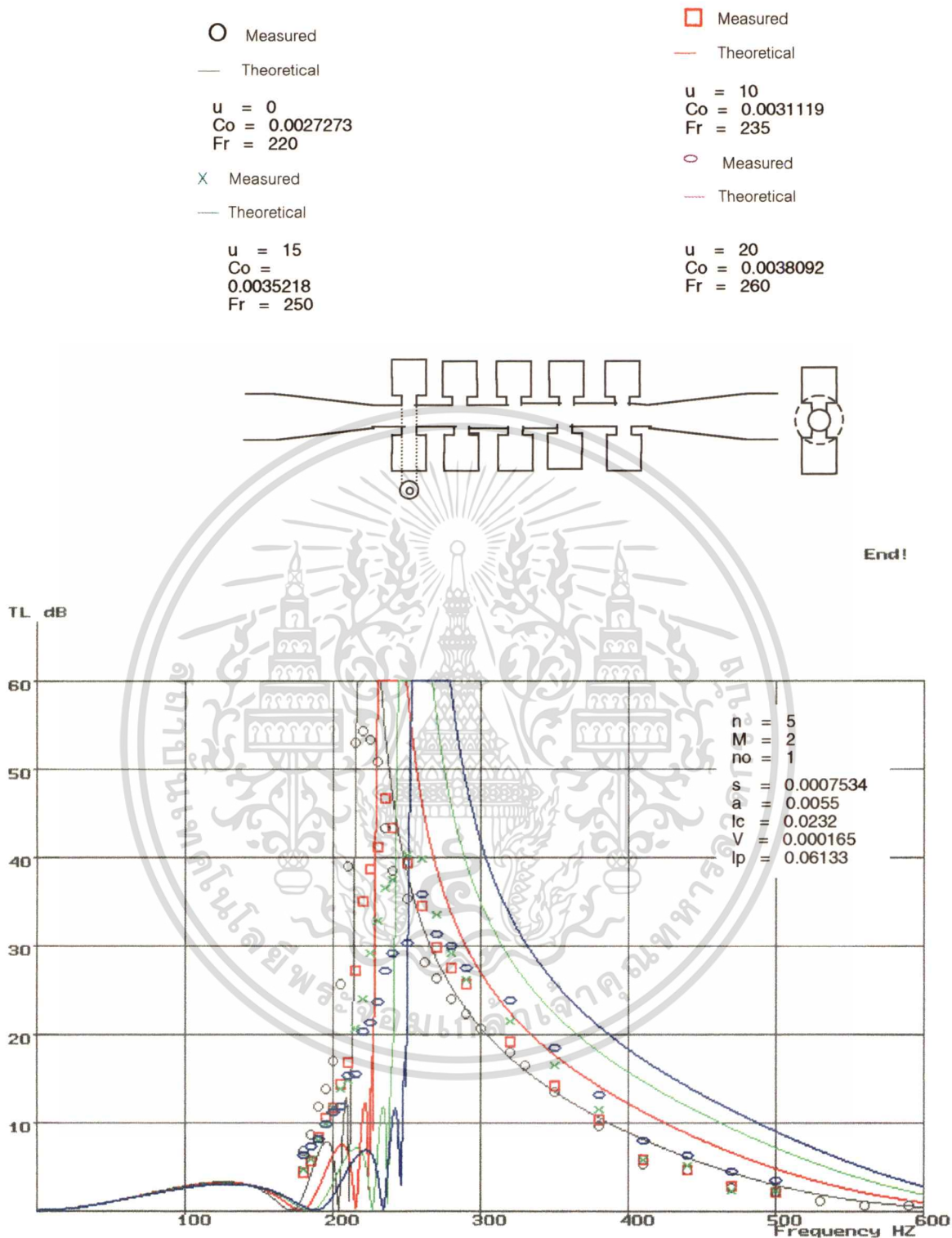
รูปที่ 4.15.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด (แบบอนุกรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



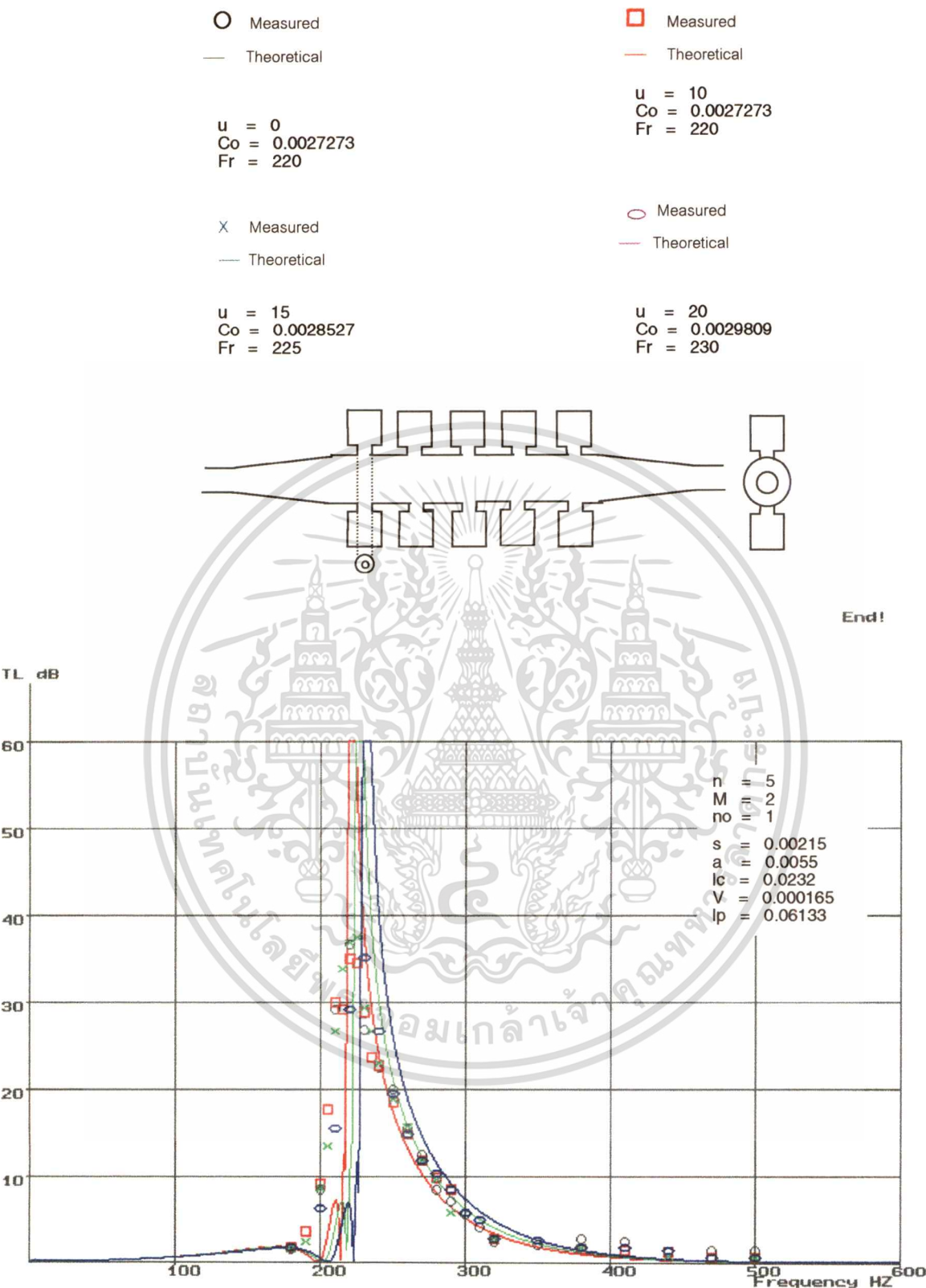
รูปที่ 4.15.2 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด (แบบขนาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15.3 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด (ผลบนที่สอดคล้อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15.4 การทดสอบ Helmholtz Resonators ที่มีความเร็วลมหลายชุด (ผลบนที่ขยาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ได้เสนอวิธีการลดเสียงโดยใช้เครื่องลดเสียงแบบ Helmholtz ซึ่งเป็นหลักการของความถี่เรโซแนนซ์ ที่เกิดขึ้นจากการเกิด Standing wave ในระบบท่อปิดท้ายของตัวลดเสียง ถ้า standing wave ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องลดเสียงมีช่วงความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับย่านความถี่เสียงในท่อส่ง เครื่องลดเสียงจะดึงพลังงานเสียงที่ย่านความถี่เรโซแนนซ์นั้นมาใช้ในการแกว่งของคลื่น ทำให้พลังงานเสียงในระบบท่อส่งที่มีย่านความถี่เดียวกับความถี่เรโซแนนซ์ของตัวลดเสียง ลดลง ลักษณะการลดเสียงในระบบท่อสามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงที่เป็นวงจรไฟฟ้า โดยมีความต้านทานเป็นค่าอิมพีแดนซ์(Z) แหล่งกำเนิดเสียงเป็นกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.15 และเสียงในระบบท่อส่งที่ผ่านเครื่องลดเสียงจะลดลงได้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบผลกระทบที่มีต่อการลดเสียงของเครื่องลดเสียง(Resonators)

สรุปปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการลดเสียงของ Resonators

- ลักษณะการต่อ Resonators แบบอนุกรม ถ้ามีจำนวนมากก็จะทำให้เสียงลดลงได้มาก เนื่องจากจำนวน Resonators มีมากขึ้น ทำให้ดึงพลังงานเสียงออกจากท่อส่งได้มาก เป็นผลมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของ Resonators (Z_c) มีจำนวนมากขึ้น ดังรูปที่ 4.8
- ลักษณะการต่อ Resonators แบบขนาน ถ้ามีจำนวน Resonators มาก ทำให้เสียงลดลงได้มากขึ้น เนื่องจากจำนวน Resonators มีมากขึ้นทำให้ดึงพลังงานเสียงออกจากท่อส่งได้มาก เป็นผลมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของ Resonators (Z_c) มีจำนวนมากขึ้น ดังรูปที่ 4.9
- ลักษณะการต่อ Resonators แบบอนุกรมเปรียบเทียบกับแบบขนานที่จำนวน Resonators เท่ากันการต่ออนุกรมจะลดเสียงได้มากกว่าเนื่องจากช่วงเวลาของเสียงที่ผ่าน Resonators มีระยะมากกว่าเพราะมีค่าระยะ Resonators (L_p) ยาวกว่าทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งระหว่าง Resonators (Z_p) มากขึ้น ดังผลการทดลองรูปที่ 4.7
- ลักษณะของท่อที่ Resonators ต่ออยู่เป็นท่อธรรมดา ท่อลดและท่อขยาย ซึ่งท่อลดจะสามารถลดเสียงได้มากกว่าเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดท่อส่ง (S) มีขนาดเล็กลงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่ง (Z_0, Z_p) มีค่ามากขึ้น ดังผลการทดลองรูปที่ 4.11
- พื้นที่หน้าตัดของ connector ถ้ามีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากันถึงแม้จะมีจำนวนมากขึ้นก็ไม่มีผลกระทบต่อการลดเสียงของ Resonators เพราะจำนวนรูที่มากขึ้นไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ ดังผลการทดลองรูปที่ 4.13
- พื้นที่หน้าตัดของรู connector ถ้าพื้นที่หน้าตัดมากก็จะลดเสียงได้มากขึ้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของรู connector ทำให้ค่า a ซึ่งเป็นรัศมีของรู connector มีค่ามากทำให้ค่า conductivity (C_p) มากขึ้น ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของ Resonators น้อยลงมีผลให้ค่าคงที่ C มากขึ้น และพบว่าเมื่อมีผลให้ค่าสูงสุดของความถี่ในการเก็บเสียง(f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปคือถ้าพื้นที่หน้าตัดของรู connector น้อยจะทำให้ค่า f_c ต่ำลงด้วย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่า conductivity (C_0) น้อยลง ดังผลการทดลองรูปที่ 4.14

- ผลของความเร็วลม มีผลต่อการลดเสียงเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น สมรรถนะของการลดเสียงของ Resonators จะลดลงซึ่งดูได้จากผลการทดลอง ผลของความเร็วมจะมีผลต่อค่า L_{CM} ซึ่งเป็นความยาวสมมุติที่มีความเร็วลมของรู connector ลดลงซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก ดังผลการทดลองรูปที่ 4.15
- ผลของความเร็วมต่อท่อลดและท่อขยาย ซึ่งความเร็วลมมีผลกระทบต่อท่อลดมากกว่าท่อขยายเพราะท่อลดจะทำให้ความเร็วลมในท่อลดสูงขึ้นเป็นลักษณะของท่อ jet ดังผลการทดลองรูปที่ 4.15.3 และรูปที่ 4.15.4

นอกจากนี้ ยังมีผลกระทบแบบอื่นที่ไม่ได้ทดลองไว้แต่สามารถหาเหตุผลได้จากสมการคลื่นหนึ่งมิติในระบบท่อคือ

- ขนาดของ Resonators หมายถึงปริมาตรภายในของ Resonators มีผลต่อความถี่ (การทดลองครั้งนี้ปริมาตรคงที่) ถ้าขนาดปริมาตรเล็กลงจะเก็บเสียงได้ที่ความถี่สูงขึ้น
- ผลของความยาว connector (L_c) การทดลองครั้งนี้ค่า L_c คงที่ ถ้าค่า L_c มากค่า Conductivity (C_0) จะน้อยลง ทำให้ Z_c ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของ Resonator มีค่ามากขึ้น ทำให้ค่าคงที่ C น้อยลงและค่าการลดเสียง TL น้อยลงตามด้วย
- ผลกระทบของระยะระหว่าง Resonators (L_p) การทดลองครั้งนี้คงค่า L_p ไว้แต่สามารถดูผลกระทบเปรียบเทียบของการต่ออนุกรมกับขนาน ในการต่ออนุกรมซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_p มากกว่าจะลดเสียงได้ดีกว่า ดังนั้นค่า L_p มีค่าห่างมากก็จะลดเสียงได้ดีกว่า

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการลดเสียงโดยใช้เครื่องลดเสียงแบบ Helmholtz เริ่มต้นกล่าวถึงวิธีการลดเสียงรบกวน ลักษณะของเครื่องลดเสียง พื้นฐานสมการคลื่นซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาสมการลดเสียง(Transmission Loss) และการนำสมการลดเสียงมาใช้เป็นทฤษฎีการหาสมรรถนะการลดเสียงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี ยกเว้นส่วนที่เป็นความเร็วลมที่มีผลของค่า LcM (เป็นความยาวสมมุติของ connector ที่มีความเร็วลมหรือมาร์คนัมเบอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้กล่าวถึงและอาจจะเป็นผลการวิจัยในอนาคตที่ศึกษาผลกระทบนี้โดยตรง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการจำลองกระบวนการที่เกิดเสียงรบกวนในระบบท่อที่สามารถกำหนดความถี่ของเสียงรบกวนได้ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสมมุติฐานและวิธีการทั่วไปของสมการอนุพันธ์ที่ใช้ในการลดเสียงของ Resonators ชนิด Helmholtz ได้กำหนดสภาวะไว้ดังนี้

1. ความดันของเสียงมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันสัมบูรณ์เฉลี่ยในระบบ
2. ท่อนำเสียงที่ใช้ต้องมีคุณลักษณะไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่น
3. ผนังของ Resonators ต้องไม่ดูดและนำพลังงานเสียง
4. คลื่นความดันในแนวระนาบมีการเพิ่มขึ้นภายในท่อนำเสียง
5. อิทธิพลของความหนืดโดยทั่วไปมีผลน้อยมาก
6. ความหนาของ boundary-layer มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนำเสียง

เสียง

7. ผลการทดลองจะต้องผ่านการแก้ผลของการสะท้อนที่เกิดขึ้นจริงเพื่อให้ตรงกับสภาวะข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว

8. อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองจะต้องมีความแม่นยำและผ่านการปรับแต่ง(calibrate) ให้เกิดความเที่ยงตรงในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะการลดเสียงของเครื่องลดเสียง (Resonators) สามารถสรุปได้ดังนี้

- ลักษณะการต่อ Resonators แบบอนุกรม ถ้ามีจำนวนมากก็จะทำให้เสียงลดลงได้มาก
- ลักษณะการต่อ Resonators แบบขนาน ถ้ามีจำนวน Resonators มาก ทำให้เสียงลดลง

ได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลักษณะการต่อ Resonators แบบอนุกรมเปรียบเทียบกับแบบขนานที่จำนวนขนานด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Resonators เท่ากับการต่ออนุกรมจะลดเสียงได้มากกว่า

