

พฤติกรรมเสียงของอุปกรณ์ลดเสียงความถี่สูงแบบ HELMHOLTZ

ACOUSTICAL CHARACTERISTIC OF HELMHOLTZ RESONATOR
AT HIGH FREQUENCY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-203-3

ACOUSTICAL CHARACTERISTIC OF HELMHOLTZ RESONATOR
AT HIGH FREQUENCY



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

2001

ISBN 974-648-203-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไปดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารฉบับนี้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือข้อผิดพลาดใดๆ กรุณาแจ้งไปยังฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2909-1111

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมเสียงของอุปกรณ์ลดเสียงความถี่สูงแบบ Helmholtz
นักศึกษา นายปราโมทย์ เรืองฤทธิ์
รหัสประจำตัว 41062022
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ. 2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. อัครเดช สินธุ์ภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้แสดงพฤติกรรมการลดเสียงโดยใช้ Helmholtz Resonator ที่สามารถปรับปริมาตรได้ ซึ่งนำมาติดตั้งเข้ากับผนังท่อกลม และท่อสี่เหลี่ยม เพื่อหาค่าการลดเสียงในช่วงความถี่ต่างๆกัน สมการ Transmission loss (TL) ได้มาจากทฤษฎีพื้นฐานมิติเดียว โดยคำนวณหาค่า Transmission loss เปรียบเทียบกับผลการทดลอง เมื่อมีและไม่มีความเร็วลมที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองกระบวนการเกิดเสียงรบกวนในระบบท่อ และแหล่งของเสียงมาจาก Loud-Speaker ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ จากการทดลองพบว่าปริมาตรของ Helmholtz Resonator มีพฤติกรรมต่อเสียงที่ลดลง ปริมาตรน้อยจะสามารถลดเสียงได้ในช่วงความถี่สูง ส่วนปริมาตรมากสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งช่วงความถี่ในการลดเสียงกว้างขึ้น Helmholtz Resonator เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่สามารถนำมาลดเสียงในระบบท่อได้ดี และยังประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง นอกจากนี้ยังสามารถคาดการณ์ระดับเสียงที่ลดลงว่าเป็นตามทฤษฎีหรือไม่

Thesis Title	Acoustical Characteristic of Helmholtz Resonator at High Frequency
Student	Mr. Pramot Ruangrit
Student ID.	41062022
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Akaradech Sindhuphak

ABSTRACT

This thesis indicates the acoustic characteristic of noise reduction. The Helmholtz Resonator can be adjust volume and locate on the wall of circle duct and square duct which are used for attenuation the noise of particular frequency regions. The transmission loss (TL) equation derived from one - dimensional theory. The calculated of transmission loss characteristic is comparison with the result of experiment with velocity flow and without velocity flow at room temperature. This thesis has indicated noise appearance in the pipe system. The sound source from a loud-speaker that can be adjust the frequency. The result of experiment found that volume of Helmholtz Resonator has the acoustic characteristic of noise reduction. Small volume can reduce noise at high frequency when volume is increased, it can reduce noise at low frequency and make more band width of frequency. Helmholtz Resonator is small equipment that can reduce noise in the pipe system and use small area for installation, predict the level of noise reduction referring to the theory.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับ พฤติกรรมเสียงของอุปกรณ์ลดเสียงความถี่สูงแบบ Helmholtz จาก รศ.อัครเดช สิ้นธุภัก ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และเมตตาจากท่าน จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยเหลือแก้ไขและให้คำแนะนำในบางจุด รวมทั้งเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ซึ่งมีส่วนช่วยให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหานั้น

ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่สนับสนุนส่งเสริมในการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งร่วมในการทำวิจัย และโครงการ JICA ซึ่งสนับสนุนเครื่องมือ

ขอขอบคุณ คุณ กาญจนา บัวมี ,คุณ วนิดา เศรษฐมเดชา และ คุณ เพ็ญศรี ต้นประยูร ที่ช่วยเป็นกำลังใจ และช่วยเหลือในงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ บริษัท สยามนิสสันอโตโมบิล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปราโมทย์ เรืองฤทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์	XIII
สัญลักษณ์ตัวห้อยข้างใต้ตัวอักษร.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.4.1 Silencers สำหรับลดเสียงในท่อ.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและพื้นฐาน.....	9
2.1 พฤติกรรมของคลื่นเสียง.....	9
2.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของคลื่น.....	9
2.1.2 อากาศและคุณสมบัติ.....	10
2.1.3 Simple Harmonic Motion และ Sine Wave.....	10
2.1.4 คลื่นเสียงในอากาศ.....	12
2.1.5 คลื่นอิสระที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า.....	14
2.1.6 การอ้อมของคลื่นที่ผ่านวัตถุที่ขวางหน้า.....	24
2.1.7 ส่วนประกอบของคลื่น.....	25
2.2 Transmission ผ่านในท่อ.....	33
2.2.1 Acoustic Impedance.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.2 The Helmholtz Resonator.....	34
2.2.2.1 ความแข็งของมวลภายในปริมาตรถึงปิด.....	35
2.2.2.2 มวลของ Plug Fluid.....	35
2.2.2.3 ความต้านทานการแผ่รังสี.....	35
2.2.2.4 แรงเคลื่อนที่.....	35
2.2.3 การสะท้อนของคลื่นในท่อ.....	38
2.2.4 ผลที่ได้ของ Helmholtz Resonator.....	40
2.3 Coefficient β	45
2.3.1 ปลายปิด.....	46
2.3.2 ปลายเปิด.....	46
บทที่ 3 การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.1 การสร้างอุปกรณ์ประกอบในการทดลอง.....	48
3.2 ระบบท่อที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.2.1 ระบบท่อสำหรับทดลองแบบ Without Flow.....	48
3.2.2 ระบบท่อสำหรับทดลองแบบ With Flow.....	49
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดในการทดลอง.....	49
3.3.1 ท่อนำเสียงแบบกลม.....	49
3.3.2 ท่อนำเสียงแบบเหลี่ยม.....	49
3.3.3 Oscillator.....	50
3.3.4 Amplifier.....	50
3.3.5 Driver Unit.....	50
3.3.6 Probe Tube.....	50
3.3.7 Microphone.....	50
3.3.8 Pre-Amplifier.....	50
3.3.9 FFT Analyzer.....	50
3.3.10 Blower.....	51
3.3.11 Inverter.....	51

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.12 Anemometer.....	51
3.3.12 Calibrator.....	51
3.4 Silencer แบบ Helmholtz Resonator.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
4.1 วิธีการทดลอง.....	53
4.1.1 การทดลองโดยใช้ Helmholtz Resonator กรณีไม่มีความเร็วลม.....	53
4.1.2 การทดลองโดยใช้ Helmholtz Resonator กรณีมีความเร็วลม.....	53
4.2 การบันทึกผลการทดลอง.....	53
4.3 ผลการทดลอง.....	54
4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลและวิจารณ์.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์.....	93
5.4 แนวทางวิจัยในอนาคต.....	93
บรรณานุกรม.....	94
ภาคผนวก ก.....	95
ส่วน A การหาค่า Attenuation ของ Mufflers ชนิด Expansion Chamber.....	95
ส่วน B การหาค่า Attenuation ของ Mufflers ชนิด Resonator.....	107
ส่วน C การหาค่า Attenuation ของ Mufflers ใน Tail Pipe.....	112
ส่วน D การรวมกัน.....	116
ภาคผนวก ข Program ที่ใช้ในการทดลอง.....	121
บทความการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14	128
ประวัติผู้เขียน.....	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
ก.1 ค่าที่ได้จากการคำนวณ Attenuation ที่ได้จากการวัด	102
ก.2 เปรียบเทียบ Co ที่ได้จากการคำนวณกับค่า Co ที่มาจากรายการตัวเลข 12 ถึง 14.....	103
ก.3 เปรียบเทียบสองวิธีการคำนวณค่า Attenuation ของ Single Resonator Muffler กับ Tail Pipe.....	104
ก.4 ความถี่ Cut-off สำหรับ Expansion Chambers แบบคู่.....	106



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การสั่นสะเทือนของต้นกำเนิดเสียงและมีผลกระทบต่ออนุภาคของอากาศที่มีกระทบยัง แกว่ง.....	2
1.2 ความเข้มของเสียงเท่ากัน เสียงดังจากลมที่เป่าหรือการดูดอากาศซึ่งจะอยู่ในช่วงความ สูง.....	3
1.3 Transmission loss in mass controlled.....	3
1.4 อุปกรณ์สำหรับวัดการสะท้อนกลับ.....	4
1.5 ลักษณะของ Silencers.....	4
1.6 ลักษณะของ Silencers ชนิด Resonator.....	6
2.1 Transmission ของ Elastic Wave ที่ให้กับ coil spring a) สภาพหยุดนิ่ง b) การกด spring ให้ เคลื่อนที่ c) การกดให้ spring เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายมือ N คือ สภาพปกติ C คือ สภาพการกด และ R คือ สภาพการขยายออก.....	9
2.2 ตัวอย่าง Harmonic Motion และ Sine Wave a) จุด P1 เคลื่อนที่เป็นวงกลมคงที่เท่ากับ ความเร็ว V และ b) เคลื่อนที่และลงระหว่าง +a และ -a c) จะเหมือนกับ Projection d) เคลื่อนที่ไปทางซ้าย ซึ่งที่ความเร็ว c	11
2.3 การแพร่ Plane Wave ซึ่งคลื่นจะเคลื่อนที่จากซ้ายไปทางขวาของท่อ คลื่นจะมีการเปลี่ยน แปลงใน Sound Wave 3 จุด $x = 0, x = x_1$ และ $x = x_2 = 2x_1$	12
2.4 แสดง Sound Pressure ใน Plane Free Progressive สำหรับ Forward Traveling Wave 20 จุด.....	17
2.5 แสดง Sound Pressure ใน Plane Free Progressive สำหรับ Backward Traveling Wave 20 จุด.....	19
2.6 แสดง Sound Pressure ของ Plane Standing Wave ที่ 20 จุด.....	20
2.7 One และ Two-Dimensional Wave.....	24
2.8 การกระจายผ่านท่อเล็ก.....	25
2.9 การรวมสองความสัมพันธ์ Harmonically กับ Sine Wave ก่อให้เกิดคลื่นที่ซับซ้อน.....	27
2.10 การรวมสองความสัมพันธ์ Harmonically กับ Sine Wave ที่มีผลต่างใน Phase ณ.จุดเวลาชั่วขณะเดียวก็ตาม ความดันที่ถูกวัดด้วยไมโครโฟนจะเป็น.....	28
2.11 แสดงเหมือนกับรูปที่ 2.9 และ 2.10 คลื่นของคลื่นที่ต่าง Phase.....	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 การแสดง Line Spectrum Harmonically b) แสดง line spectrum Inharmonically c) การต่อเนื่องของ Spectrum d) การรวม line และความต่อเนื่องของ Spectrum (เกี่ยวกับการ Spectrum).....	30
2.13 กราฟแสดงการเพิ่มความเข้มและความกว้างเสียง.....	32
2.14 แสดงลักษณะ Helmholtz Resonator.....	34
2.15 การส่งและการสะท้อนของคลื่นในท่อ.....	38
2.16 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดในท่อ.....	39
2.17 แสดงคลื่นในท่อ Helmholtz Resonator.....	41
3.1 แสดงระบบท่อที่ใช้สำหรับการทดลอง Without Flow.....	48
3.2 แสดงอุปกรณ์สำหรับการทดลอง With Flow.....	49
3.3 แสดงท่อนำเสียงแบบกลม.....	49
3.4 แสดงท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม.....	49
3.5 แสดง Oscillator.....	50
3.6 Microphone (From Bruel & Kjaer Instruments).....	50
3.7 Digital real-time frequency analyzer (From Bruel & Kjaer Instruments).....	51
3.8 Acoustic Calibrator (From Bruel & Kjaer Instruments).....	51
3.9 แสดงรูป Helmholtz Resonator.....	52
4.1 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m.....	54
4.2 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m.....	55
4.3 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m.....	56
4.4 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m.....	57
4.5 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m.....	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m.....	59
4.7 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m.....	60
4.8 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m.....	61
4.9 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m.....	62
4.10 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m.....	63
4.11 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m.....	64
4.12 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m.....	65
4.13 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m.....	66
4.14 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m.....	67
4.15 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m.....	68
4.16 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m.....	69
4.17 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m.....	70
4.18 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m.....	71

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m.....	72
4.20 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m.....	73
4.21 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m.....	74
4.22 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m.....	75
4.23 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m.....	76
4.24 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m.....	77
4.25 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m.....	78
4.26 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m.....	79
4.27 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m.....	80
4.28 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m.....	81
4.29 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m.....	82
4.30 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m.....	83
4.31 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m.....	84

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m.....	85
4.33 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m.....	86
4.34 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m.....	87
4.35 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m.....	88
4.36 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m.....	89
ก.1 แสดงไดอะแกรม Expansion Chamber ชนิดเดี่ยว.....	97
ก.2 แสดงไดอะแกรม Expansion Chamber ชนิดคู่.....	99
ก.3 แสดงไดอะแกรม Expansion Chamber ชนิดคู่ที่ต่อ Internal connecting tube.....	100
ก.4 แสดงไดอะแกรม Single resonator muffler.....	109
ก.5 แสดงไดอะแกรมกรณี Connector สั้นและ Chamber ยาว.....	110
ก.6 แสดงรายละเอียดของ Single-resonator muffler กับ tail pipe.....	114
ก.7 แสดงไดอะแกรมที่ใช้ Resonator 2 ชุด ที่ความถี่แตกต่างกัน.....	117
ก.8 แสดงไดอะแกรมส่วนประกอบของ Muffler ร่วมกับ Expansion Chamber.....	119
ข.1 ค่าแก้ไขความถูกต้องจากการวัดค่า Attenuation.....	128
ข.2 แสดงผลการทดลองโดยการปรับแก้ข้อมูลความถูกต้อง.....	128

สัญลักษณ์

a = รัศมี Connector length ของ Helmholtz Resonator

A = แทนค่าจุดสูงสุดของคลื่นตกกระทบ

B = แทนค่าจุดสูงสุดของคลื่นสะท้อน

C = ความเร็วเสียง (m/sec)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Helmholtz Resonator

d = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Connector length

f = ความถี่ (Frequency) (Hz)

fr = ความถี่ Resonance

H = ความสูงของ Helmholtz Resonator

I = Sound Current

k = ค่าคงที่ของความยาวคลื่น , $2\pi f / c$

l = ความยาวของ Connector length

l_e = ความยาวของ Connector length เนื่องจากความดันเสียง

l'_e = ความยาวของ Connector length เนื่องจากความดันเสียงระหว่างท่อ นำเสียงกับ Resonator

l_t = ความยาวส่วนปลายท่อ นำเสียง

M = ค่า Mach Number

P = ความดันเสียง (Sound Pressure)

P_0 = ความกดอากาศ

R = ความต้านทานของ Impedance

rms = Effective root mean square

S = พื้นที่หน้าตัดของท่อ นำเสียง

T = จำนวนของคลื่น

TL = Transmission Loss

t = เวลา

U = ความเร็วลม (m/s)

V = ปริมาตรของ Resonator(m³)

W = Acoustic Power

X = ความต้านทาน

สัญลักษณ์ (ต่อ)

x = ระยะทางที่ใช้ในการวัด

Z = Impedance , P / U

Z_0 = พหุคูณของ Impedance ,Acoustic ในการส่งผ่านของคลื่นใน Resonator, $\rho c/ S_0$

Z_0 = พหุคูณของ Impedance ,Acoustic ในการส่งผ่านของคลื่นในแนวระนาบภายในท่อ ,
 $\rho c/ S$

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

ω = ความเร็วเชิงมุม , $2\pi f$

λ = ความยาวคลื่น , c/f

β = ค่า Conductivity

α = สัมประสิทธิ์

θ = มุม Phase

ξ = การแทนค่าส่วนค้ำกลาง (Particle of the medium)ของคลื่นเสียงในแนวระนาบขณะส่งผ่าน

ξ' = ค่าความเร็วส่วนค้ำกลาง (Velocity Particle of the medium)ของคลื่นเสียงในแนวระนาบ
ขณะส่ง ผ่าน

สัญลักษณ์ตัวห้อยข้างใต้ตัวอักษร

b = Branch

c = Connector

i = Incident Wave

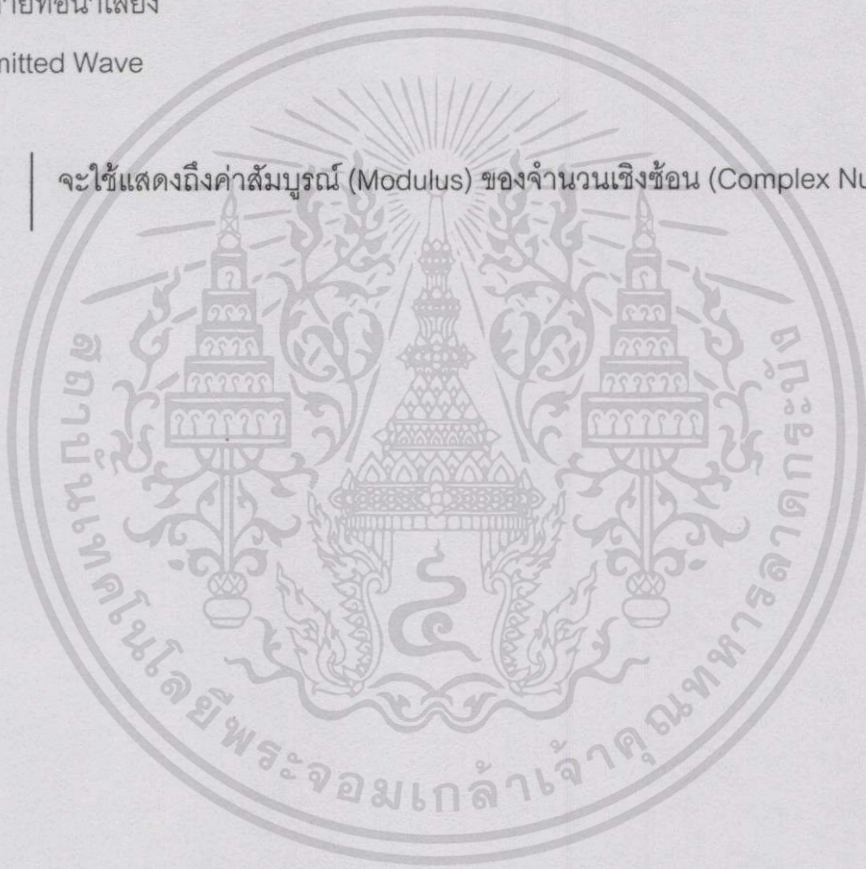
r = Resonant

re = Reflected Wave

t = สนวนปลายท่อนำเสียง

tr = Transmitted Wave

หมายเหตุ : | | จะใช้แสดงถึงค่าสัมบูรณ์ (Modulus) ของจำนวนเชิงซ้อน (Complex Number)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

Noise หมายถึงเสียงรบกวนที่ไม่ต้องการได้ยินนั่นเอง จะมีโทษมากกว่าผลดี และทำให้มนุษย์เกิดความรำคาญ, ความดันโลหิตสูง, หลอดเลือดตีบลง, ในระยะยาวจะส่งผลกระทบต่อความผิดปกติของหัวใจ นอกจากนี้เสียงดังยังมีผลต่อการหลังฮอร์โมนประเภทต่างๆ การยึดหดตัวของกล้ามเนื้อ การแปรปรวนทางอารมณ์ และจิตใจ ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานลดลง มีผลร้ายต่อมนุษย์ Noise ที่เพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียการได้ยินถาวรหลังจากที่ได้รับเสียงนานเกินไป ความเข้มของเสียงตามไลน์การผลิตในโรงงานหลายแห่ง , การขับรถยนต์ หรือมอเตอร์ไซค์ และยังอาจเกิดอันตรายให้กับชีวิตของมนุษย์ได้ ตัวอย่างเช่น อุบัติเหตุร้ายแรง อาจเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดเสียงจากใบพัดขนาดใหญ่ในโรงงาน หรือเสียงลมในระบบท่อกลบเสียงเตือนภัยขณะที่อันตรายใกล้เข้ามา ทั้งหมดนี้จึงเป็นตัวอย่างที่เกิดจาก Noise

ดังนั้นงานวิจัยจึงศึกษาการลดเสียงรบกวน (Noise Reduction) ในระบบท่อโดยใช้ Single Chamber Resonator ชนิด Helmholtz Resonator เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อศึกษาพฤติกรรมการลดเสียง จะพิจารณาอยู่ 2 กรณี คือ กรณีแรกไม่มีความเร็วลมไหลผ่าน และกรณีที่สองมีความเร็วลม ซึ่งกรณีที่มีความเร็วลมไหลผ่านจะมีความเร็วลมต่างๆ กัน ผลที่ได้จากการทดลองวิจัยนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ลดเสียง และประยุกต์ในการใช้งานในระบบท่อต่างๆ

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

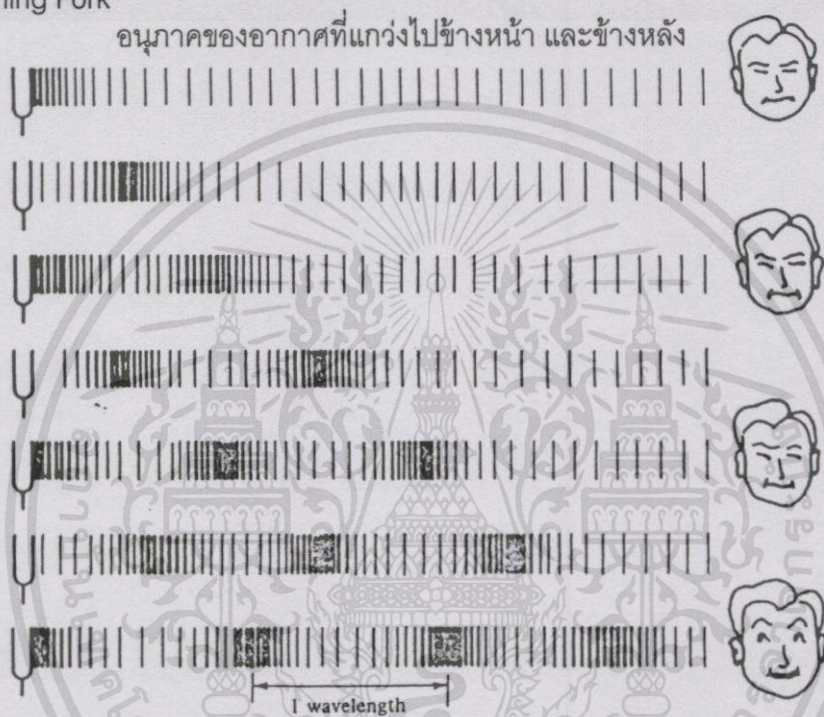
เพื่อศึกษาพฤติกรรมของอุปกรณ์ลดเสียง Helmholtz Resonator แต่ละขนาดว่าสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ใด ที่สามารถนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้ในวัตถุประสงค์เพื่อลดเสียง เช่นในระบบท่อไอเสียรถยนต์ และการลดเสียงทางเดินของ Intake Port เครื่องยนต์ และระบบท่อในไลน์ผลิตที่ต้องการได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เสียง(Sound)เป็นปรากฏการณ์ประเภทคลื่นที่ซึ่งพลังงานการสั่นสะเทือนจากต้นกำเนิดเสียงจะกระทบต่ออนุภาคของอากาศที่อยู่รอบๆ เคลื่อนที่ไปเป็นคลื่น และอนุภาคที่อยู่ห่างออกไปเสียงจะเดินทางไปในอากาศด้วยความเร็วประมาณ 340 เมตรต่อวินาที ของเหลว และของแข็งจะเร็วกว่านี้ เช่น ในน้ำ 1500 เมตรต่อวินาที และในเหล็ก 5000 เมตรต่อวินาที การสั่นสะเทือนจาก Tuning Fork ที่มีลักษณะเป็นง่ามจะสั่นสะเทือนที่ความถี่คงที่ ขณะที่ง่ามเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ข้างหลัง อากาศในบริเวณใกล้เคียงกับง่าม ก็จะเกิดการกดอัด และ การทำให้บางเบา (Rarefaction) เป็นช่วงๆ การรบกวนเช่นนี้จะแพร่ออกจาก Tuning Fork แสดงดังรูปที่ 1.1 หูก็จะรับเสียงต่อโดยความถี่ของการสั่นของง่าม Tuning Fork ถ้าเราขยายให้มี Tuning Fork หลายๆ อันให้สั่นในเวลาเดียวกัน โดยแต่ละอันจะมีความถี่แตกต่างกัน เสียงซึ่งหูของเรารับรู้ก็จะเป็น Pure Tone อีกต่อไป แต่จะมีส่วนประกอบของความถี่หลายๆ อันมากกว่า โดยทั่วไปเสียงที่มาถึงหูของ

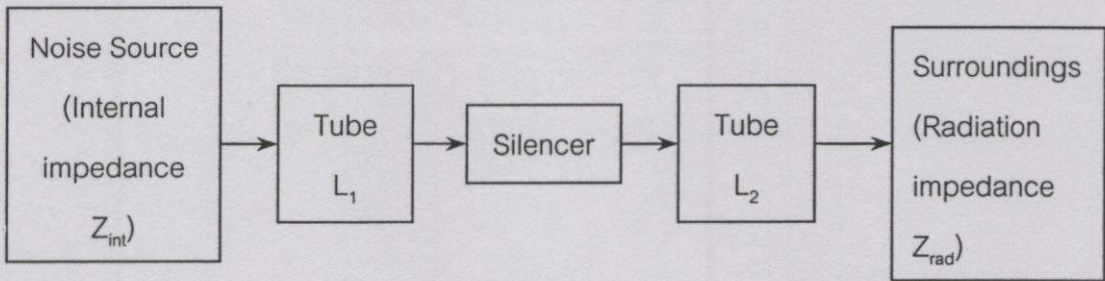
Tuning Fork



รูปที่ 1.1 การสั่นสะท้อนของต้นกำเนิดเสียง และมีผลกระทบต่ออนุภาคของอากาศที่มีกระแทกยังแก้วหู

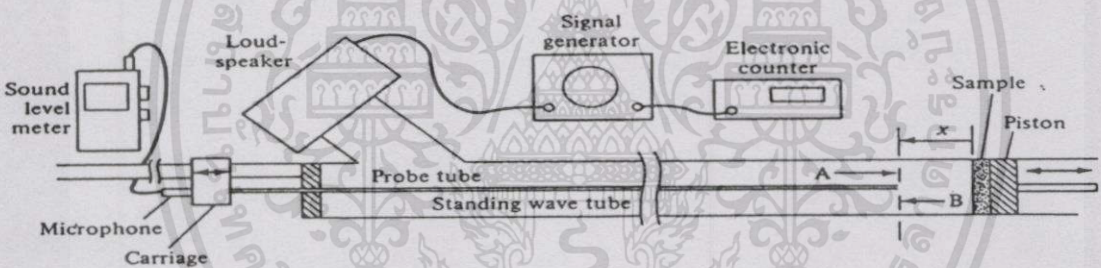
เราจะมีจำนวนของส่วนประกอบความถี่ที่ไม่จำกัด อย่างไรก็ตามหูของคนธรรมดาจะไวต่อส่วนประกอบในระดับเสียงประมาณ 20 ถึง 20,000 Hertz หรือ (รอบต่อวินาที) เท่านั้นหูจะไม่ได้ยินส่วนประกอบของเสียงถ้าตกอยู่ภายนอกระดับเสียงของความถี่นี้ เสียงเกิดขึ้นซ้ำๆ ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเสียงที่ส่งผ่านไปในระบบท่อ คลื่นเสียงจะถูกส่งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และผ่านไปยังส่วนปลายท่อ ในงานวิจัยนี้เพื่อจำกัดเสียงให้ลดน้อยลงก่อนที่เสียงจะผ่านไปยังส่วนปลายท่อ โดยใช้ทฤษฎี Transmission loss ซึ่งเสียงที่มีความถี่สูง จะอยู่ระหว่าง 400 ถึง 20,000 Hertz จะรบกวนมากกว่าเสียงที่มีความถี่ต่ำ และเสียงบริสุทธิ์ (Pure Tone) จะรบกวนมากกว่าเสียงที่ประกอบไปด้วยเสียงหลายๆ เสียง

แสดงการขึ้นตอนจำลองในการลดเสียงในระบบท่อโดยใช้ Silencer เป็นอุปกรณ์ลดเสียง



รูปที่ 1.4 แสดงเสียงที่ส่งผ่านต่อเข้ากับท่อ L_1 และ L_2 โดยมี Silencer สำหรับลดเสียงก่อนที่เสียงจะออกสู่สิ่งแวดล้อม

จาก Standing - Wave พิจารณาของท่อกลม และท่อสี่เหลี่ยมกำเนิดเสียงได้จาก Loudspeaker ที่จุดเริ่มต้น และใช้ Probe tube หรือ Microphone เล็กๆ ที่มีขนาดยาวแสดงในรูปที่ 1.5 โดยใช้ Sample ของ Acoustical material หรือ Silencer เพื่อศึกษาการลดเสียง



รูปที่ 1.5 อุปกรณ์สำหรับวัดการสะท้อนกลับ

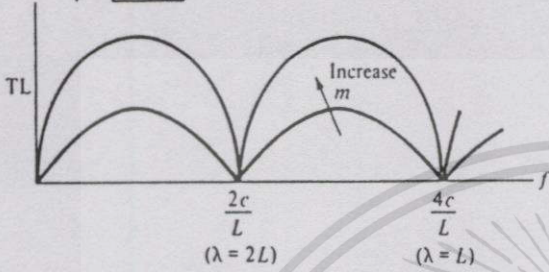
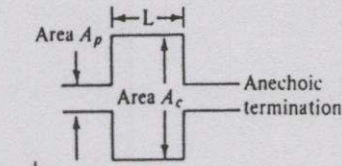
1.4.1 Silencers สำหรับลดเสียงในท่อ

Acoustic silencers และการออกแบบสำหรับอุปกรณ์ลดเสียงในระบบการไหล ชนิดแรก เช่นเสียงจากพัดลม ,เสียงจากท่อไอเสียรถยนต์ , ระบบ intake และ ท่อลมตามไลน์ ชนิดที่สองคือ Silencers

Silencers จะประกอบด้วย หนึ่งชิ้น หรือมากกว่าหนึ่งชิ้น เช่น expansion chambers, Side-branch resonator , Helmholtz resonator ,Conical side branch และ Perforated tubes ซึ่ง silencers จะพิจารณากับความถี่ที่ทำการติดตั้งเข้ากับระบบ คือ Automotive exhaust mufflers และ Silencers สำหรับขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งรวมถึง expansion chamber ,side - branch resonator และ Helmholtz resonator

ชนิดของอุปกรณ์ลดเสียงแบบต่างๆ

1. การลดเสียงโดยการใช้ Expansion chamber



$$TL = 10 \log(1 + \frac{1}{4} (m - 1/m)^2 \sin^2 kL) \text{ dB}$$

$$m = A_c / A_p ; k = \omega / c$$

Expansion Chamber

2. การลดเสียงโดยใช้อุปกรณ์ลดเสียงแบบ Resonator

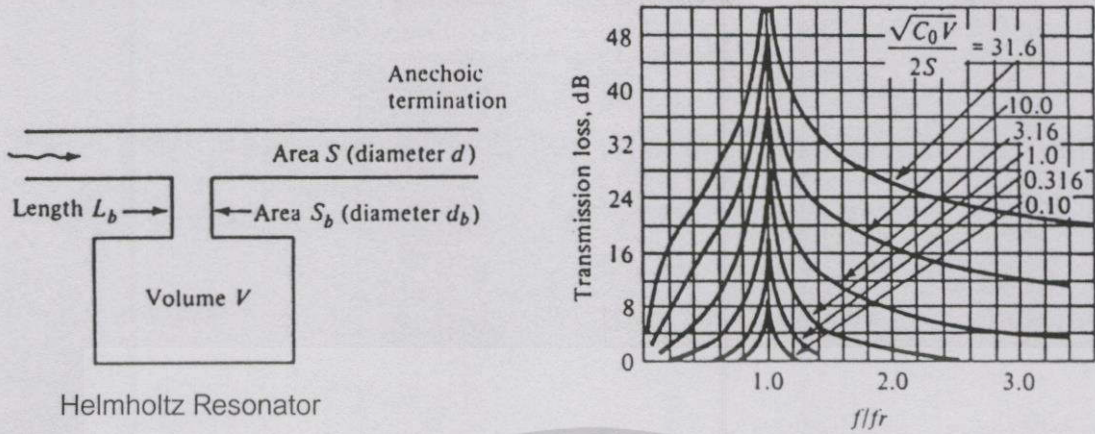


Side Branch

Conical Side Branch

$$TL = 10 \log \left| \frac{P_i}{P_t} \right|^2 = \left| 10 \log \left(1 + \frac{1}{4} \tan^2 kl \right) \right|$$

$$= 10 \log \left| 1 + \frac{\left(\frac{(\sqrt{m}-1)^2}{kl} \left\{ \sqrt{m} + \frac{(\sqrt{m}-1)^2}{kl} \right\} \tan kl \right)^2}{4 \left\{ \sqrt{m} - \frac{\sqrt{m}-1}{kl} \tan kl \right\}^2} \right|$$



รูปที่ 1.7 ลักษณะของ silencers ชนิด Resonator

C_0 = Conductivity ของคอคดลวด
 $= S_b/L_b$ คือ effective length ของคอคดลวด $\approx L_b + 0.82 d_b$
 fr = Resonant frequency
 $= c / 2\pi \cdot \sqrt{C_0 / V}$ เมื่อ c = ความเร็วเสียง

$$TL = 10 \log \left| 1 + \frac{Z_0^2}{4Xb^2} \right|$$

ตารางที่ 1.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พ.ศ.	ชื่อผู้ทำวิจัย	ชื่อเรื่องวิจัย
2520	Richard Oboka	Comparison of Transmission loss and Insertion loss of a Helmholtz Resonator
2520	Richard Oboka	Performance Characteristic of Combination of Element
2523	Dr.Shuntoro Murakami, Sanni Hagi and Minoru Maeda	Acoustical Performance of Conical Side – Branch Tubes
2534	รศ.อัศวเดช สินธุภักดิ์, Dr.Shuntoro Murakami และ Minoru Maeda	Acoustical Performance of Helmholtz's Type Resonators
2534	รศ.อัศวเดช สินธุภักดิ์, Dr.Shuntoro Murakami และ Minoru Maeda	Acoustical Performance of Side Branch Type Silencers

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

พ.ศ.	ชื่อผู้ทำวิจัย	ชื่อเรื่องวิจัย
2534	รศ.อัครเดช สินธุภาค, Dr.Shuntoro Murakam และ Minuru Maeda	Acoustical Performance of Helmholtz's Type Resonators
2534	รศ.อัครเดช สินธุภาค, Dr.Shuntoro Murakam และ Minuru Maeda	Effect of flow on Transmission Loss Characteristic of Expansion Chamber Mufflers
2539	รศ.อัครเดช สินธุภาค, Dr.Shuntoro Murakam และ Minuru Maeda	Effect of flow on Transmission Loss Characteristic of Helmholtz's Type Resonator
2542	บุญชัย ศิลปกิจวงษ์กุล	สมรรถนะของเครื่องลดเสียงชนิด Helmholtz

1.5 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้ได้จำลองกระบวนการเกิดเสียงรบกวนในระบบท่อที่สามารถกำหนดความถี่ของเสียงรบกวนในช่วงความถี่ได้ จากนั้นขึ้นอยู่กับการผสมผสาน และวิธีการทั่วไปของสมการในการลดเสียงของ Helmholtz Resonator ไว้ดังนี้

1. ความดันของเสียงมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันสัมบูรณ์เฉลี่ยในระบบ และไม่ขึ้นกับเวลา
2. ท่อนำเสียงที่ใช้จะต้องมีลักษณะไม่สะท้อนกลับของคลื่น
3. ผนังของ Resonator ต้องไม่ดูดกลืน และนำพลังงานเสียง
4. คลื่นความดันในแนวระนาบมีการเพิ่มขึ้นภายในท่อนำเสียง
5. อิทธิพลของความหนืดโดยทั่วไปมีผลน้อยมาก
6. ผลการทดลองจะต้องปรับแก้การสะท้อนที่เกิดขึ้นจริง เพื่อความถูกต้องกับสภาวะข้าง

ต้นที่กล่าวมาแล้ว

7. อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองจะต้อง Calibrate เพื่อความแม่นยำ

การศึกษาพฤติกรรมการลดเสียง ในระบบท่อดังนี้

1.5.1 ศึกษาโดยใช้ท่อ pipe 2 ประเภท

1.1 ท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 m

1.2 ท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไปดัดแปลง หรือทำซ้ำ โดยผู้แต่งสงวนลิขสิทธิ์ไว้ และสงวนไว้สำหรับเอกสารที่สงวนไว้ใช้

1.2 ท่อสี่เหลี่ยมขนาด $0.025 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$

1.5.2 อุปกรณ์ในการลดเสียงแบบ Helmholtz Resonator

2.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 m

1.5.3 Connector Length

3.1 ความยาว 0.02 m

3.2 ความยาว 0.04 m

3.3 ความยาว 0.06 m

1.5.4 เส้นผ่านศูนย์กลาง Connector Length

4.1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 m

4.2 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 m

1.5.5 ทำการทดลองพฤติกรรมของการลดเสียงแบบ without flow

1.5.6 ทำการทดลองพฤติกรรมของการลดเสียงแบบ with flow

6.1 โดยใช้ความเร็วลม $U = 5, 10, 20, 40 \text{ m/s}$

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

โดยการศึกษาว่า Helmholtz Resonator แต่ละชนิดมีพฤติกรรมลดเสียงในช่วงใดและศึกษาท่อนำเสียงที่เกิดเสียงในช่วงความถี่สูง หลังจากนั้นเลือกท่อนำเสียงแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 m และท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยมขนาด $0.025 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$ และทำการผ่าท่อเป็นช่องตลอดความยาว หลังจากนั้นนำท่อกลมเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.006 m และทำการผ่าท่อตลอดความยาวเช่นกัน จากนั้นนำท่อสองขนาดมาเชื่อมเข้าด้วยกัน ซึ่งจะบุด้วย Glass Wood ทั้งสองด้านของท่อ และทำการติดตั้งอุปกรณ์ Oscillator เป็นอุปกรณ์ปรับความถี่ จะต่อกับ Amplifier เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณเสียง และผ่าน Driver Unit หรือ Loudspeaker เป็นอุปกรณ์จำลองเสียงเข้าในระบบท่อ จากนั้นใช้ Microphone วัดสัญญาณเสียงผ่าน Probe tube ต่อผ่าน Pre-Amplifier และต่อกับ FFT Analyzer เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณคลื่นเสียงให้เป็นสัญญาณความถี่ที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล เมื่อติดตั้งอุปกรณ์และนำ Helmholtz resonator ติดตั้งเข้ากับผนังของท่อเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการลดเสียงของ Helmholtz resonator แต่ละชนิดว่าสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ใด เพื่อความสะดวกในการศึกษาโดยนำข้อมูลที่ได้จากผลทดลองมาแสดงความสัมพันธ์บนกราฟระหว่าง Transmission loss (dB) กับ Frequency (Hz)

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

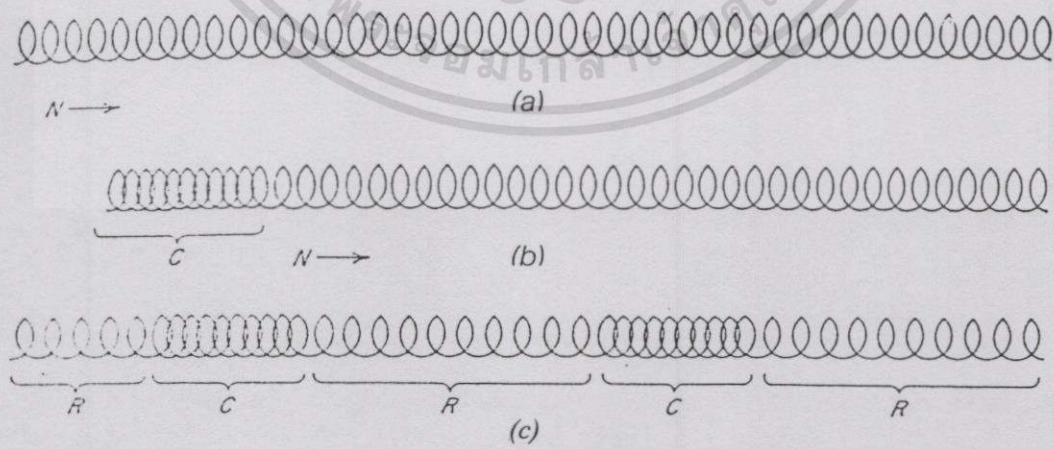
2.1 พฤติกรรมของคลื่นเสียง

2.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของคลื่น

จากวิชาฟิสิกส์ทุกรูปแบบของการเคลื่อนไหวของคลื่นจะเป็นไปตามคำกล่าวที่ว่า การรบกวนที่เกิดขึ้น ณ.จุดหนึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังอีกจุดหนึ่งได้ซึ่งถูกกำหนดโดยคุณสมบัติทางกายภาพของภาวะคงที่ระหว่างจุดที่ทำการสังเกต

คลื่นเสียงเป็นรูปแบบเฉพาะของคลื่นระดับธรรมดา ซึ่งรู้จักในนามของ Elastic wave โดยสามารถเกิดขึ้นในสื่อ ซึ่งมีคุณสมบัติของมวล Inertia กับ Elasticity และ Elasticity จะมีหน้าที่ดึงกลับมายังตำแหน่งเดิมเหมือนกับสปริง และด้วยเหตุผลนี้ Inertia ส่วนที่ถูกเคลื่อนที่ไปสามารถส่ง Momentum ไปยังส่วนที่อยู่ติดกัน

การส่งผ่าน Elastic wave ได้แสดงในรูปที่ 2.1 Coil Spring โลหะตัดปลายถูกดึงให้ยืดออก Inertia ประกอบอยู่กับมวลของ Coils Elasticity และมีแนวโน้มที่คงสภาพระยะห่างของ Coils อยู่ติดกันอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเกิดการเคลื่อนไหวที่ปลายด้านหนึ่งของสปริงที่ถูกยึดออก ในทิศทางตามแกนของ Coil และพลังงานจะไม่มี การเคลื่อนไหว ผลของ Momentum เป็นเหตุให้ Coil ที่ถูกเปลี่ยนแรงที่ส่งไปยัง Coil ที่อยู่ไกลออกไปตามเส้น และ Elastic wave ก็จะทำให้ Coil เคลื่อนที่ไปและย้อนกลับคืนมายังตำแหน่งเดิม คลื่นจะถูกแพร่ไปตามสปริง และจะแพร่ต่อไปในทิศทางที่คลื่นนั้นเคลื่อนไป



รูปที่ 2.1 Transmission ของ elastic wave ที่ให้กับ coil spring a) สภาพหยุดอยู่หนึ่ง b) การกด spring ให้เคลื่อนที่ c) การกดให้ spring เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายมือ N คือ สภาพปกติ C คือ สภาพการกด และ R คือ สภาพการขยายออก

2.1.2 อากาศ และคุณสมบัติ

นิยามเกี่ยวกับ Elastic Medium กล่าวไว้ว่าต้องมี Inertia กับ Elasticity ในการพิจารณา Inertia ถือว่า อากาศมีมวล “น้ำหนัก” สำหรับจุดประสงค์นี้ ให้สมมติว่า อากาศประกอบด้วย จำนวนโมเลกุลมากๆ ซึ่งจะคิดเฉพาะขอบเขตเล็กๆ ที่ถูกแพร่กระจายไปอย่างมีรูปแบบเดียวกัน ภายในที่ว่าง แต่ละโมเลกุลจะเคลื่อนไหวในรูปแบบ Random Motion ถ้าล้อมรอบส่วนที่ว่างใน กล่อง ก่ออื่นจะต้องไม่มีอากาศ และจากนั้นก็เติมอากาศเข้าไป ณ.อุณหภูมิห้อง และความดันปกติ พบว่าน้ำหนักของอากาศจะประมาณ 1 lb. สำหรับทุกๆ 13 ft³ หรือประมาณ 1 kg สำหรับ ทุกๆ 1 m³ พบว่าอากาศ จะมีแรงบนพื้นผิวของกล่อง จำนวนประมาณ 14.7 lb / in² หรือ ประมาณ 100,000 Newton / m² แรงต่อหน่วยพื้นที่ อันนี้เป็นสิ่งที่มักจะเรียกว่า ความดันบรรยากาศ และสัมพันธ์โดยตรงกับ ความหนาแน่น หรือจำนวนโมเลกุลของอากาศในกล่อง พบว่าคุณสมบัติรวมๆ ของอากาศระบุได้ 3 Parameters คือ 1) ความดัน 2) ความหนาแน่น 3) อุณหภูมิ

สามารถแสดงให้เห็นว่าอากาศมี Elasticity โดยวิธีการต่างๆ อย่างเช่น ถ้าเราปล่อยลม ออกจากลูกบาสเกตบอลออก และปล่อยให้ตกลงบนพื้นลูกบาสเกตบอลก็ว่าจะไม่จะตั้งขึ้นมา แต่ เมื่อเติมลมเข้าไปในลูกบาสเกตบอลก็จะกระเด็นเมื่อตกลงบนพื้น แม้แต่ในตัวอย่างที่ง่ายกว่านี้ สมมติว่าในขณะที่เตรียมทำให้ลูกบาสเกตบอลพอง ถ้าเราเอานิ้วไปบีบรั้มลม จะทำให้เกิดความรู้สึกแบบเดียวกับการกดสปริง ในความเป็นจริงการที่เรารู้ขนาดทางกายภาพของรั้ม และจำนวน ของแรงที่เราใช้มีออกสามารถกำหนด “Spring Constant “ หรือ Compressibility ของก๊าซได้ รวมทั้งให้คำอธิบายในเชิงปริมาณของ Elasticity ของอากาศได้

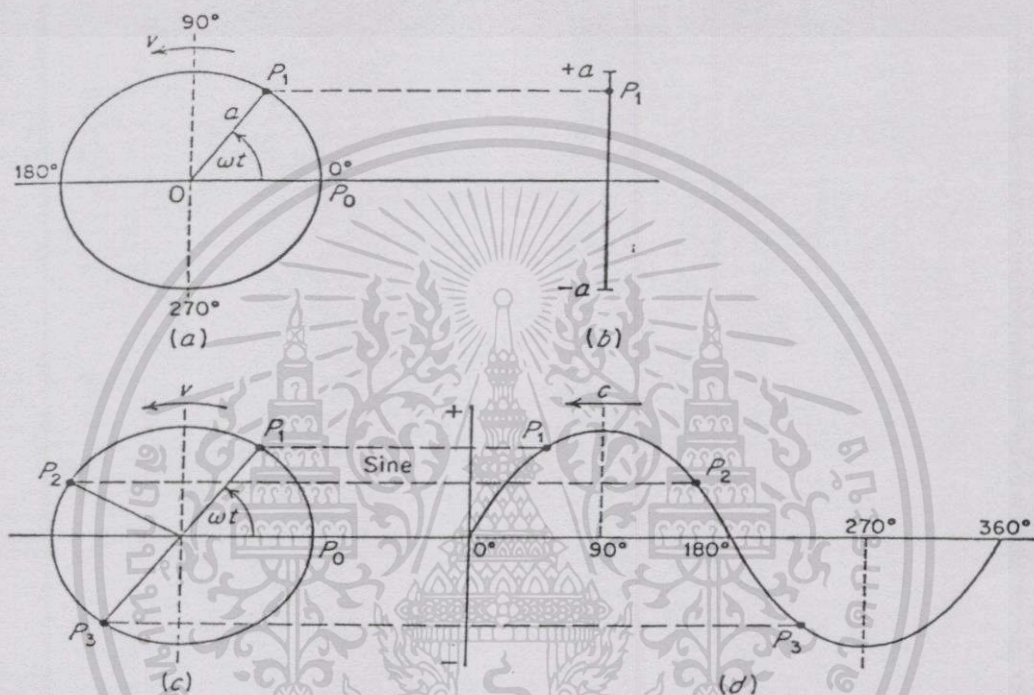
สรุปได้ว่า เพราะน้ำหนักของอากาศจึงมี Inertia เพราะ “Springiness” จึงมี Elasticity และเพราะอากาศทั้ง Inertia กับ Elasticity คลื่นจึงสามารถแพร่ไปได้ในอากาศ

2.1.3 การเคลื่อนที่ Harmonic สำหรับ Sine Wave

มาถึงตรงนี้ได้กล่าวถึง ความหนาแน่น , Elasticity , ความดัน และอุณหภูมิของอากาศ อธิบายได้ว่า จะสามารถแพร่คลื่นเสียงผ่านได้ ขณะที่ในเรื่องของเสียงที่ซับซ้อนมากๆ เหมือนจะมี ประโยชน์มากกว่า พิจารณารูปแบบที่ง่ายของเสียงเป็นอันดับแรก คือ Pure Tone ในการจำแนก แยกแยะ Pure Tone เกิดขึ้นมาจากชนิดของ Motion นี้เรียกว่า Sine wave พิจารณาดูว่าคลื่นเกิดขึ้น

การเคลื่อนที่ Harmonic มักถูกอธิบายว่าเป็นบนพื้นราบทางเดินของจุดที่กำลังเคลื่อนที่ ไปรอบ วงกลม ณ. ความเร็วเดียวกัน ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2.2(a) สมมติว่า จุดเคลื่อนไหว P₁ เดิน ทางไปรอบๆ วงกลม ณ ความเร็วคงที่ของจุดนั้นบนพื้นราบ ก็จะลากกลับ และลากไปตามเส้นทาง เหมือนกับจุดที่ไปรอบๆ วงกลม(ดังรูปที่ 2.2 b) สมมุติได้เคลื่อนที่พื้นที่ราบลงบนที่ซึ่งไปทางซ้าย ณ.ความเร็วเดียวกัน c (เหมือนที่ระบุไว้ในรูปที่ 2.2(d)) แทนที่จะลากย้อนๆกันไปตามเส้นทาง

แสดงดังในรูปที่ 2.2(b) ผลการลากเส้นก็คือรูปแบบของกราฟ Trigonometric Function ซึ่งรู้จักกันในนามของมุมเป็น อัตราของด้านที่ตรงข้ามกับมุมในสามเหลี่ยมทางขวาต่อด้านยาวที่สุดของสามเหลี่ยม Simple Harmonic Motion เป็น Motion ซึ่งจะเปลี่ยนใน Magnitude กับเวลาตามลักษณะที่อธิบายไว้ในรูปที่ 2.2 (c) กับ (d) เคลื่อนที่ทำให้เกิด Plot ของเคลื่อนที่เหมือนกับ Function ของเวลาที่คล้ายกับ Sine wave ดังที่ระบุไว้ในรูปที่ 2.2(d)

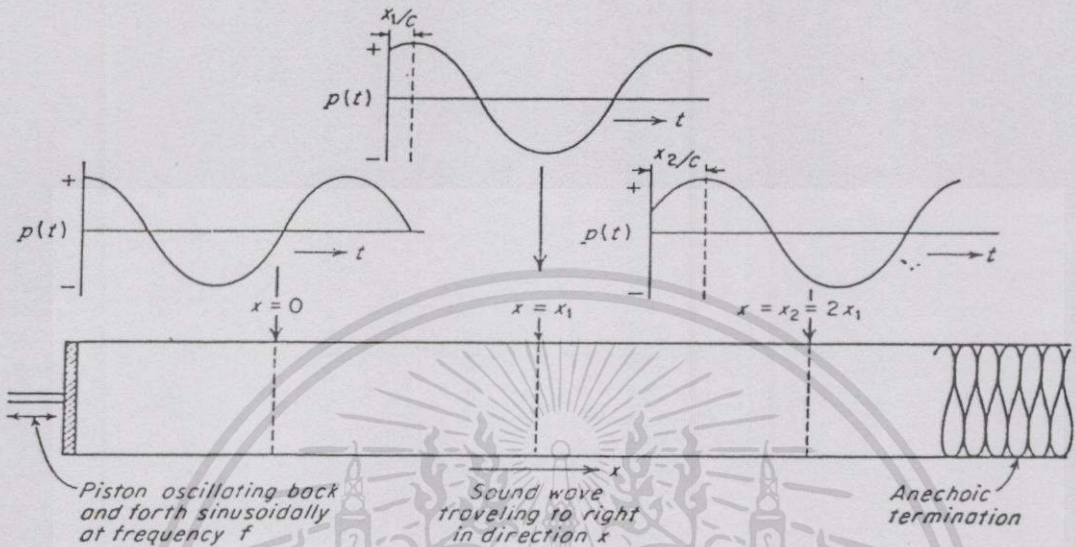


รูปที่ 2.2 ตัวอย่าง Harmonic motion และ Sine wave ,a) จุด P_1 เคลื่อนที่เป็นวงกลมคงที่เท่ากับความเร็ว V และ ,b) เคลื่อนที่ขึ้น และลงระหว่าง $+a$ และ $-a$, c) จะเหมือนกับแผ่นราบ d) เคลื่อนที่ไปทางซ้าย ซึ่งที่ความเร็ว c

พิจารณาท่อที่มีความยาวที่บรรจุไปด้วยอากาศ ที่มีกอร์เคลื่อนที่เหมือนลูกสูบที่ปลายด้านหนึ่ง (รูปที่ 2.3) สมมติว่าลูกสูบถูกทำให้เคลื่อนที่ไป และกลับ ซึ่ง Harmonic ของลูกสูบนี้จะทำให้โมเลกุลอากาศที่อยู่ชิดติดกันกับลูกสูบ จับกลุ่มอยู่ด้วยกัน หรือกดอัด จากนั้นจะเคลื่อนแยกออกจากกัน หรือจางไป การกระทำสลับกันระหว่างการกดอัด และ ทำให้บางเบา จะเคลื่อนที่ตามท่อ ขึ้นอยู่กับ Elasticity ของตัวกลาง คลื่นที่มีรูปทรง Sine จะถูกก่อให้เกิดขึ้น ซึ่งความถี่เป็นอัตรา (จำนวนของครั้งต่อวินาที) ที่ลูกสูบเคลื่อนกลับและไปความแข็งแรงของคลื่นถูกกำหนดโดย Magnitude ของการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

2.1.4 คลื่นเสียงในอากาศ

ในที่นี้ Sound wave ของ Single Frequency ถูกกำเนิดขึ้นมาได้อย่างไร พิจารณาว่าคลื่นนี้เคลื่อนผ่านอากาศได้อย่างไร แล้ว Parameter ที่ใช้ในการอธิบายลักษณะต่อไป Amplitude



รูปที่ 2.3 การแพร่ Plane-wave ซึ่งคลื่นจะเคลื่อนที่จากซ้ายไปทางขวาของท่อ คลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงใน Sound wave 3 จุด $x=0$, $x=x_1$ และ $x=x_2=2x_1$

คลื่นเสียงจะถูกกำหนดโดยตรงด้วยการเคลื่อนที่ ซึ่งโมเลกุลเคลื่อนที่ในทิศทางเดียว และในการย้อนกลับ ซึ่ง Parameter สามารถใช้ในการอธิบายคลื่นเสียงจะมีความเร็วเสียง กับ ความดันเสียง

ความเร็วเสียง เป็นอัตราการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น หรือเป็นการเคลื่อนที่ต่อหน่วยเวลา ถ้าการเคลื่อนที่ต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น Amplitude ของคลื่นเสียงที่จะเพิ่มขึ้น และ ความเร็วเสียง ก็จะมีเพิ่มตามกันไปด้วย อุปสรรคสำคัญอย่างหนึ่งต่อการใช้ความเร็วเสียง ในการอธิบาย Magnitude ของคลื่นเสียง คือ การขาดแคลนเครื่องมือที่เหมาะสม ซึ่งมีขนาดเล็ก และไม่มี ความคงทนเพียงพอ สำหรับใช้ในการวัดพื้นที่จริง

ความจริงที่โมเลกุลอยู่ในชนิดของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะเปลี่ยนทิศทางโดยปริมาณ เมื่อเกิดอัตราเร่ง หรือ แรงการเคลื่อนที่ เมื่อแรงเป็นอัตราของการเปลี่ยนแปลงของ Momentum เปลี่ยนไป การวัด แรงที่จะทำให้โมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่จากสภาพคงที่ ซึ่งจะทำให้ทิศทางของ Amplitude ของคลื่นเสียง การวัดแรงที่ถูกใช้บนพื้นที่ขนาดใหญ่เกี่ยวข้องกับความสามารถจะหาแรงต่อหน่วยพื้นที่ หรือความดันได้ ความดันคงที่ถูกบันทึกไว้ในคลื่นเสียง มักจะมีการผันแปรเล็กน้อยจากความดันบรรยากาศปกติ การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยนี้เรียกว่า Excess Sound Pressure

หรือเรียก Sound Pressure ก่อนหน้านี้ออกว่าความถี่เป็นอัตรา ซึ่งถูกสูบทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงไป และกลับ อันนี้จะหมายถึงจำนวนครั้งต่อวินาที ที่ถูกสูบเคลื่อนที่จากตำแหน่งสภาพคงที่จะกระโดดผ่านตำแหน่งสมดุลไปยังจุดที่เคลื่อนที่สูงที่สุด ซึ่งอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ ตอนแรก และจากนั้นก็คืนกลับมายังที่ตำแหน่งสมดุล คือ ความถี่ของคลื่นเป็นจำนวนรอบต่อวินาที ที่มุมเป็นวงกลมครบ 1 รอบของ Sine wave เวลาที่ต้องการสำหรับแต่ละรอบ เรียกว่า Period ของคลื่นเป็นการแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกันของความถี่ ถ้าถูกสูบสั้นที่ความถี่ 100 รอบ / วินาที (cps) ,Period ของการสั่นเป็น 0.01 วินาที

การเคลื่อนที่ของลูกสูบในท่อเป็นสาเหตุให้โมเลกุลของอากาศ กดอัดและขยายคลื่นไปตามท่อ ซึ่งห่างจากท่อพอสสมควร และ ลูกสูบเริ่มเคลื่อนไหว เราสามารถวัดด้วยเครื่องมือที่เหมาะสมว่าจะต้องใช้ Period ของเวลาที่แน่นอนก่อนที่คลื่นเสียงจะเริ่มต้นที่จุดลูกสูบจะไปถึงจุดที่ทำให้การสังเกตความยาวของเวลาเป็นที่จำเป็นต่อการส่งผ่านคลื่นไปตามท่อจะเป็น Function Elasticity ของอากาศ และ ความหนาแน่น

โดยการทดลองสามารถกำหนดได้ว่า Elasticity ของอากาศคงที่และความดันคงที่ของอากาศนั้นคือ ความกดอากาศคงที่จะกลายเป็นอัตราส่วนของ Specific Heat ของอากาศ ณ. ความดันคงที่ Specific Heat ของอากาศ ณ.ความดันคงที่ จนถึง Specific Heat ณ.ปริมาตรคงที่ อุณหภูมิส่วนใหญ่ ซึ่งนำมาเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนจะเป็น 1.4 ด้วยเหตุนี้ความเร็วของเสียงในอากาศได้จากสมการ

$$C = \sqrt{\frac{1.4 P_0}{\rho_0}} \quad (2.1)$$

ซึ่ง P_0 เป็นความกดอากาศ และ ρ_0 เป็น ความแน่นของอากาศ

สันนิษฐานว่า อากาศมีพฤติกรรมเหมือนก๊าซอุดมคติการสันนิษฐานอุณหภูมิ และความหนาแน่นส่วนใหญ่ เกี่ยวข้องสามารถแสดงให้เห็นว่า ความเร็วของเสียงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศเท่านั้น

ในหน่วยของอังกฤษ สมการสำหรับความเร็วของเสียงในรูป ft / sec จะได้เป็น

$$C = 49.03 \sqrt{R} \text{ ft / sec} \quad (2.2)$$

ซึ่ง R เป็นอุณหภูมิใน Degrees Rankine นั่นคือ 459.7° บากอุณหภูมิใน Degrees Fahrenheit สมการสำหรับความเร็วของเสียงในรูปของ เมตรต่อวินาที จะได้

$$C = 20.05 \sqrt{T} \text{ m/sec} \quad (2.3)$$

ซึ่ง T เป็นอุณหภูมิสมบูรณ์ใน Degrees Kelvin นั่นคือ 273.2° บวกอุณหภูมิใน Degrees Centigrade

ความถี่ และความถี่เสียงจะสัมพันธ์กันโดยผ่านทางความยาวคลื่น ความยาวของคลื่นเสียงเป็นระยะทางที่คลื่นเดินทางระหว่าง 1 Period หรือ Cycle คลื่น 100 cps จะเคลื่อนไปในระยะ 1.13 ft ใน 1 cycle เมื่อความเร็วของเสียงเป็น 1130 ft / sec ด้วยเหตุนี้ ความเร็วของเสียงจะเท่ากับผลคูณของความถี่กับความยาวคลื่น

$$C = f \lambda \quad (2.4)$$

ซึ่ง C = ความเร็วของเสียง ft / sec หรือ m / sec

f = ความถี่ cps

λ = ความยาวคลื่น ft หรือ m

ความเร็วของเสียงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอากาศเท่านั้น และคงที่ ณ อุณหภูมิที่กำหนดให้ หรืออีกนัยหนึ่งความยาวคลื่นจะลดลงในขณะที่ความถี่จะเพิ่มขึ้น ถ้าความถี่เป็น 1000 cps ในตัวอย่างที่ 2.1 และความยาวคลื่นก็จะเป็น 1.13 ft

2.1.5 คลื่นอิสระที่เคลื่อนไปข้างหน้า (Free – Progressive Waves)

ระดับทิศทาง ตามที่กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับ Particular Sound Wave เคลื่อนที่ไปตามท่อ โดยการเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นโดยการสั่นลูกสูบที่ปลายด้านหนึ่งของท่อ (รูปที่ 2.3) สมมติให้ท่อยาวสิ้นสุด หรือว่ามีส่วนปลายแบบไม่มีการสะท้อนกลับ ดังนั้นผลที่เกิดขึ้น ณ.ปลายท่อก็จะนำมากล่าวถึง คลื่นเสียงถูกทำให้เกิดขึ้นโดย Piston ที่เคลื่อนไปตามท่อ คุณสมบัติทั้งหมดของคลื่นได้ดังรูปที่ (2.3) ระยะห่างจากลูกสูบเคลื่อนไปตามท่อ กับการกระทำของตัวลูกสูบเอง คลื่นรูปแบบนี้รู้จักในนามของ One – Dimensional ,Plane ,Free Progressive wave ลักษณะ One – Dimensional จะสัมพันธ์กับรายละเอียดของตัวแปรในทางสถิติในรูปของ Single Distance และ Planer หมายถึง คลื่นที่เคลื่อนไปข้างหน้าโดยจะขนานกับคลื่นอื่นๆ และFree Progressive หมายถึง การเคลื่อนที่ตำแหน่งไปข้างหน้าของคลื่นซึ่งไม่มีรบกวนจากคลื่นอื่นๆ หรือเปลี่ยนไปในระหว่างการเคลื่อนที่ คลื่นไม่ได้เป็นอิสระ ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยผนังของท่อสำหรับจุดประสงค์ในทางปฏิบัติเคลื่อนที่จะคล้ายกันระหว่าง ท่อ กับ ลูกสูบ สังเกตเห็นได้ว่า ณ จุดใดๆ ตามท่อ สามารถวัดค่าความดันที่เกิดขึ้นๆ บนและล่าง ความกดอากาศ นั้นหมายถึง สามารถวัดค่าความดันเสียงและอัตราความเร็ว

การก่อดัดของ ก๊าซอุดมคติเป็น Adiabatic ($PV^{1.4} = \text{Constant}$) ในที่สุด ถ้าเราสังเกตว่า กฎของการรักษามวลคงไว้ ก็จะมีส่วนประกอบสำหรับใช้ตั้งสมการที่เหมือนกัน 3 สมการ (Newton's, Adiabatic-Boyle – Charles และ Conservation) เมื่อนำมารวมกันก็จะได้สมการคลื่น สำหรับพื้นราบ One – Dimensional Sound – Pressure wave ของ Angular Frequency ω

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = - \frac{\omega^2}{c^2} p \quad (2.5)$$