- ลักษณะของท่อที่ Resonators ต่ออยู่เป็นท่อธรรมดา ท่อลดและท่อขยาย ซึ่งท่อลดจะสามารถลดเสียงได้มากกว่า
- พื้นที่หน้าตัดของ connector ถ้ามีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากันถึงแม้จะมีจำนวนรูมากขึ้นก็ไม่มีผลกระทบต่อ การลดเสียงของ Resonators
- พื้นที่หน้าตัดของรู connector ถ้าพื้นที่หน้าตัดมากก็จะลดเสียงได้มากขึ้น
- ผลของความเร็วลม มีผลต่อการลดเสียงเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น สมรรถนะของการลดเสียงของ Resonators จะลดลง
- ผลของความเร็วมต่อท่อลดและท่อขยาย ซึ่งความเร็วลมมีผลกระทบต่อท่อลดมากกว่าท่อขยายเพราะท่อลด
- ขนาดของ Resonators หมายถึงปริมาตรภายในของ Resonators มีผลต่อความถี่(การทดลองครั้งนี้ปริมาตรคงที่) ถ้าขนาดปริมาตรเล็กลงจะเก็บเสียงได้ที่ความถี่สูงขึ้น
- ผลของความยาว connector (L_c) มาก ทำให้ค่าการลดเสียง TL น้อยลง
- ผลกระทบของระยะระหว่าง Resonators (L_p) มีค่าห่างมากก็จะลดเสียงได้ดี

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

- ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ลดเสียงในท่อไอเสีย ซึ่งมีผลต่อสภาพสิ่งแวดล้อม
- การออกแบบเครื่องลดเสียง (Resonators) มีปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบทำให้ทราบถึงแนวทางในการออกแบบเครื่องลดเสียง (Resonators)
- ใช้ในการลดเสียงดังในระบบท่อต่าง ๆ เช่น ท่อระบายอากาศ , ท่อส่งแอร์ เป็นต้น
- ใช้ในการวิจัยพัฒนาแนวทางที่ใช้ในการออกแบบเครื่องลดเสียงดัง (Resonators) หลาย ๆ รูปแบบในอนาคต
- ทำให้ทราบทฤษฎีพื้นฐานของเสียง
- ทำให้ทราบวิธีการลดเสียงดังในรูปแบบต่าง ๆ และทำให้มีแนวทางในการคิดค้นวิธีลดเสียงดัง รูปแบบอื่น ๆ เช่น ใช้ phase หักล้าง

5.3 แนวทางวิจัยในอนาคต

- ออกแบบเครื่องลดเสียง(Resonators) ในย่านความถี่สูงกว่านี้
- ปรับปรุงรูปแบบ Resonators ให้มีขนาดเล็กยาว เพื่อประหยัดเนื้อที่
- ทดลอง Resonators แบบอื่น ๆ เช่น Side branch Resonators
- ทดลองหาคุณลักษณะ(Characteristic) ของ Helmholtz Resonators
- ทดลองหาคุณลักษณะ(Characteristic) ของ Helmholtz Resonators แบบที่มีความเร็วลม

- ทดลองหาคคุณลักษณะ(Characteristic)ของResonators แบบอื่น ๆ เช่น Side branch

Resonators

- แนวทางในการวิจัยหาวิธีลดเสียง แบบอื่น ๆ เช่น ใช้ phase หักล้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- Stewart, George Walter, and Lindsay, Robert Bruce: Acoustics. D. Van Nostrand Co., Inc., 1993.
- Davis, A. H. (With Appendix by N. Fleming): Further Model Experiments Concerning the Acoustical Features of Exhaust Silencers. Rep. No. N.108 , British N.P.L. (Rep. No. 1421,A.R.C.), Feb. 1935.
- Davis, A. H. and Fleming, N. :The Attenuation Characteristics of Some Aero-Engine Exhaust Silencers. Rep. No. N.125 , British N.P.L. (Rep. No. 2249,A.R.C.), Feb. 1936.
- Morley, A. W. : Progress of Experiments in Aero-Engine Exhaust Silencing. R. & M. No. 1760, British A.R.C., 1937.
- Martin, Herbert : Muffling Without Power Loss in the Four-Stroke-Cycle Engine. Translation No. 328 ,Materiel Div., Army Air Corps, Aug. 3, 1938
- Buschmann, H.: Noise in Motor Vehicles. R.T.P. Translation No. 2584, British Ministry of Aircraft Production.
- Martin, H., Schmidt, U., and Willms, W. : The Present Stage of Development of Exhaust Silencers. R.T.P. T.I.B. Translation No. 2596, British Ministry of Aircraft Production. (From MTZ, No. 12 1940.)
- Czarnecki, K. R., and Davis, Don d., Jr.: Dynamometer-Stand Investigation of the Muffler Used in the Demonstration of Light-Airplane Noise Reduction. NACA TN 1688, 1949.
- Davis, Don D., Jr., and Czarnecki, K. R. : Dynamometer-Stand Investigation of a Group of Mufflers. NACA TN 1838, 1949.
- Chu, Lan Jen: Electromagnetic Waves in Elliptic Hollow Pipes of Metal. Jour. Appl. Phys., vol. 9, no. 9, Sept. 1938, pp. 583-591.
- Levine, Herold, and Schwinger, Julian: On the Radiation of Sound From an Unflanged Circular Pipe. Phys. Rev., vol. 73, no. 4, Second sec., Feb. 15, 1948, pp.33-406
- Trimmer, John D.: Sound Waves in a Moving Medium. Jour. Acous. Soc. Am., vol. 9 , no. 2, Oct. 1937,pp. 162-164

ภาคผนวก ก

ส่วน A

การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ชนิด EXPANSION-CHAMBER

สมมุติฐานและวิธีการทั่วไป

สมการอนุพันธ์ที่ใช้หาค่า attenuation ของ mufflers ชนิด expansion-chamber นั้นมีการกำหนดสภาวะดังนี้

1. ความดันเสียง มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ ค่าความดันสัมบูรณ์เฉลี่ยในระบบ
2. ท่อนำเสียงที่ใช้ต้องมีคุณลักษณะไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่น
3. ผนังของ muffler ต้องไม่ดูดและนำพลังงานเสียง
4. พิจารณาความดันคลื่นในแนวระนาบเท่านั้น
5. ผลของความหนืดเกิดขึ้นน้อยมาก

ดังนั้น นิยามค่าของ ค่า attenuation สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Average incident sound power}}{\text{Average transmitted sound power}} \right) \quad (A1)$$

ตามเอกสารอ้างอิง 1, แทนค่า ความเร็วของการตกกระทบและสะท้อนของคลื่นตามแนวแกน x เขียนได้

ดังนี้

$$\begin{aligned} \xi_i &= Ae^{i(\omega t - kx)} & \xi_i &= i\omega Ae^{i(\omega t - kx)} \\ \xi_{re} &= Be^{i(\omega t + kx)} & \xi_{re} &= i\omega Be^{i(\omega t + kx)} \end{aligned} \quad (A2)$$

เมื่อ ทิศทาง x เป็นบวก หมายถึง ทิศทางของคลื่นตกกระทบและค่าคงที่ A และ B มีค่าเป็น $\pm \rho c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ เมื่อ ρ คือ ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของอากาศ ดังนั้นค่าความดันของการตกกระทบและสะท้อน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_i &= i\omega p c A e^{i(\omega t - kx)} \\ P_{re} &= i\omega p c B e^{i(\omega t + kx)} \end{aligned} \quad (A3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยพลังเสียงในคลื่นตกกระทบคือ

$$\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} p_i \xi_i S dt$$

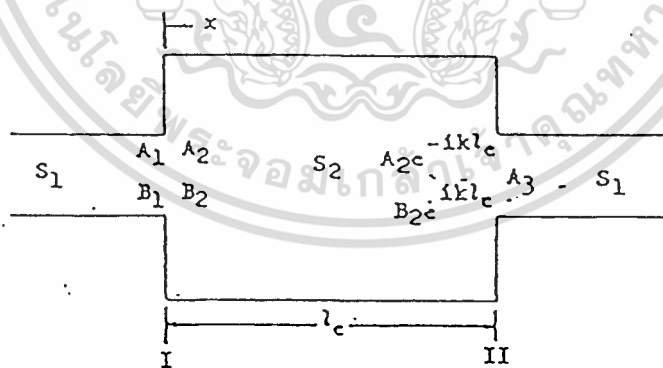
เมื่อมีการคำนวณค่าพลังงานจริง(actual power) จะพิจารณาในส่วน of ค่า p_i และ ξ_i เท่านั้น หลังจากอินทิเกรตแล้วจะได้กำลังเฉลี่ยของเสียงดังนี้

$$\frac{1}{2} \rho c \omega^2 S |A|^2$$

ถ้าค่า attenuation สองค่าอยู่ระหว่างภาคตัดขวางที่มีพื้นที่เท่ากันสามารถ เขียนสูตรได้ ดังนี้

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left| \frac{A_1}{A_2} \right|^2 \quad (A4)$$

เมื่อกำหนดให้ไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นในจุดที่สอง Expansion chamber ชนิดเดียว แสดงในไดอะแกรม ดังนี้



รูปที่ ก. 1แสดงไดอะแกรม Expansion chamber ชนิดเดียว

จุดเชื่อมต่อของแกน x สมการต่อเนื่องของความดัน และปริมาตรการไหลที่จุดต่อ 1

สามารถเขียนสมการช่วย ของสมการ (A2) และ (A3) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad (A5)$$

$$S_1(A_1 - B_1) = S_2(A_2 - B_2)$$

หรือ

$$A_1 - B_1 = m(A_2 - B_2) \quad (A6)$$

จุดต่อที่ 2 อธิบายได้ดังนี้

$$A_2 e^{-ikl_e} + B_2 e^{-ikl_e} = A_3 \quad (A7)$$

$$m(A_2 e^{-ikl_e} - B_2 e^{-ikl_e}) = A_3 \quad (A8)$$

ถ้าสมการ (A5),(A6),(A7) และ (A8) นำมาแก้สมการเขียนเป็นอัตราส่วน A_1/A_3 ได้ผลดังนี้

$$\frac{A_1}{A_3} = \cos kl_e + i \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m} \right) \sin kl_e$$

$$\left| \frac{A_1}{A_3} \right| = \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(m + \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl_e} \quad (A9)$$

และค่า attenuation ดูได้จากสมการ A4

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{4} \left(m + \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl_e \right] \quad (A10)$$

ถ้าแก้สมการ B_1/A_3 จะได้ผลดังนี้

$$\frac{B_1}{A_3} = -i \frac{1}{2} \left(m - \frac{1}{m} \right) \sin kl_e \quad (A11)$$

เมื่อใช้วิธีการและการทดสอบวัดค่าความดันสูงสุดของท่อไอเสียจากจุดต่อ 1 จะเป็นสัดส่วนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left| \frac{A_1}{A_3} \right| + \left| \frac{B_1}{B_3} \right|$$

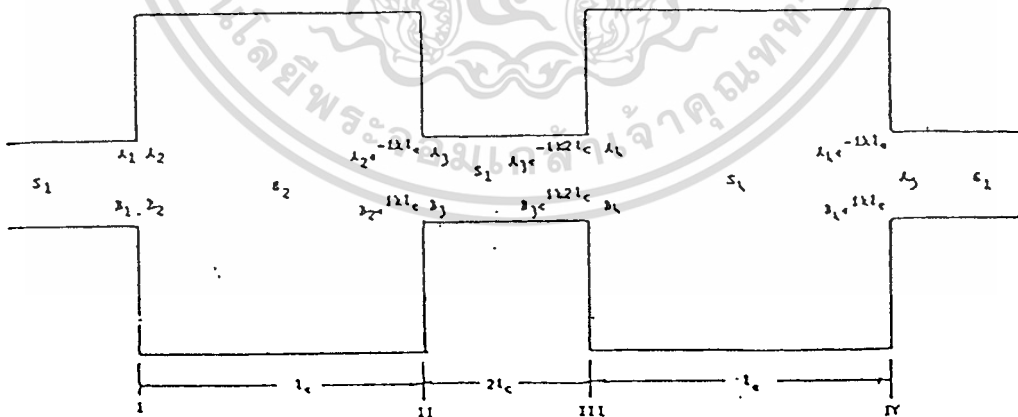
จากจุด x จะพบว่า ค่าตกกระทบและสะท้อนของคลื่นจะรวมกันซึ่งมีการวัดค่า attenuation สูงสุด ดังนี้

$$10 \log_{10} \left(\left| \frac{A_1}{A_3} \right| + \left| \frac{B_1}{B_3} \right| \right)^2 \quad (A12)$$

แทนค่า สมการ (A9) และ (A11) จะได้สมการ (A12)

$$\text{Maximum measured attenuation} = 10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{2} \left(n + \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 k l_e + \left(m + \frac{1}{m} \right) \sin k l_e \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(m + \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 k l_e} \right] \quad (A13)$$

Expansion chamber ชนิดคู่ที่ต่อ external connecting tube. - แสดงดังไดอะแกรม ดังนี้



รูปที่ ก.2 แสดงไดอะแกรม Expansion chamber ชนิดคู่

ผลกระทบของความยาวที่ใช้ connecting tube มีค่า $2l_c$ เท่ากับความยาวทางกายภาพ. ถ้าใช้พื้นฐานเดียวกับ single expansion chamber แล้วสามารถเขียนสมการต่อเนื่องของความดันและการไหลที่ 4

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดต่อ 1

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2$$

$$A_1 - B_1 = m(A_2 - B_2)$$

จุดต่อ 2

$$A_2 e^{-ik_1 z} + B_2 e^{ik_1 z} = A_3 + B_3$$

$$m(A_2 e^{-ik_1 z} - B_2 e^{ik_1 z}) = A_3 - B_3$$

จุดต่อ 3

$$A_3 e^{-ik_2 z} + B_3 e^{ik_2 z} = A_4 + B_4$$

$$A_3 e^{-ik_2 z} - B_3 e^{ik_2 z} = m(A_4 - B_4)$$

จุดต่อ 4

$$A_4 e^{-ik_1 z} + B_4 e^{ik_1 z} = A_5$$

$$m(A_4 e^{-ik_1 z} - B_4 e^{ik_1 z}) = A_5$$

ผลของการแก้ปัญหาสมการได้ดังนี้

$$\frac{A_1}{A_5} = \frac{1}{16m^2} \left[(m+1)^4 e^{2ik(z_s+z_c)} - (m^2-1)^2 e^{-2ik(z_s+z_c)} - 2(m^2-1)^2 e^{2ikz_s} + \right. \\ \left. 2(m^2-1)^2 e^{-2ikz_s} - (m^2-1)^2 e^{2ik(z_s-z_c)} + (m-1)^4 e^{-2ik(z_s-z_c)} \right]$$

สมการนี้เมื่อเขียนตามเทอมของตรีโกณมิติ ได้

$$\frac{A_1}{A_5} = \frac{1}{16m^2} \left\{ i \left[\begin{aligned} &4m(m+1)^2 \cos 2k(z_s+z_c) - 4m(m-1)^2 \cos 2k(z_s-z_c) \\ &2(m^2+1)(m+1)^2 \sin 2k(z_s+z_c) - \\ &2(m^2+1)(m+1)^2 \sin 2k(z_s-z_c) - 4m(m^2-1)^2 \sin kz_s \end{aligned} \right] \right\} \quad (A14)$$

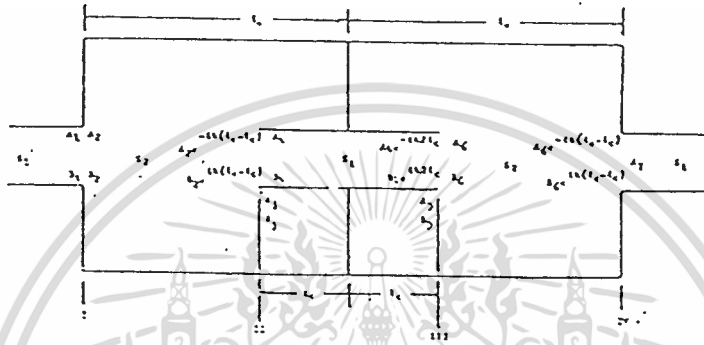
ค่า attenuation คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left\{ \left[R \left(\frac{A_1}{A_5} \right) \right]^2 + \left[I \left(\frac{A_1}{A_5} \right) \right]^2 \right\} \quad (A15)$$

เมื่อ R และ I ใช้เป็นค่าจริง และ จิตนาการ ตามลำดับ

Expansion chamber ชนิดคู่ที่ต่อ internal connecting tube. - แสดงดังไดอะแกรม ดังนี้



รูปที่ ก.3 แสดงไดอะแกรม Expansion chamber ชนิดคู่ที่ต่อ internal connecting tube

สามารถเขียนสมการต่อเนื่องของความดันและการไหลที่ 4 จุดต่อ ดังนี้

จุดต่อ 1

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2$$

$$A_1 + B_1 = m(A_2 - B_2)$$

จุดต่อ 2

$$A_2 e^{-k(t_c - t_c)} + B_2 e^{ik(t_c - t_c)} = A_3 + B_3 = A_4 + B_4$$

$$m(A_2 e^{-k(t_c - t_c)} - B_2 e^{ik(t_c - t_c)}) = A_4 - B_4 + (m-1)(A_3 - B_3)$$

จุดต่อ 3

$$A_4 e^{-2ik2t_c} + B_4 e^{2ik2t_c} = A_5 + B_5 = A_6 + B_6$$

$$A_4 e^{-2ik2t_c} - B_4 e^{2ik2t_c} + (m-1)(A_5 - B_5) = m(A_6 - B_6)$$

จุดต่อ 4

$$A_6 e^{-k(t_c - t_c)} + B_6 e^{ik(t_c - t_c)} = A_7$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m(A_6 e^{-k(l_e - l_c)} - B_6 e^{ik(l_e - l_c)}) = A_7$$

เพิ่มเติม , เพราะผลรวมของการสะท้อนจาก bulkhead ถูกแยกเป็นสอง chambers, ดังนี้

$$B_3 = A_3 e^{-2ikl_c}$$

$$B_5 = A_5 e^{2ikl_c}$$

ผลของการแก้ปัญหามหาสมการได้ดังนี้

$$\frac{A_1}{A_7} = \frac{1}{4(1 + \cos 2kl_e)} \left\{ \begin{aligned} & [4 \cos 2kl_e + 2m \cos 2k(l_e + l_c) - 2(m-2) \cos 2k(l_e - l_c)] + \\ & \left[2\left(m + \frac{1}{m}\right) \sin 2kl_e + 2(m^2 + 1) \sin 2k(l_e + l_c) - \right. \\ & \left. \left[\left(m + \frac{1}{m}\right)(m-2) \sin 2kl_e(l_e - l_c) - 2\left(m + \frac{1}{m}\right)(m-2) \sin 2kl_e \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (A16)$$

ค่า attenuation คือ

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left\{ \left[R \left(\frac{A_1}{A_7} \right) \right]^2 + \left[I \left(\frac{A_1}{A_7} \right) \right]^2 \right\} \quad (A17)$$

ความถี่ช่วง Cut-off

ในการออกแบบ double-expansion-chamber mufflers นั้นสามารถที่จะทำนายขีดจำกัดความถี่ต่ำของค่า attenuation ในย่านความถี่แรก ซึ่งเรียกว่า cut-off frequency f_c ซึ่งใช้ในการออกแบบ muffler เบื้องต้น ได้สมการจากการทดลอง ดังนี้

$$f_c \approx \frac{c}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{ml_e l_c + \frac{l_e}{3}(l_e - l_c)}} \quad (A18)$$

ได้ค่าเป็นที่น่าสนใจ สามารถดูได้จากตารางที่ ก.4

ส่วน B

การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ชนิด RESONATOR

Resonators ชนิดเดี่ยว

สมการอนุพันธ์ของการหาค่า attenuation ใน single resonator แบบ side branch, กำหนดสมมุติฐาน (1),(2), และ (3) ดังแสดงในภาคผนวก ก ส่วน A :

- (4) คลื่นความดันแนวระนาบมีการเพิ่มขึ้นภายในท่อไอเสียและท่อนำเสียง
- (5) อิทธิพลของความหนืดโดยทั่วไปมีผลน้อยมากยกเว้นในท่อที่มีการต่อของ ท่อหรือ orifices ระหว่างท่อไอเสียกับ volume chamber ของ resonator
- (6) ความหนาของ boundary-layer มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรือ orifice ซึ่งพิจารณาจากผลของความหนืด
- (7) ขนาดของ resonator ที่มีขนาดเล็ก จะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นเสียงที่นำมาพิจารณา

พิจารณาค่า impedance ของ side branch มีค่า $Z = R + iX$ ที่ภายในท่อเปิดมีคลื่นเสียงในแนวระนาบเพิ่มขึ้น

ที่จุดเชื่อมต่อของท่อ ในสภาวะความดันต่อเนื่องและมีกระแสเสียง กำหนดดังนี้

$$P_i + P_{re} = P_b = P_{tr} \quad (B1)$$

$$I_i - I_{re} = I_b + I_{tr} \quad (B2)$$

เมื่อ i และ re หมายถึง การตกกระทบและสะท้อนของคลื่นก่อน branch, b หมายถึง branch, และ tr หมายถึง การส่งผ่านคลื่นหลัง branch. ในแนวระนาบ ค่า $p = Z_0 I$, เมื่อ Z_0 เป็น คุณสมบัติ impedance ของท่อ สามารถเขียนในเทอมของความดันและ impedance, จากสมการ (B2) ได้ดังนี้

$$\frac{1}{Z_0}(P_i - P_{re}) = P_{tr} \left(\frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_0} \right) \quad (B3)$$

แก้สมการ (B1) และ (B3) ได้เป็นอัตราส่วน P/P_0 ดังนี้

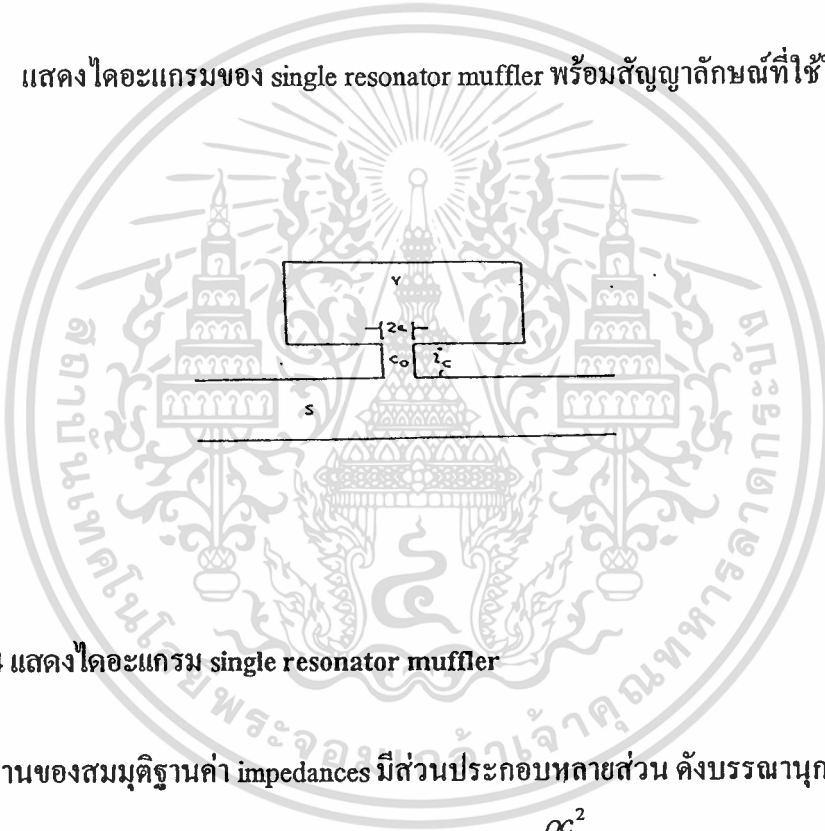
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_i}{P_{tr}} = 1 + \frac{Z_0}{2Z_b} = 1 + \frac{Z_0}{2(R_b + iX_b)}$$

เพราะฉะนั้น ค่า attenuation คือ

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left| \frac{P_i}{P_{tr}} \right|^2 = 10 \log_{10} \frac{\left(R_b + \frac{Z_0}{2} \right)^2 + X_b^2}{R_b^2 + X_b^2} \quad (B4)$$

แสดงไดอะแกรมของ single resonator muffler พร้อมสัญลักษณ์ที่ใช้ในการทำนาย



รูปที่ ก.4 แสดงไดอะแกรม single resonator muffler

บนพื้นฐานของสมมติฐานค่า impedances มีส่วนประกอบหลายส่วน ดังบรรณานุกรม 1

$$Volume - chamber impedance = j \frac{\rho c^2}{\omega V} \quad (B5)$$

$$Z_0 = Connect impedance = \frac{l_c}{\pi a^3} \sqrt{2\mu\rho\omega} + j \frac{\omega_0}{c_0} + \frac{l_c}{\pi a^3} \sqrt{2\mu\rho\omega} \quad (B6)$$

C_0 คือ ค่า conductivity และ l_c เป็นผลกระทบของความยาวของ connector. ดังนั้น resonator แบบ side branch มีขนาด volume chamber และ connector ในแนวนุกรม

$$R_b = \frac{l_c}{\pi a^3} \sqrt{2\mu\rho\omega} \quad (B7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่า สมการ(B4), ได้ ค่า attenuation ของ single-resonator muffler.

ในหลายกรณีที่เป็นไปได้ผลกระทบของความหนืดมีผลน้อยมาก .ถ้าค่า $\mu = 0$, สมการ (B4) มีค่าดังนี้

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{Z_0}{4X_b^2} \right) \quad (B9)$$

โดยแทนค่า X_b ที่เป็นไปได้เข้าไปในสมการ (B9)

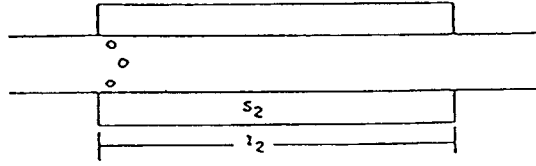
$$Attenuation = 10 \log_{10} \left[1 + \frac{\left(\frac{\sqrt{c_0 V}}{2S} \right)^2}{\left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right)} \right] \quad (B10)$$

จากรูปที่ 2-18 ได้จากสมการนี้ ค่าความมีค่าน้อยมากสามารถทำนายค่า attenuation เพิ่มขึ้นแบบไม่มีขีดจำกัดที่ ค่า resonant frequency $\frac{f}{f_r} = 1$

ถ้าผลของความยาวที่ connector l_c มีไม่เพียงพอที่จะใช้เปรียบเทียบกับความยาวของคลื่นเสียง,ตามสมมุติฐาน (7) สำหรับ ความยาว ของconnector l_c และพื้นที่ S_c ที่ส่วนท้ายของปริมาตร V , ได้ค่า reactance กับความหนืดดังนี้

$$X_b = \frac{\rho c}{S_c} \left(\frac{\tan kl_c - \frac{S_c}{kV}}{\frac{S_c}{kV} \tan kl_c + 1} \right) \quad (B11)$$

ในกรณีที่ connector สั้น และ chamber ยาว ดังโครงสร้าง, จะประมาณค่าที่ใช้ ดังรูป



รูปที่ ก.5 แสดงไดอะแกรมกรณี connector ล้วนและ chamber ยาว

ปัญหาอีกส่วนในการหาค่า branch impedance สำหรับ chamber แบบปิด(ไม่คิดค่าความหนืด) จะได้ค่า branch impedance ดังนี้

$$Z_b = i \left(\frac{\rho \omega}{c_0} - \frac{\rho c}{S_0} \cot k l_c \right) \quad (B12)$$

ค่า Attenuation ได้ดังนี้

$$10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{m}{\frac{k S_2}{c_0} - \cot k l_c} \right)^2 \right] \quad (B13)$$

Resonators แบบ หลายตัว

ค่า attenuation , เมื่อ M จาก chambers ของ filter แบบไม่จำกัด ประกอบเป็น branch resonators ได้ดังนี้ แสดงโดยบรรณานุกรมที่ 8

$$Attenuation = 8.69M \cosh^{-1} \left| \cos k l_1 + i \frac{Z_0}{2Z_b} \sin k l_1 \right| \quad (B14)$$

เมื่อ

$$\frac{Z_0}{2Z_b} = \frac{\rho c}{2S} \frac{1}{\left(\frac{2\pi f \rho}{c_0} - \frac{\rho c^2}{2\pi f V} \right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Z_0}{2Z_b} = -i \frac{\frac{\sqrt{c_0 V}}{2S}}{\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f}}$$

เมื่อแทนค่าในสมการ (B14) และให้ $k_r = \frac{2\pi f_r}{c}$ ได้

$$Attenuation = 8.69M \cosh^{-1} \left[\cos \left(k l_1 \frac{f}{f_r} \right) + \frac{\frac{\sqrt{c_0 V}}{2S}}{\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f}} \sin \left(k l_1 \frac{f}{f_r} \right) \right] \quad (B15)$$

เมื่อกำหนดค่า hyperbolic cosine นำไปใช้ผลที่เป็นลบ . ค่าความถี่ของ attenuation /chamber แบบ multiple-resonator ได้ ฟังก์ชัน 3 ตัวแปรคือ : $\sqrt{c_0 V / 2S}$, $k_r l_1$ และ $\sqrt{c_0 / V}$ (เมื่อ f_r ขึ้นกับ $\sqrt{c_0 / V}$) เส้นโค้งในรูปที่ 2-18 คำนวณได้จากสมการ(B15).

ในบรรณานุกรม 1 ความถี่ cut-off ได้ดังนี้

$$f_c = \frac{c}{\pi} \sqrt{\frac{S}{l_1 V} \left(\frac{1}{1 + \frac{4S}{l_1 c_0}} \right)} \quad (B16)$$

ในเทอมของ resonant frequency ในสมการ(B16) สามารถเขียนเป็น

$$f_c = \frac{f_r}{\sqrt{1 + \frac{c_0 l_1}{4S}}} \quad (B17)$$

ส่วน C

การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ใน TAIL PIPES

Expansion chamber แบบเดี่ยว

เมื่อพิจารณาส่วนประกอบของ expansion chamber กับ expansion ratio m ที่ด้านทางของ tail pipe มีผลต่อความยาว l_e .

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad (C1)$$

$$A_1 - B_1 = m(A_2 - B_2) \quad (C2)$$

ที่ปลายทาง, ผลรวมของการสะท้อนจากปลายของ tail pipe,

$$A_2 e^{-ikl_e} + B_2 e^{ikl_e} = A_3 + B_3 = A_3 (1 - e^{-i2kl_e}) \quad (C3)$$

$$m(A_2 e^{-ikl_e} - B_2 e^{ikl_e}) = A_3 (1 + e^{-i2kl_e}) \quad (C4)$$

4 สมการนี้ ได้จากเทอม A_1/A_3 ดังนี้

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{1}{4m} \left\{ [4 \cos 2kl_e - 2(m-1) \sin 2kl_e \sin kl_e] + i[2(m^2+1) \sin 2kl_e - 2(m^2-1) \cos 2kl_e \sin 2kl_e] \right\}$$

ค่า attenuation เป็น $10 \log_{10} \left| \frac{A_1}{A_3} \right|^2$ เมื่อ

$$\left| \frac{A_1}{A_3} \right|^2 = 1 + \frac{(m^2-1)^2}{2m^2} \sin^2 kl_e - \frac{m^2-1}{2m} \sin 2kl_e \sin 2kl_e - \frac{m^4-1}{2m^2} \cos 2kl_e \sin^2 kl_e \quad (C5)$$

ความถี่ช่วง cut-off โดยประมาณ จะพบได้จากกำหนด สูตรเท่ากับศูนย์และ หาค่า k , โดยเอกสารนี้ประมาณได้ดังนี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin k l_e = k l_e$$

$$\sin 2k l_e = 2k l_e$$

$$\sin 2k l_t = 2k l_t$$

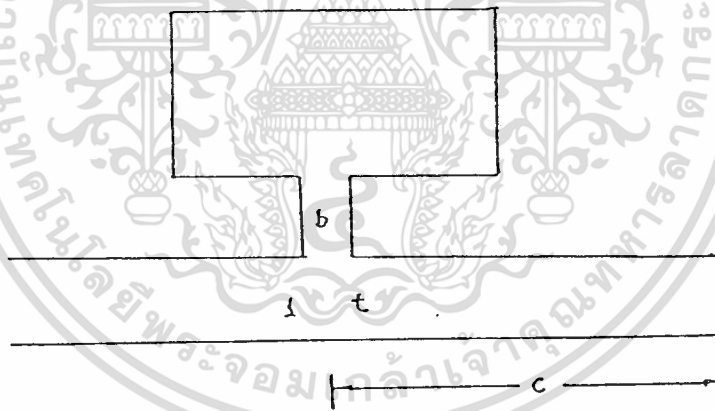
$$\cos k l_t = 1$$

ผลลัพธ์คือ

$$f_c \approx \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{4 + \frac{2l_e}{m l_t}}{\left(m + \frac{1}{m}\right) l_e l_t}} \quad (C6)$$

Resonator แบบเดี่ยว

ดังไดอะแกรม ของ single-resonator muffler กับ tail pipe ที่ยาวไม่จำกัด ได้ดังนี้



รูปที่ ก.6 แสดงไดอะแกรมของ single-resonator muffler กับ tail pipe

สมการ 1

$$Z_1 = \frac{P_1}{I_1} = \frac{-i\omega\rho(A_1 + B_1)e^{i\omega t}}{-iSk(A_1 - B_1)e^{i\omega t}} = Z_0 \frac{A_1 + B_1}{A_1 - B_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์นี้

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (C7)$$

เมื่อ Z_1 เป็น impedance ของ branch และ tail pipe ในแนวขนาน ดังนี้

$$\frac{B_t}{A_t} = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \quad (C8)$$