ซึ่ง p = ความดันเสียง

c = ความเร็วของเสียงในอากาศ

$\omega = 2\pi f$, Radians / sec

f = ความถี่ของคลื่น, cps

x = Coordinate system ทางที่คลื่นจะเดินทางไป

Forward-traveling wave ตอนนี้อินจินตนาการว่าลูกสูบในท่อเกิดคลื่นเสียงซึ่งเดินทางไปทางขวา และไม่สะท้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.3 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ปลายด้านขวามือของท่อเป็น Anechoic (เสียงสะท้อน) ดังนั้น พลังงานทั้งหมดที่ถูกผลิตออกมาโดยลูกสูบก็จะถูกดูดกลืนที่ส่วนปลาย

กำหนดพื้นราบไปตามท่อเป็น $x = 0$ Plane ณ พื้นราบนี้ความดันเสียงจะผันแปร sinusoidally ที่ความถี่เดียวกันเหมือนลูกสูบ และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ P_R ดังนั้น

$$[p(t)]_{x=0} = P_R \cos \omega t \quad (2.6)$$

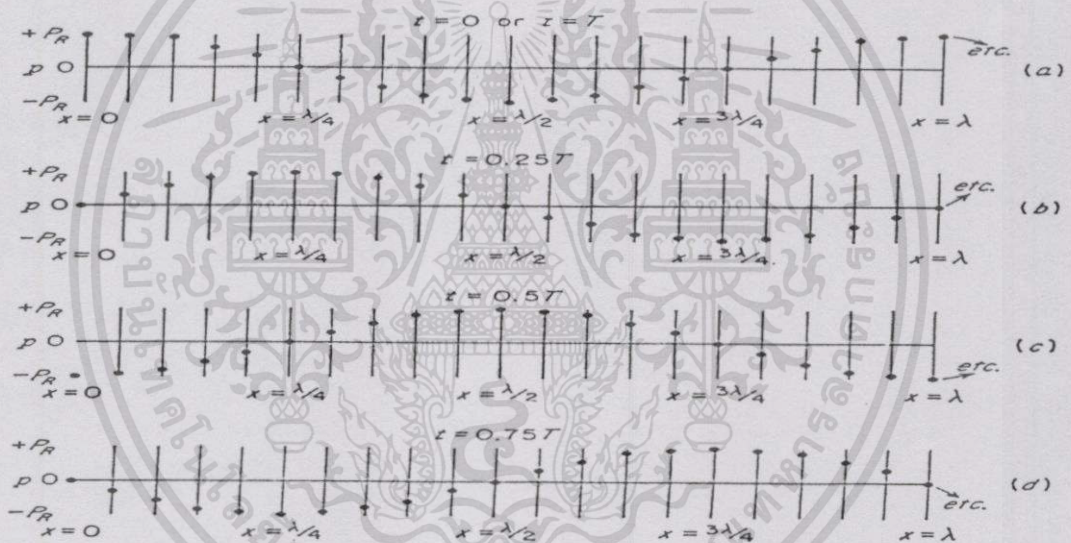
ตอนนี้เมื่อดูที่รูป 2.4 เราจะสังเกตแผนภาพ 4 ซึ่ง Plot ความดันเสียงเปรียบเทียบกับความผันแปรของระยะทาง X เราจะสังเกตได้ว่า แผนภาพแต่ละอันมีเส้น vertical ลากไป 20 แห่งไปตามทิศทาง X เส้นเหล่านี้จะช่วยในการรวมจุดไปที่ตำแหน่งตามเส้นทางของ Free Progressive Wave ที่กำลังเดินทางออกด้านนอก ในทางปฏิบัติคลื่นที่เดินทางแบบนี้อาจมีอยู่จริงสำหรับความถี่ที่ต่ำกว่า 500 cps ในท่อขนาดยาวซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm (2 in.) ตัว loudspeaker จะถูกวางไว้ที่ปลายด้านซ้ายของท่อและส่วนปลายของท่อ (ไม่สะท้อน) ที่ปลายด้านขวา ความถี่ของแหล่งกำเนิดเป็น 100 cps ดังนั้น ความยาวคลื่นจะเป็น

$$\lambda = \frac{c}{100} = \frac{344}{100} = 3.44 \text{ m (11.28 ft)} \quad (2.7)$$

ซึ่ง c คือ ความเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 344 m/sec (1,128 ft/sec) เวลาที่ใช้สำหรับให้คลื่นเดินทาง 1 ความยาวคลื่น (3.44 m) นั่นคือ Period จะเป็น

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{3.44}{344} = \frac{3.44}{344} = 0.01 \text{ sec} = \frac{1}{f} \quad (2.8)$$

ก่อนอื่น ดูที่กราฟรูป 2.4 (a) ที่แต่ละแห่งของทั้ง 20 จุดตลอดทางของคลื่น ตำแหน่งของจุดจะแสดงความดันเสียง



รูปที่ 2.4 แสดง Sound Pressure ใน Plane free progressive สำหรับ Forward - traveling wave 20 จุด

ความดันเสียงนี้จะอยู่เหนือเส้นศูนย์ใกล้กับปลายด้านซ้ายและขวา จะอยู่ต่ำกว่าเส้นศูนย์ที่ระหว่างเส้นศูนย์กลางจะเป็นเส้น เครื่องวัดความดัน (Barometric-pressure) กราฟ (a) ของรูป 2.4 คือ " ถ่ายรูปโดยใช้ไฟแฟลช " ที่เวลา $t = 0$ ของการกระจายความดันเสียงไปในช่องว่างเหนือระยะทางซึ่งถูกเลือกให้เป็นความยาวคลื่น

ตอนนี้ในเวลาสั้นๆต่อมา ที่เท่ากับ 0.0025 sec นั่นคือ $T / 4$ sec คลื่นได้เดินทางไปทางขวา ระยะทางเท่ากับ $1/4$ ความยาวคลื่น [ดูกราฟ (c) และ (d) ในรูปที่ 2.4] คลื่นได้เดินทางไปอีก 0.86 m. และในที่สุด ภายหลัง 0.01 sec = T คลื่นก็ได้เดินทางได้เต็มความยาวคลื่น และกราฟ (a) ก็

จะนำมาใช้อีกครั้งหนึ่ง จากนั้นการต่อเนื่องทั้งหมดของกราฟทั้ง 4 เคลื่อนที่ซ้ำตัวเองครั้งแล้วครั้งเล่าเหมือนกับที่คลื่นจะยังคงเดินทางไปทางขวาจากแหล่งกำเนิด

จะเห็นว่า ณ.แต่ละตำแหน่ง ความดันเสียงจะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นแนวราบที่แสดงไว้ ความดันคลื่นใดๆที่มีอยู่ที่เส้นแนวราบอันหนึ่งที่ทำให้ชั่วครวจะเกิดขึ้น ณ.ตำแหน่งถัดไปทางขวาที่ $T / 20 = 0.01 / 20 = 0.005 \text{ sec}$ เป็นสิ่งอธิบายกล่าวที่ว่า คลื่นเดินทาง (wave motion) ประเภทนี้อธิบายในทางคณิตศาสตร์ได้โดย

$$p(x, t) = P_R \cos \left(\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) \quad (2.9)$$

- ซึ่ง
- P_R = จุดยอดของระดับความดันเสียง, newtons / m²
 - X = ระยะทางที่คลื่นเดินทางไป, m
 - T = เวลา, sec
 - C = ความเร็วของเสียง = 344 m/sec
 - ω = $2\pi f$ = มุมความถี่, radians/sec

สมการนี้ถูกต้อง สามารถเห็นได้โดยการแทนที่ P ในสมการ (2.5) ที่ด้านขวามือของสมการ (2.9) และสังเกตดูว่าเป็นการแก้ปัญหา

สรุปสมการ (2.9) กับรูป 2.4 จะได้ว่า :

1. คลื่นเสียงแบบ plane, progressive, forward-traveling จะเคลื่อนไปทางขวาโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงความดันจุดยอด นั่นคือ P_R ไม่เป็น function ของ x
2. ณ จุดใดๆของ x ความดันเสียงจะ varies ด้วยความถี่มุม (angular frequency) ω เดียวกันกับที่จุดอื่นๆ
3. ผลเพียงอย่างเดียวของระยะห่างก็คือ การหน่วงเวลา ที่ซึ่งความดัน ณ.จุดใดๆอยู่ที่ค่า เดียวกันมันก็คืออยู่ที่ $x = 0$

ไปดูที่รูป 2.4 เหนือจุด $x = 0$ จะเห็นว่า ความดันจะ varies เหมือนที่ให้ไว้ใน สมการที่ 2.6 จุดที่ $x = \lambda / 4$ ฟังก์ชันเดียวกันจะปรากฏขึ้น ยกเว้นว่าความดันจะไปถึงจุดสูงสุดของมัน ณ ช่วงเวลาที่ $t = 0.25 T = (\lambda / 4) / c \text{ sec}$ ภายหลัง (Eq.2.9) เราอาจจะพูดได้ว่า phase shift ของ $\omega x / c = \omega (\lambda / 4) / c = \pi / 2$ radians ได้เกิดขึ้น ที่จุด $x = \lambda / 2$ ความดันเสียงจะไปถึงจุดสูงสุดที่ $t = (\lambda / 2) / c = 0.5 T$ Phase Shift ในตอนนี้จะเป็น π radians

ในของรูปที่ 2.4 ซึ่ง $f = 100 \text{ cps}$ จะได้

$$p(x, t) = P_R \cos \left[628 \left(t - \frac{x}{344} \right) \right] \quad (2.10)$$

Backward - Traveling wave คลื่นที่เดินทางไปข้างหลังเป็นคลื่นหนึ่ง ซึ่งเดินทางไปในทิศทางตรงข้ามของ x สามารถเกิดขึ้นได้โดยการตั้งแหล่งกำเนิดเสียงไว้ที่ปลายด้านขวามือของท่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm และให้การแผ่รังสีไปทางซ้ายและสะท้อนกลับไปทางด้านขวามือของท่อ ซึ่งอยู่ใน

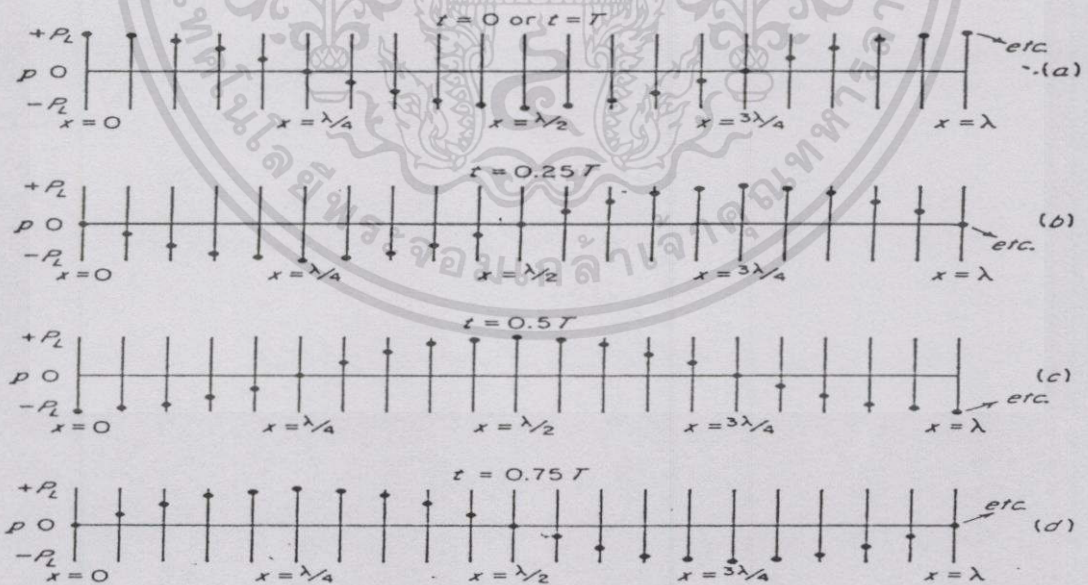
ตำแหน่งที่ไม่มีเสียงสะท้อนกลับ และด้วยวิธีนั้นมันจะหันเหคลื่นที่เดินทางไปข้างหน้าในการเคลื่อนที่

ไปรอบๆ

$$p(x, t) = P_L \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.11)$$

การเปลี่ยนแปลงเพียงอย่างเดียวจากสมการที่ 2.9 จะอยู่ในสัญลักษณ์ที่ตามหลังตัวด้วย t ในสมการ

กรณีการเดินทางไปข้างหลังได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า



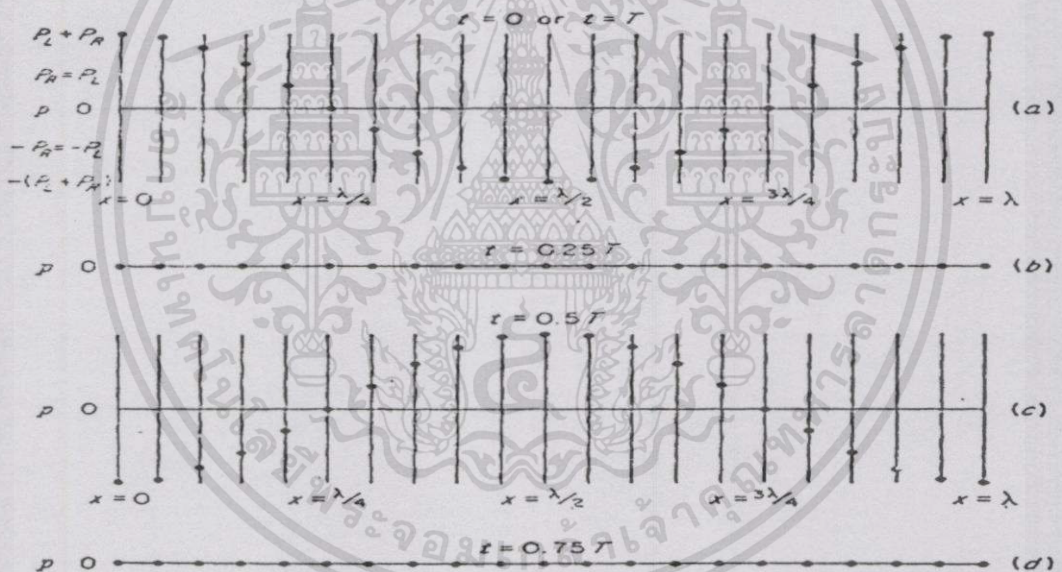
รูปที่ 2.5 แสดง Sound Pressure ใน Plane free progressive สำหรับ Backward - traveling wave 20 จุด

ความดันเสียงใด ๆ ซึ่งมีอยู่ที่เส้นใดเส้นหนึ่ง ก็จะมีอยู่ที่เส้นทางถัดไปทางซ้ายภายหลัง $t / 20$ sec เรียกว่า Phase Shift ของ 18° ($2\pi / 20$ Radians) จะมีอยู่ระหว่างเส้นที่อยู่ประชิดกันและนี้เป็นความจริงตามรูปที่ 2.4

คลื่นที่เดินทางไปทั้งข้างหน้า และข้างหลัง (Combined Forward และ Backward Traveling waves) และ Standing wave ในขั้นตอนถัดไป ได้โดยการบวกสมการที่ 2.4 กับ 2.5 เข้าด้วยกัน จะได้ สมการที่ 2.12 สำหรับ $f = 100$ cps

$$p(x, t) = P_R \cos \left(628 \left(t - \frac{x}{344} \right) \right) + P_L \cos \left(628 \left(t + \frac{x}{344} \right) \right) \quad (2.12)$$

การรวมสมการเข้าด้วยกันจะเห็นได้ว่าคลื่นทั้ง 2 ตัวที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ รูปที่ 2.6 เป็นการรวมทางพีชคณิตอย่างง่าย ๆ ของรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.6 แสดง Sound pressure ของ Plane standing wave ที่ 20 จด

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ความดันเสียงที่จุดหนึ่งจะเกิดขึ้น ณ จุดถัดไปทางด้านขวาหรือทางด้านซ้าย ในช่วงเวลาเล็กน้อยคลื่นก็จะเดินทางต่อไปอีก เห็นว่าที่แต่ละจุดในช่องว่างความดันเสียงจะเพิ่มขึ้น และลดลงเป็นเส้นโค้งตรงกับเวลา ยกเว้นที่จุด $x = \lambda/4$ กับ $x = 3\lambda/4$ ที่นั้นความดันจะเป็นศูนย์เสมอค่าสูงสุดของการผันแปรความดัน ณ.จุดที่แตกต่างจะมากที่สุดที่ $x = 0$, $x = \lambda/2$ และ $x = \lambda$ ความดันเสียงที่จุดทั้ง 9 จุด ระหว่าง $x = \lambda/4$ กับ $x = 3\lambda/4$ จะ Vary พร้อมกันเสมอ นั่นคือ เพิ่มขึ้นหรือลดลงใน Phase แม้ว่าจำนวนสูงสุดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

กันความดันเสียงสำหรับจุด 5 จุดทางซ้ายของ $x = \lambda / 4$ และทางด้านขวาของ $x = 3\lambda / 4$ จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงพร้อมกันด้วยนั้น ใน Phase แต่เปลี่ยนแปลงจะเป็น $1/2$ cps หรือ 180° ออกมาจาก Phase ซึ่งมีความดันเสียงสำหรับจุด 9 จุด อยู่ระหว่าง $x = \lambda / 4$ และ $x = 3\lambda / 4$

สมมุติว่า $P_R = P_L = P$ สามารถแสดงโดยใช้หลักทางคณิตศาสตร์ได้ว่า จำนวนเทอม 2 เทอมในสมการที่ 2.12 คือ

$$p(x, t) = 2P \left[\cos 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \cos \omega t \quad (2.13)$$

ตอนนี้จะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนระหว่างคลื่น Standing กับ Traveling ใน Traveling wave (สมการ 2.9 กับ สมการ 2.11) เวลา t กับ x/c จะเกิดขึ้นเหมือนจำนวนรวม หรือ จำนวนที่แตกต่างภายในข้อสรุปของ Cosine ดังนั้น สำหรับ Traveling wave ที่ปรับทั้งเวลา และ ระยะทาง (ตามความเร็วของเสียง) ในข้อสรุปของ Cosine จะสามารถรักษาข้อสรุปนั้นไว้ และยังให้ความสำคัญกับ Cosine เหมือนเดิมในสมการ 2.13 เวลา และ x/c จะไม่ปรากฏพร้อมกันภายในข้อสรุปของ Single Cosine ดังนั้นความดันเสียงแบบเดียวกันก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นที่จุดที่อยู่ประชิดกันในช่องว่างในเวลาหลังจากนั้น

Particle Velocity คือ อัตราความเร็วจากสมการ Newtonian สามารถแก้ปัญหาสำหรับ อัตราความเร็ว u ในฐานของความดันเสียง p เราจะพบว่าในกรณี Free - Progressive - Plane - wave ของรูปที่ 2.3 และ 2.4 นั้น

$$u = \frac{p}{\rho_0 c} \quad (2.14)$$

ซึ่ง u คือ อัตราความเร็ว และ ρ_0 คือ Density ของอากาศผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ 2.9 เราจะเห็นว่า

$$u(x, t) = \frac{P_R}{\rho_0 c} \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.15)$$

กำลังเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ นั่นคือ ความเข้ม (Intensity) ที่ถูกถ่ายทอดไปยังด้านขวามือในรูปที่ 2.3 จะเท่ากับ

$$\text{ความเข้มเฉลี่ย} \quad I = \bar{p}u \quad (2.16)$$

ซึ่งเส้นที่อยู่บนจะระบุเวลาเฉลี่ยของผลคูณ ระหว่างสมการ 2.9 และ 2.15 ลงในสมการ 2.16 จะให้ผลกับ ความเข้มทันทีทันใด (P_R คือจุดยอดหรือค่าสูงสุดของความดันเสียง)

$$I(t) = \frac{P_{\max}^2}{\rho_0 c} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.17)$$

เนื่องจากเวลาเฉลี่ยของ Cosine เป็นศูนย์ ความเข้มเฉลี่ยจึงเป็น

$$I(t) = \left[\frac{P_{\max}}{\sqrt{2}} \right]^2 \frac{1}{\rho_0 c} \quad (2.18)$$

ให้สังเกตความจริงที่ว่าค่า Root - mean - square (rms) ของ Sine wave เท่ากับ $1/\sqrt{2}$ เท่าของค่าที่จุดยอดจะได้

$$I(t) = \left[\frac{P_{\max}}{\rho_0 c} \right]^2 \quad (2.19)$$

เครื่องวัดระดับเสียงทุกตัวจะถูก Calibrate เพื่อที่จะอ่านค่า rms (ถูกเรียกว่า ค่า Effective ด้วยเช่นกัน) ของคลื่นเสียง ดังนั้น Intensity I อาจถูกคำนวณได้อย่างง่ายดาย จาก P_{rms} สำหรับคลื่นประเภทนี้

Spherical wave โดยไม่ต้องลงไปในรายละเอียด เราจะพบว่าสำหรับรูปทรงกลม, 1 มิติ, Free Progressive wave

$$p(r, t) = \frac{A_{\max}}{r} \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (2.20)$$

สมการนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสมการ 2.9

1. ในฐานะที่เป็นรูปทรงกลม Progressive wave จะเดินทางออกไปจากแหล่งกำเนิด ช่วงกว้างของคลื่นความดันจะลดลงในอัตราส่วนที่ตรงกันข้ามกับ r

2. ณ จุด r ใดๆ คลื่นเสียงจะมีความถี่เหมือนกันกับแหล่งกำเนิดรูปทรงกลมที่ผลิตขึ้นมา

3.นอกจากผลลัพธ์ของบนช่วงกว้างของคลื่นแล้ว ระยะทาง r จะทำให้เกิด Time Delay (Phase Shift) ในคลื่นด้วยเช่นกัน

ในกรณีของคลื่นรูปทรงกลม อาจใช้แสดง Average Intensity ที่ระยะทาง r จากแหล่งกำเนิดที่ให้ในสมการ 2.19 ได้ด้วยเช่นกัน ซึ่ง P_{rms} คือความดัน rms ที่ระยะทาง r อย่างไรก็ตามสังเกตว่า ณ จุดนี้ P_{rms} จะลดลงในอัตราส่วนที่ตรงกันข้ามกับ r และทางตรงข้าม p_{rms} จะคงที่สำหรับ Plane wave

ความคล้ายคลึงกันระหว่างสูตรของ Acoustic power flow กับ Electrical power ใน watts, E อยู่ใน Volts และ R เป็นความต้านทานในรูป ohms ถ้าระบุ $\rho_0 c$ เป็นชนิดหนึ่งของ Acoustic Resistance จะมีสูตรที่คล้ายคลึงกันสำหรับกำลังงานในทุกกรณี

ความแตกต่างที่สำคัญระหว่าง Plane wave กับ Spherical waves กลายเป็นสิ่งที่เห็นได้เด่นชัด เมื่อพิจารณา Intensity ของคลื่นเสียง ณ.จุดใดจุดหนึ่งที่ถูกให้มา ถ้าสมมติว่าแหล่งกำเนิดได้แจกจ่าย Constant Energy ให้กับคลื่นโดยไม่มีการลดน้อยลงใน Plane Wave, Intensity ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะได้มาจากแหล่งกำเนิดไกล เมื่อพื้นที่ Wave Front อยู่คงที่ (ท่อมีหน้าตัดคงที่) ใน Spherical Wave พื้นที่ของ Wave Front เพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางไปยังหน้าไกลออกไปเรื่อยๆ จากแหล่งกำเนิดในความเป็นจริง พื้นที่นี้เพิ่มขึ้นพร้อมกับ Square ของระยะทางจากแหล่งกำเนิด เมื่อพื้นที่ของ Sphere เท่ากับ $4\pi r^2$ เท่ากับ Square ของรัศมีเพราะฉะนั้นใน Spherical Wave ที่มีแหล่งกำเนิดของพลังงานต่อวินาทีคงที่ (นั่นคือ กำลังคงที่) Intensity ก็ต้องลดลงเหมือน Square ของระยะทางจากแหล่งกำเนิด เมื่อผลคูณของ Intensity กับพื้นที่ที่ผ่านมีค่าเท่ากับพลังงานที่ถูกส่งผ่านโดยคลื่น นี่เป็นที่มาของ Inverse Square law อาจกล่าวง่าย ๆ ว่า

$$I \text{ (ที่รัศมี } r \text{ X)} = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{P_{rms}^2 \text{ (ที่ } r \text{)}}{\rho_0 c} \quad (2.21)$$

ซึ่ง W คือ Total Acoustic Power ที่ถูกปล่อยออกจากจุดศูนย์กลางที่แหล่งกำเนิดของเสียง

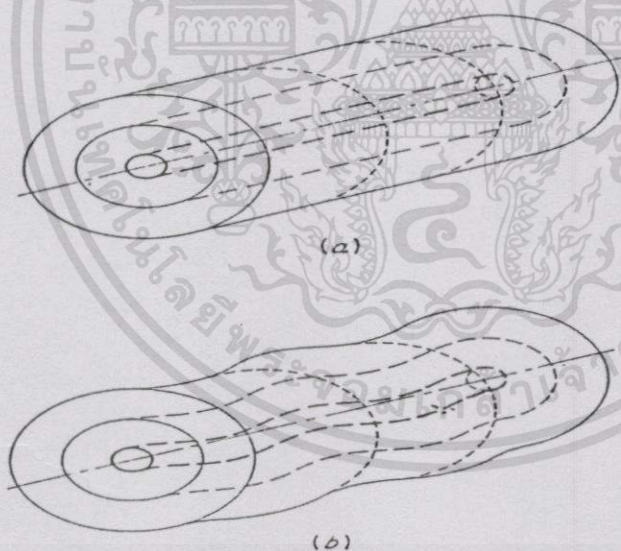
จะเห็นว่า สำหรับระยะทาง 10 เท่า ความดันเสียงถูกทำให้ลดลงด้วย Factor 10 และ Sound Intensity ถูกทำให้ลดลงด้วย Factor 100 เปรียบเทียบตัวอย่างนี้กับตัวอย่าง 2.3 สำหรับ Plane Free Progressive Wave

ในวิธีการกระทำคล้ายคลึงกันกับการสร้างคลื่นแบบ Plane กับ Spherical, สามารถทำให้เกิดคลื่นที่มีธรรมชาติซับซ้อนกว่านี้ได้ ตัวอย่างอีกอันหนึ่งของคลื่น Free Progressive Wave 1 มิติ สามารถได้มาโดยการพิจารณาระบบท่อสุบที่ยาวมากๆ หรือท่อ ลักษณะตรงที่เต็มไปด้วยอากาศ สมมติว่า ให้พื้นผิวหน้าของท่อเด่นเป็นจังหวะสม่ำเสมอในทิศทางที่แพร่รัศมีคลื่นเสียงจะแพร่ออก

ไปจากกระบอกสูบ คลื่นนี้ตัดสลับกันระหว่าง Plane Wave กับ Spherical Wave ที่จุดใดจุดหนึ่ง คลื่นจะมีคุณสมบัติเหมือนกันกับจุดอื่นที่ระยะห่างเดียวกันจากกระบอกสูบ แต่จะมี 2 จุดที่มีระยะห่างจากกระบอกสูบแตกต่างกันคลื่นก็จะแตกต่างกันสามารถแสดงให้เห็นว่า ความเข้มที่ระยะห่างใดๆจากแหล่งกำเนิดจะตรงกันข้ามกับ Power แรกสุดของรัศมีมากกว่า Power อันที่สองเมื่ออยู่ในกรณีของ Spherical Wave คลื่นชนิดนี้ถูกเรียกว่า Cylindrical Wave 1 มิติ

เหมือนดังเช่นตัวอย่างในคลื่น 2 มิติที่สมมติให้เพิ่มเข้าไปใน Uniform Radial Motion ของกระบอกสูบถูกกำหนดให้มีคลื่นอันอื่นตลอดทั้งแกนของตัวกระบอกสูบ ผลก็คือคลื่นเสียงที่ถูกแผ่รังสีจากกระบอกสูบ ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กักระยะทางการแผ่รังสีจากแหล่งกำเนิดเท่านั้น แต่ยังต้องขึ้นอยู่กักระยะทางตลอดแกนของแหล่งกำเนิด

รูปที่ใกล้เคียงกับคลื่นทั้ง 2 อธิบายมาข้างต้นจะถูกแสดงไว้ในรูป 2.7 คลื่นถูกแสดงด้วยลักษณะต่อเนื่องของพื้นผิวที่เรียกว่า "Wave Front" Wave Front ถูกเรียกเป็นพื้นผิวที่มี Phase เท่ากัน หมายความว่า ดันเสียงที่แต่ละพื้นผิวจะมีความหนาทันกับความดันเสียงที่พื้นผิวอื่นนั่นก็คือ ถ้าความดันเสียงอยู่ที่จุดสูงสุด ณ พื้นผิวหนึ่งก็จะอยู่ที่จุดสูงสุด ณ พื้นผิวอื่นทุกที่ที่มี phase เหมือนกัน



รูปที่ 2.7 แสดงคลื่น หนึ่ง และ สองมิติ

2.1.6 การอ้อมของคลื่นที่ผ่านวัตถุที่ขวางหน้า (Diffraction – standing wave)

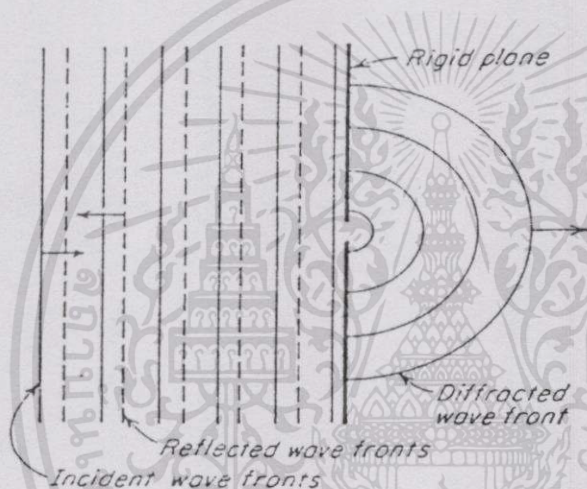
Free Progressive Wves ถูกอธิบายไว้ว่าไม่มีอุปสรรคหรือการเปลี่ยนแปลงในตัวกลางที่ถ่ายทอด คลื่นเหล่านี้สามารถอยู่ได้เฉพาะในช่องว่างอิสระ(Free Space)เท่านั้นทันทีที่ปิดช่องว่างนั้น หรือ วางสิ่งกีดขวางในเส้นทางคลื่นรูปร่างของคลื่นก็จะถูกเปลี่ยนไป การวิเคราะห์ทาง

คณิตศาสตร์ในเรื่องการทำปฏิกิริยาของคลื่นกับสิ่งกีดขวางเป็นสิ่งที่ยากแต่ก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจ

ไปว่าคลื่นมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนขึ้นเมื่อผ่านสิ่งกีดขวางที่มีรูปร่างไม่เรียบ และด้วยเหตุนี้จึงมีวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนกว่าที่จะใช้การคำนวณง่ายๆได้

ที่สุดสิ่งที่เป็นตัวบอกว่า Wave Front สามารถถูกทำให้เปลี่ยนได้ก็อาจตรวจสอบกรณีของ Plane Wave ที่ปะทะกับพื้นผิวหน้าเรียบขนาดใหญ่ ซึ่งเต็มไปด้วยรูเล็กๆ เสียงจะทะลุผ่านรูเล็กๆ รูปแบบของ Spherical Wave เสียงนั้นที่กระทำตัวในลักษณะที่อธิบายไว้สามารถแสดงได้ทั้งทางการวิเคราะห์ และทางการทดลอง การวิเคราะห์ซึ่งศึกษาปรากฏการณ์นี้รู้จักกันในนามของทฤษฎี Diffraction และคลื่นเสียงอันใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นมาจะรู้จักกันในนามของ Diffraction Wave

Standing Wave จะอยู่ในสถานที่ปิด ซึ่งมีพื้นผิวหน้าขนานกันและกัน ในห้องรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากอาจจะมี Standing Wave ความถี่ Resonant Standing Waves สามารถคงอยู่ได้จะสัมพันธ์กับการแบ่งแยกระหว่างพื้นผิวที่มีการสะท้อน ความถี่ที่ต่ำที่สุดสำหรับ Resonant Standing Wave ในระบบ 1 มิติจะได้



รูปที่ 2.8 การกระจายคลื่นผ่านช่องเล็ก

$$f = \frac{c}{2d} \quad (2.22)$$

ซึ่ง f = ความถี่ที่ต่ำที่สุดสำหรับ Resonant standing wave

c = ความเร็วเสียง

d = ระยะทางที่แยกพื้นผิวที่มีการสะท้อน 2 ผิวหน้า

Resonant Standing waves จะสามารถคงอยู่ได้เช่นกันในทุก ๆ ผลคูณจำนวนเต็ม

$$f = \frac{nc}{2d} \quad (2.23)$$

ซึ่ง n เป็นจำนวนเต็ม : 1,2,3,.....