สมการต่อเนื่องของความดันที่จุดต่อ คือ

$$A_1 + B_1 = A_t + B_t$$

$$\frac{A_t}{A_1} = \frac{1 + \frac{B_t}{A_t}}{1 + \frac{B_1}{A_1}}$$

แทนค่าจาก สมการ(C7) และ (C8) ได้

$$\frac{A_t}{A_1} = \frac{Z_t}{Z_1} \frac{Z_1 + Z_0}{Z_t + Z_0}$$

ถ้าแทนค่าเสร็จแล้วได้

$$Z_t = \frac{Z_0 Z_1}{Z_0 + Z_1}$$

ผลลัพธ์ คือ

$$\frac{A_t}{A_1} = 1 + \frac{Z_0/Z_1}{Z_0/Z_1 + 1}$$

ถ้าได้ค่า Z_0/Z_1 และ Z_0/Z_t นำไปแทนในสมการนี้ จะได้ค่า attenuation ที่สามารถหาได้จากการคำนวณที่สมการ(A4). ยกตัวอย่าง, ค่าสมการหาค่า attenuation ซึ่งพัฒนาขึ้นกรณี ค่า Z_0 เป็น ค่า reactance เท่านั้น และ ผลรวมของการสะท้อนโดยกำหนด tail pipe เป็นแบบปลายเปิด ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{A_t}{A_i} = 1 + \frac{Z_0/iX_b}{\frac{Z_0}{iX_t} + 1}$$

ลดสมการได้

$$\left| \frac{A_t}{A_i} \right|^2 = 1 + \frac{2(Z_0/X_b)(Z_0/X_t)}{(Z_0/X_t)^2 + 1} + \frac{(Z_0/X_b)^2}{(Z_0/X_t)^2 + 1} \quad (C9)$$

สุดท้ายของการแทนที่ , สำหรับ single-branch resonator กับ tail pipe ได้

$$\frac{Z_0}{X_t} = \cot kl_t$$

$$kl_t = k_{r,t} \frac{f}{f_r}$$

และ

$$\frac{Z_0}{X_b} = \frac{\sqrt{c_0 V}}{S \left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right)}$$

ผลลัพธ์ที่ได้

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left[1 + \frac{\sqrt{c_0 V}}{S} \frac{\sin 2k_{r,t} \frac{f}{f_r}}{\left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right)} + \frac{\sqrt{c_0 V}}{S^2} \frac{\sin 2k_{r,t} \frac{f}{f_r}}{\left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right)^2} \right] \quad (C10)$$

ความถี่ผ่านได้จากการกำหนดผลรวมของเทอมที่สองและสามจากสมการ(C10) เท่ากับศูนย์ ได้ผลดังนี้

$$\tan kl_t = -2S \left(\frac{k}{c_0} - \frac{1}{kV} \right) \quad (C11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะทางเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า attenuation ที่เป็นศูนย์ สำหรับค่า k ใด ๆ มีผลเป็นที่น่าพอใจจากสมการนี้. สำหรับความถี่ช่วง cut-off สมการนี้ก็สามารถกำหนดค่าโดยประมาณได้

$$\tan k l_t = k l_t$$

ผลลัพธ์ที่ได้

$$f_c = \frac{f_r}{\sqrt{1 + \frac{\sqrt{c_0 V}}{2S} k_r l_t}} = \frac{f_r}{\sqrt{1 + \frac{c_0 l_t}{2S}}} \tag{C12}$$

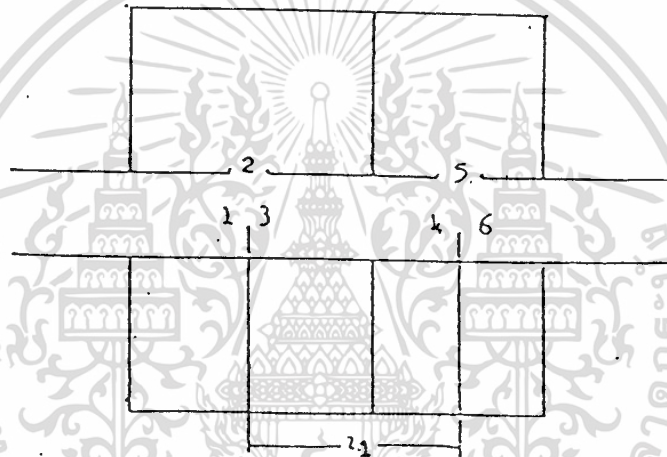


ส่วน D

การรวมกัน

Two resonators tuned at different frequencies

ดังไดอะแกรม ที่ประกอบเป็น muffler ซึ่งใช้ สอง resonators ที่ความถี่แตกต่างกัน แสดง
ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ ก.7 แสดงไดอะแกรมที่ใช้ Resonators 2 ชุด ที่ความถี่แตกต่างกัน

สมมุติฐานเหมือนกับ single resonators ในภาคผนวก ก ส่วน C

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{Z_3}{Z_1} \frac{Z_1 + Z_0}{Z_3 + Z_0}$$

$$\frac{A_4}{A_6} = \frac{Z_6}{Z_4} \frac{Z_4 + Z_0}{Z_6 + Z_0} = \frac{Z_4 + Z_0}{2Z_4}$$

ให้ $Z_6 = Z_0$ ดังนั้น

$$A_4 = A_3 e^{-ik_1 l_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\frac{A_1}{A_6} = \frac{A_1}{A_3 e^{-ikl_1}} = \frac{e^{ikl_1}}{2} \left(\frac{Z_1 + Z_0}{Z_1 + \frac{Z_0 Z_1}{Z_3}} \right) \left(\frac{Z_4 + Z_0}{Z_4} \right) \quad (D1)$$

ค่า impedances ที่ได้จากสมการนี้คือ

$$Z_4 = \frac{Z_0 Z_5}{Z_0 + Z_5} \quad (D2)$$

$$\frac{Z_3}{Z_0} = \frac{Z_4 \cos kl_1 + iZ_0 \sin kl_1}{Z_0 \cos kl_1 + iZ_4 \sin kl_1} \quad (D3)$$

$$Z_1 = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (D4)$$

ค่า attenuation ที่หาโดยการแทนค่าสมการ(D2),(D3) และ (D4) ใน สมการ (D1) และ ใช้สูตร ดังนี้

$$Attenuation = 10 \log_{10} \left| \frac{A_1}{A_6} \right|^2 \quad (D5)$$

ถ้าค่าของ branch impedances ไม่มีองค์ประกอบความต้านทาน จะได้ผลดังนี้

$$\frac{A_1}{A_6} = \frac{1}{2} \frac{[R_3 X_2^2 + Z_0 R_3^2 + Z_0 (X_2 + X_3)^2] + i[R_3^2 X_2 + X_2 X_3 (X_2 + X_3)]}{[R_3 X_2^2 \cos kl_1 + Z_0 X_2 R_3 \sin kl_1] + i \left[\begin{array}{l} R_3^2 X_2 + X_2 X_3 (X_2 + X_3) \cos kl_1 - \\ Z_0 X_2 (X_2 + X_3) \sin kl_1 \end{array} \right]} \quad (D6)$$

เมื่อ

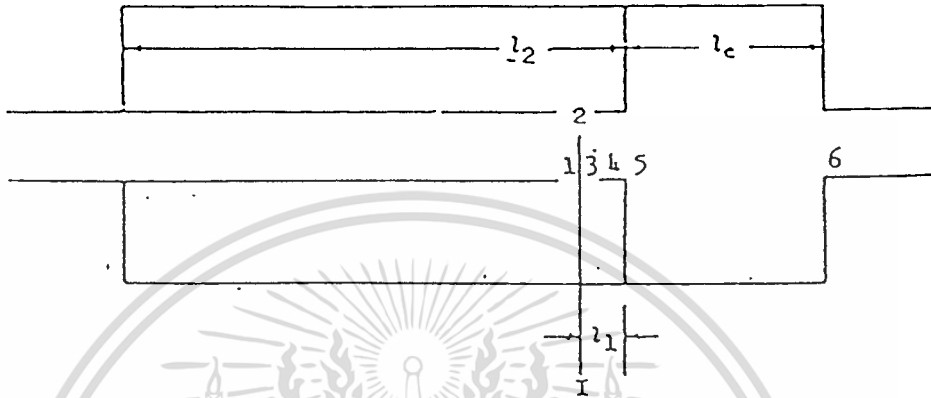
$$R_3 = \frac{Z_0 X_5^2 (Z_0^2 + X_5^2)}{[(Z_0^2 + X_5^2) \cos 2kl_1 - Z_0 X_5 \sin kl_1]^2 + X_5^4 \sin^2 kl_1} \quad (D7)$$

$$X_3 = \frac{Z_0 X_5^2 (Z_0^2 + X_5^2) \cos 2kl_1 + \frac{1}{2} (Z_0^5 + Z_0^3 X_5^2) \sin 2kl_1}{[(Z_0^2 + X_5^2) \cos 2kl_1 - Z_0 X_5 \sin kl_1]^2 + X_5^4 \sin^2 kl_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The resonator และ expansion chamber

ดังในไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของ muffler ร่วมกับ expansion chamber แสดงด้วยรูปด้านล่าง :



รูปที่ ก.8 แสดงไดอะแกรมส่วนประกอบของ muffler ร่วมกับ expansion chamber

ในจุดเชื่อมต่อที่ 1 สภาวะ boundary แสดงดังนี้

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 = A_3 + B_3 \quad (D8)$$

$$S_1(A_1 - B_1) = S_2(A_2 - B_2) + S_1(A_3 - B_3) \quad (D9)$$

สมการ(D8) และ (D9)

$$A_1 = \frac{1}{2} \frac{S_2}{S_1} (A_2 - B_2) + A_3 \quad (D10)$$

สำหรับ side branch

$$Z_2 = \frac{P_2}{I_2} = \frac{-\rho\omega (A_2 + B_2)e^{i\omega t}}{-kS (A_2 - B_2)e^{i\omega t}} = \frac{\rho c}{S_2} \frac{A_2 + B_2}{A_2 - B_2}$$

ได้จาก

$$A_2 - B_2 = \frac{\rho c}{S_2 l_2} (A_2 + B_2) = \frac{\rho c}{S_2 Z_2} (A_2 + B_2) \quad (D11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้านำสมการ (D11) ไปแทนค่าในสมการ (D10), ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$A_1 = \frac{S_2}{2S} \frac{\rho c}{S_2 Z_2} (A_3 + B_3) + A_3$$

ดังนั้น $A_3 = A_4 e^{ikl_1}$, $B_3 = B_4 e^{-ikl_1}$, and $\frac{\rho c}{S_1} = Z_0$, สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A_1 = \left(1 + \frac{Z_c}{2Z_2}\right) A_4 e^{ikl_1} + \frac{Z_0}{2Z_2} B_4 e^{-ikl_1} \quad (D12)$$

เอาสมการที่มีเครื่องหมายข้างใต้เป็น 1 และ 3 จากสมการ (A9) และ (A11) แทนค่าโดย 4 และ 6, ตามลำดับ ดังนั้น อัตราส่วน A_4/A_6 และ B_4/A_6 สามารถเขียน ดังนี้

$$\frac{A_4}{A_6} = \cos kl_e + i \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e \quad (D13)$$

$$\frac{B_4}{A_6} = -i \frac{1}{2} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin kl_e \quad (D14)$$

ใช้สมการ (D12), (D13), และ (D14), ที่อัตราส่วนของ A_4/A_6 เขียนได้ดังนี้

$$\left(1 + \frac{Z_0}{2iX_b}\right) \left[\cos kl_e + i \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e \right] e^{ikl_1} + \frac{Z_0}{2iX_b} \left[-i \frac{1}{2} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin kl_e \right] e^{-ikl_1}$$

$$= \left\{ \left(1 - i \frac{Z_0}{2X_b}\right) \left[\cos kl_e + i \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e \right] - \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin kl_e e^{-2ikl_1} \right\} e^{ikl_1}$$

$$= \left\{ \cos kl_e + \frac{Z_0}{4X_b} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e - \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \cos 2kl_1 \sin kl_e + \right. \\ \left. i \left[\frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e - \frac{Z_0}{2X_b} \cos kl_e + \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin 2kl_1 \sin kl_e \right] \right\} \quad (D15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า attenuation ที่ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 \text{Attenuation} &= 10 \log_{10} \left| \frac{A_1}{A_6} \right|^2 \\
 &= 10 \log_{10} \left\{ \left[\cos k\iota_s + \frac{Z_0}{4X_b} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin k\iota_s - \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \cos 2k\iota_l \sin k\iota_s \right]^2 + \right. \\
 &\quad \left. \left[\frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin k\iota_s - \frac{Z_0}{2X_b} \cos k\iota_s + \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin 2k\iota_l \sin k\iota_s \right]^2 \right\} \quad (D16)
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ค่าที่ได้จากการคำนวณการแก้ค่า ATTENUATION ที่ได้จากการวัด

เปอร์เซ็นต์การสะท้อน	ค่าที่ใช้แก้ ค่าที่เพิ่มขึ้นภายใน ท่อไอเสีย (เดซิเบล)	ค่า attenuation จริง (เดซิเบล)	ค่า attenuation จริง + ค่าที่ใช้แก้ = ค่า attenuation ที่วัดได้ (เดซิเบล)
5	0.42	0.45	0.87
10	.83	.92	1.74
20	1.53	1.94	3.52
30	2.28	3.10	5.38
40	2.92	4.24	7.16
50	3.52	6.02	9.54
60	4.08	7.96	12.04
70	4.61	10.46	15.07
80	5.11	13.98	19.09
85	5.34	16.48	21.82
90	5.58	20.00	25.58
95	5.80	26.03	31.83
97	5.90	30.46	36.35
99	5.98	40.00	45.98
99.5	6.00	46.02	52.02
99.9	6.02	60.00	66.02
100	6.02	∞	∞

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 เปรียบเทียบค่า C_0 ที่ได้จากการคำนวณกับค่า C_0 ที่มาจากรายการตัวเลข 12 ถึง 14

Muffler	จำนวนของ connectors / chamber	จำนวน ของ chambers	l _c (นิ้ว.)	2a (นิ้ว.)	จำนวน C _o (ft)		รายการ C _c (ft)
					$\beta = \frac{\pi}{4}$	$\beta = \frac{\pi}{2}$	
Tube connector to chamber							
24	1	1	6.8	2.0	0.034	0.031	0.0308
25	1	1	6.8	2.0	.034	.031	.0308
26	1	1	6.8	2.0	.034	.031	.0308
27	1	1	2.16	2.0	.089	.070	.0702
29	1	1	6.8	1.0	.009	.009	.0086
30	1	1	6.8	3.0	.074	.064	.0644
31	1	1	.43	2.0	.215	.131	.1309
32	1	1	13.6	2.0	.018	.017	.0172
33	1	1	3.0	1.4	.036	.031	.0308
34	1	1	1.28	1.0	.039	.032	.0308
37	1	1	1.75	1.0	.031	.026	.026
38	1	1	1.66	.5	.066	.052	.052
58	4	2	.25	.5	.147	.102	.100
59	4	2	1.00	1.0	.188	.147	.140
60	4	2	3.00	1.5	.164	.141	.140
Orifice connector to chamber							
39	2	1	0.05	1.0	0.296	0.157	0.151
40	6	1	.05	1.0	.887	.470	.670
47	10	1	.05	.05	.664	.369	.741
51	1	2	.05	.05	.066	.037	.041
52	4	2	.05	.05	.265	.148	.166
56	8	2	.05	.05	.529	.296	.332
62	3	2	.05	.05	.198	.111	.111
63	7	2	.05	.05	.463	.259	.271

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

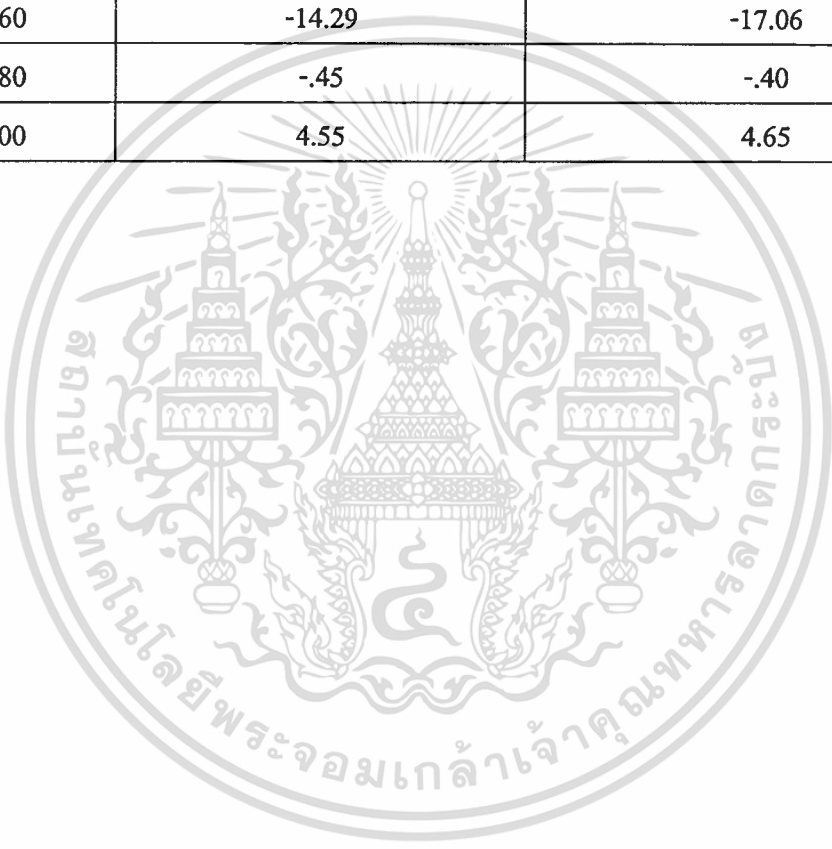
ตารางที่ ก.3 เปรียบเทียบสองวิธีการคำนวณค่า ATTENUATION ของ SINGLE-RESONATOR MUFFLER กับ TAIL PIPE

[ค่าคงที่ Muffler: $C_0 = 0.261 \text{ ft}$; $V = 0.338 \text{ ft}^3$; $c = 2000 \text{ fps}$; ความยาวของ Tail-pipe = 20 in]

ความถี่, f (cps)	Attenuation (dB)	
	คำนวณโดยใช้ค่า ที่แน่นอนของ tail-pipe impedance	คำนวณโดยใช้ค่า ที่ประมาณของ tail-pipe impedance
20	-0.81	-0.81
40	-4.10	-4.10
60	-9.63	-9.65
80	-2.24	-2.24
100	5.09	5.10
120	9.86	9.87
140	13.67	13.67
160	17.09	17.10
180	20.28	20.29
200	23.37	20.37
220	27.08	27.09
240	31.38	31.39
260	37.35	37.36
280	∞	∞
300	38.48	38.50
320	33.14	33.16
340	29.35	29.37
360	26.63	26.67
380	24.45	24.48
400	22.39	22.41
420	20.30	20.33
440	18.27	18.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่, f (cps)	Attenuation (dB)	
	คำนวณโดยใช้ค่า ที่แน่นอนของ tail-pipe impedance	คำนวณโดยใช้ค่า ที่ประมาณของ tail-pipe impedance
460	16.00	16.03
480	13.37	13.39
500	10.32	10.34
520	6.34	6.33
540	-.42	-.56
560	-14.29	-17.06
580	-.45	-.40
600	4.55	4.65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ความถี่ CUT-OFF สำหรับ EXPANSION CHAMBERS แบบคู่

$$[c = 1140 \text{ fps}]$$

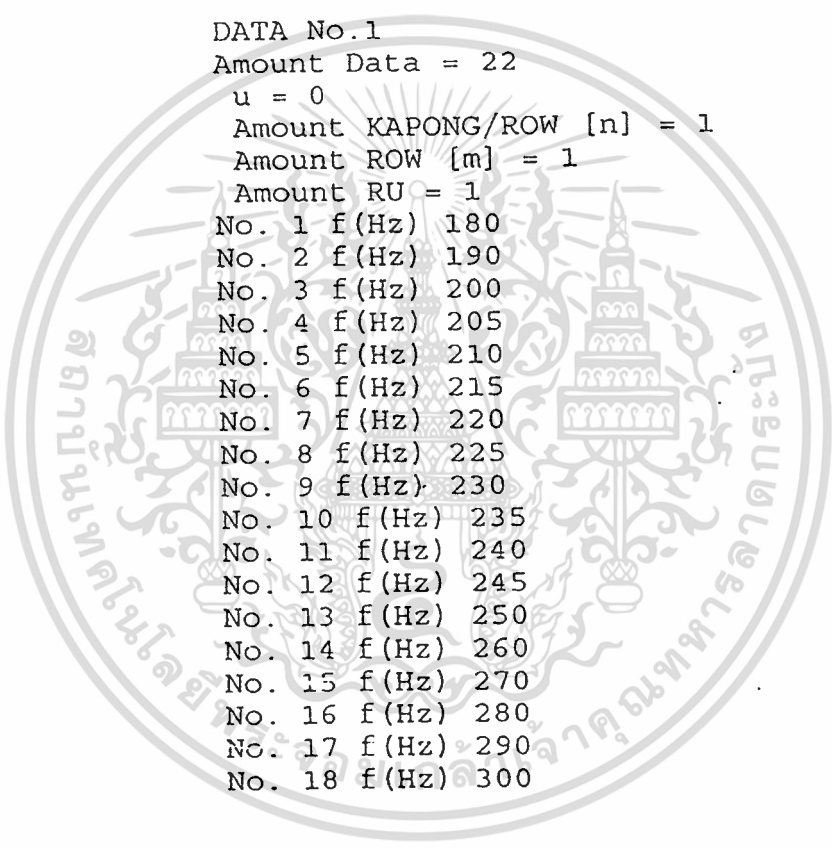
Muffler	m	z_s (ft)	z_c (ft)	I_c (cps)	
				ค่าโดยประมาณ (eq. (A18))	ค่าที่แน่นอน (eq.(A17))
12	16	2	0.10	85.8	86.1
14	16	2	.25	59.9	59.1
15	16	2	.50	44.0	43.3
16	16	2	1.00	31.7	30.6
17	16	2	.25	59.9	60.6
18	16	2	.50	44.0	43.8
19	16	2	1.00	31.7	31.7
20	16	2	1.50	26.1	25.9
21	4	1	.50	123.2	122.4
22	9	1	.50	84.0	83.9
23	16	3	1.50	21.2	21.2

ภาคผนวก ข

วิธีการใช้งานโปรแกรมต่างๆ

โปรแกรม DAVIS

ใช้ในการป้อนข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองมาแล้วเพื่อแก้ความผิดพลาด จากการสะท้อนกลับของคลื่นซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง ใส่แผ่นโปรแกรม DAVIS ใน DRIVE A: ก่อนแล้วเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์จะขึ้นข้อความดังข้างล่าง



```

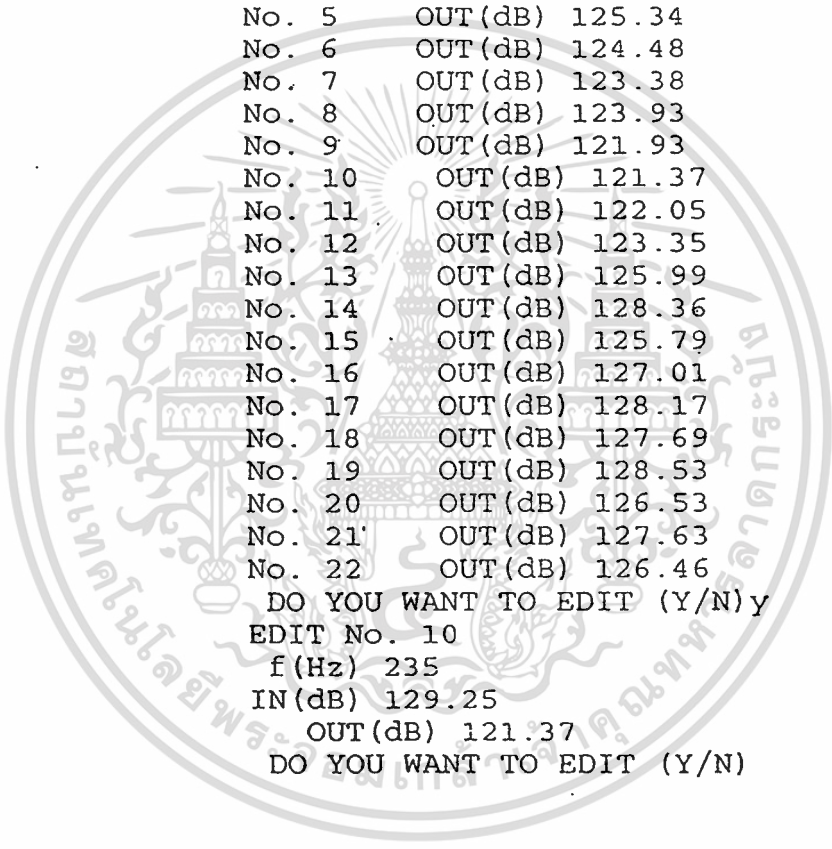
DATA No.1
Amount Data = 22
u = 0
Amount KAPONG/ROW [n] = 1
Amount ROW [m] = 1
Amount RU = 1
No. 1 f(Hz) 180
No. 2 f(Hz) 190
No. 3 f(Hz) 200
No. 4 f(Hz) 205
No. 5 f(Hz) 210
No. 6 f(Hz) 215
No. 7 f(Hz) 220
No. 8 f(Hz) 225
No. 9 f(Hz) 230
No. 10 f(Hz) 235
No. 11 f(Hz) 240
No. 12 f(Hz) 245
No. 13 f(Hz) 250
No. 14 f(Hz) 260
No. 15 f(Hz) 270
No. 16 f(Hz) 280
No. 17 f(Hz) 290
No. 18 f(Hz) 300
  
```

DATA NO .	=	ให้ใส่ชื่อข้อมูลลงไป
Amount Data	=	ให้ป้อนจำนวนข้อมูลดิบที่เก็บผลจากการทดลอง
u	=	ความเร็วลม (m/s)
Amount KAPONG/ROW [n]	=	จำนวน Resonators ต่อแถว(n)
Amount ROW[m]	=	จำนวนทางขนานของ Resonators
Amount RU	=	จำนวนรูของ Connector
NO.1 f(Hz)	=	ชุดข้อมูลความถี่ที่กำหนดโดยการตั้งจากเครื่องกำเนิดความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเสียงผ่านลำโพงออกมาอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.1 IN(Hz) = ชุดข้อมูลความดังของเสียงที่อ่านจาก FFT Analyser ก่อนเข้า Resonators

NO.1 OUT(Hz) = ชุดข้อมูลความดังของเสียงที่อ่านจาก FFT Analyser หลังออกจาก Resonators



```

No. 4      OUT (dB) 125.28
No. 5      OUT (dB) 125.34
No. 6      OUT (dB) 124.48
No. 7      OUT (dB) 123.38
No. 8      OUT (dB) 123.93
No. 9      OUT (dB) 121.93
No. 10     OUT (dB) 121.37
No. 11     OUT (dB) 122.05
No. 12     OUT (dB) 123.35
No. 13     OUT (dB) 125.99
No. 14     OUT (dB) 128.36
No. 15     OUT (dB) 125.79
No. 16     OUT (dB) 127.01
No. 17     OUT (dB) 128.17
No. 18     OUT (dB) 127.69
No. 19     OUT (dB) 128.53
No. 20     OUT (dB) 126.53
No. 21     OUT (dB) 127.63
No. 22     OUT (dB) 126.46
DO YOU WANT TO EDIT (Y/N)Y
EDIT No. 10
f (Hz) 235
IN (dB) 129.25
OUT (dB) 121.37
DO YOU WANT TO EDIT (Y/N)

```

หลังจากป้อนข้อมูลเสร็จแล้ว ถ้าเกิดความผิดพลาดขึ้นที่ข้อมูลเท่าไรให้จำเอาไว้จนป้อนข้อมูล OUT เสร็จโปรแกรมจะถาม Do You want to edit ถ้าตอบ N หมายถึงไม่มีข้อมูลผิดพลาด ถ้ามีข้อมูลผิดพลาดให้ตอบ Y แล้วป้อนตำแหน่งข้อมูลผิดพลาดที่จำเอาไว้ แล้วป้อนข้อมูลใหม่เข้าไปแทนที่ เมื่อแก้ไขเสร็จแล้วให้ตอบ N จะได้ OUT PUT ที่หน้าจอดังนี้

Freq(Hz)	Trans.Loss	In(dB)	Out(dB)	Differ.	David value
180	0.640	127.35	126.23	1.120	0.480
190	1.020	126.49	124.61	1.880	0.860
200	0.632	126.59	124.54	2.050	1.417
205	0.918	127.77	125.28	2.490	1.571
210	1.442	128.66	125.34	3.320	1.878
215	2.420	129.43	124.48	4.950	2.530
220	3.850	130.31	123.38	6.930	3.080
225	4.253	131.42	123.93	7.490	3.237
230	4.847	130.25	121.93	8.320	3.473
235	4.534	129.25	121.37	7.880	3.346
240	3.612	128.65	122.05	6.600	2.988
245	2.457	128.36	123.35	5.010	2.553
250	1.460	129.34	125.99	3.350	1.890
260	0.606	130.37	128.36	2.010	1.403
270	1.020	127.67	125.79	1.880	0.860
280	0.835	128.52	127.01	1.510	0.675
290	0.680	129.37	128.17	1.200	0.520
300	0.522	128.59	127.69	0.900	0.376
310	0.470	129.34	128.53	0.810	0.340
320	0.261	126.98	126.53	0.450	0.189
330	0.186	127.95	127.63	0.320	0.134
350	0.064	126.57	126.46	0.110	0.046

DO YOU WANT TO SAVE FILE (Y/N)

ถ้าต้องการเก็บข้อมูลให้ตอบ Y โปรแกรมจะเก็บข้อมูลเป็น TEXT FILE เอาไว้ เมื่อต้องการใช้ให้เอาโปรแกรม Word เปิดแล้วสามารถพิมพ์ออกมาได้

วิธีการใช้งานโปรแกรมคำนวณหาค่า TL (Transmission Loss) และ โปรแกรม SPL (Sound Pressure Level) นำแผ่น โปรแกรม TL หรือ SPL. ใส่ใน Drive A: แล้วเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์จะปรากฏหน้าจอ ดังรูปที่ ข.1 แล้วป้อนข้อมูลตามความหมายข้างล่างนี้

Resonator Calculation

Variable Entry

# No. Resonator :	# M :
# Nh :	# Fr :
# Cross area :	# Lp :
# Lc :	# Radius :
# Volume :	# Uc :

Press ESC to end

NO. Resonator	= จำนวน Resonators ที่ต่อเรียงอนุกรมกัน (n)
M	= จำนวนทางขนานของ Resonators (m)
Nh	= จำนวนรูของ Connector (No)
Fr	= ความถี่สูงสุดในการทดลอง
Cross area	= พื้นที่หน้าตัดท่อซึ่งแบ่งตามจำนวนทางขนาน $s/m = S$ หน่วยเป็น m^2
Lp	= ระยะระหว่าง Resonator หน่วยเป็น m
Lc	= ความยาว Connector หน่วยเป็น m
Radius	= รัศมีของรู Connector หน่วยเป็น m
Volume	= ปริมาตรของ Resonator (V) หน่วยเป็น m^3
Uc	= ความเร็วลม (U) หน่วยเป็น m/s

Resonator Calculation

Variable Entry

# No. Resonator : 2	# M : 1
# Nh : 1	# Fr : 230
# Cross area : 0.00229	# Lp : 0.0
# Lc : 0.0232	# Radius : 0.0055
# Volume : 0.000165	# Uc : 0

Press ESC to end

รูปที่ ข.2

ตัวอย่างการป้อนข้อมูลเมื่อป้อนเสร็จแล้วยังมีผิดพลาดอีกให้เลื่อนไปที่ตำแหน่งผิดพลาด โดยใช้แป้นพิมพ์ที่มีลูกศร ซ้าย ขวา บน ล่าง เมื่อแก้ไขเสร็จแล้ว ให้กด ESC จอภาพจะขึ้น

Plot Data Yes...(Y) or No...(N)

ถ้ากด Y โปรแกรมจะให้ป้อนข้อมูลระยะความถี่และค่า TL ซึ่งได้จากโปรแกรม Davis ดังตัวอย่างข้างล่างนี้ ถ้ากด N โปรแกรมจะ พล็อตเส้น โค้งเฉพาะทฤษฎีเท่านั้น ไม่มีผลการทดลอง

```

Data Plot Entry
Frequency (Hz) [ End...-> 0 ] 100
Frequency (Hz) [ End...-> 0 ] 200
Frequency (Hz) [ End...-> 0 ] 300
Frequency (Hz) [ End...-> 0 ] 400
Frequency (Hz) [ End...-> 0 ] 500
Frequency (Hz) [ End...-> 0 ] 0
TL (dB) 10.5
TL (dB) 22.56
TL (dB) 30.5
TL (dB) 10
TL (dB) 11
Continue data Graph2 ( Y or N)

```

จากตัวอย่างการป้อนข้อมูลถ้าป้อนความถี่ของข้อมูลเสร็จแล้วให้กด 0 จะเลื่อนไปป้อนค่า TL ซึ่งป้อนค่าตามโปรแกรม Davis ซึ่งจำนวนข้อมูลจะเท่ากับความถี่ที่ป้อนเข้าไปก่อนหน้านี้ เมื่อสิ้นสุดแล้วโปรแกรมจะถามว่าป้อนข้อมูลอีกชุดหรือไม่ ถ้าตอบ Y จะป้อนข้อมูลชุดต่อไป ถ้าตอบ N จะไปพล็อตกราฟ ทฤษฎี และผลการทดลองร่วมกันดังข้อมูลบทที่ 4