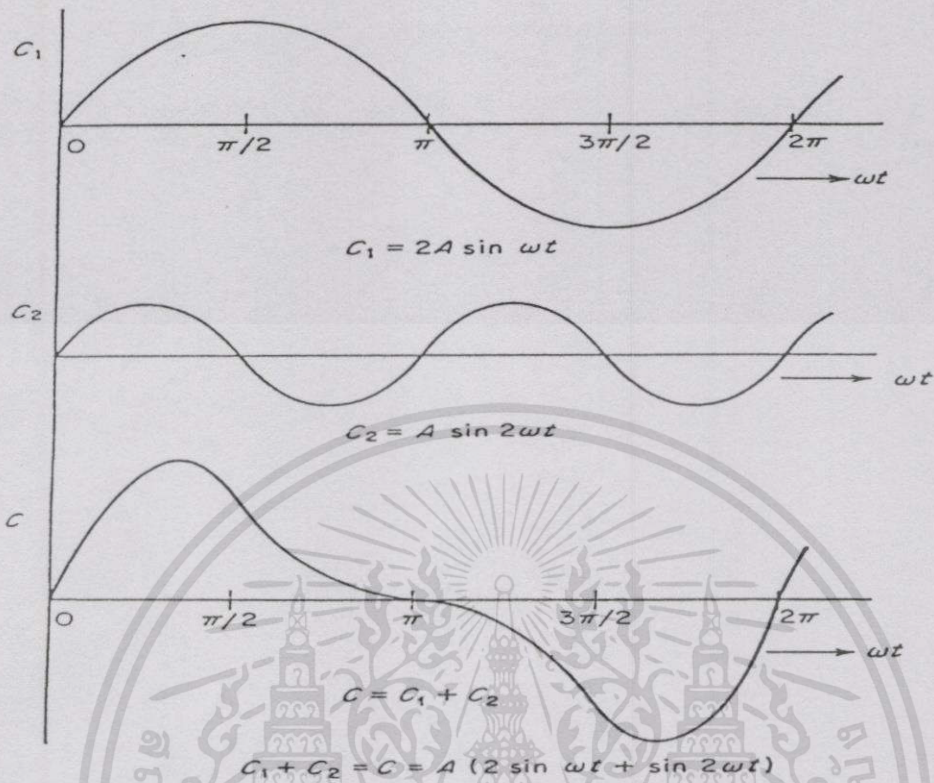
2.1.7 ส่วนประกอบของคลื่น

การรวมกันของคลื่นที่สัมพันธ์กันอย่าง Harmonically และ Inharmonically ในการอธิบายถึงปัจจุบัน ได้พิจารณาคลื่นที่มีความถี่ Single เพียงอย่างเดียวเท่านั้น คลื่นเสียงจะถูกเรียกว่า Pure Tone ในธรรมชาติ Pure Tone โดยปกติจะไม่มีผลลัพธ์เป็น Complex Wave ด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fourier Analysis สามารถแสดงให้เห็นว่าคลื่นเสียงใดๆ ซึ่งซ้ำตัวเองเป็นช่วงๆ อย่างสม่ำเสมอสามารถนำมาพิจารณาเป็นการรวมตัวอย่างเหมาะสมของ Sine Waves ซึ่งความถี่ต่างๆ เป็นผลคูณของบางความถี่ที่ถูกเรียกว่า Fundamental Frequency Component ที่มีความถี่สองครั้งในขั้นต้นจะถูกเรียกว่า Second Harmonic และอันอื่นๆต่อไป Component Wave ที่ให้มา รูปแบบคลื่นของ Resultant Periodic Wave สามารถได้มาโดยใช้กระบวนการของ Superposition นั่นก็หมายถึง ณ.เวลาใดๆ ที่ให้มา Amplitudes ของ Individual Component จะถูกเพิ่มเป็นแนวยาว เพื่อจะให้ Amplitude ของ Periodic Complex Wave คลื่นที่ถูกรวมตัวกันซ้ำทับตัวเองจากแต่ละช่วงเวลา T ที่เท่ากับ $1/f_1$ ซึ่ง f_1 เป็น Fundamental Frequency

การรวมกันของหลายๆ Sine waves แนวคิดของ Phase ที่เกี่ยวข้องระหว่าง Individual components ทำให้สมบูรณได้ตามจำนวนของวิเคราะห์วิธีที่ง่ายที่สุดก็คือการอ้างอิง Phase ที่สัมพันธ์กันของ Harmonics ที่บางจุดซึ่งกำหนดไว้ในเวลา (อ้างอิงเป็น $t = 0$) จนถึง Phase ของ Fundamental เวลาถูกเลือกขึ้นมาดังนั้น Fundamental จะมีทั้ง Zero value (Fundamental สามารถแทนได้เป็น $(\sin \omega t)$ หรือมีทั้ง Positive maximum value (Fundamental สามารถแทนด้วย $(\cos \omega t)$ Harmonics ก็สามารเขียนได้เป็น $C_n \sin n (\omega t + \theta_n)$ หรือ $C_n \cos n (\omega t + \theta_n)$ ในที่นี้ n คือ ลำดับของ Harmonic นั่นคือ 2,3,4 และอื่นๆ C_n คือ Amplitude ของ " n " Harmonic และ θ_n คือ Phase ของ n Harmonic ที่สัมพันธ์กับ Fundamental

ตัวอย่างของการรวมตัวของหนึ่ง Sine wave กับอันอื่นเพื่อก่อให้เกิด Complex Wave ได้ถูกระบุไว้ในรูปที่ 2.9 ซึ่ง Sine Wave และ Second Harmonic ถูกรวมเข้ากับ Zero Phase Difference ที่ $t = 0$ เพื่อจะให้เกิด Third wave การรวมกันของ Sines 2 ตัวที่เหมือนกันเหล่านี้กับ Phase Difference $\pi/4$ Radians ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ตัวอย่างคลื่นที่สามที่ถูก Plot ไว้ในรูปที่ 2.11 จะแสดงผลเมื่อ Phase Difference $\pi/2$ Radians ถูกนำเข้ามาระหว่างคลื่นทั้งสอง

การเพิ่ม Component waves เพื่อจะทำให้เกิด Complex wave กำหนดรายละเอียดคุณสมบัติอื่นๆ ของคลื่น ตัวอย่างเช่นจุดยอดของ Complex waves ที่ถูกประกอบด้วย Component ที่สัมพันธ์กันอย่างกลมกลืนกับ Amplitude ของ Individual Component เท่านั้นแต่ต้องอาศัย Phase ที่สัมพันธ์กันระหว่าง Component ซึ่งสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 2.9 ,2.10 และ 2.11 โดยทั่วไปจะเป็นค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อ Harmonics ที่สูงกว่าทั้งหมดอยู่ใน Phase ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ นั่นคือ $\theta_n = 0$ นี้สันนิษฐานได้ว่าทั้งหมดนี้ถูกแสดงเป็น Cosine Function



รูปที่ 2.9 การรวมสองความถี่ Harmonically กับ Sine wave ก่อให้เกิดคลื่นที่ซับซ้อน

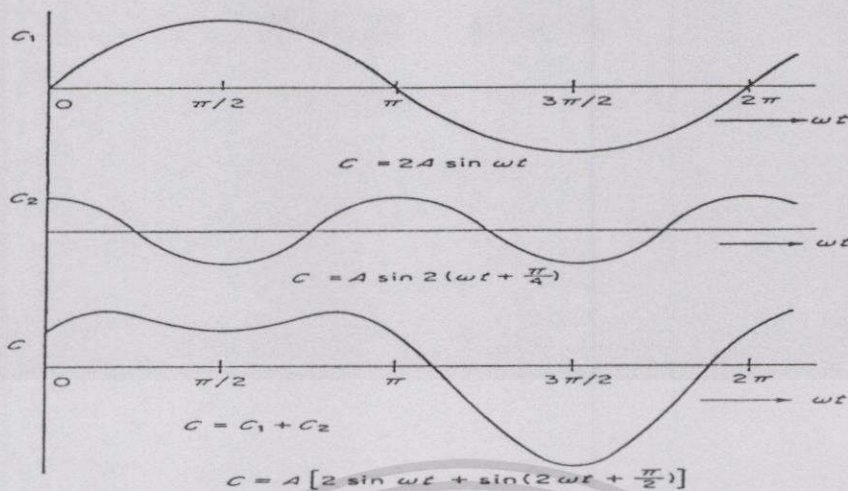
ก่อนหน้านี้ได้ระบุไว้ว่า Effective (rms) value ของความดันคลื่นเสียงเป็นปริมาณที่มีประโยชน์ที่สุดในเมื่อกำลัง (Power) ที่ถูกส่งผ่านโดยคลื่นมีความสัมพันธ์กับ Mean - Square Pressure ในคลื่นนั้นจากสมการ 2.19

สมมติว่าใช้เครื่องวัดระดับเสียง (Sound - Level Meter) ที่สามารถกำหนด Effective (rms) ความดันเสียงได้ ทำการวัดคลื่นเสียงทั้ง 2 ที่ปล่อยออกมาจาก 2 แหล่งให้ความดันของคลื่นเป็น

$$P_1(t) = P_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) \quad (2.24a)$$

$$P_2(t) = P_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \quad (2.24b)$$

ซึ่ง ω_1 กับ ω_2 เป็นความถี่มุม (Angular) และ θ_1 กับ θ_2 เป็น Phase ตามลำดับ

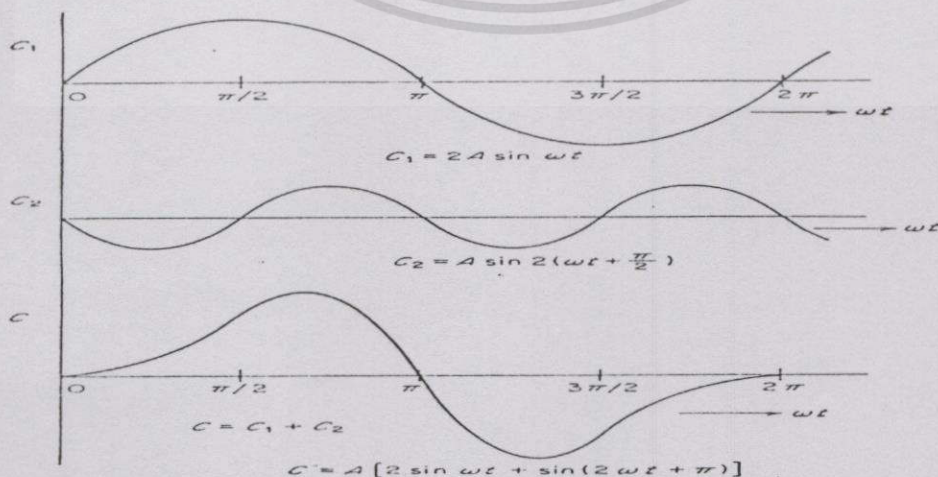


รูปที่ 2.10 การรวมสองความสั้มพันธ์ Harmonically กับ Sine wave ที่มีผลต่างใน Phase ณ. จุด เวลาชั่วขณะเดียวกันก็ตาม ความดันที่ถูกวัดด้วยไมโครโฟนจะเป็น

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) = P_1 \cos (\omega_1 t + \theta_1) + P_2 \cos (\omega_2 t + \theta_2) \quad (2.25)$$

ในการตัดสินใจทำให้เกิดผลของผลบวกนี้ วงจรใน Ideal sound - level meter จะเป็น Square p(t) ใช้เวลาเฉลี่ย แสดง Square Root ของผลลัพธ์(ถูกเปลี่ยนเป็นเดซิเบล) บนเครื่อง แสดงผล เมื่อ p(t) ถูกทำให้เป็น square จะได้

$$[p(t)]^2 = \frac{P_1^2 + P_2^2}{2} + \frac{P_1^2 \cos 2(\omega_1 t + \theta_1)}{2} + \frac{P_2^2 \cos 2(\omega_2 t + \theta_2)}{2} + 2P_1 P_2 \cos (\omega_1 t + \theta_1) \cos (\omega_2 t + \theta_2) \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.11 แสดงเหมือนกับรูปที่ 2.9 และ 2.10 คลื่นสองคลื่นที่ต่าง Phase

รู้ว่าเวลาเฉลี่ยของแต่ละ Single Cosines เป็นศูนย์สามารถนำมาแสดงในเชิงคณิตศาสตร์ได้ว่าเวลาเฉลี่ยของผลคูณของ 2 Cosines ก็เป็นศูนย์ด้วยในทุก ๆ ยกเว้นเฉพาะที่มีความถี่เหมือนกันผลที่ได้สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ Mean – Square Pressure (ด้วย $\omega_1 \neq \omega_2$) ดังนี้

$$p^2 = \left[\frac{P_1}{\sqrt{2}} \right]^2 + \left[\frac{P_2}{\sqrt{2}} \right]^2 \quad (2.27)$$

จะเห็นว่า $P_1 / \sqrt{2} =$ ความดันเสียงจริงของคลื่นแรก และ $P_2 / \sqrt{2} =$ ความดันเสียงจริงของคลื่นที่สองเพราะค่า rms ของ sine wave เป็นที่รู้กันว่าเป็น $1 / \sqrt{2}$ เท่าของค่า Peak ดังนั้นสำหรับคลื่น 2 คลื่นที่มีความถี่แตกต่างกัน

$$P = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} \quad (2.28)$$

ซึ่ง P , p_1 และ p_2 เป็น Effective (rms) Magnitudes

ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ปริมาณ 2 อัน p_1 กับ p_2 จะประกอบด้วย Sine wave ที่สามความถี่เดียวกันแต่ต่างกันที่ Amplitude กับ Phase

$$\begin{aligned} p(t) &= p_1(t) + p_2(t) \\ &= \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2P_1P_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)} \cos(\omega t + \theta_3) \\ &= P_3 \cos(\omega t + \theta_3) \end{aligned} \quad (2.29)$$

ซึ่ง θ_3 เป็นมุม Phase ใหม่ ความดัน rms จะเป็น

$$P = \frac{P_3}{\sqrt{2}} = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1p_2 \cos 2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2.30)$$

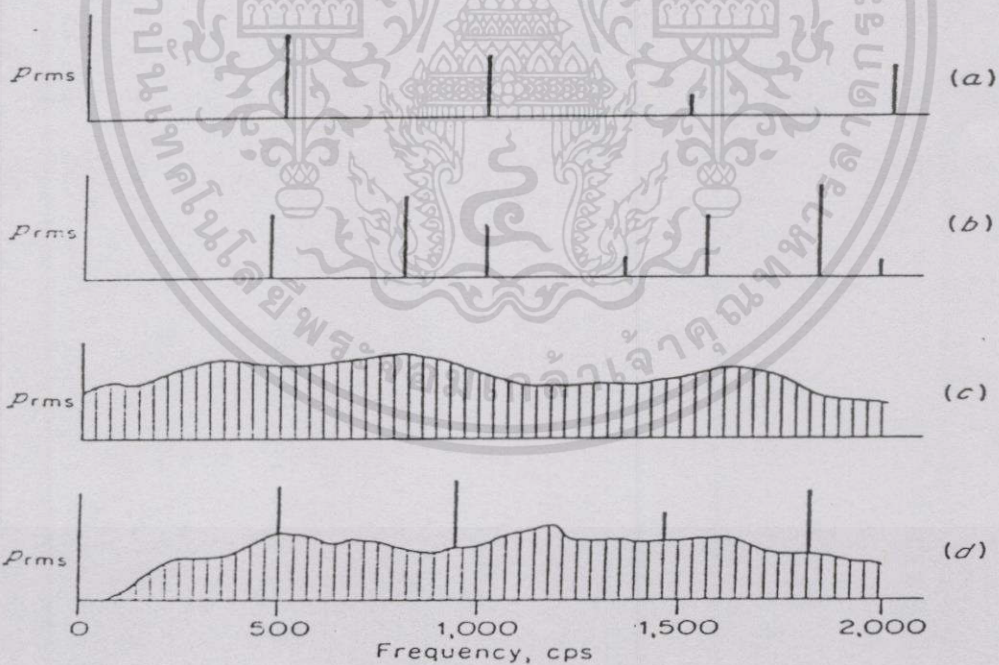
ซึ่ง p_1 , p_2 และ p_3 เป็นค่า rms การเปรียบเทียบสมการ 2.30 และ 2.28 แสดงให้เห็นความสำคัญของ Phase เมื่อทำการประกอบคลื่น sine ทั้งสองตัวที่มีความถี่เหมือนกัน ถ้าผลต่าง Phase Difference ($\theta_1 - \theta_2$) เป็นศูนย์ คลื่นทั้งสองใน Phase และความดันรวม ก็จะอยู่ที่ค่าสูงสุด ($\theta_1 - \theta_2 = 0$) ความดันรวมก็จะอยู่ที่ต่ำสุด ในทางปฏิบัติความดันเสียงจริงคลื่นทั้งหมดที่ซึ่งมีความถี่แตกต่างกัน ซึ่งคลื่นทั้งสองถูกเพิ่มเข้ามารวมด้วยกันตามสมการ 2.30 เพื่อจะให้ได้ความดันจริงอันใหม่ ดังนั้นความดันนี้กับความดันส่วนที่เหลืออยู่ของส่วนประกอบจะถูกรวมยอดตามสมการ 2.28

หนึ่งในปริมาณต่อไปที่น่าสนใจ คือ ค่าเฉลี่ยที่ถูกปรับให้ถูกต้องของคลื่น หมายถึง Negative loop ของคลื่นถูกทำให้เป็นตำแหน่ง และค่าเฉลี่ยนั้นที่อยู่ใต้ loops ทั้งหมดก็จะถูกกำหนด สำหรับ Sine wave ของค่า Peak เนื่องจาก Effective value ของ Sine wave ของจุดยอด ค่าเฉลี่ยที่ถูกปรับให้ถูกต้องของ Effective value

สำหรับ Complex Wave ที่มีคลื่นที่มีหลายๆ ส่วนประกอบที่สัมพันธ์กันอย่างกลมกลืน ค่าเฉลี่ยที่ถูกปรับให้ถูกต้องจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ Amplitudes และ Phases ของส่วนประกอบเฉพาะตัวนั้น

แสดงให้เห็นว่า Phase ไม่ใช่สิ่งสำคัญในการตัดสินใจ Effective (rms) Value ของการรวมตัวของ Sine Wave ที่มีความถี่แตกต่างกัน ผลที่ได้มักจะได้ออมูล Amplitude จากกราฟในรูปที่ 2.12 Spectra 4 ลำดับชั้นได้ถูกแสดงไว้

Line Spectrum sound กราฟบนสุด (a) แสดง Effective sound – Pressure Spectrum สำหรับกลุ่มของส่วนประกอบทั้ง 4 ที่สัมพันธ์กับความถี่ Fundamental และ Effective sound Pressure ของแต่ละส่วนประกอบจะถูกระบุโดยความสูงแนวตั้งของเส้นเหนือความถี่ กราฟเช่นนี้ จะถูกเรียกว่า Line Spectrum



รูปที่ 2.12 การแสดง line Spectrum harmonically b) แสดง line Spectrum Inharmonically c) การต่อเนื่องของ Spectrum d) การรวม line และความต่อเนื่องของ Spectrum (เกี่ยวกับการเกิด Spectrum)

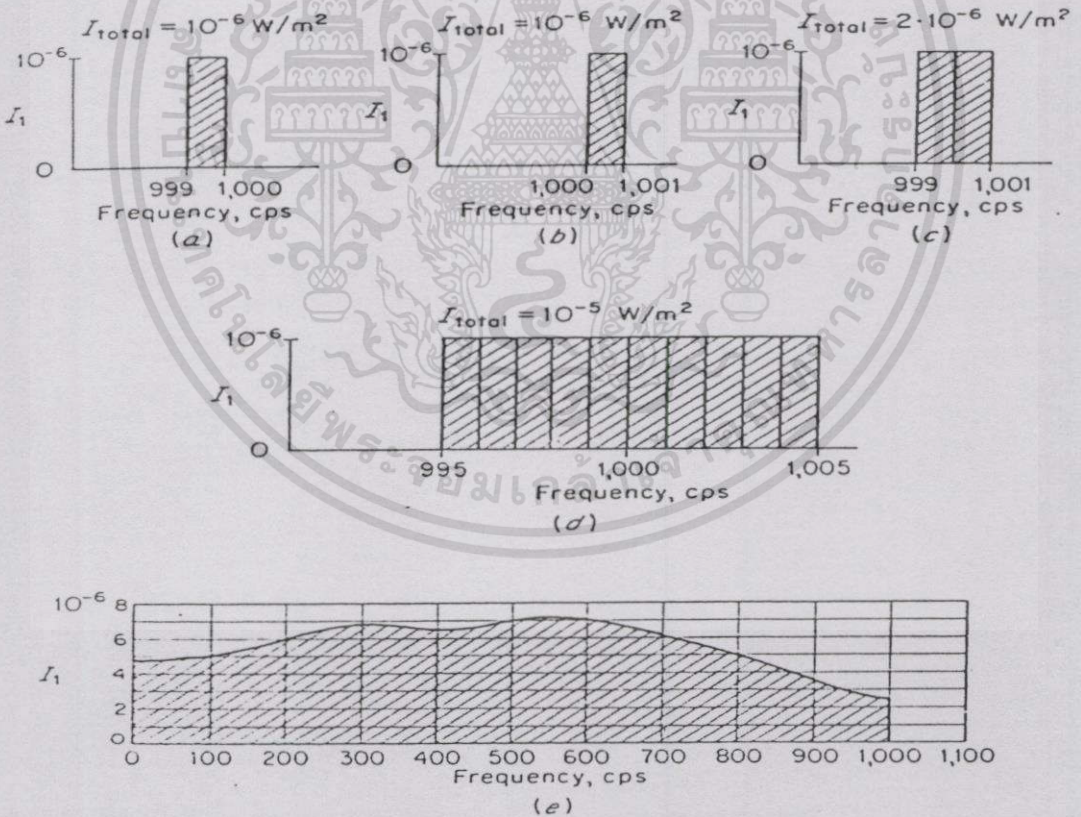
Power มากเท่ากับ 1 ครั้ง Intensity ก็ต้องเป็นสองเท่าเหมือนกับในรูปที่ 2.13 เครื่องจักรแบบนี้ 10 เครื่องจะผลิต Intensity เป็น 10 เท่า

กล่าวอีกนัย หนึ่งคือ ถ้าความต่อเนื่อง Spectrum เป็น "Flat" (มีความเข้มเหมือนกับใน ทุกๆ 1 cps Band) Total Intensity จะได้ว่าโดย

$$I_{total} = I_1 \Delta f \tag{2.31}$$

หรือ Total Intensity เท่ากับผลคูณของ Intensity ใน 1 cps Band ที่ถูกคูณด้วยความกว้างของ Total Band ใน รอบต่อวินาที

เหตุผลนี้จะดีมากถ้า Spectrum เป็น Flat แต่สิ่งที่จะทำให้ Spectrum เป็นสิ่งที่แตกต่างกัน ณ ความถี่ที่แตกต่างกัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 e ซึ่งจะแทนที่ Actual I_1 ของตัวเลขนั้น ค่าเฉลี่ย I_1 เข้าไปใน Band ที่สนใจ



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงการเพิ่มความเข้ม และความกว้างของเสียง

ในทางกลับกัน ถ้าวัด I_1 พร้อมกับ Analyzer ที่มี Bandwidth Δf Average Spectrum

Intensity I_1 (1 cps Band) ที่อยู่ใน Band นั้นจะได้มาจากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$I1 = \frac{I_T}{\Delta f} \quad (2.32)$$

เนื่องจากสามารถวัด Effective sound pressure ได้ง่าย แต่ไม่สามารถวัด Sound Intensity ซึ่งจะใช้จากสมการ 2.31 กับสมการ 2.32 ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อถูกแสดงในรูป Effective sound pressure การแทนที่สมการที่ 2.19 เข้าไปในสมการที่ 2.31 จะให้

$$\left(\frac{p_{rms}^2}{\rho_0 c} \right)_{Total} = \left(\frac{p_{rms}^2}{\rho_0 c} \right)_1 \Delta f \quad (2.33)$$

การตัดค่าของ $\rho_0 c$ และหาค่า Square root นำไปสู่

$$(p_{rms})_{Total} = (p_{rms})_1 \sqrt{\Delta f} \quad (2.34)$$

ซึ่ง $(p_{rms})_1$ เป็น Effective sound pressure ในความกว้าง 1 cps

กล่าวคือการเพิ่ม Bandwidth ของ Flat Continuous Spectrum Noise ขึ้นสองเท่าจะทำให้เพิ่ม Intensity ขึ้นด้วย Factor เป็น 2 และ Effective Sound Pressure ด้วย Factor คือ 1.41

2.2 Transmission Through Ducts

2.2.1 Acoustic Impedance (Z)

อ้างถึง One – Dimensional Sound Waves ส่งผ่านท่อปกติจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด (Cross – Sectional area) หรือ Side Branch และเมื่อเกิดการไม่เสมอเหมือนเกิดขึ้น บางครั้งเสียงจะมีการสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดไปถึงการกำหนดขนาด (Magnitudes) ของ Transmitted และคลื่นเสียง จะต้องพิจารณาเงื่อนไขคลื่นเสียงที่ต้องการประการแรก คือ เงื่อนไขของความดัน และประการที่สอง เงื่อนไขของความเร็ว เมื่อความเร็ว คือ Partical velocity time ของ Cross Sectional area ซึ่งรวมถึงการพิจารณา Acoustic Impedance เกี่ยวกับการป้องกันเสียงสะท้อน

$$Z = \frac{\text{ความดัน}}{\text{ความเร็ว}} = \frac{P}{U} = \frac{p}{s \cdot u} = \frac{z}{s} \quad (2.35)$$

เมื่อ s คือ Cross Sectional Area

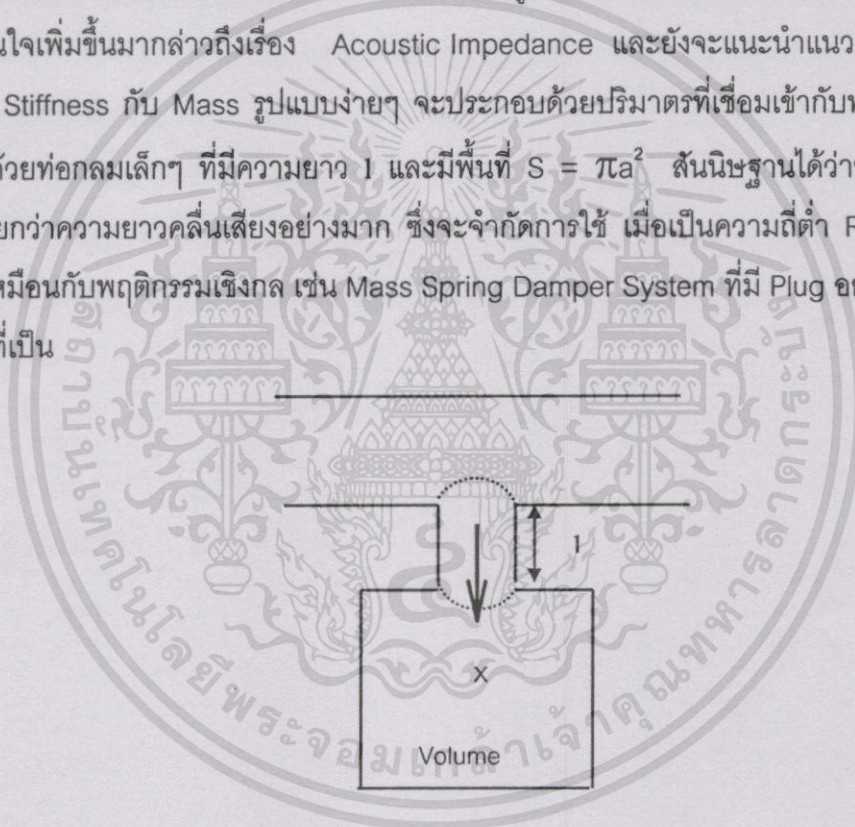
เนื่องจากต้องขึ้นอยู่กับ Cross - Sectional Area ดังนั้นผลรวม Acoustic Power จึงมีความสำคัญมากกว่า Acoustic Intensity ตัว Power ที่ประกอบอยู่ใน Plan wave จะเป็น

$$W = I \times S = \left(\frac{p^2}{\rho_0 c} \right) S = \frac{p^2}{Z_0} \quad (2.36)$$

และยังสะดวกต่อการใช้ Acoustic Impedance

2.2.2 The Helmholtz Resonator

Helmholtz Resonator เป็นเรื่องที่น่าสนใจเพราะถูกใช้ในเครื่อง Acoustic นำไปประยุกต์ใช้ในสิ่งที่น่าสนใจเพิ่มขึ้นมากกว่าเรื่อง Acoustic Impedance และยังจะแนะนำแนวคิดในเรื่อง Acoustical Stiffness กับ Mass รูปแบบง่ายๆ จะประกอบด้วยปริมาตรที่เชื่อมเข้ากับท่อนำเสียงของอากาศด้วยท่อกลมเล็กๆ ที่มีความยาว l และมีพื้นที่ $S = \pi a^2$ สันนิษฐานได้ว่าขนาดทุกๆ ขนาดจะน้อยกว่าความยาวคลื่นเสียงอย่างมาก ซึ่งจะจำกัดการใช้ เมื่อเป็นความถี่ต่ำ Resonator ปัจจุบันจะเหมือนกับพฤติกรรมเชิงกล เช่น Mass Spring Damper System ที่มี Plug อยู่ใน Neck โดยทำหน้าที่เป็น



รูปที่ 2.14 การแสดง Helmholtz Resonator

มวล และปริมาตรของอากาศที่มาด้วย ก็จะทำหน้าที่เป็นเหมือน Spring และหน้าที่ของ Frictional Force บน Plug ของอากาศที่อยู่ใน Neck คือสิ่งที่ไม่ต้องเอาคำนึงถึงก็ได้ เว้นแต่ช่องจะเล็กมาก หรือถูกจำกัดโดยเจตนาในทางใดทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อ Plug สั่นสะเทือนก็สามารถส่งกระจายเสียงเข้าไปในท่อนำเสียง และ พลังงานจะสูญหายไปยัง Resonator ถ้าข้อจำกัดที่มีอยู่ใน Neck หายไป จำนวนการกระจายเสียงนี้ ก็ต้องนำมาคำนวณด้วย ในการตั้งสมการ Motion , Plug ของอากาศถูกสมมติแทนที่ด้วย x ตามแรงภายนอกและจะได้ 4 เทอมดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่าควรใช้โดยผู้เขียน หรือผู้เผยแพร่ใช้โดยไม่ผิดกฎหมาย และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ว่าของเอกสารฉบับนี้สงวนไว้เพื่อ

2.2.2.1 ความแข็งของมวลภายในปริมาตรถึงปิด (Stiffness of enclosed volume)

การแกว่งที่เร็วเพียงพอสำหรับการขยาย และทำให้ความร้อนคงที่ จะได้สมการ

$$p = \frac{\gamma P_0 S}{V} x = \rho_0 c^2 \frac{S}{V} x \quad (2.37)$$

$$\text{แรงในแกน } +x = -pS = -\rho_0 c^2 (S^2/V)x \quad (2.38)$$

2.2.2.2 มวลของ Plug Fluid

Plug ของ Moving Fluid จะใหญ่กว่า Actual Volume, $S\Delta l$ และมักจะถูกเขียนเป็น Effective volume $S'l' = S(1 + 2\Delta l)$. $S\Delta l$ จะเหมือนกับ Volume ของอากาศซึ่งจะเคลื่อนที่ไปเหมือนกับลูกสูบกลมของพื้นที่ S ที่กำลังลั่นตะเทือนอยู่ใน Infinite Baffle และ จะปรากฏขึ้น 2 ครั้ง เพราะ Plug มีปลาย 2 ด้าน ดังนั้นมวลทั้งหมดของ fluid

$$\begin{aligned} m &= \rho_0 S'l' \\ &= \rho_0 S(1 + 2\Delta l) \end{aligned} \quad (2.39)$$