ถ้าเป็นโปรแกรม SPL ก็คล้ายกัน เพียงแต่เปลี่ยนจากค่า TL เป็นค่า IN และ OUT แทน

โปรแกรม Davis curve

```

#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<ctype.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>

```

```
main()
```

```
{
```

```
float x[]={0,0.42,1.40,1.75,2.15,2.55,2.82,3.10,3.38,3.67,4.05,4.25,
4.45,4.62,4.75,4.90,5.05,5.15,5.25,5.30,5.40,5.45,5.55,5.56,
5.61,5.67,5.70,5.73,5.77,5.80,5.82,5.85,5.87,5.89,5.91,5.92,
5.94,5.94,5.96,5.97,5.98,5.99,5.99,5.99,5.99,5.99,5.99,
5.99,5.99,5.99,5.99,5.99,5.99};
```

```
float y[]={0.42,0.92,1.75,2.15,2.55,2.82,3.10,3.38,3.67,4.05,4.25,4.45,
           4.62,4.75,4.90,5.05,5.15,5.25,5.30,5.40,5.45,5.55,5.56,5.61,
           5.67,5.70,5.73,5.77,5.80,5.82,5.85,5.87,5.89,5.91,5.92,5.94,
           5.94,5.96,5.97,5.98,5.99,5.99,5.99,5.99,5.99,5.99,5.99,5.99,
           5.99,5.99,5.99,5.99,5.99,6.00};
```

```
int dk;
int sig=5;
int c,vv,dd,n,nh,m;
float b[6][53];
float dano,error;
char ans,ans1,datano[10];
```

```
do
{
    clrscr();
    printf("DATA No.");
    scanf("%f",&dano);
    gcvt(dano,sig,datano);
    printf("Amount Data = ");
    scanf("%d",&dk);
    printf(" u = ");
    scanf("%d",&vv);
    printf(" Amount KAPONG/ROW [n] = ");
    scanf("%d",&n);
    printf(" Amount ROW [m] = ");
    scanf("%d",&m);
    printf(" Amount RU = ");
    scanf("%d",&nh);
    for (c=1;c<=dk;++c)
    {
```

เอกสารนี้เป็น `printf("No. %d",c);` สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

printf(" f(Hz) ");
scanf("%f",&b[0][c]);
}
printf("\n");
for (c=1;c<=dk;++c)
{
    printf("No. %d",c);
    printf(" IN(dB) ");
    scanf("%f",&b[1][c]);
}
printf("\n");
for (c=1;c<=dk;++c)
{
    printf("No. %d",c);
    printf("  OUT(dB) ");
    scanf("%f",&b[2][c]);
}

do
{
    printf(" DO YOU WANT TO EDIT (Y/N)");
    ans = getche();
    printf("\n");
    if (toupper(ans) == 'Y')
    {
        printf("EDIT No. ");
        scanf("%d",&c);
        printf(" f(Hz) ");
        scanf("%f",&b[0][c]);
        printf("IN(dB) ");
        scanf("%f",&b[1][c]);
        printf("  OUT(dB) ");
    }
} while (toupper(ans) == 'Y');

```

```

scanf("%f",&b[2][c]);
}
}
while(toupper(ans) == 'Y');
for (c=1;c<=dk;++c)
{
b[3][c]=(b[1][c]-b[2][c]);
dd=floor(b[3][c]);
if (dd>53){
dd=53;
}
if (b[3][c]<1)
{
dd=0;
}
b[4][c]=0;
b[6][c]=x[dd]+((y[dd]-x[dd])*(b[3][c]-dd));
error=abs((b[6][c]-b[4][c])/b[4][c]);
}
while(error<0.00001);
b[4][c]=b[6][c];
b[3][c]=(b[1][c]-b[2][c]);
b[5][c]=(b[3][c]-b[4][c]);
if (b[3][c]<=0){
b[4][c]=0;
b[5][c]=b[3][c]-b[4][c];
}
}
printf("\n");
printf(" u = %d",vv);
printf(" [m/s] ");
printf(" n = %d",n);

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

printf(" m = %d",m);
printf(" no = %d\n",nh);
for (c=1;c<=dk;++c)
{
    if (c==1) {
        printf("          DATA OF TRANSMISSION LOSS\n");
        printf("-----\n");
        printf(" Freq(Hz) Trans.Loss  In(dB)  Out(dB)  Differ.  David value\n");
    }

    printf(" %3.0f  %10.3f  %6.2f  %6.2f  %8.3f  %8.3f"
    ,b[0][c],b[5][c],b[1][c],b[2][c],b[3][c],b[4][c]);
    printf("\n");
}
printf("-----\n");
printf(" DO YOU WANT TO SAVE FILE (Y/N)");
ans = getche();
printf("\n");
if (toupper(ans) == 'Y') {
    FILE *fp;
    if((fp=fopen(datano,"w"))==NULL){
        printf("Error in opening file \n");
        printf("\007");
        exit(0);
    }

    fprintf(fp,"\n");
    fprintf(fp," u = %d",vv);
    fprintf(fp," [m/s] ");
    fprintf(fp," n = %d",n);
    fprintf(fp," m = %d",m);
    fprintf(fp," no = %d\n",nh);
    for (c=1;c<=dk;++c) {

```

เอกสารนี้เป็น if (c==1) { วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fprintf(fp,"          DATA OF TRANSMISSION LOSS\n");
fprintf(fp,"-----\n");
fprintf(fp," Freq(Hz)  Trans.Loss  In(dB)  Out(dB)  Differ.  David value\n");
}

fprintf(fp," %3.0f  %10.3f  %6.2f  %6.2f  %8.3f  %8.3f"
,b[0][c],b[5][c],b[1][c],b[2][c],b[3][c],b[4][c]);

fprintf(fp,"\n");
}

fprintf(fp,"-----\n");

fclose(fp);
}

printf(" DO YOU WANT TO RETURN (Y/N)");
ans1 = getche();
}while(toupper(ans1)!='Y');
}

```

โปรแกรมที่ใช้คำนวณหาค่า TRANSMISSION LOSS ของ RESONATORS

```
#include<complex.h>
#include<stdlib.h>
#include<conio.h>

#define DENSE 1.17
#define SOUNDVEL 340
#define K (2 * M_PI * f) / SOUNDVEL
#define W 2*M_PI*f

struct item {
    char reso[3];
    char Nh[8];
    char C_area[10]; /* Cross area */
    char Lp[10];
    char Lc[10];
    char a[10];
    char V[10];
    char Uc[10];
    char Fr[10];
};

typedef complex array[2][2];
void arrprint(array);
void mul_matrix(array,array,array);
void array_input(array,complex,complex,complex,complex);
void array_assign(array,array);
void cal_tl(int);
double calculate(struct item *,int);
array arr0,arr1,arr2,arr3,arr4;
double calculate(struct item *data,int f)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

complex zop,zc,zop1;                                /* zop = 1/zo */
complex c0,ap,bp,cp,dp,fnh;
complex temp,ttl;

double tl,ttl;
int ireso;
double fLc,fa;
double fC_area,fLp,fV,fFr;

ireso = atoi(data->reso);
fC_area = atof(data->C_area);
fLp = atof(data->Lp);
fLc = atof(data->Lc);
fV = atof(data->V);
fa = atof(data->a);
fnh = atof(data->Nh);
fFr = atof(data->Fr);
zop = fC_area / (DENSE * SOUNDVEL);
temp = K * fLp;
ap = cos(temp);
dp = cos(temp);
bp = (sin(temp)/zop) * complex(0,1);
cp = (sin(temp)*zop) * complex(0,1);

temp = (fFr*fFr);
c0 = (temp*4*M_PI*M_PI*fV)/115600;

zc = ((1.17*340*((f/fFr)-(fFr/f)))/(sqrt(c0*fV))) * complex(0,1);
if (zc!=0){
    array_input(arr1,1,0,zop,1);
    array_input(arr2,1,0,1/zc,1);
    array_input(arr3,ap,bp,cp,dp);
}

```

```

    cal_tl(ireso);
}

ttt=abs(arr4[1][0])/(abs(zop)*2);
tl = 10* log10( pow(ttt,2));
return(tl);
}

void cal_tl(int reso)
{
    int i;
    array temp1,temp2,temp3,temp4;
    mul_matrix(arr1,arr2,temp1);
    array_assign(arr3,temp2);
    if ( reso == 1 ) {
        mul_matrix(temp1,arr1,arr4);
    }
    else {
        for (i=reso;i>0;i--) {
            if(i==1) {
                mul_matrix(temp1,arr1,arr4);
                return;
            }
            mul_matrix(temp1,temp2,temp3);
            mul_matrix(temp3,arr2,temp4);
            array_assign(temp4,temp1);
        }
    }
}

void arrprint(array arrayin)
{
    int i,j;

```

เอกสารนี้เป็น for (i=0;i<2;i++) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        for (j=0;j<2;j++)
            cout << arrayin[i][j] << "\n";
    }

void mul_matrix(array in1,array in2,array out)
{
    int i,j,k;

    for (i=0;i<2;i++)
        for (j=0;j<2;j++)
            out[i][j] = 0;

    for (i=0;i<2;i++)
        for (j=0;j<2;j++)
            for (k=0;k<2;k++)
                out[i][j] += in1[i][k] * in2[k][j];
}

void array_input(array in,complex a,complex b,complex c,complex d)
{
    in[0][0] = a;
    in[0][1] = b;
    in[1][0] = c;
    in[1][1] = d;
}

```

```

void array_assign(array in1,array in2)
{

```

```

    in2[0][0] = in1[0][0];
    in2[0][1] = in1[0][1];
    in2[1][0] = in1[1][0];
    in2[1][1] = in1[1][1];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

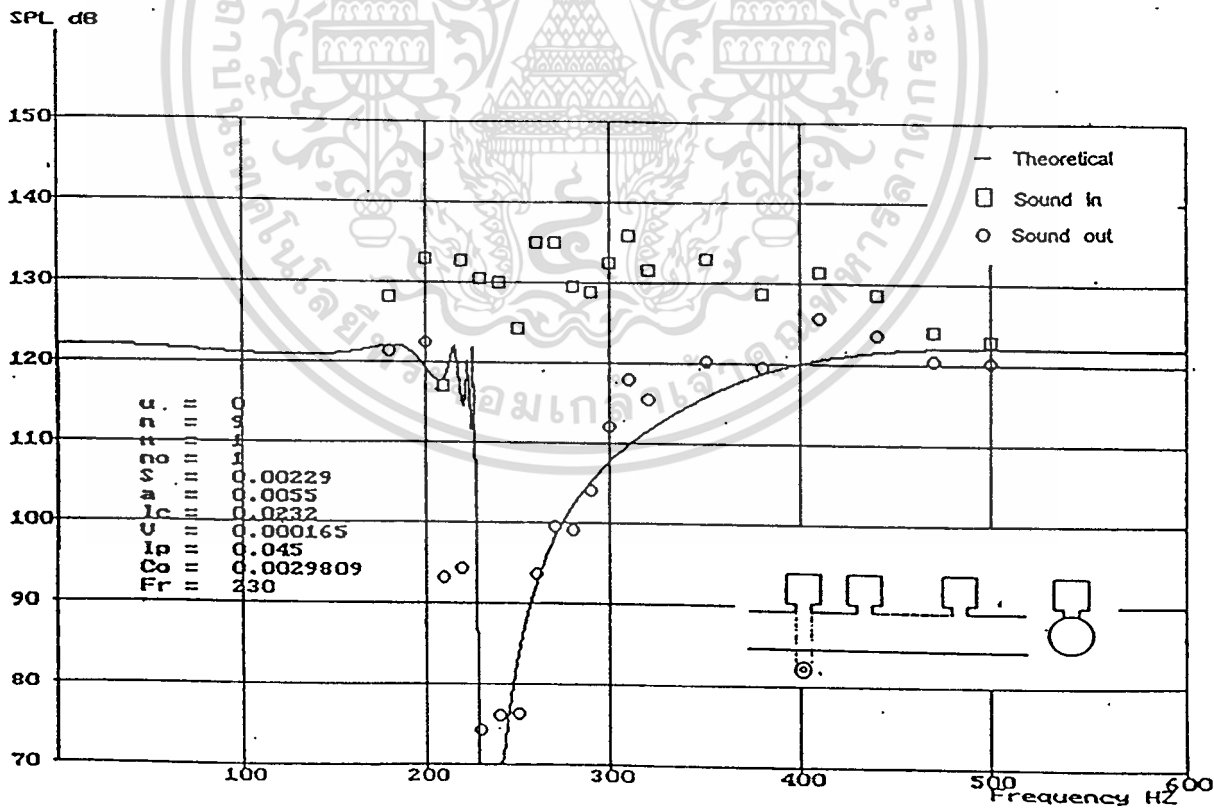
การหาค่า SOUND PRESSURE LEVEL(SPL)

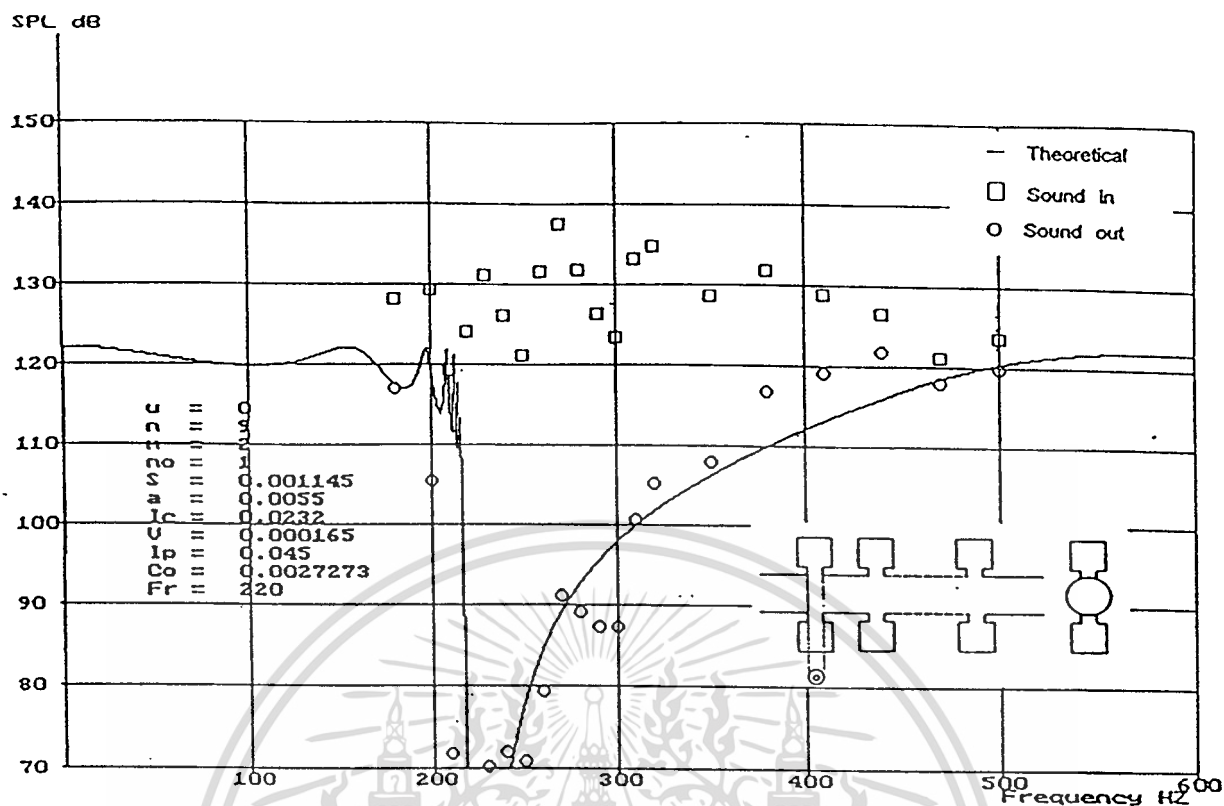
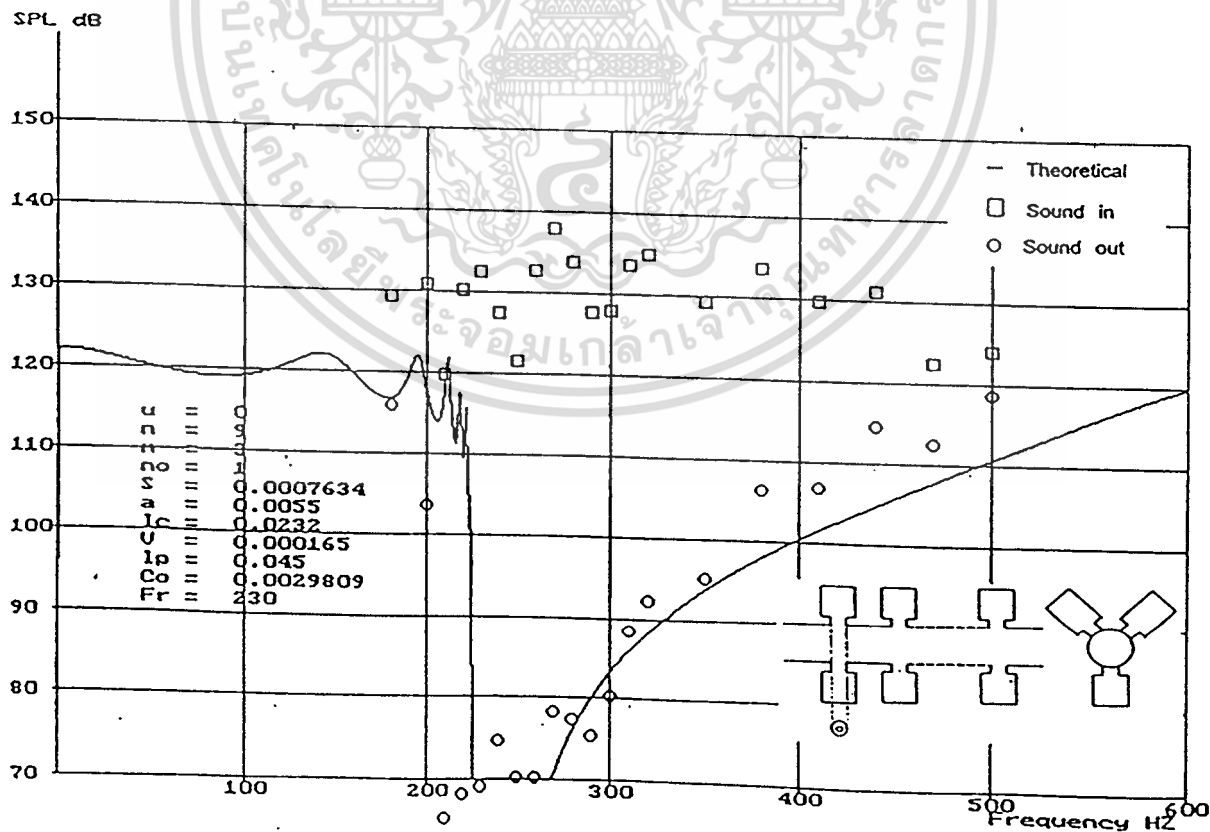
การหาค่า SPL จะแสดงให้เห็นความดังของเสียง ที่ก่อนเข้า Resonator และออกมาจาก Resonator มีการลดลงเล็กน้อยเพียงใด สามารถหาได้จากสมการ