2.2.2.3 ความต้านทานการแผ่รังสี (Radiation Resistance force)

การแผ่รังสีจาก Plug ของอากาศจะเหมือนกับการแผ่รังสีจากลูกสูบกลมที่อยู่ใน Rigid baffle

เพื่อความสะดวกเขียนในรูปแบบของ R คงที่

$$F_{\text{RAD}} = -RS^2 \frac{dx}{dt} \quad (2.40)$$

2.2.2.4 แรงเคลื่อนที่ (Driving force)

ถ้า Resonator ถูกขับโดยคลื่นเสียง Harmonic ฉะนั้น

$$\begin{aligned} F &= Sp \\ &= SAe^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2.41)$$

สมการของการเคลื่อนที่ที่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไปต่างประเทศโดยไม่ขออนุญาต หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และสงวนลิขสิทธิ์ในตัวเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องไว้ด้วย

$$\rho_0 l' S \frac{d^2 x}{dt^2} + RS^2 \frac{dx}{dt} + \frac{\rho_0 c^2}{V} S^2 x = SA e^{j\omega t} \quad (2.42)$$

อัตราความเร็วเชิงอนุภาค

$$U = \frac{dx}{dt}$$

และอัตราความเร็วเชิงปริมาตร

ดังนั้น

$$\frac{\rho_0 l'}{S} \frac{dU}{dt} + RU + \frac{\rho_0 c^2}{V} \int U dt = Ae^{j\omega t}$$

หรือ

$$M \frac{dU}{dt} + RU + K \int U dt = Ae^{j\omega t} \quad (2.43)$$

เมื่อ $M = \rho_0 l' / S$ คือมวลของ Acoustic

และ $K = \rho_0 c^2 / V$ คือ Stiffness Acoustic

การแก้ปัญหา Harmonic ของสมการ 2.43 คือ

$$U = \frac{Ae^{j\omega t}}{R + j(\omega M - K/\omega)} = \frac{p}{Z} \quad (2.45)$$

Resonator จะถูกกำหนดเป็นการเกิดขึ้นเมื่อ U ไปถึงจุดสูงสุด ซึ่งหมายถึง เมื่อ Imaginary หรือ Reactive Part ของ Acoustic เป็น 0

$$\omega_0^2 = \frac{K}{M} = \frac{\rho_0 c^2 / V}{\rho_0 l' / S} = \frac{c^2 S}{l' V}$$

$$f_o = \frac{c}{2\pi} \left(\frac{S}{Vl'} \right)^{1/2} = \frac{c}{2\pi} \left(\frac{\pi a^2}{V(l' + 2\Delta l)} \right)^{1/2} \quad (2.46)$$

ณ. ความถี่ Resonant การตอบรับของ Resonator จะถูกควบคุมไว้ทั้งหมดด้วยความถี่ในระบบ ในกรณีนี้มาจาก Radiation term และถ้าความถี่มีเล็กน้อย ความดัน Acoustic จำนวนมากจะ ถูกผลิตขึ้นภายใน Resonator ณ.ความถี่อื่นจะน้อย และความดัน Acoustic ภายใน Resonator ก็ น้อย Resonator อาจกล่าวได้ว่าเป็น Tuned Filter ซึ่งความถี่จะถูกกำหนดโดยขนาด และความ กว้างแถบคลื่น ถูกกำหนดโดยความถี่

สมการ 2.44 จะเป็นสมการที่สำคัญ เพราะว่าจะให้รูปแบบต่างๆ ไปสำหรับ Acoustic Mass กับ Acoustic Stiffness ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะถูกใช้ภายหลัง เมื่อจะพิจารณาองค์ประกอบ Lumped Acoustic

จาก Acoustic Impedance ของ Resonator ซึ่งอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$Z = R + j(\omega M - K/\omega)$$

$$= R + j \frac{\omega \rho_o}{S} (1 + 2\Delta l) - \frac{\rho_o c^2}{\omega V} \quad (2.57)$$

เมื่อ Acoustic Resistance R ของ Piston

$$R = \frac{\rho_o c}{\pi a^2} R_1 (2ka)$$

ถ้า $2ka < 0.5$

$$R = \frac{\rho_o c k^2}{2\pi}$$

และ Acoustic Reactance คือ

$$X = \frac{\rho_o c}{\pi a^2} X_1 (2ka)$$

Acoustic Impedance ของ Acoustic Mass กับ Acoustic Stiffness ให้เป็น $j\omega M$ กับ $-jK/\omega$ ตามลำดับ จะพิจารณาได้ว่า Acoustic Impedance ของลูกสูบกลมรัศมี a ซึ่ง $a \ll \lambda$ นั้น

สะท้อนใน Rigid Infinite Baffle ควรจะประกอบด้วย Radiation Term R และ Term Mass จะตอบสนองไปยังปลายด้านหนึ่งที่ถูกตัด

$$Z_{\text{piston}} = R + \frac{j\omega\rho_0}{S} \Delta l \quad (2.58)$$

แต่ Radiation Impedance กับ Acoustic Impedance จะแตกต่างกัน โดยนิยมใช้ Factor S^2 และการเปรียบเทียบจะแสดงให้เห็นว่า

$$Z_{\text{piston}} = \frac{\rho_0 c k^2}{2\pi} + \frac{j\omega\rho_0}{S} \frac{8a}{3\pi} \quad (2.59)$$

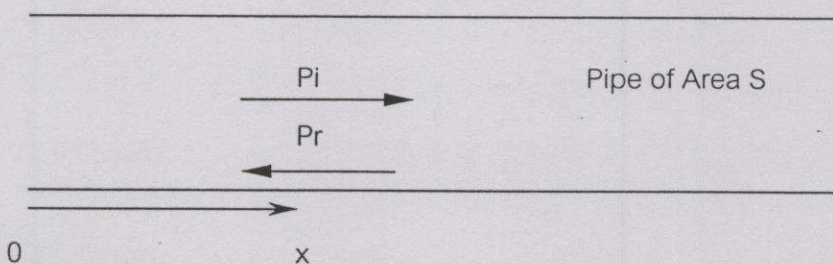
ปลายด้านที่ถูกตัด $\Delta l = 8a/3\pi$ เกี่ยวกับคลื่นเสียงในแบบปลายเปิด

2.2.3 การสะท้อนของคลื่นในท่อ

ถ้า Single wave เดินทางอยู่ในทิศทาง Positive x ไปตามท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ S ซึ่งเป็น Acoustic Impedance ที่ได้จากคลื่นนั้น ก็จะเป็น $\rho_0 c / S$ สมมติว่ามีความไม่ต่อเนื่องในท่อ อย่างเช่น มีการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นคลื่นที่เกิดขึ้นบางตัว ก็จะถูกสะท้อน และ Acoustic Impedance ของคลื่นที่ถูกสะท้อน ก็จะเป็น $-\rho_0 c / S$ ความดัน และอัตราความเร็ว ปริมาตรของ Individual wave 2 คลื่น จะได้

$$P_i = A e^{j(\omega t - kx)}; U_i = \frac{P_i}{\rho_0 c / S} \quad (2.60)$$

$$P_r = B e^{j(\omega t + kx)}; U_r = \frac{P_r}{-\rho_0 c / S} \quad (2.61)$$



รูปที่ 2.15 การส่ง และการสะท้อนของคลื่นในท่อ

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{B}{A} &= \frac{\rho_0 c / S_2 - \rho_0 c / S_1}{\rho_0 c / S_2 + \rho_0 c / S_1} \\ &= \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \end{aligned} \quad (2.65)$$

เพื่อที่คำนวณว่า พลังงานที่ปรากฏขึ้นถูกสะท้อนไปมากเท่าไร และถูกส่งผ่านไปเท่าไร จะเขียนการสะท้อน กับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ดังต่อไปนี้

$$\alpha_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{|B|^2 / 2\rho_0 c / S_1}{|A|^2 / 2\rho_0 c / S_1} = \left| \frac{B}{A} \right|^2 \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(S_1 - S_2)^2}{(S_1 + S_2)^2} \\ \alpha_t = 1 - \alpha_r &= \frac{4S_1 S_2}{(S_1 + S_2)^2} \end{aligned} \quad (2.67)$$

ดังนั้น α_r กับ α_t จะขึ้นอยู่กับ Ratio $S_1 : S_2$ หรือ $S_2 : S_1$ เท่านั้นและไม่ขึ้นกับการลดหรือเพิ่มพื้นที่หน้าตัด นอกจากนี้ Ratio ก็ต้องใหญ่พอที่จะสร้าง Substantial Reduction ในพลังงานที่ถูกส่งผ่าน เช่น ถ้า $S_2 : S_1 = 10$ (หรือ 0.1), $\alpha_t = 0.33$

2.2.4 ผลที่ได้ของ Helmholtz Resonator

Main pipe ที่มีพื้นที่ S จะมี Helmholtz Resonator ของ Acoustic Impedance Z_b ที่ตำแหน่ง $X = 0$ จะไม่มีคลื่นถูกสะท้อนไปข้างหลังของ Side Branch และ Acoustic Impedance ของ Main pipe ที่ $x = 0$ จะเป็น $\rho_0 c / S$ ซึ่ง Side Branch เป็นต้นเหตุให้เกิดการสะท้อนของคลื่นที่ปรากฏขึ้น และที่ $x = 0$ อาจเขียนสมการความดันกับอัตราความเร็วได้ 4 ตัวแปรคือ

$$P_i = A_i e^{j\omega t} \quad U_i = \frac{P_i}{\rho_0 c / S} \quad (2.68)$$

เมื่อ

$$Z = \frac{\rho_0 c}{S} \frac{A_1 + B_1}{A_1 - B_1} \text{ และ } Z_t = \frac{\rho_0 c}{S}$$

สมการ 2.75 จะถูกเขียนใหม่ จะได้

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{-\rho_0 c / 2S}{\rho_0 c / 2S + Z_b} \quad (2.75)$$

ดังนั้นจากสมการ 2.76 จะได้

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{A_3}{A_1} = \frac{Z_b}{\rho_0 c / 2S + Z_b} \quad (2.76)$$

โดยทั่วไป Acoustic Impedance ของ Helmholtz Resonator จะซับซ้อน อาจเขียนได้เป็น

$$Z_b = R_b + j X_b \quad (2.77)$$

และสำหรับที่ให้ไว้ในสมการที่ 2.57 จะรวมเทอมของ Radiation เข้าด้วยกัน เมื่อใช้ Helmholtz Resonator พลังงานที่ส่งกระจายรังสีออกมาจะถูกย้อนกลับไปยัง Main pipe และด้วยเหตุนี้ Impedance ของ Resonator ก็จะเป็น

$$Z_b = j \frac{\omega \rho_0 l'}{S_b} - \frac{\rho_0 c^2}{\omega V} \text{ เมื่อ } l' = l + 16a / 3\pi \quad (2.78)$$

ณ. ความถี่ Resonance ของ Resonator นั้นคือเมื่อ $f = f_0 = (c/2\pi) (S_b / l' V)^{1/2}$

โดย

- P_i คือ ความดันเสียงที่เข้าด้านหน้า Resonator
- P_r คือ ความดันเสียงสะท้อนกลับไปด้านหน้า Resonator
- P_t คือ ความดันเสียงที่ผ่านไปด้านหลัง Resonator
- P_b คือ ความดันเสียงที่เข้าตัว Resonator
- U_0 คือ ความเร็วเสียง

เมื่อพิจารณาผลกระทบของ Helmholtz resonator ที่ความหน่วง $Z = R + iX$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ให้นำไปใช้เพื่อการค้า หรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

$$P_i = Z_0 U_i = \frac{\rho c}{S_0} U_i = A_1^{ejwt} \quad (2.79)$$

$$P_r = Z_0 U_r = \frac{\rho c}{S_0} U_r = B_1^{ejwt} \quad (2.80)$$

$$P_t = Z_0 U_t = \frac{\rho c}{S_0} U_t = A_2^{ejwt} \quad (2.81)$$

$$P_b = Z_b U_b = \frac{\rho c}{S_b} U_b = A_b^{ejwt} \quad (2.82)$$

โดย

Z_0 คือ Characteritic Impedance ของท่อ เทอมของความดัน และความเร็ว

Z_b คือ Characteritic Impedance ของ Resonator ที่ทางเข้า

ดังนั้นสมการที่ 2 จะได้

$$U_i S_0 - U_r S_0 = U_b S_b + U_t S_0 \quad (2.83)$$

$$\frac{1}{Z_0} (P_i - P_r) = \frac{1}{Z_b} P_b + \frac{1}{Z_0} P_t = \left(\frac{P_i}{Z_0} - \frac{P_r}{Z_0} \right) = \left(\frac{P_b}{Z_b} + \frac{P_t}{Z_0} \right)$$

ซึ่ง $P_b = P_t$ จะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

สมการ (2.72) $\times 1/Z_0$ + (2.83) จะได้

$$\frac{1}{Z_0} P_i + \frac{1}{Z_0} P_r = \frac{1}{Z_0} P_t \quad (2.84)$$

$$\frac{1}{Z_0} P_i - \frac{1}{Z_0} P_r = \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_0} \right) P_t$$

$$\frac{1}{Z_0} (P_i - P_r) = \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_0} \right) P_t$$

$$\frac{2}{Z_0} P_i = \left(\frac{1}{Z_b} + \frac{2}{Z_0} \right) P_t$$

$$\frac{P_i}{P_t} = \frac{Z_o}{2} \left(\frac{1}{Z_b} + \frac{2}{Z_o} \right) = 1 + \frac{Z_o}{2S_b} = 1 + \left(\frac{\rho_c}{2 \frac{S_o}{S_b}} \right) \quad (2.85)$$

$$= 1 + \frac{Z_o}{2(R_b + iX_b)} = 1 + \frac{Z_o(R_b - iX_b)}{2(R_b^2 + X_b^2)}$$

$$= \left\{ 1 + \frac{Z_o R_b}{2(R_b^2 + iX_b^2)} \right\} + i \left\{ \frac{-Z_o X_b}{2(R_b^2 + X_b^2)} \right\}$$

$$TL = 10 \log \left| \frac{P_i}{P_t} \right|^2 = 10 \log \left\{ 1 + \frac{Z_o R_b}{2(R_b^2 + iX_b^2)} + i \frac{-Z_o X_b}{2(R_b^2 + X_b^2)} \right\} \quad (2.86)$$

$$TL = 10 \log \frac{4(R_b^2 + X_b^2) + 4(R_b^2 + X_b^2)Z_o R_b + Z_o^2 R_b^2 + Z_o^2 X_b^2}{4(R_b^2 + X_b^2)}$$

$$= 10 \log \frac{4(R_b^2 + X_b^2) + 4Z_o R_b + Z_o^2}{4(R_b^2 + X_b^2)}$$

$$= 10 \log \frac{(R_b^2 + X_b^2) + Z_o R_b + (Z_o^2/4)}{R_b^2 + X_b^2}$$

$$= 10 \log \frac{(R_b + Z_o/2)^2 + X_b^2}{R_b^2 + X_b^2}$$

$$TL = 10 \log \left(1 + \frac{Z_o^2}{4X_b^2} \right) \quad (2.87)$$

แทนค่า X_b และ Z_o ลงในสมการ (5) จะอยู่ในรูป

$$\frac{X_b}{Z_o} = S_o \left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right) \sqrt{\frac{l_e}{S \cdot V}} \quad (2.88)$$

และ Resonance Frequency คือ

$$f_r = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot l_e}} \quad (2.89)$$

เมื่อ $l_e = l + \beta d$

และสำหรับ with flow

$$TL = 10 \log \left[\frac{\left\{ m(1+m)^2 + \left(\frac{X_b}{Z_o} \right)^2 \right\}^2 - \frac{(1-m)^4}{4} \left(\frac{X_b}{Z_o} \right)^2}{\left\{ 4m^2 + \left(\frac{X_b}{Z_o} \right)^2 \right\}^2} \right] \quad (2.90)$$

โดยที่ m คือ Mach Number

2.3 Coefficient β

สัมประสิทธิ์ของ Resonance ในท่อ และแนวคิดของ Acoustic Impedance สามารถนำมาใช้ในการหาพฤติกรรมของท่อที่มีความยาวแน่นอน พิจารณาท่อที่มีรูปแบบพื้นที่หน้าตัดแบบเดียว $S = \pi a^2$ และมีความยาว L สมมติว่า Acoustic Impedance เป็น $Z_o =$ ที่ $X = 0$ และ Z_L ที่ $X = L$ ดังนั้นจาก สมการ 2.62

$$Z_L = \frac{\rho_o c A e^{jkL} + B e^{-jkL}}{S A e^{-jkL} - B e^{jkL}} \quad (2.91)$$

และ

$$Z_o = \frac{\rho_o c}{S} \frac{A + B}{A - B}$$

รวมสองสมการเข้าด้วยกันเพื่อกำจัด A และ B จะได้

$$Z_o = \frac{\rho_o c Z_L + j(\rho_o c / S) \tan kL}{S (\rho_o c / S) + jZ_L \tan kL} \quad (2.92)$$

ถ้าพิจารณา Impedance Z_L ซึ่งท่อมีความยาว L และ ความยาวคลื่นคงที่ k คือค่าคงที่ frequency ของท่อที่มีปลายปิดก่อน แล้วจากนั้นก็พิจารณาที่มีปลายเปิด ก็จะได้เงื่อนไขสำหรับ Resonance ในท่อ

2.3.1 ปลายปิด

$$Z_L = \infty$$

และ

$$Z_o = \frac{\rho_o c}{S} \frac{1}{\alpha + j\beta}$$

$$Z_o = \frac{\rho_o c}{S} \frac{\alpha + j(\tan kL + \beta)}{(1 - \beta \tan kL) + j\alpha \tan kL} \quad (2.93)$$

พิจารณา $x = 0$

จะได้

$$\beta \tan 2kL + (\beta^2 + \alpha^2 - 1) \tan kL - \beta = 0 \quad (2.94)$$

ในกรณี low frequencies α และ β จะค่าน้อย ๆ ดังนั้นจากสมการ 2.94 สามารถเขียนใหม่ได้

$$\tan kL = -\beta$$

2.3.2 ปลายเปิด

จากสมการ 2.93

$$Z_o = \frac{\rho_o c}{S} \frac{1}{\alpha + j\beta}$$

และ

$$Z_o = \frac{\rho_o c}{S} \frac{\alpha + j(\tan kL + \beta)}{(1 - \beta \tan kL) + j\alpha \tan kL} \quad (2.95)$$

เมื่อ ท่อนำเสียงมีความยาว $x = l$ จะได้

บทที่ 3

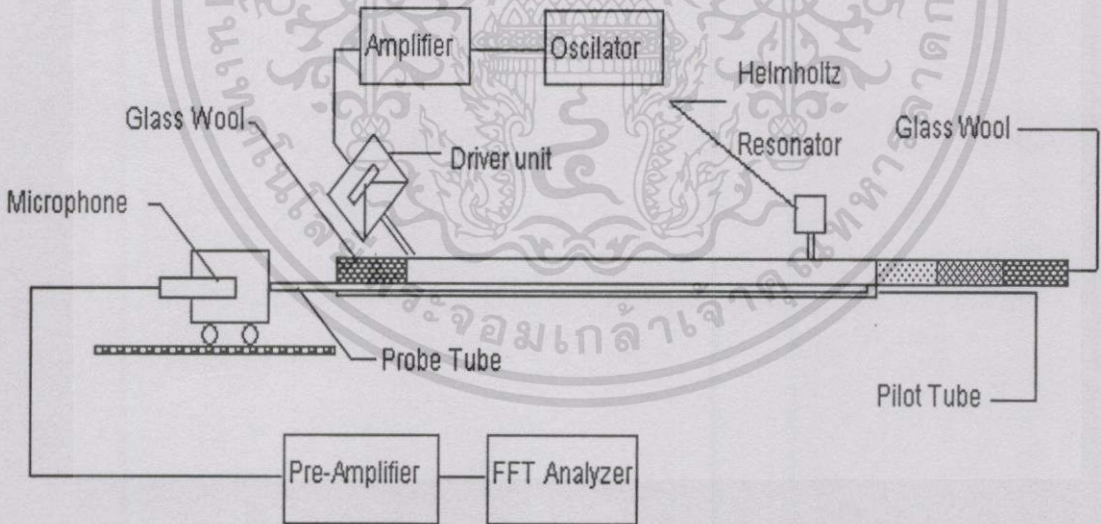
การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1 การสร้างอุปกรณ์ประกอบในการทดลอง

อ้างอิงจากทฤษฎี Standing - Wave (หรือ Impedance) ในท่อ ซึ่งประกอบด้วยท่อกลม และท่อสี่เหลี่ยม ประกอบด้วย Loudspeaker หรือ Driver Unit ที่ติดตั้งตำแหน่งส่วนปลายของระบบท่อ และ Probe - tube เปลี่ยนเสมือน microphone เล็กๆ สอดผ่านเข้าไปตลอดความยาวของระบบท่อแสดงในรูปที่ 3.1 และส่วนปลายทั้ง 2 ด้านของระบบท่อจะบุอัดด้วย acoustical material คือ Glass wool เพื่อคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นเสียง (Absorption) และป้องกันเสียงสะท้อนกลับ (Reflection) ท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.025 \text{ m}$ และ $W \times L = 0.025 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$ ซึ่งมีความยาว 8 m

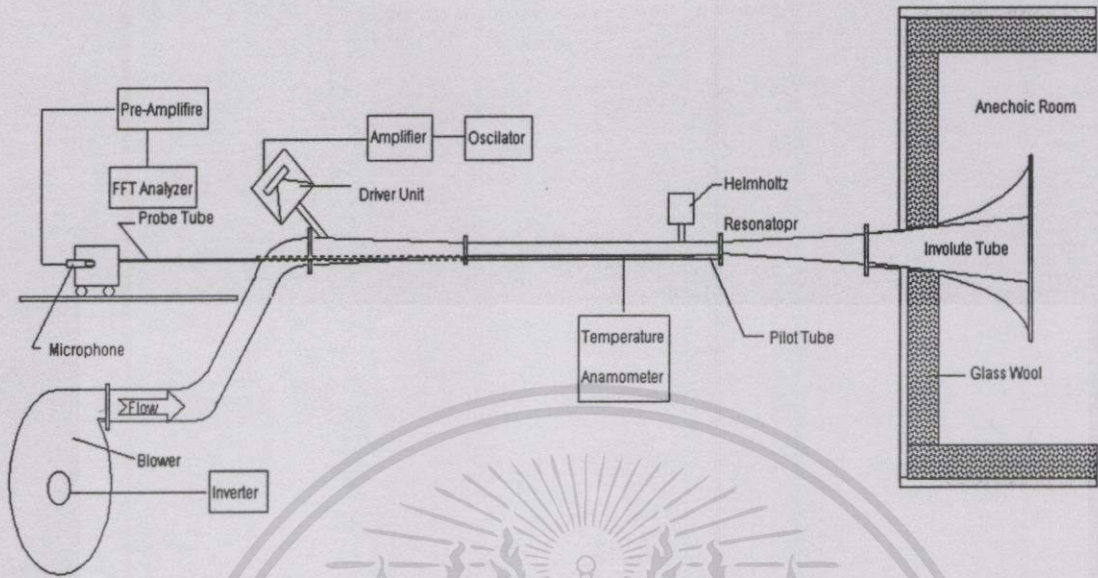
3.2 การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง

3.2.1 การทดลองแบบ Without flow



รูปที่ 3.1 แสดงระบบท่อที่ใช้สำหรับการทดลอง Without flow

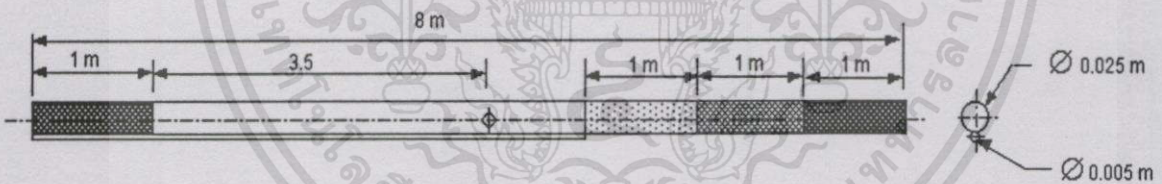
3.2.2 การทดลองแบบ With flow ตามทฤษฎี Standing – Wave



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์สำหรับการทดลองแบบ With flow

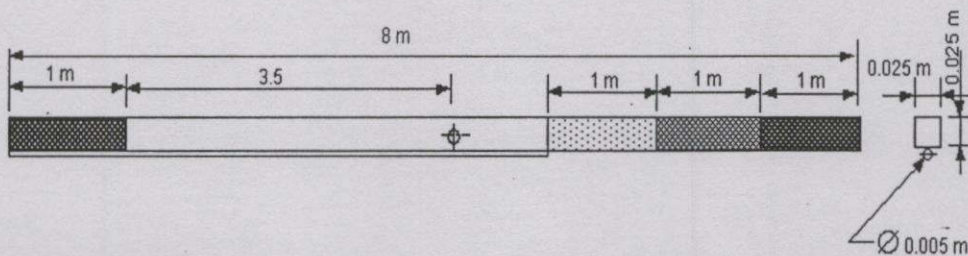
3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือวัดในการทดลอง

3.3.1 ท่อนำเสียงแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 m



รูปที่ 3.3 แสดงท่อนำเสียงแบบกลม

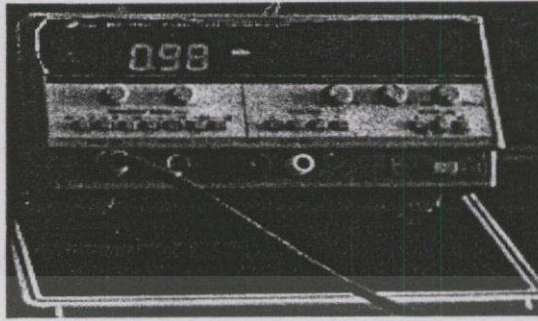
3.3.2 ท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m



รูปที่ 3.4 แสดงท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม

3.3.3 Oscillator

แหล่งกำเนิดความถี่ของคลื่นเสียงสูง – ต่ำ โดยการปรับค่าความถี่



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์สำหรับกำเนิดความถี่

3.3.4 Amplifier

ตัวขยายสัญญาณความถี่คลื่นเสียง

3.3.5 Driver Unit

เป็นแหล่งกำเนิดเสียง ซึ่งส่งคลื่นเสียงผ่านเข้าไปในระบบที่นำเสียง

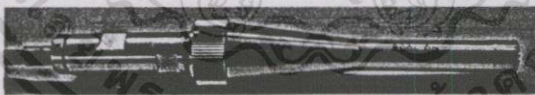
3.3.6 Probe Tube

ท่อนำเสียงจะถูกสอดอยู่ในท่อนำเสียงและวัดสัญญาณเสียงโดยผ่านมายัง

Microphone

3.3.7 Microphone

ใช้ ในการวัดสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้นสามารถวัดความถี่สูงได้ดี ซึ่งจะมีขนาดเล็ก



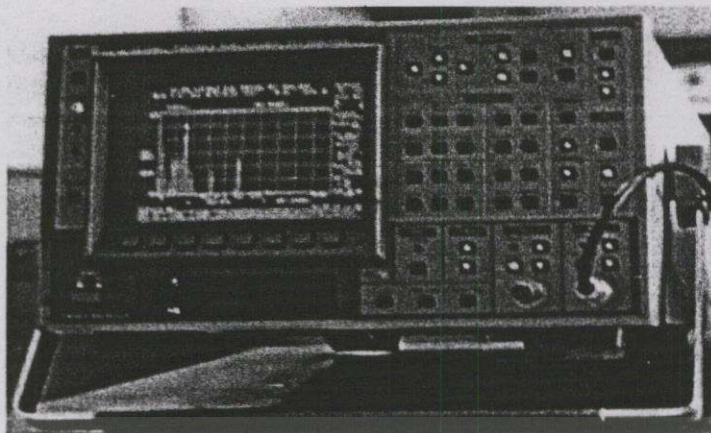
รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์สำหรับวัดความถี่ (จากบริษัท Bruel & Kjaer)

3.3.8 Pre-Amplifier

ตัวขยายสัญญาณเสียงที่รับมาจาก microphone

3.3.9 FFT Analyzer (Fast Fourier Transform Analyzer)

เครื่องมือวัดแปลงสัญญาณความดังของเสียงให้มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) ซึ่ง FFT สามารถวัดค่าความถี่ที่ต้องการ ซึ่งจะแสดงตำแหน่งของคลื่นเสียงที่เกิด Peak ตำแหน่งนั้นๆ และอ่านค่า Output จาก FFT



รูปที่ 3.7 แสดง Fast Fourier Transform Analyzer (FFT) สำหรับกำหนดความถี่ และ หาค่าความดันเสียง (dB) (จากบริษัท Bruel & Kjaer)

3.3.10 Blower

ต้นกำเนิดของความเร็วมสำหรับอุปกรณ์ในระบบท่อแบบมีความเร็วม

3.3.11 Inverter

อุปกรณ์สำหรับปรับค่าความเร็วม

3.3.12 Anemometer

เครื่องมือวัดความเร็วมในระบบท่อ

3.3.13 Calibrator

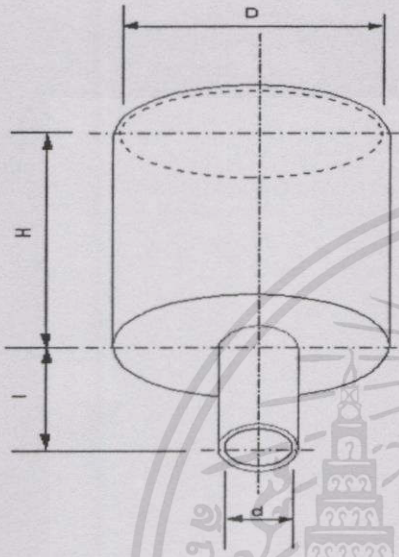
เครื่องมือสำหรับ Calibrated microphone เปรียบเทียบกับ FFT Analysis ให้สามารถอ่านค่าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งในการ Calibrated จะต้องดูจากคู่มือผู้ผลิต



รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์สำหรับ Calibrate (จากบริษัท Bruel & Kjaer)

3.4 Silencer แบบ Helmholtz Resonator

Helmholtz Resonator เป็นอุปกรณ์สำหรับลดเสียงให้น้อยลงในระบบท่อ ซึ่งมีลักษณะรูปทรงกระบอก และมีท่อขนาดเล็กผ่านศูนย์กลางเล็กๆ เชื่อมต่อระหว่างท่อ กับ Resonator ถูกเรียกว่า Helmholtz Resonator สามารถปรับปริมาตรได้เพื่อความสะดวกไม่ต้อง เปลี่ยน Helmholtz Resonator บ่อยๆ และศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของปริมาตรได้



D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Helmholtz Resonator

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Connector Length

H คือ ความยาวของ Helmholtz Resonator

l คือ ความยาวของ Connector Length

รูปที่ 3.9 แสดง Helmholtz Resonator อุปกรณ์สำหรับลดเสียง

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 วิธีการทดลอง

4.1.1 การทดลองโดยใช้ Helmholtz Resonator กรณีไม่มีความเร็วลม

4.1.1.1 ติดตั้ง Helmholtz Resonator เข้ากับผนังท่อกลม และท่อสี่เหลี่ยม

4.1.1.2 ทำการ Set อุปกรณ์เครื่องมือวัดความดันเสียง

4.1.1.3 เลื่อน Microphone เพื่อหาระยะที่มีระดับความดันเสียงมากที่สุด โดย การวัดก่อนผ่าน Helmholtz Resonator และ หลังผ่าน Helmholtz Resonator

4.1.1.4 เปลี่ยนค่าความถี่คลื่นที่ละน้อย และทำการวัดระดับความดันเสียงตาม ข้อที่ 4.1.1.3 เพื่อหาว่า Helmholtz Resonator สามารถลดเสียงได้มากที่สุดในช่วงใด

4.1.1.5 ทำการเปลี่ยน Helmholtz Resonator ขนาดต่างๆ และ ทำการวัดตามข้อ 1 ถึง 4

4.1.2 การทดลองโดยใช้ Helmholtz Resonator กรณีมีความเร็วลม

4.1.2.1 ติดตั้ง Helmholtz Resonator เข้ากับผนังท่อกลม และท่อสี่เหลี่ยม

4.1.2.2 เปิด Blower เพื่อให้ความเร็วลมไหลเข้าระบบของท่อที่ทำกรทดลอง

4.1.2.3 ปรับอัตราความเร็วลมที่ Inventor โดยอ่านค่าความเร็วลม Anemometer

4.1.2.4 ทำการ Set อุปกรณ์เครื่องมือวัดความดันเสียง

4.1.2.5 เลื่อน Microphone เพื่อหาระยะที่มีระดับความดันเสียงมากที่สุดโดย การวัดก่อนผ่าน Helmholtz Resonator และ หลังผ่าน Helmholtz Resonator

4.1.2.6 เปลี่ยนค่าความถี่คลื่นที่ละน้อย และทำการวัดระดับความดันเสียงตาม ข้อที่ 4.1.2.5 เพื่อหาว่า Helmholtz Resonator สามารถลดเสียงได้มากที่สุดในช่วงใด

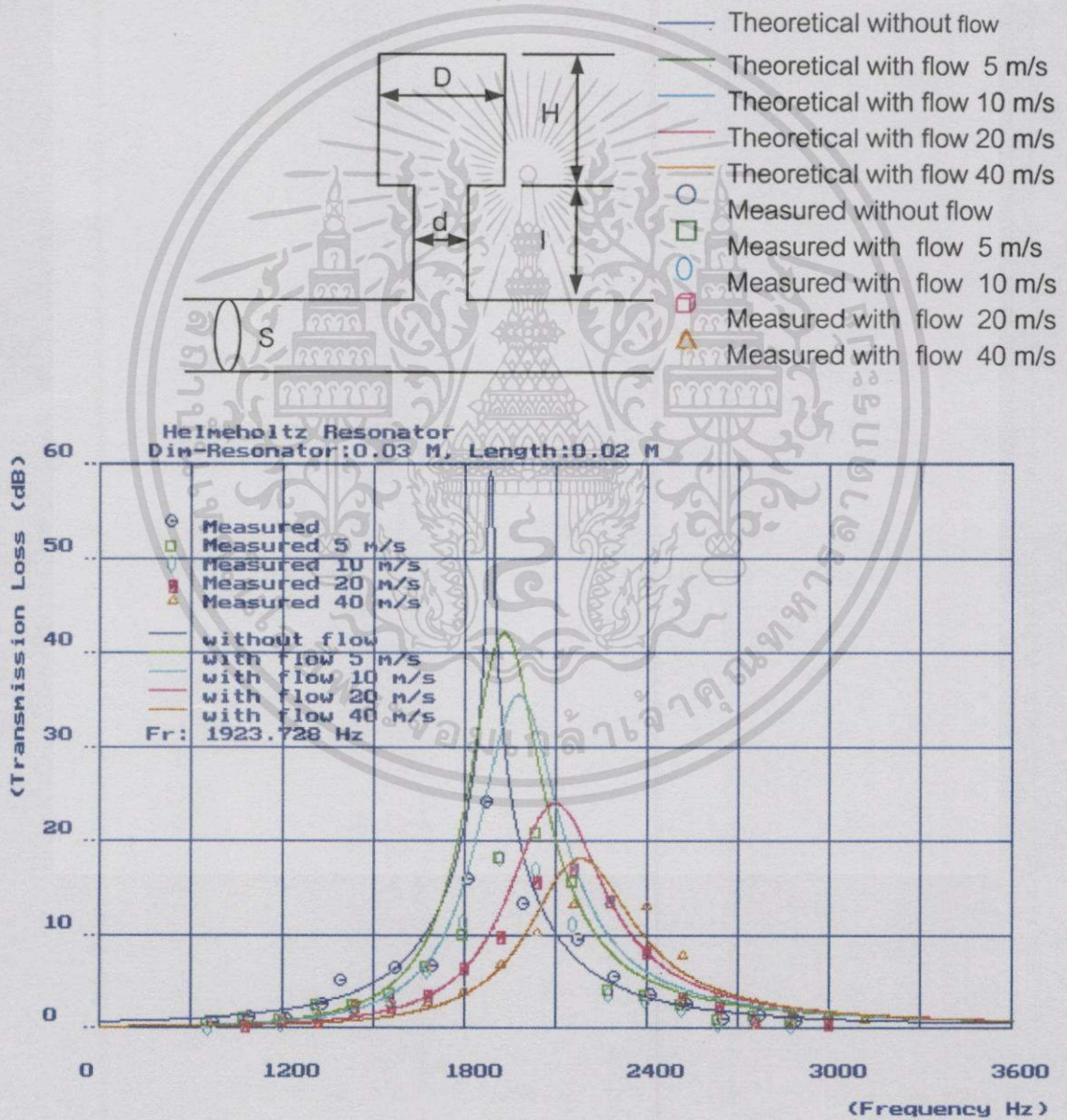
4.1.2.7 ทำการเปลี่ยน Helmholtz Resonator ขนาดต่างๆ และ ทำการวัดตาม ข้อ 1 ถึง 6

4.2 การบันทึกผลการทดลอง

เมื่อทำการวัดระดับความดันเสียงมากที่สุด โดยการวัด ก่อนผ่าน Helmholtz Resonator และ หลังผ่าน Helmholtz Resonator และบันทึกผลการทดลอง จากนั้นก็ทำการปรับเปลี่ยน ความถี่ และทำการวัดค่าดังกล่าวข้างต้น เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วนำผลการทดลองที่ได้ทำ การปรับค่าความถูกต้องกับ Davis Curve จากนั้นนำผลที่ปรับค่าความถูกต้องแล้ว ซึ่งเรียกว่า Transmission Loss มาแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟเพื่อสะดวกในการศึกษา

4. ผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03 \text{ m}$, $H = 0.02 \text{ m}$ และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01 \text{ m}$ ความยาว $l = 0.02 \text{ m}$ ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง $= 0.025 \text{ m}$ จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $1000 \sim 3000 \text{ Hz}$ ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $F_r = 1923.728 \text{ Hz}$ สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40 \text{ (m/s)}$ Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



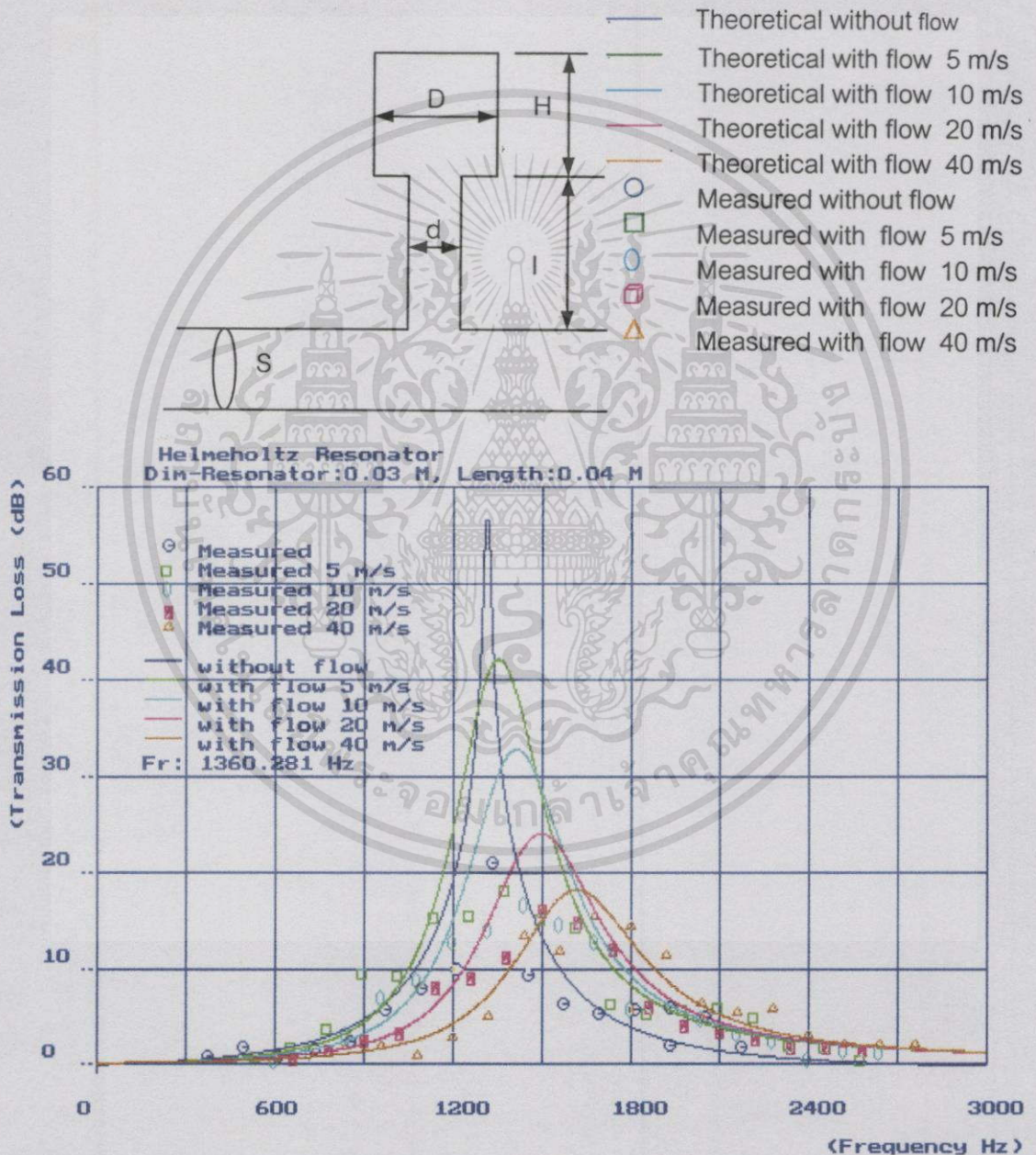
รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03 \text{ m}$,

$H = 0.02 \text{ m}$, $l = 0.02 \text{ m}$, $d = 0.01 \text{ m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

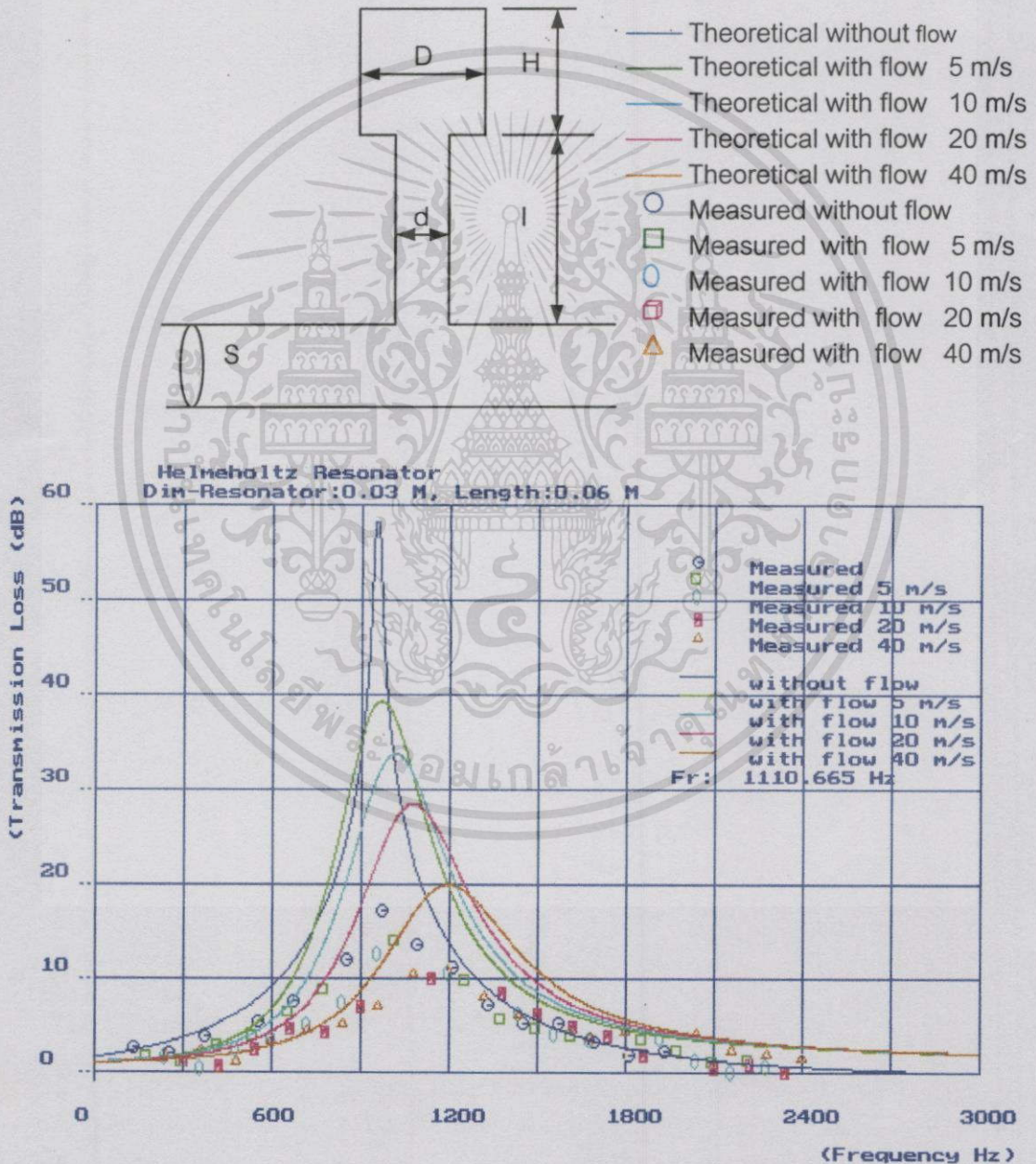
ไปทำธุรกิจใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้ทั้งหมดยังคงเป็นของ ป๋อ และต้องจำไว้ถึงใจว่าของป๋อสามารถทำอะไรก็ได้

จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นในช่วงความถี่ระหว่าง 400~2700 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 1360.281$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m

จากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 200~2400 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $Fr = 1110.665$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



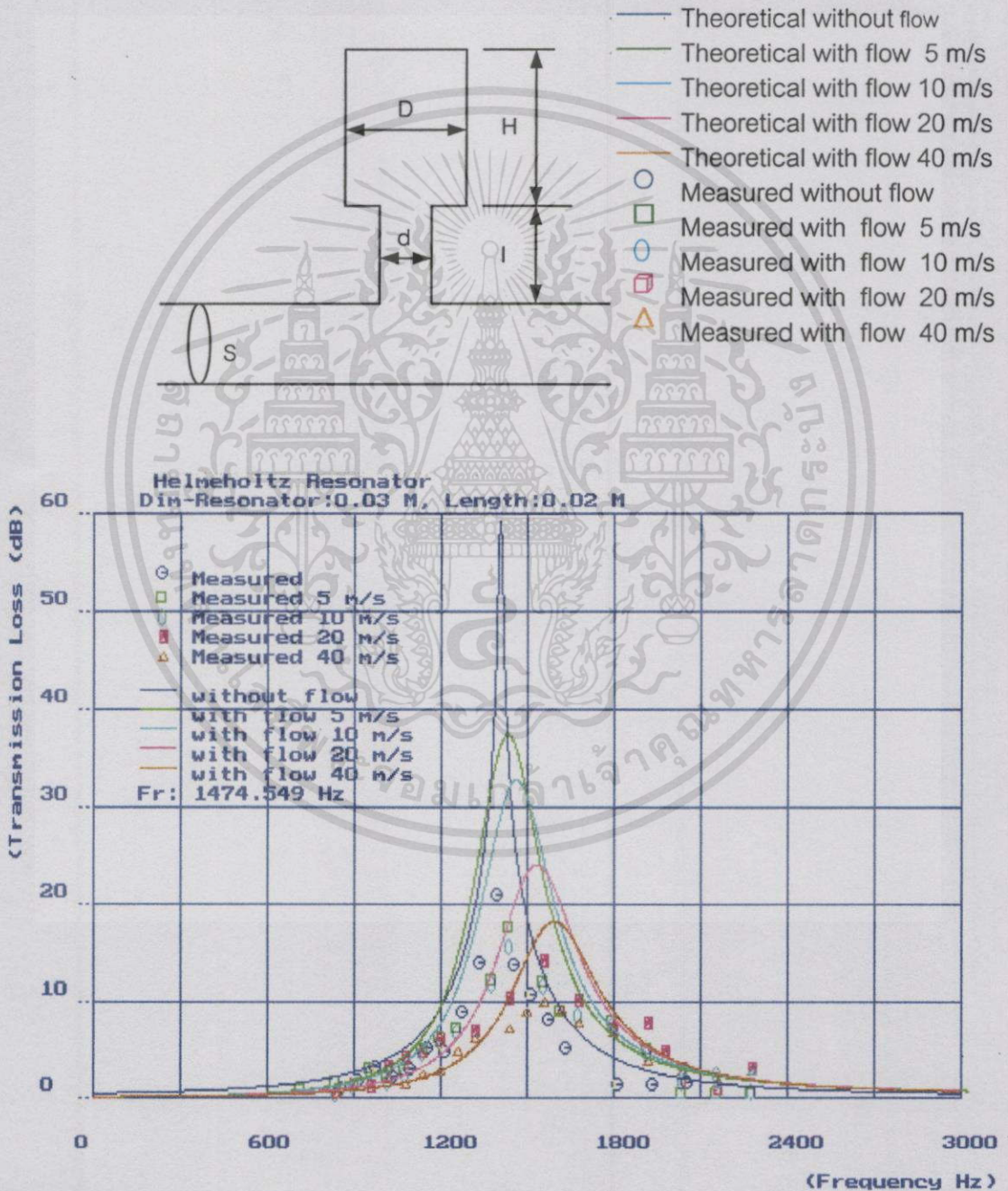
รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m,

$H = 0.02$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปทำธุรกิจใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์ของเนื้อหาข้อมูลนี้เป็นของ บริษัท ออโตมิกซ์ จำกัด และต้องอ้างอิงถึงชื่อของ บริษัท ออโตมิกซ์ จำกัด ในการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 700~2300 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $Fr = 1474.549$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



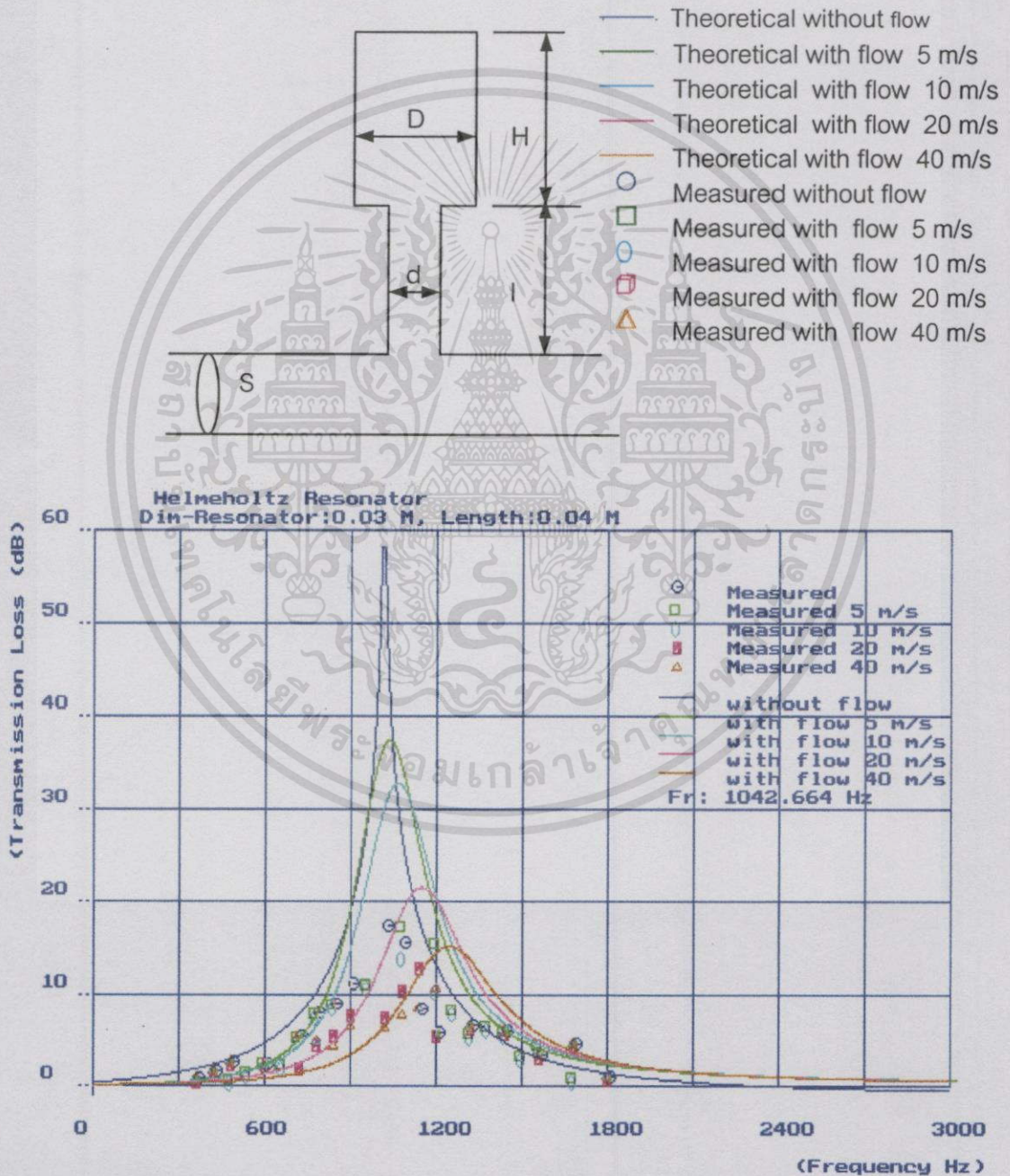
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m,

$H = 0.04$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปทำกรณีใดๆทั้งสิ้น จึงขอสงวนสิทธิ์ไว้ด้วย และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03 \text{ m}$, $H = 0.04 \text{ m}$ และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01 \text{ m}$ ความยาว $l = 0.04 \text{ m}$ ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง $= 0.025 \text{ m}$ จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $400 \sim 1800 \text{ Hz}$ ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 1042.664 \text{ Hz}$ สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40 \text{ (m/s)}$ Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



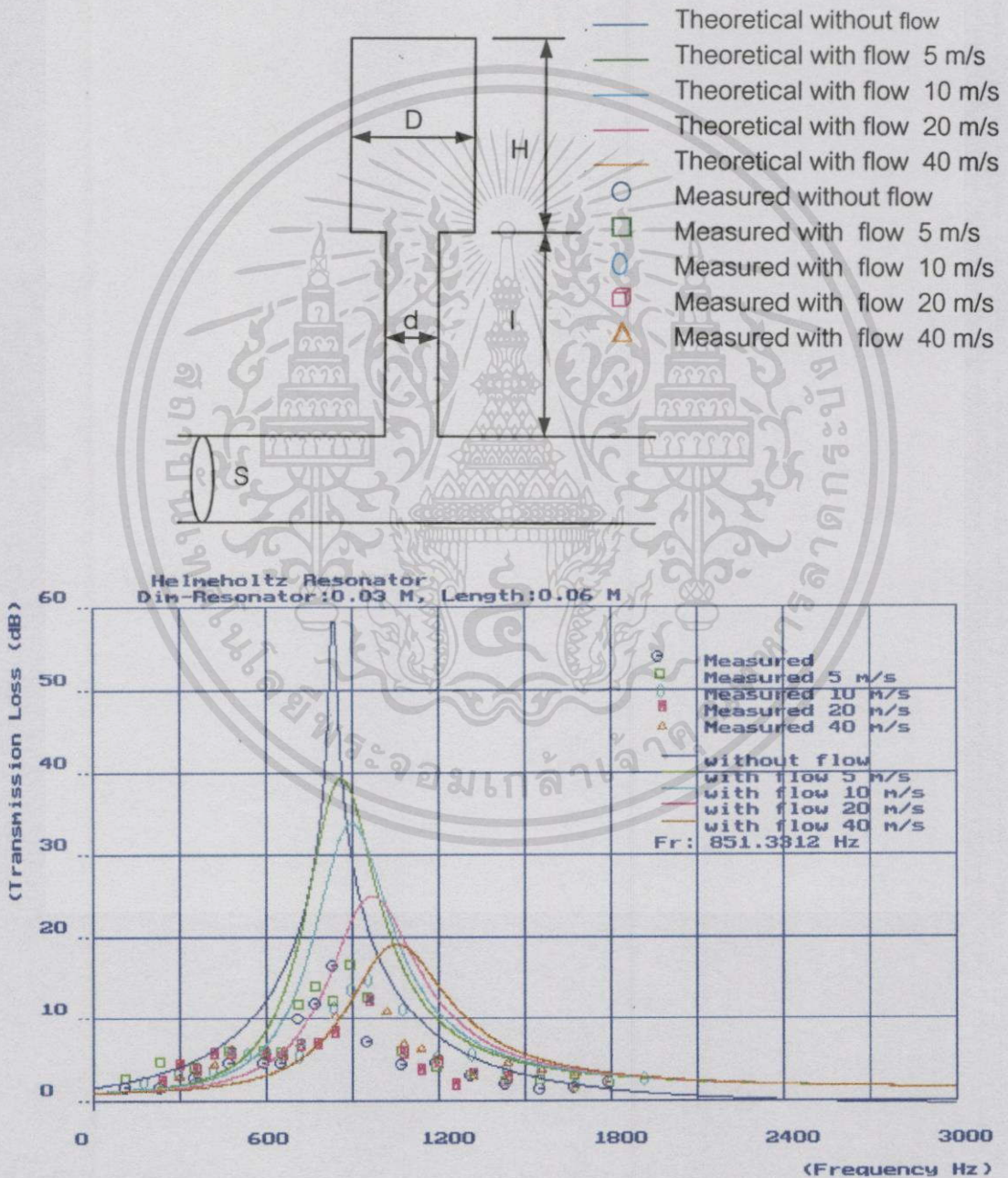
รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03 \text{ m}$,

$H = 0.04 \text{ m}$, $l = 0.04 \text{ m}$, $d = 0.01 \text{ m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้ทั้งหมดมีไว้เพื่อประโยชน์ และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 200~1900 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่ก้ำก๋อน $Fr = 851.3312$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



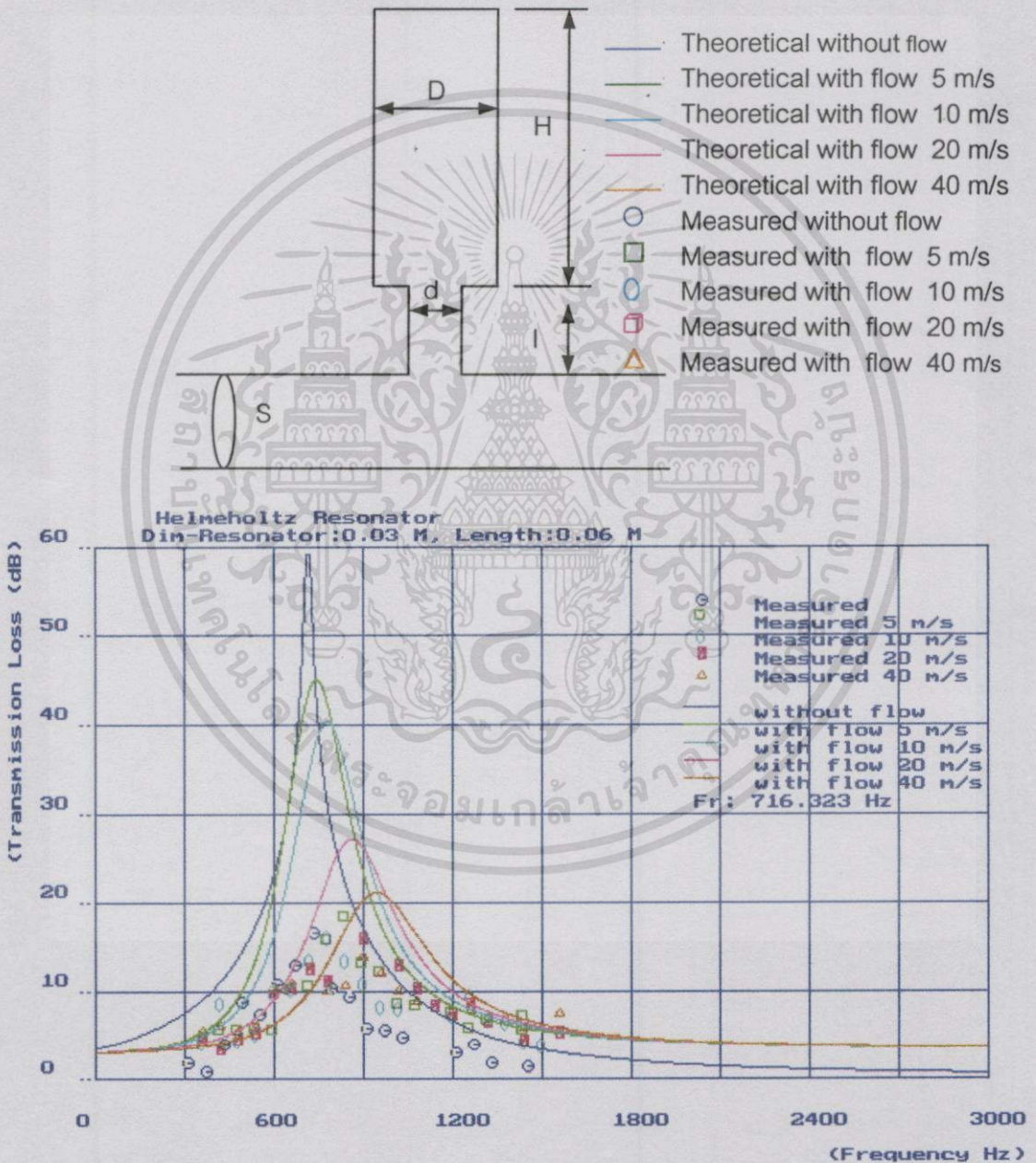
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m,

$H = 0.04$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปใช้ประโยชน์อื่นใด ซึ่งผู้เกี่ยวข้องต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขการใช้งานว่ามิอาจอ้างว่าลิขสิทธิ์ดังกล่าวสามารถที่จะใช้ประโยชน์ไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นในช่วงความถี่ระหว่าง 300~1600 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 716.323$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



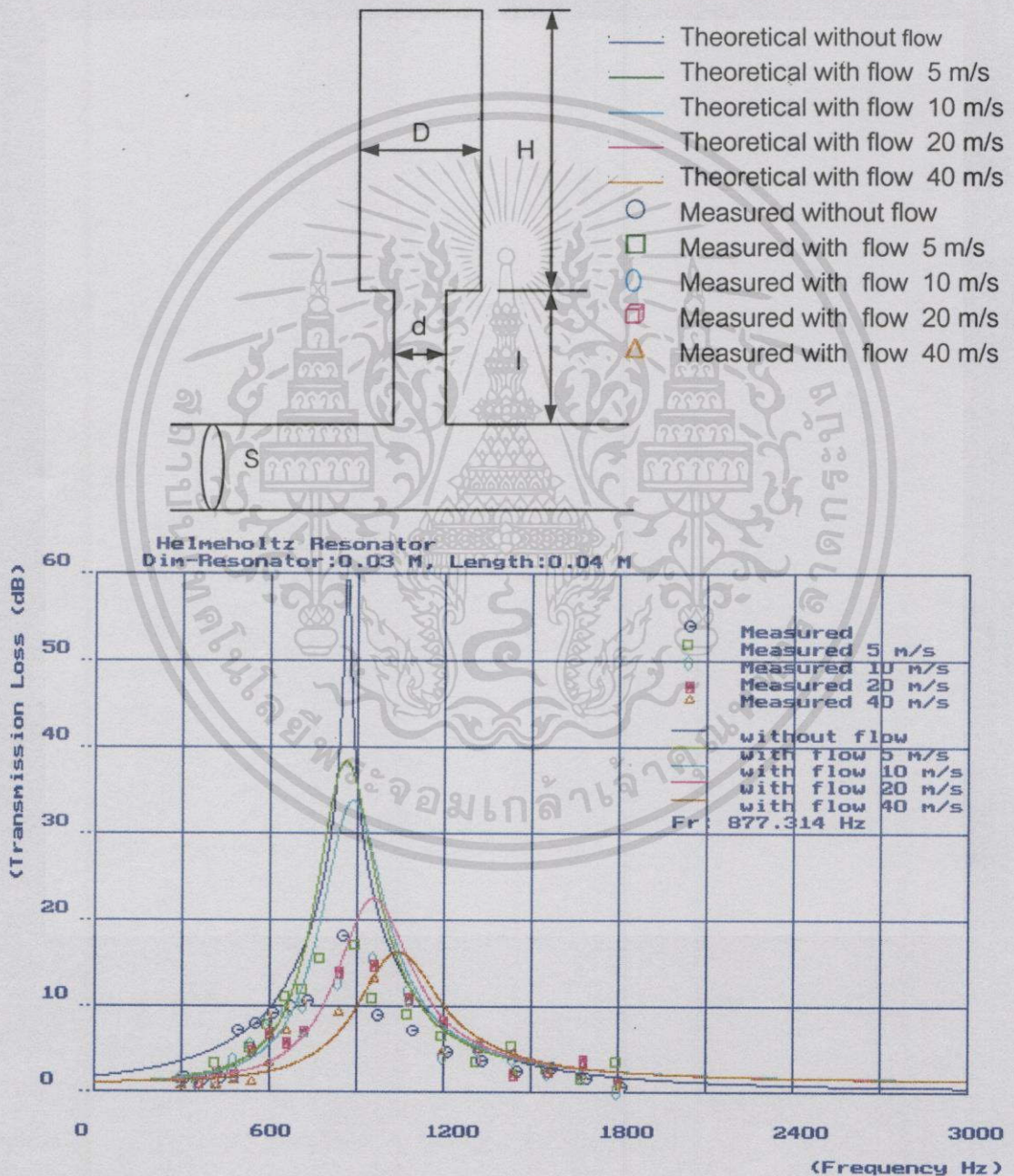
รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m,