$$SPL = 20 \log \left| \frac{A^2}{A_1} \right|^2 \tag{ค.1}$$

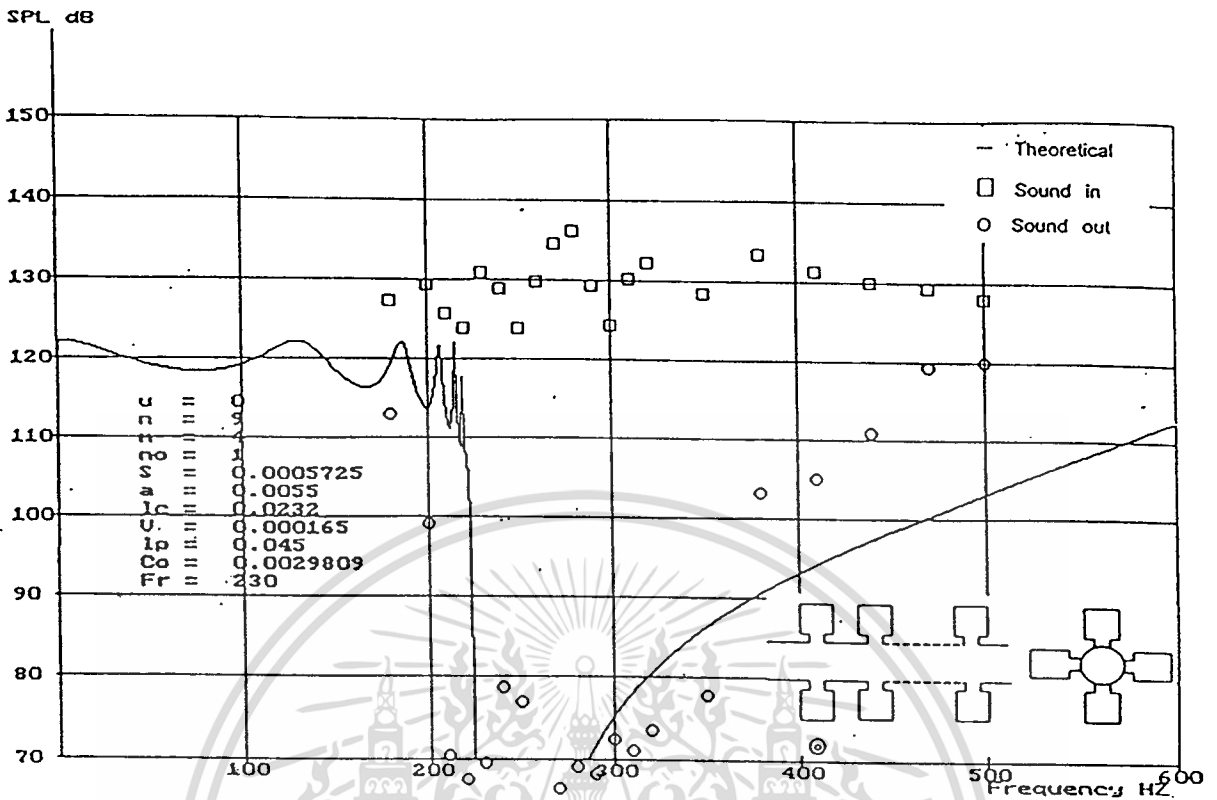
$$\therefore SPL = -20 \log \left| \frac{Z_0 C}{2} \right|^2 \tag{ค.2}$$

นำสมการไปเขียนโปรแกรมใช้งานในภาคผนวก ข.(ใช้ตัวสัมพันธ์เดียวกันกับการหาค่า TL แต่เปลี่ยนจากค่า TL ในสมการหลักเป็น สมการ ค.2)



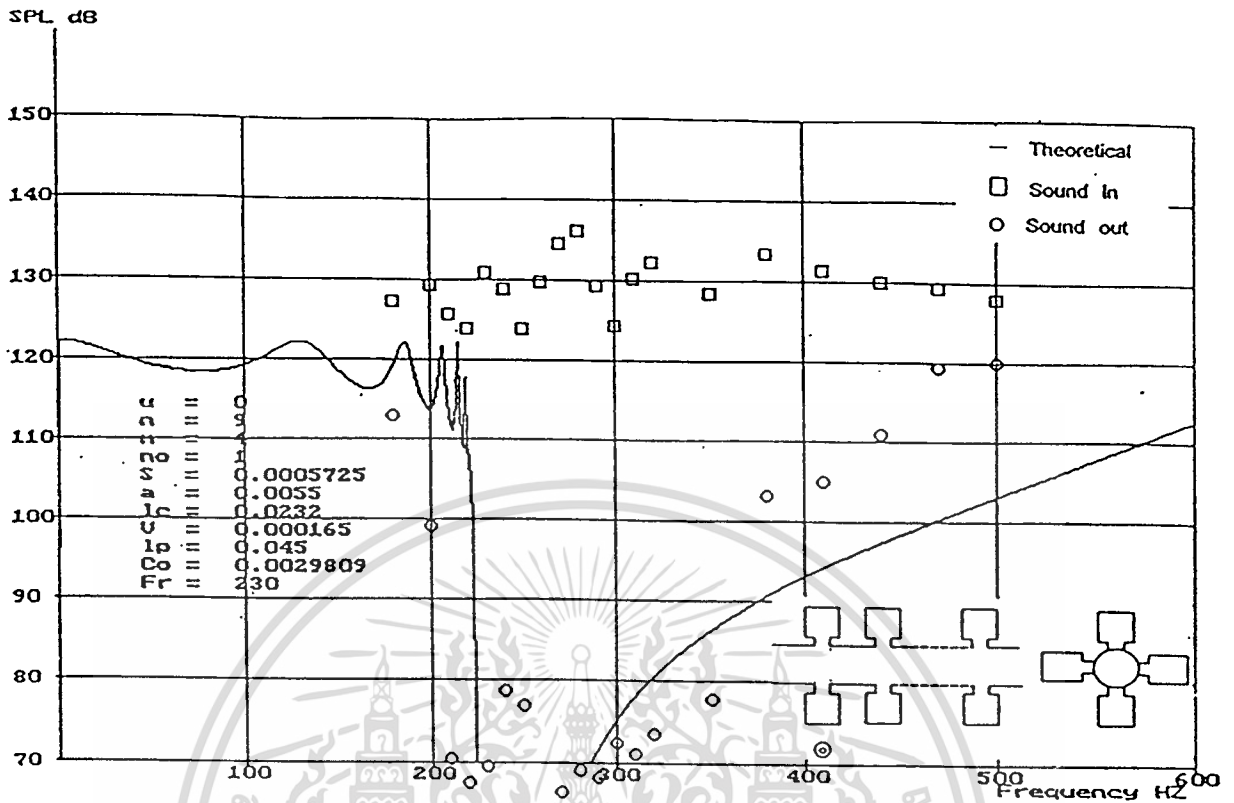
รูปที่ ค.2 $n=9, M=2$ 

เอกสารรูปที่ ค.3 $n=9, M=3$ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

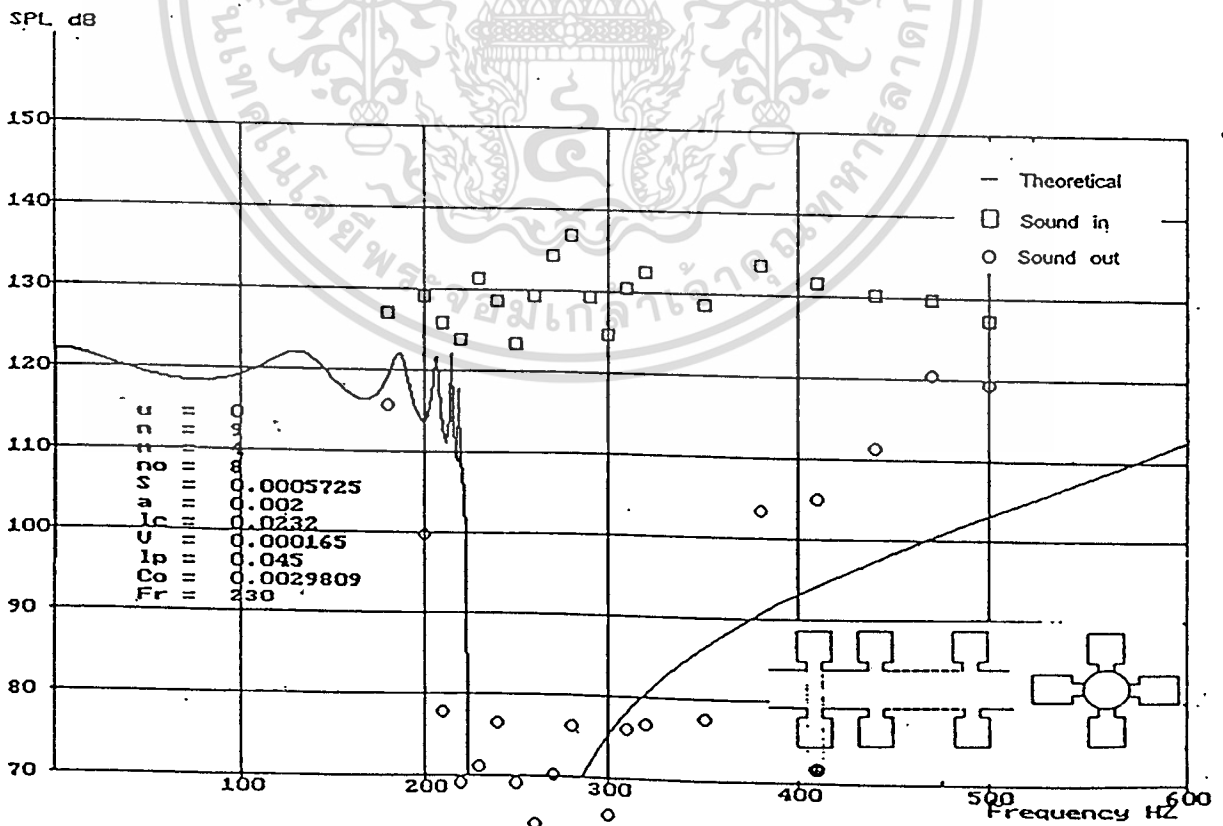


รูปที่ ก.4 n=9 , M=4

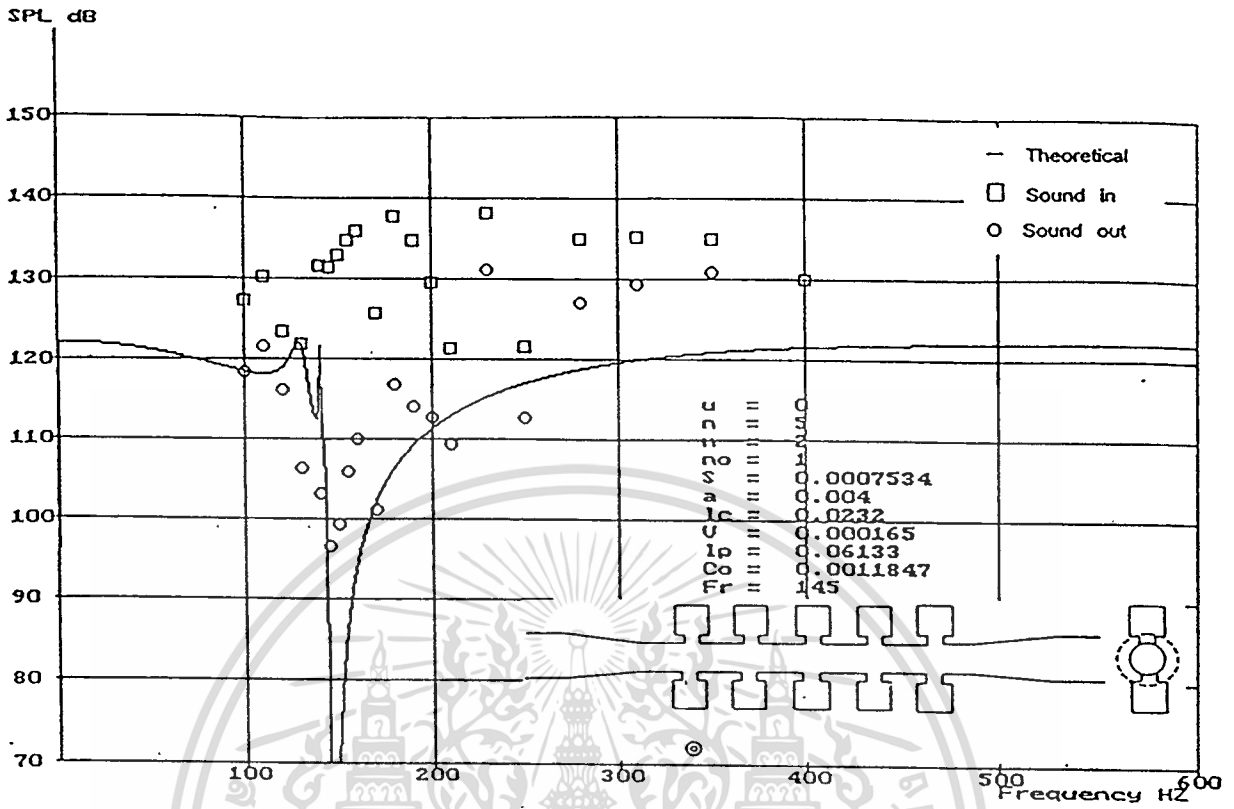
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