$H = 0.06$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปเพื่อการใดก็ตาม ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีลิขสิทธิ์ของเจ้าของ และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 300~1800 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $Fr = 877.3134$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



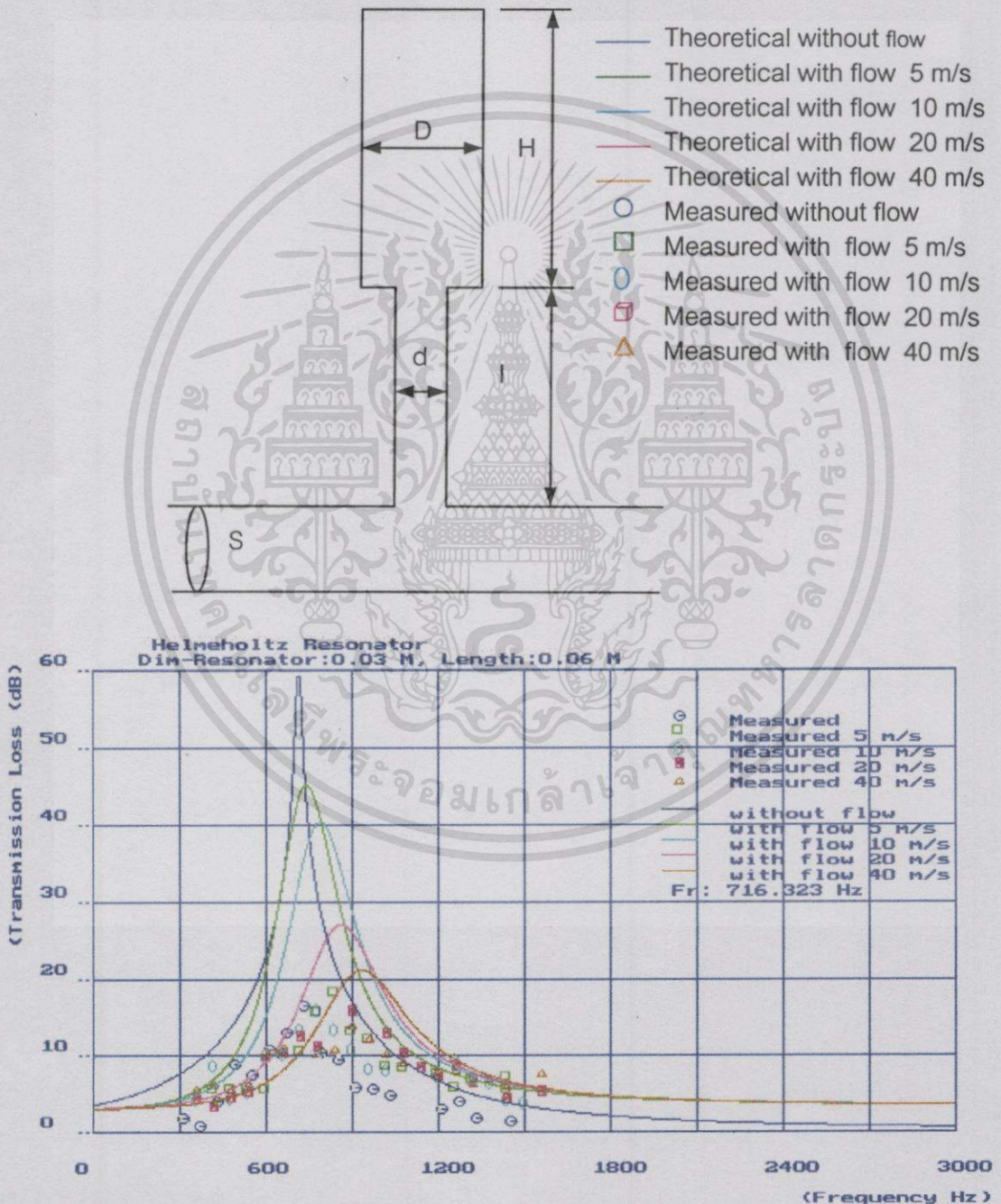
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m,

$H = 0.06$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ควรถูกใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้เกี่ยวข้อง และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้ทุกครั้ง

จากรูปที่ 4.9 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 300~1600 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $Fr = 716.323$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



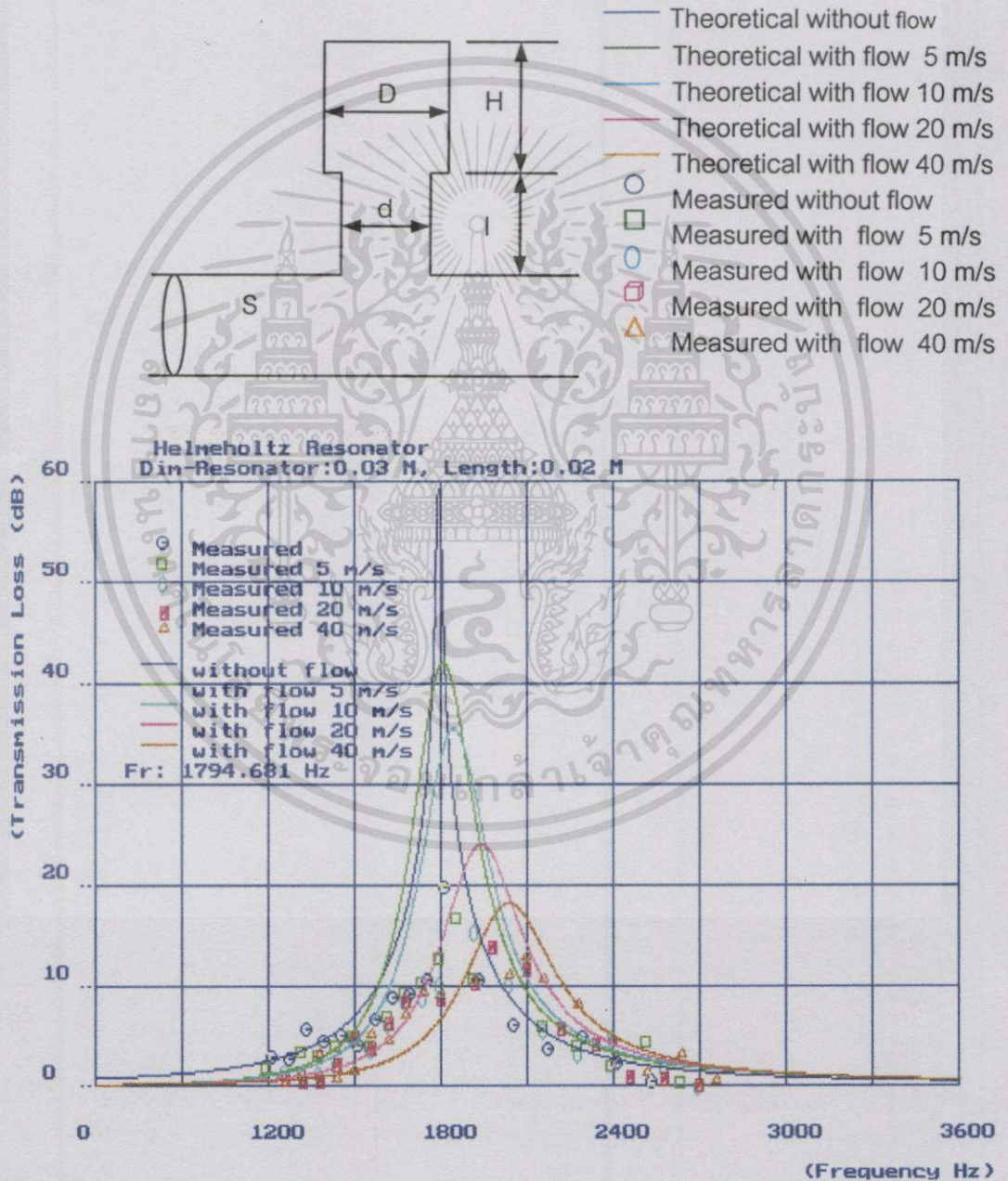
รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m,

$H = 0.06$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปทำธุรกิจใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้ยังรวมถึงข้อมูลแบบนี้อีก และต้องแจ้งถึงว่าเอกสารเหล่านี้ที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 1200~2800 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $F_r = 1794.681$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



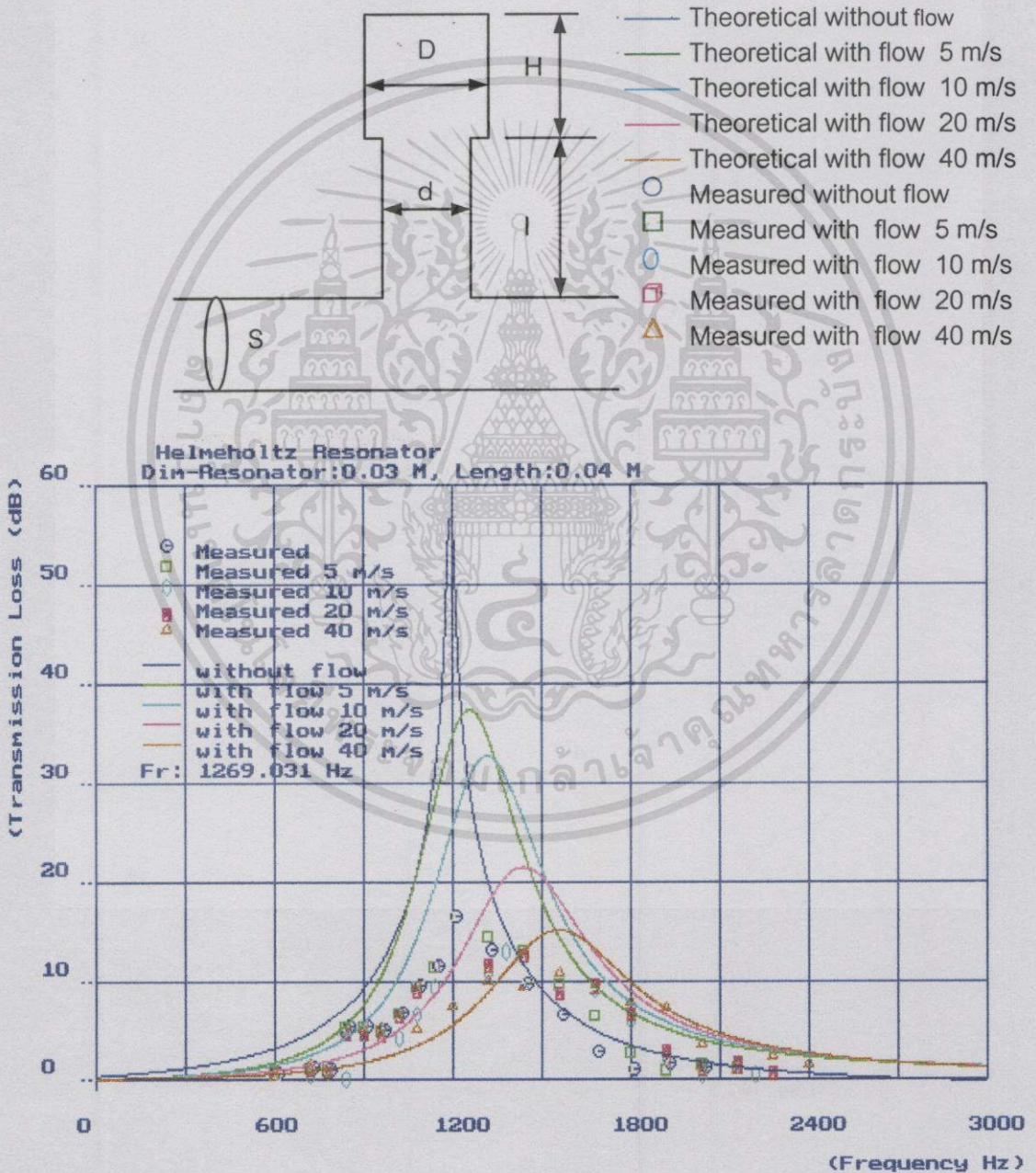
รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m,

$H = 0.02$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใดบ้าง สิ่งอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการอ้างอิงใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง $= 0.025$ m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 600~2400 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $Fr = 1269.031$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



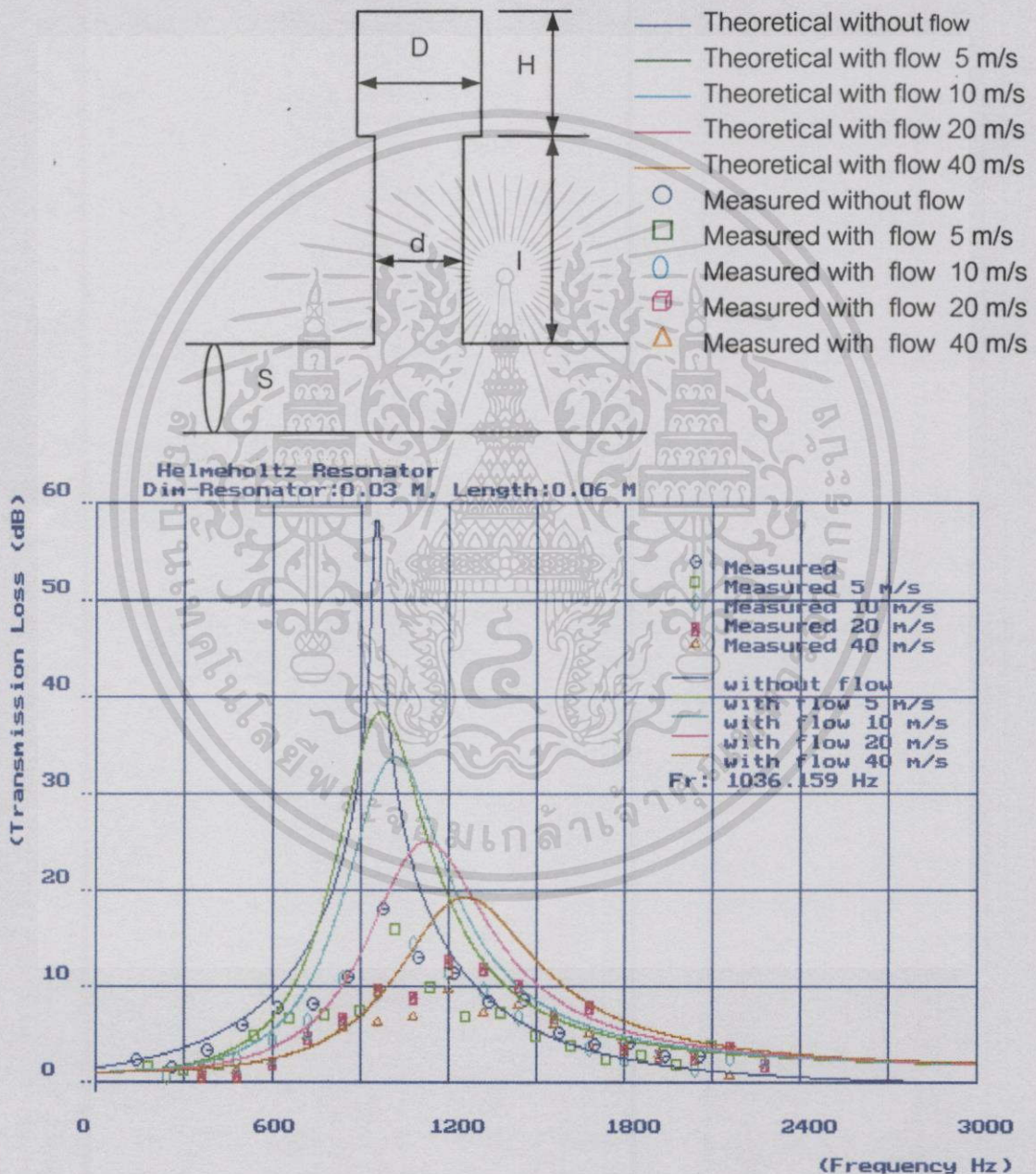
รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m,

$H = 0.02$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

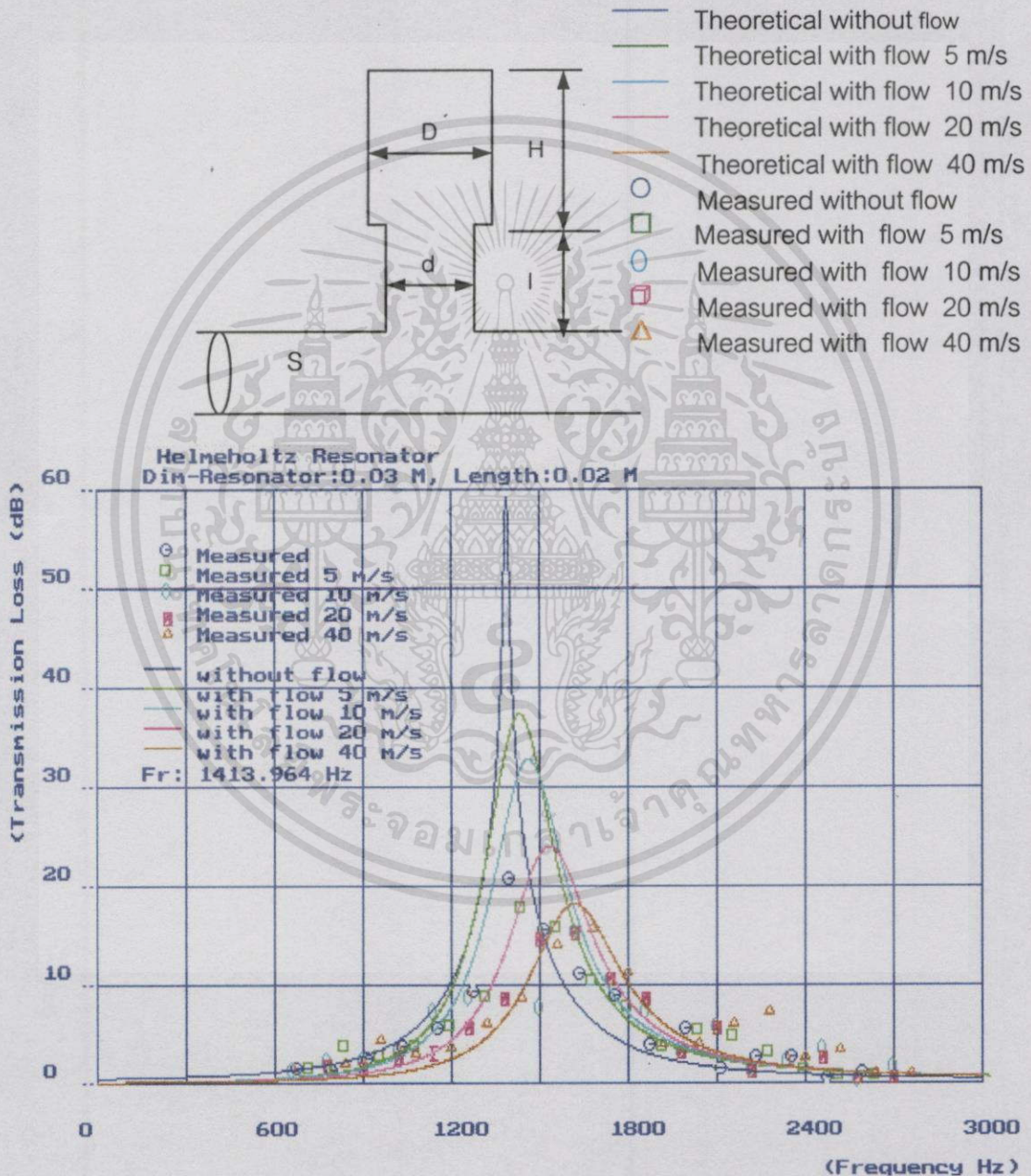
ไปว่ากรณีใดก็ตาม สิ่งนี้หมายถึงคุณจะไม่มีความรับผิดชอบที่จะแจ้งล่วงหน้าว่าจะมีการแก้ไข

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 200~2300 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 1036.159$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



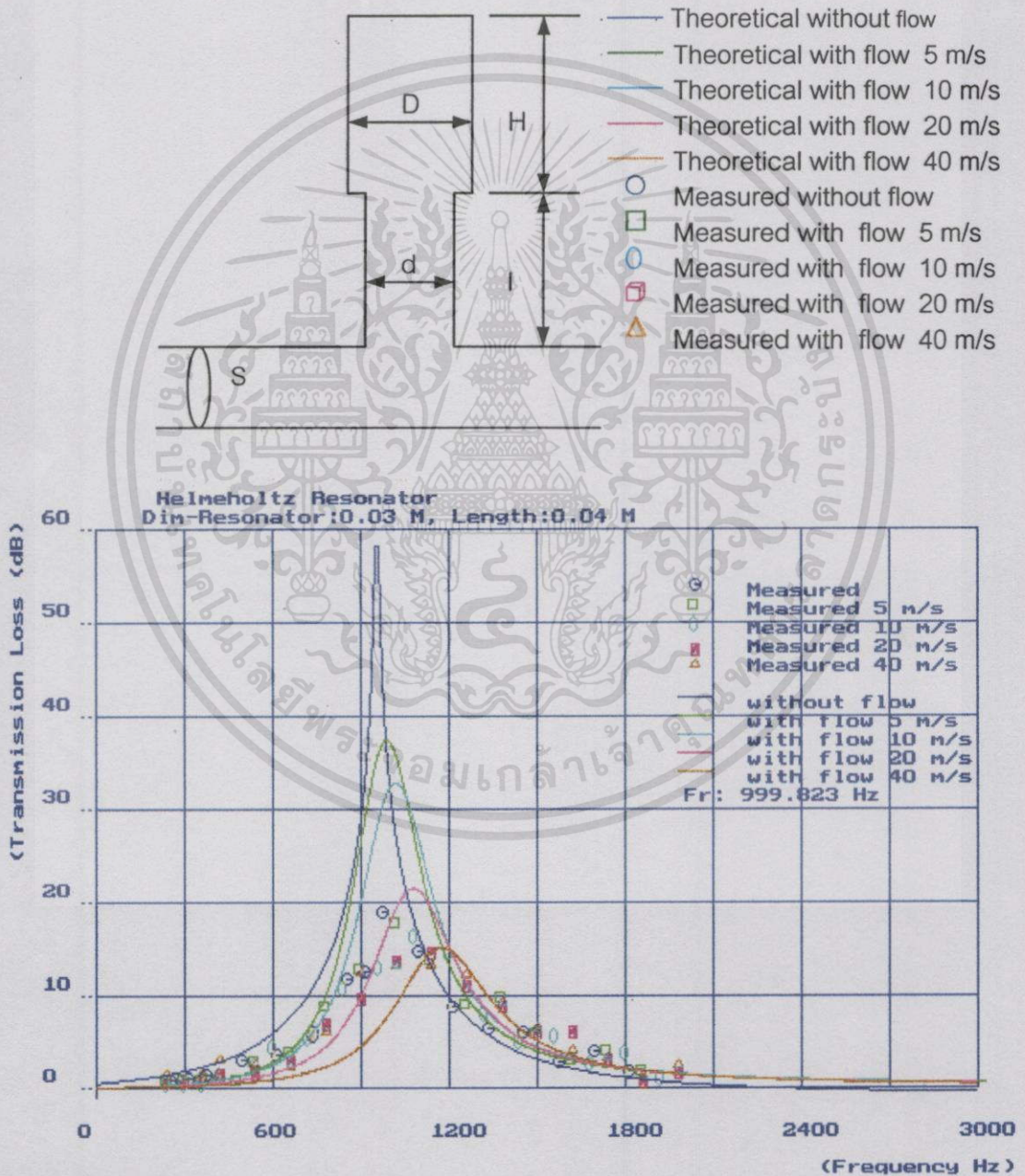
รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง $= 0.025$ m จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นในช่วงความถี่ระหว่าง 700~2800 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $Fr = 1413.964$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 250~1900 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $Fr = 999.8235$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



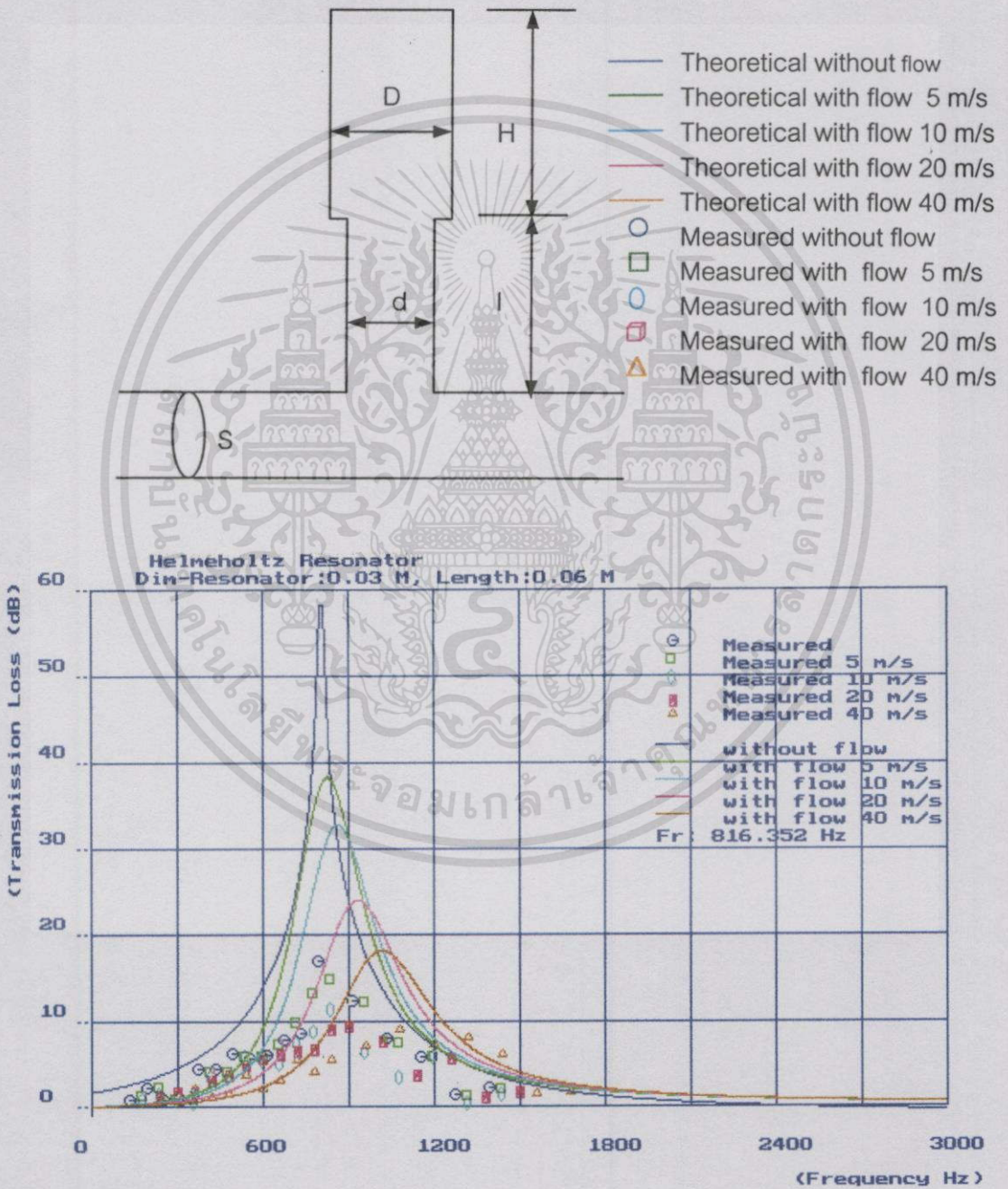
รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m,

$H = 0.04$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปทำธุรกิจใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้ทั้งหมดยังคงเป็นของสถาบันฯ และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 200~1900 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $F_r = 816.352$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



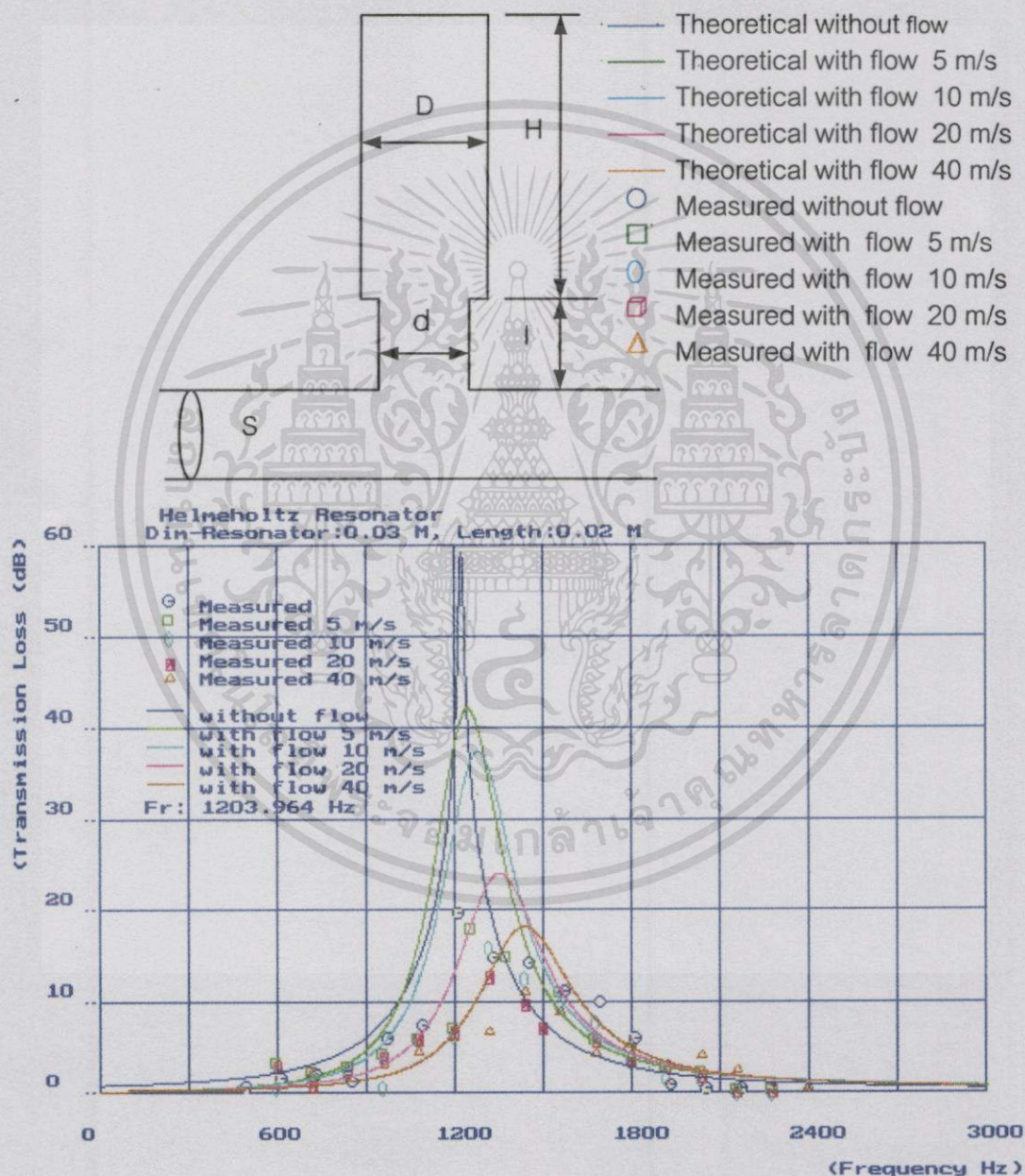
รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m,