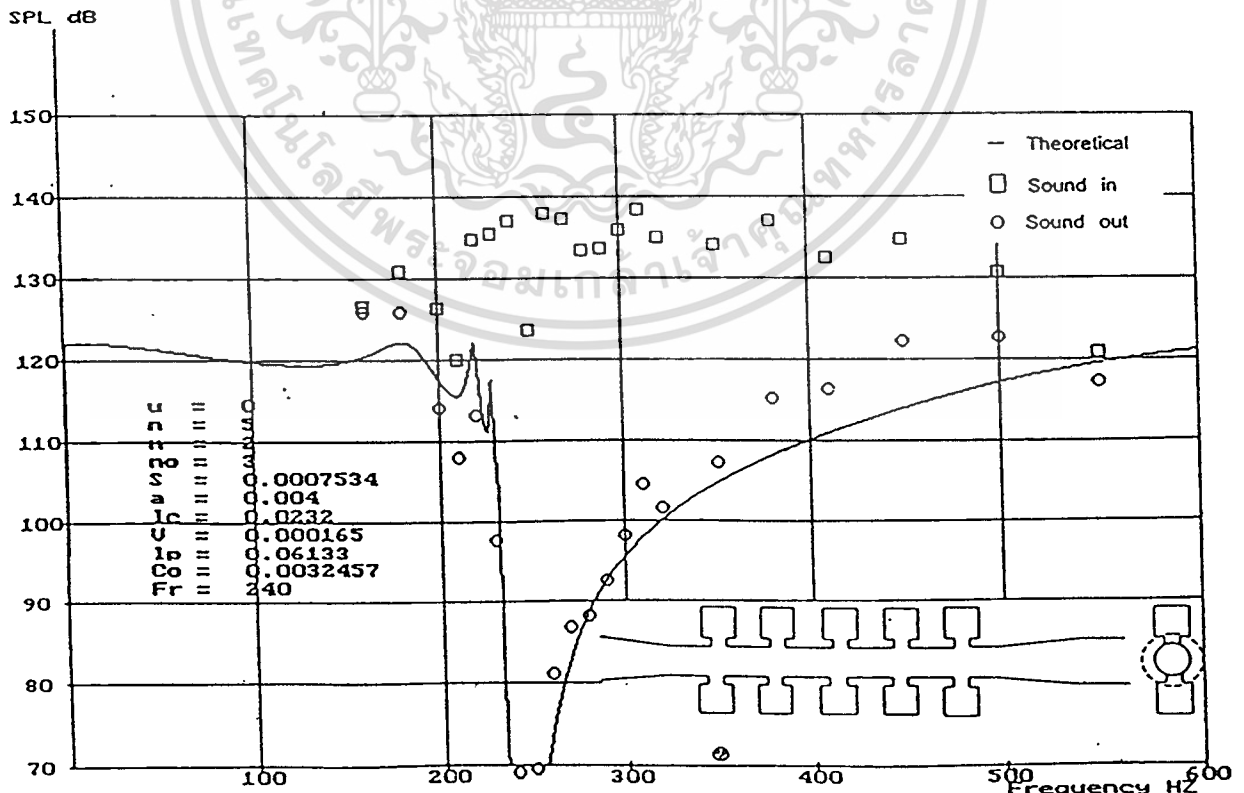
รูปที่ ค.5 $n = 9, M = 4, n_0 = 1$



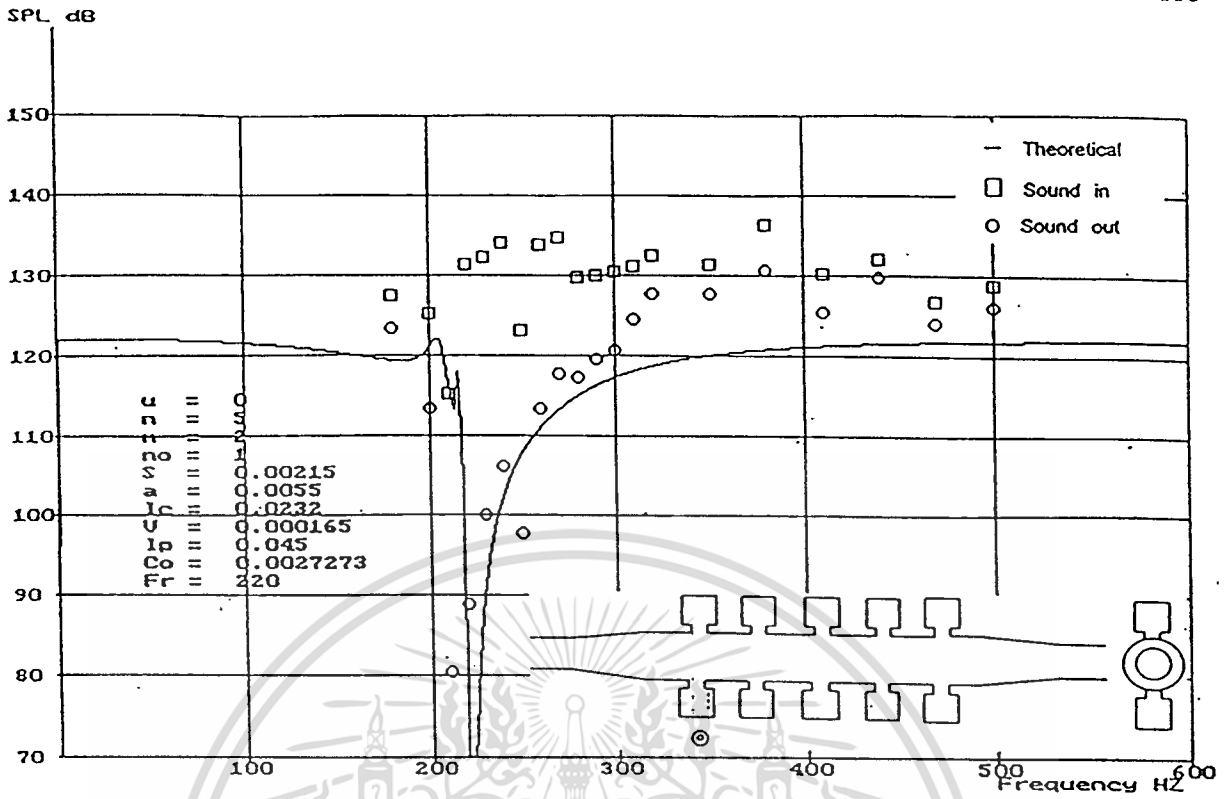
เอกสารรูปที่ ๓.6 n=9, M=4, no=8 ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



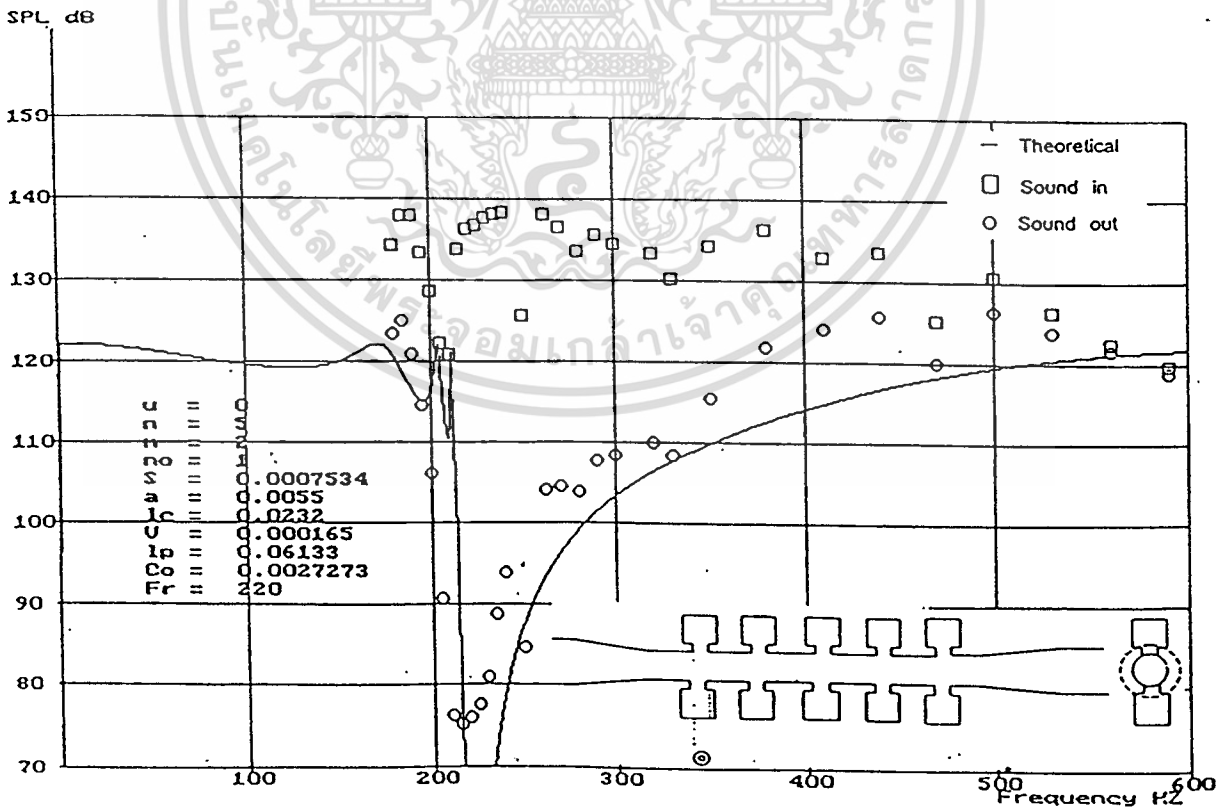
รูปที่ ค.7 n = 5, M = 2, no = 1



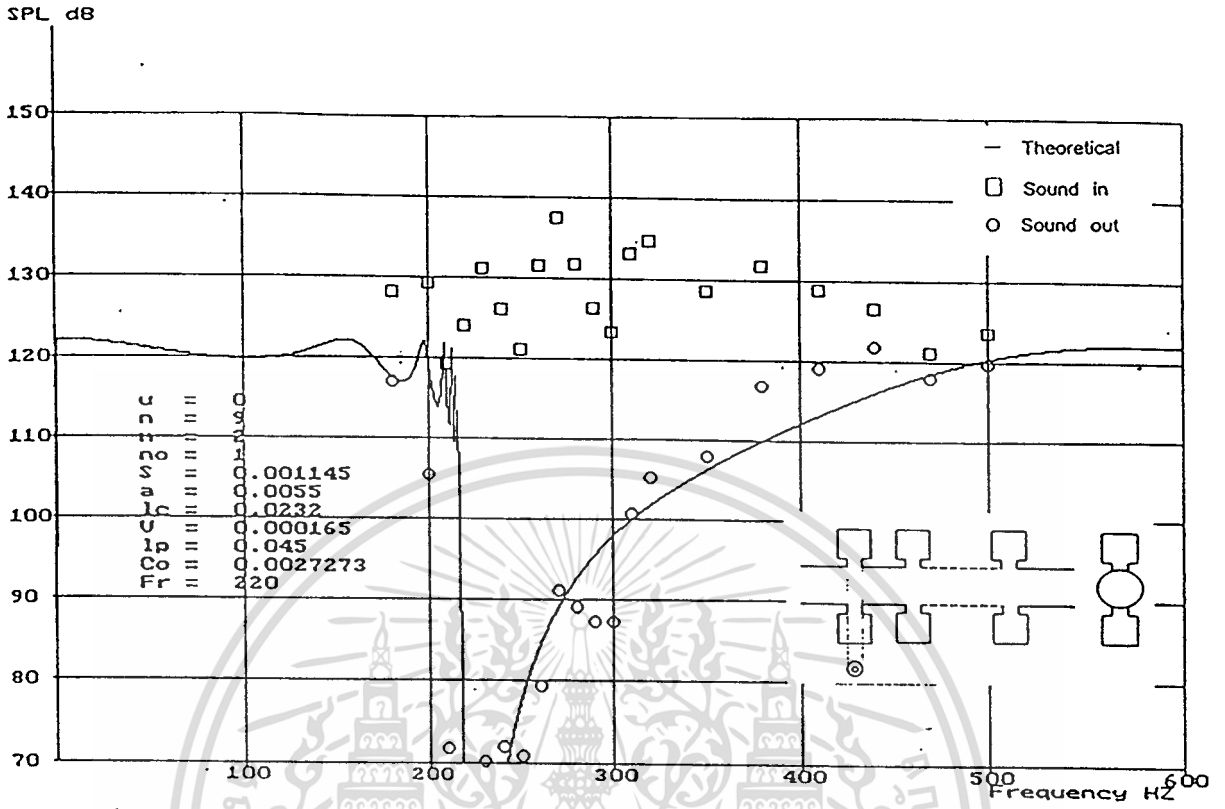
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ค.7 n = 5, M = 2, no = 3
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



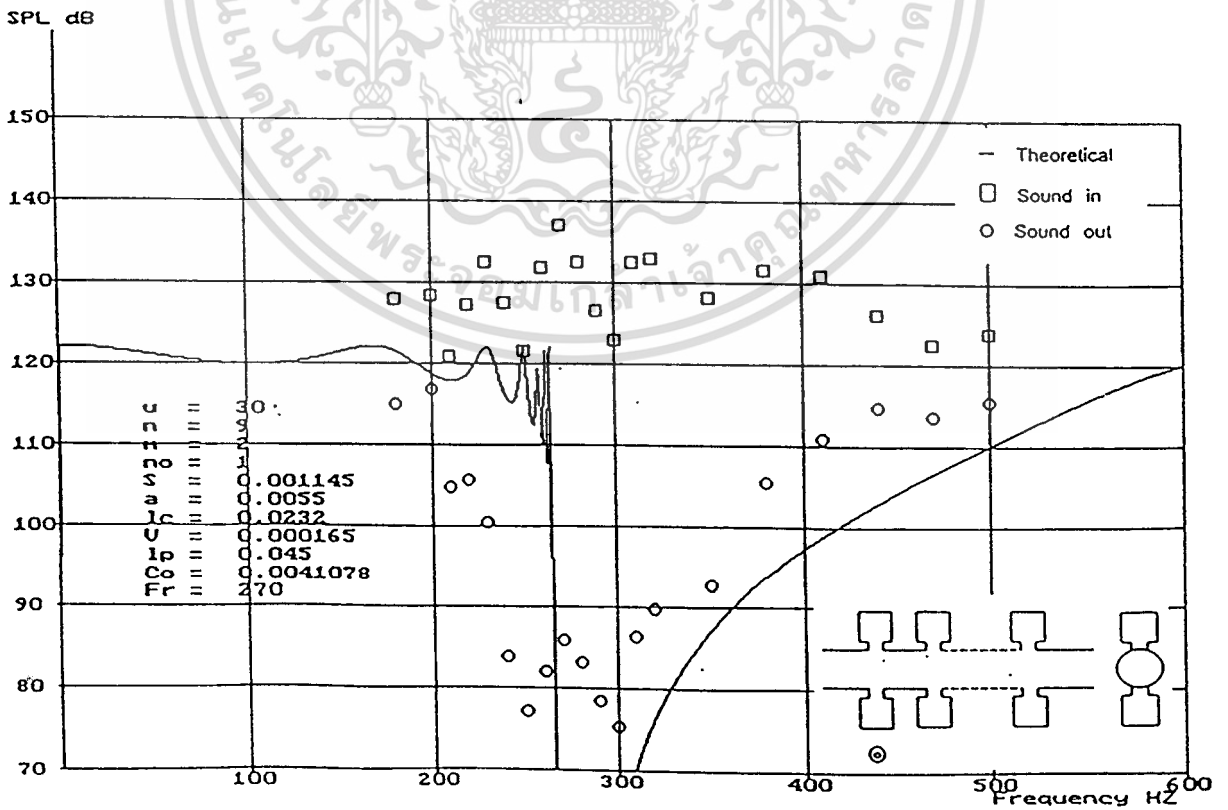
รูปที่ ๙ $n=5$, $M=2$, บนท่อนขยาย



เอกสารรูปที่ ๑๐ $n=5$, $M=2$, บนท่อลดงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.11 $n = 9, M = 2, u = 0 \text{ m/s}$



รูปที่ ค.12 $n = 9, M = 2, u = 30 \text{ m/s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากรูปที่ ค.1 การทดสอบ Helmholtz Resonators ในการวัด แบบ SPL (Sound Pressure Level)

- จากรูปที่ ค.1.1 - รูป ค.1.4 ต่อแบบอนุกรมและขนาน เมื่อความเร็วลม $v = 0 \text{ m/s}$ ซึ่งต่ออนุกรม(n)คงที่ เท่ากับ 9 และต่อขนาน(m) เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยจำนวนรู connector (no) เท่ากับ 8 รู

- จากรูปที่ ค.1.9 และ รูปที่ ค.1.10 ท่อลดและขยาย ที่ต่ออนุกรม(n) เท่ากับ 5 ต่อขนาน(m) เท่ากับ 2 โดยจำนวนรู connector (no) เท่ากับ 1 รู ความเร็วลม $v = 0 \text{ m/s}$

- จากรูปที่ ค.1.11 และ รูปที่ ค.1.12 ที่ความเร็วลมต่างกัน โดยที่การต่อ Resonators ด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 9 ด้านขนาน(m) เท่ากับ 2 และมีจำนวน connector(no) เท่ากับ 1 รู ความเร็วลม 0 และ 30 m/s

- จากรูปที่ ค.1.5 และ รูปที่ ค.1.6 เปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดรู ที่ท่อลด ความเร็วลม $v = 0 \text{ m/s}$ เมื่อต่อ Resonators ด้านอนุกรม(n) เท่ากับ 5 ด้านขนาน(m) เท่ากับ 2 โดยกำหนดรู connector(no) เท่ากับ 1 รู และรู connector (no) เท่ากับ 3 รู (พื้นที่หน้าตัด 3 เท่าของ 1 รู)

ประวัติผู้เขียน

นายบุญชัย ศิลปกิจวงษ์กุล เกิดวันที่ 30 กรกฎาคม 2509 ที่จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งทอ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต
เทเวศน์ ในปีการศึกษา 2534



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้