$H = 0.04$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

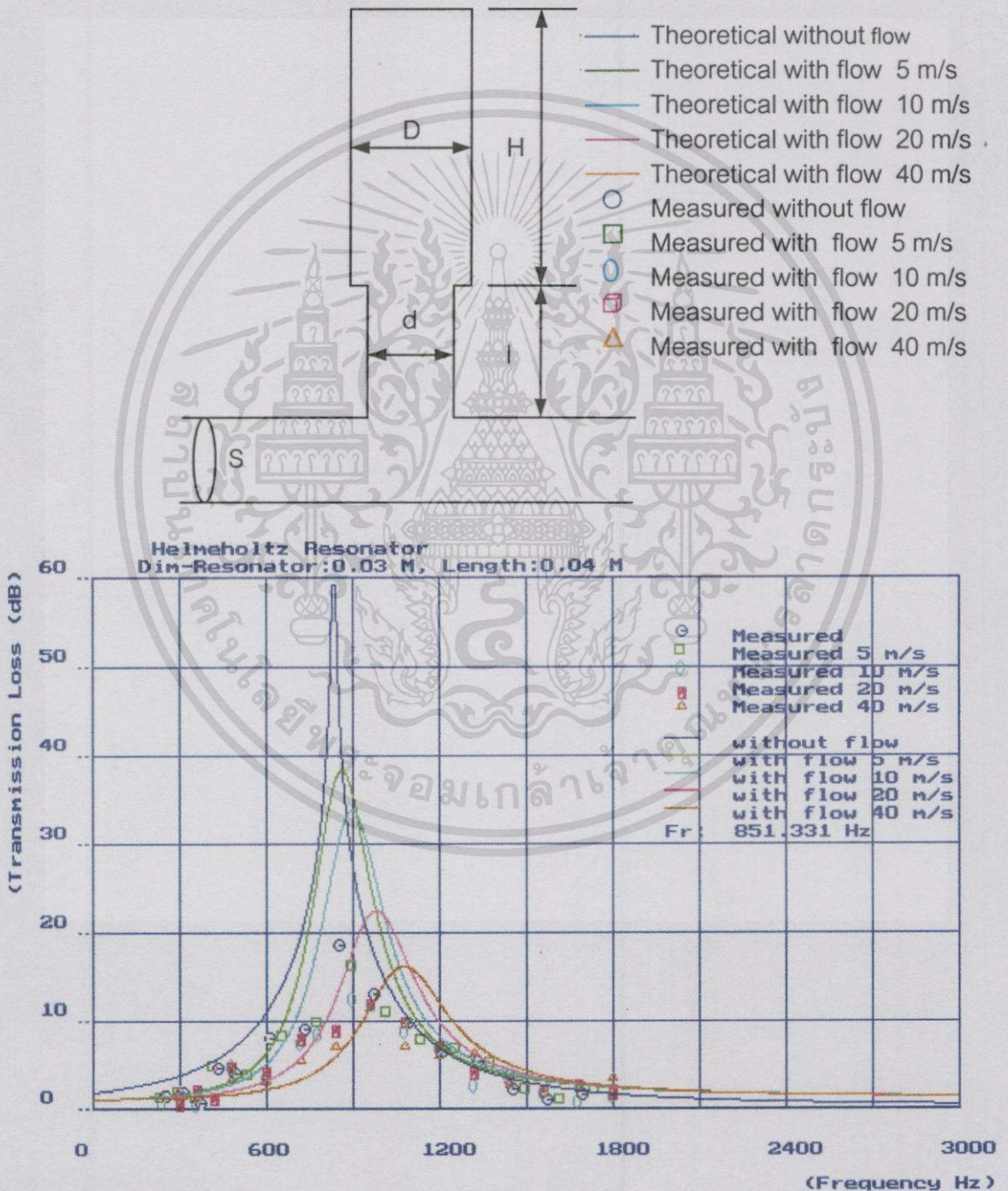
ไปทำธุรกิจใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้หมายถึงผู้ดูแลระบบและตัวงานวิจัยวิจัยว่าของเอกสารเหล่านี้ที่มีค่ากว่าไป

จากรูปที่ 4.16 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 500~2400 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $F_r = 1203.964$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m

จากรูปที่ 4.17 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นในช่วงความถี่ระหว่าง 250~1800 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่ก้ำก๋อน $F_r = 851.331$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



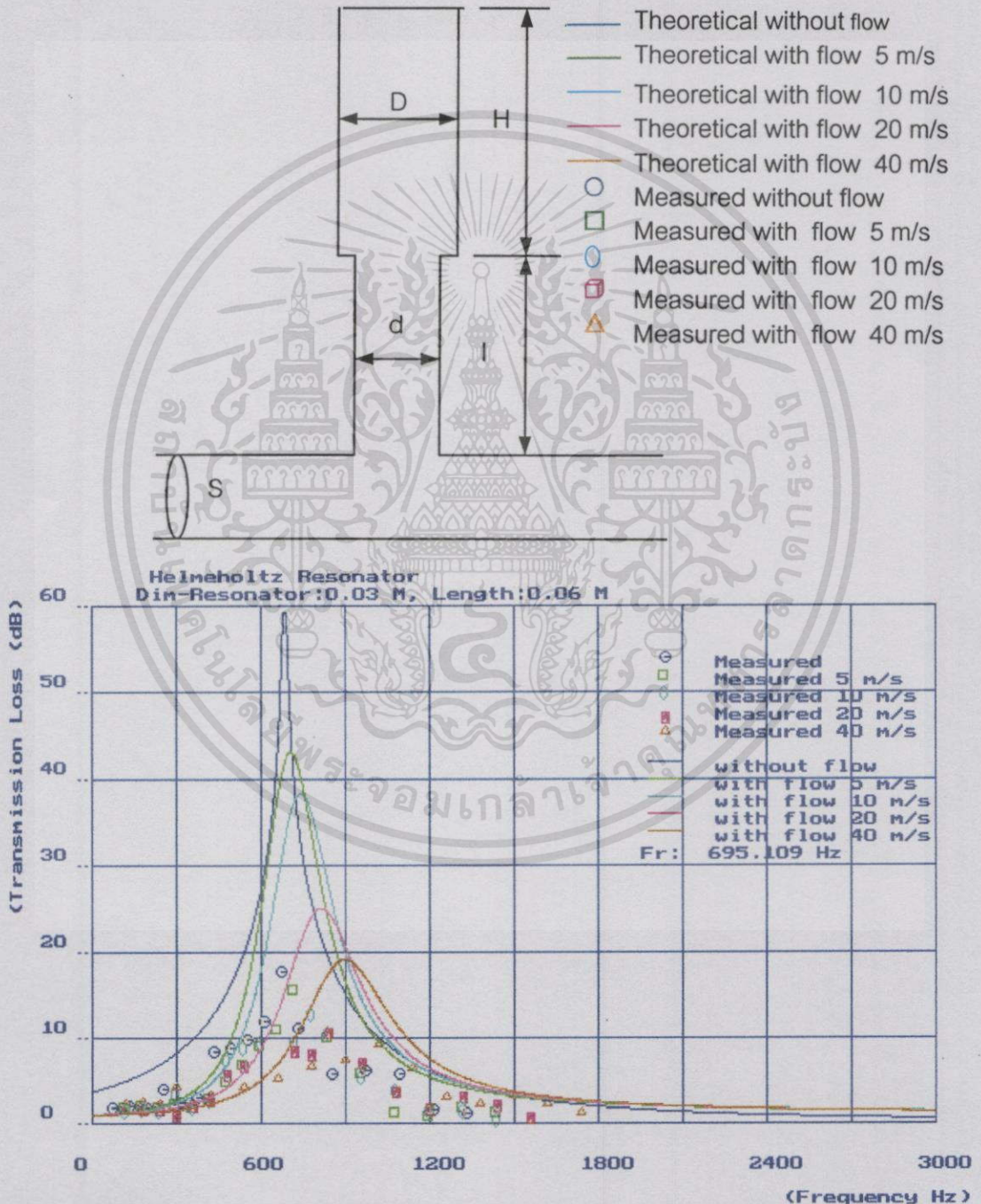
รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m,

$H = 0.06$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปทำกรณีใดกรณีหนึ่ง สิ่งที่จะทำมีให้ด้วยใจที่รัก และต้องว่าถึงถึงว่าของเอกสารเหล่านี้ซึ่งมีอยู่ทั่วไป

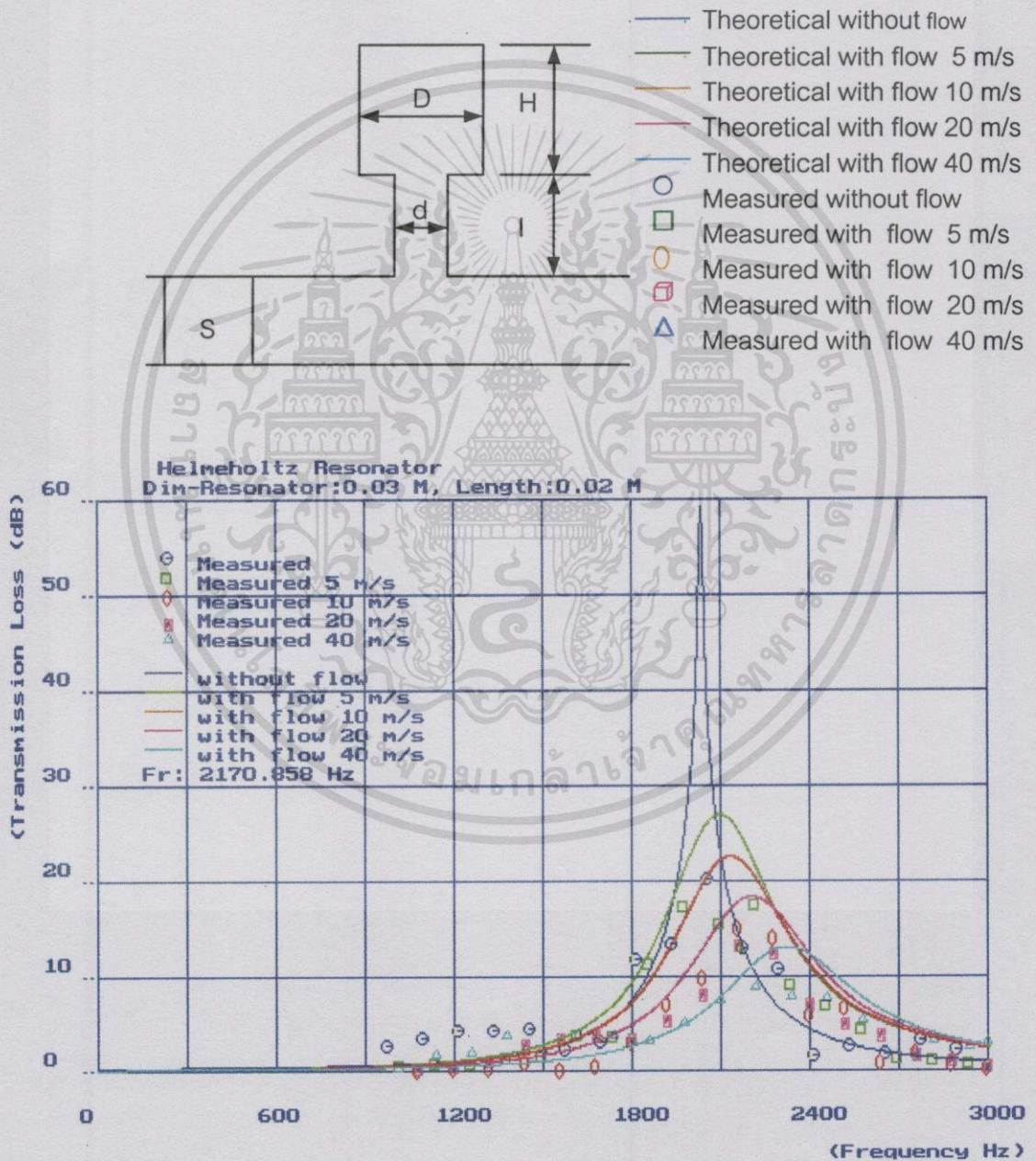
จากรูปที่ 4.18 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 100~1700 Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 695.109$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m,

$H = 0.06$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m

จากรูปที่ 4.19 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $1000 \sim 3000$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่ก่าทอน $F_r = 2170.858$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง

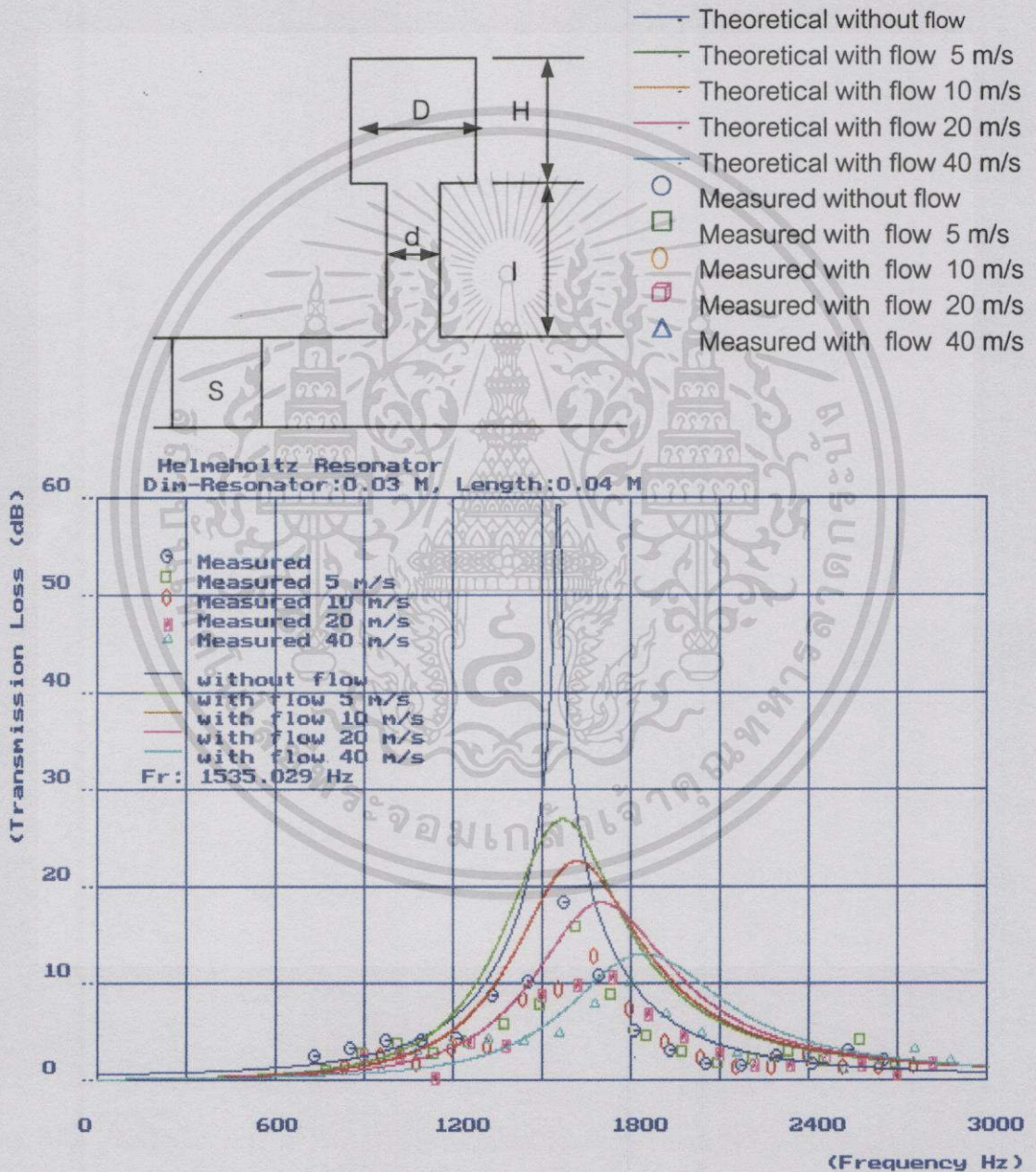


รูปที่ 4.19 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m,

$H = 0.02$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m

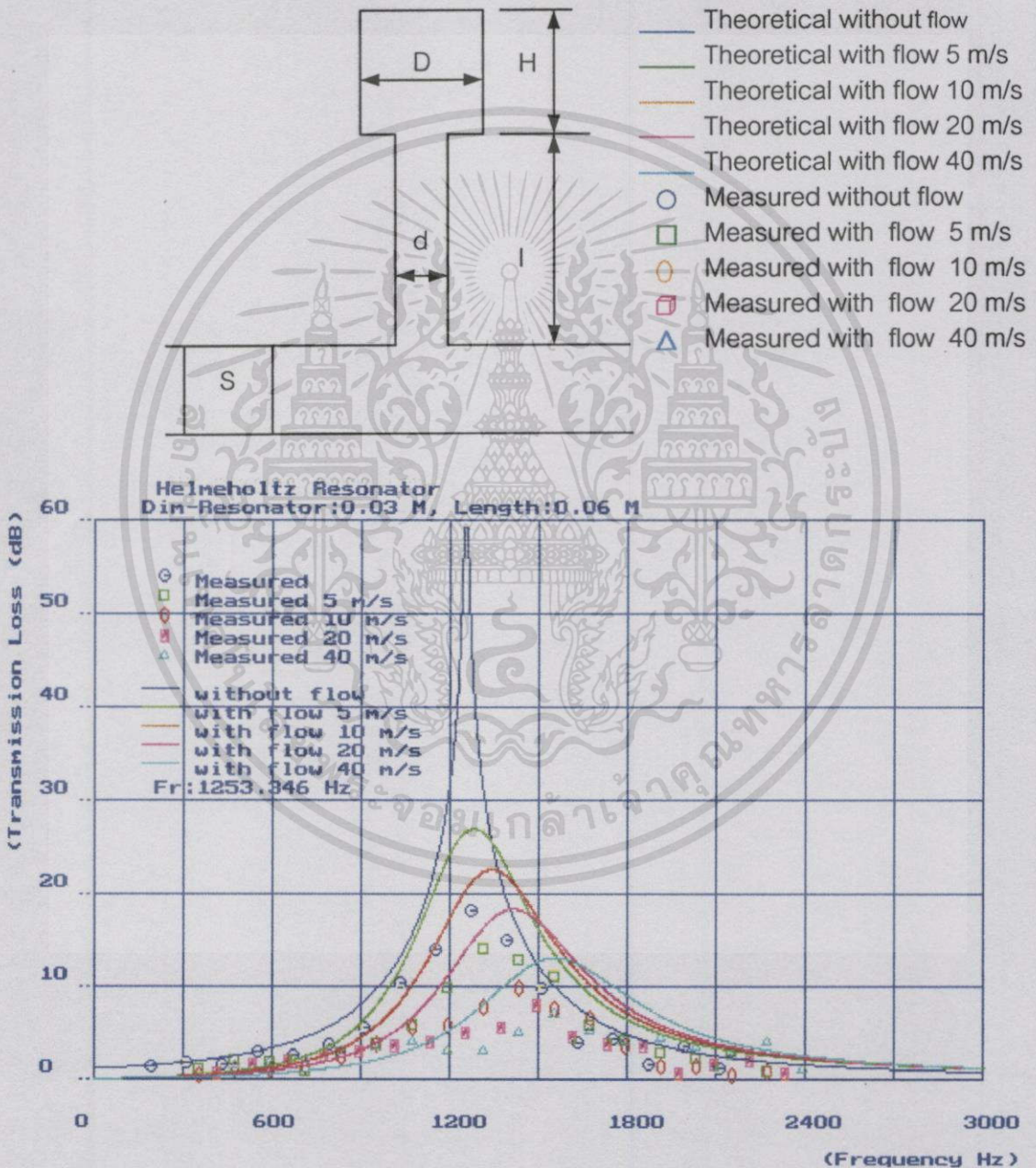
เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนไวสาหรับการใชงานเพอการศึกษาเทานั้น ไมออนุญาตใหนาไปใชประโยชนดานการคา

จากรูปที่ 4.20 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นในช่วงความถี่ระหว่าง $700 \sim 2900$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $Fr = 1535.029$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



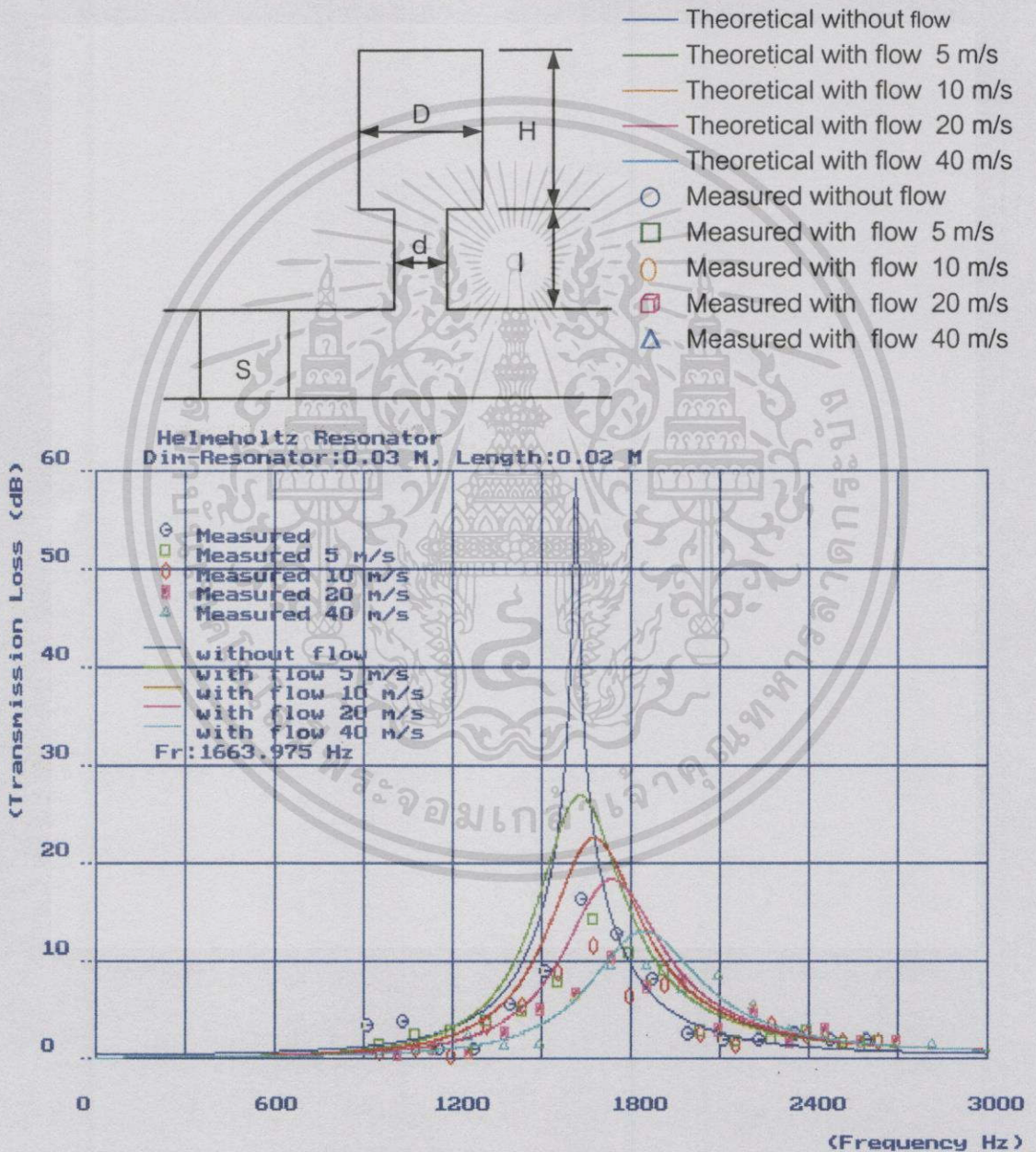
รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m

จากรูปที่ 4.21 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $200 \sim 2400$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 1253.346$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5, 10, 20, 40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



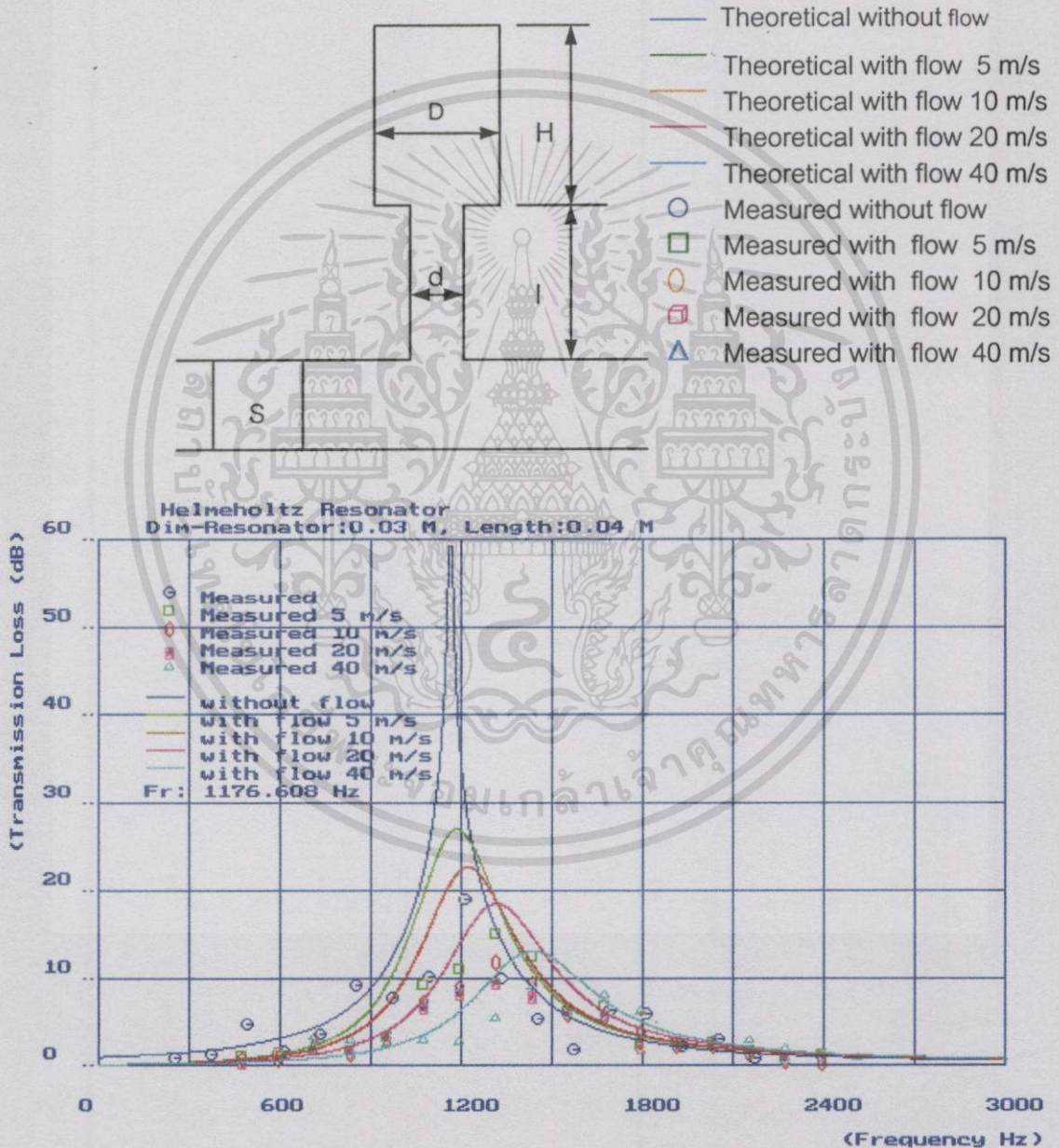
รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m

จากรูปที่ 4.22 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $900 \sim 2800$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $Fr = 1663.975$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



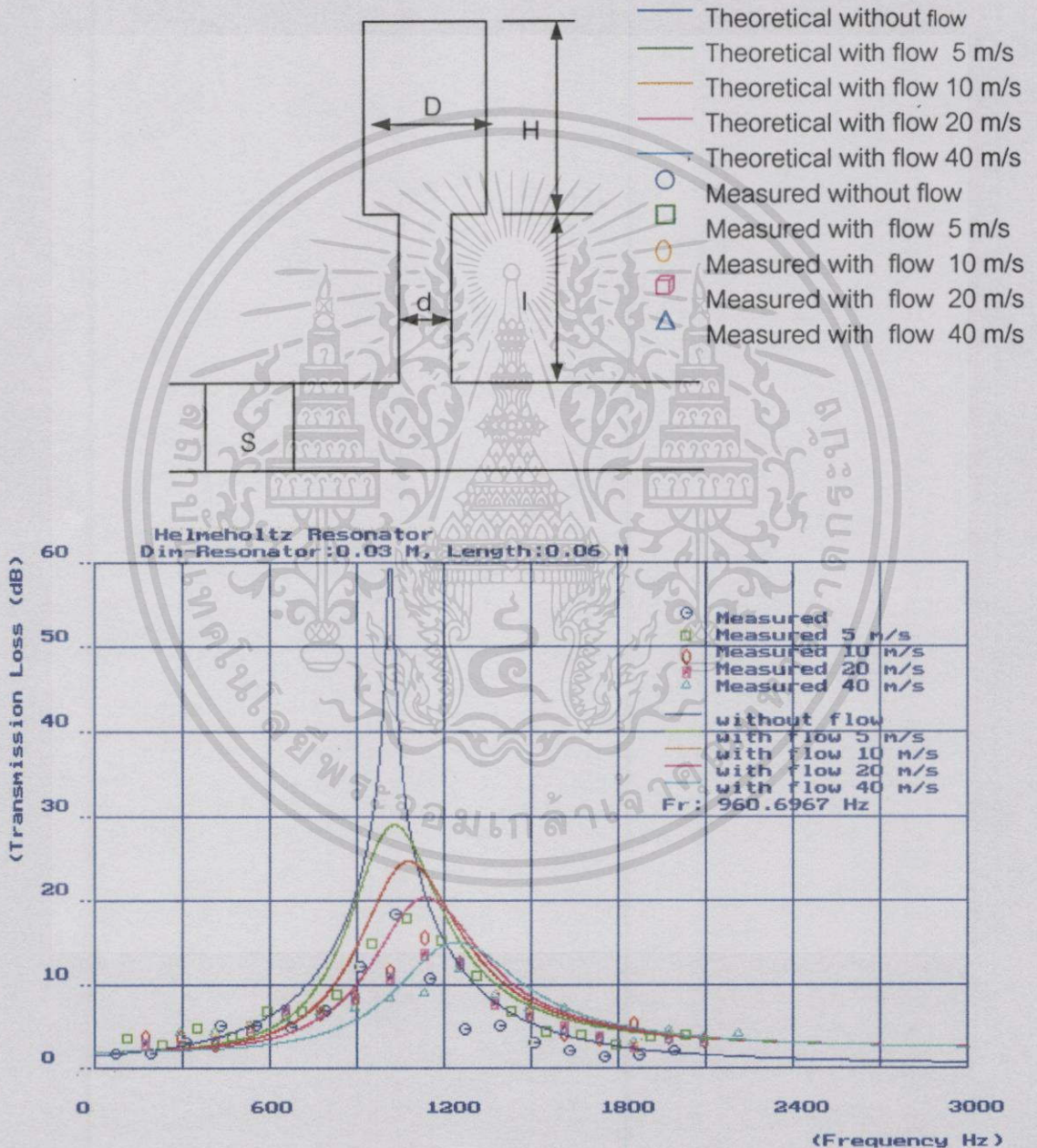
รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m

จากรูปที่ 4.23 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $260 \sim 2400$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $Fr = 1176.608$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



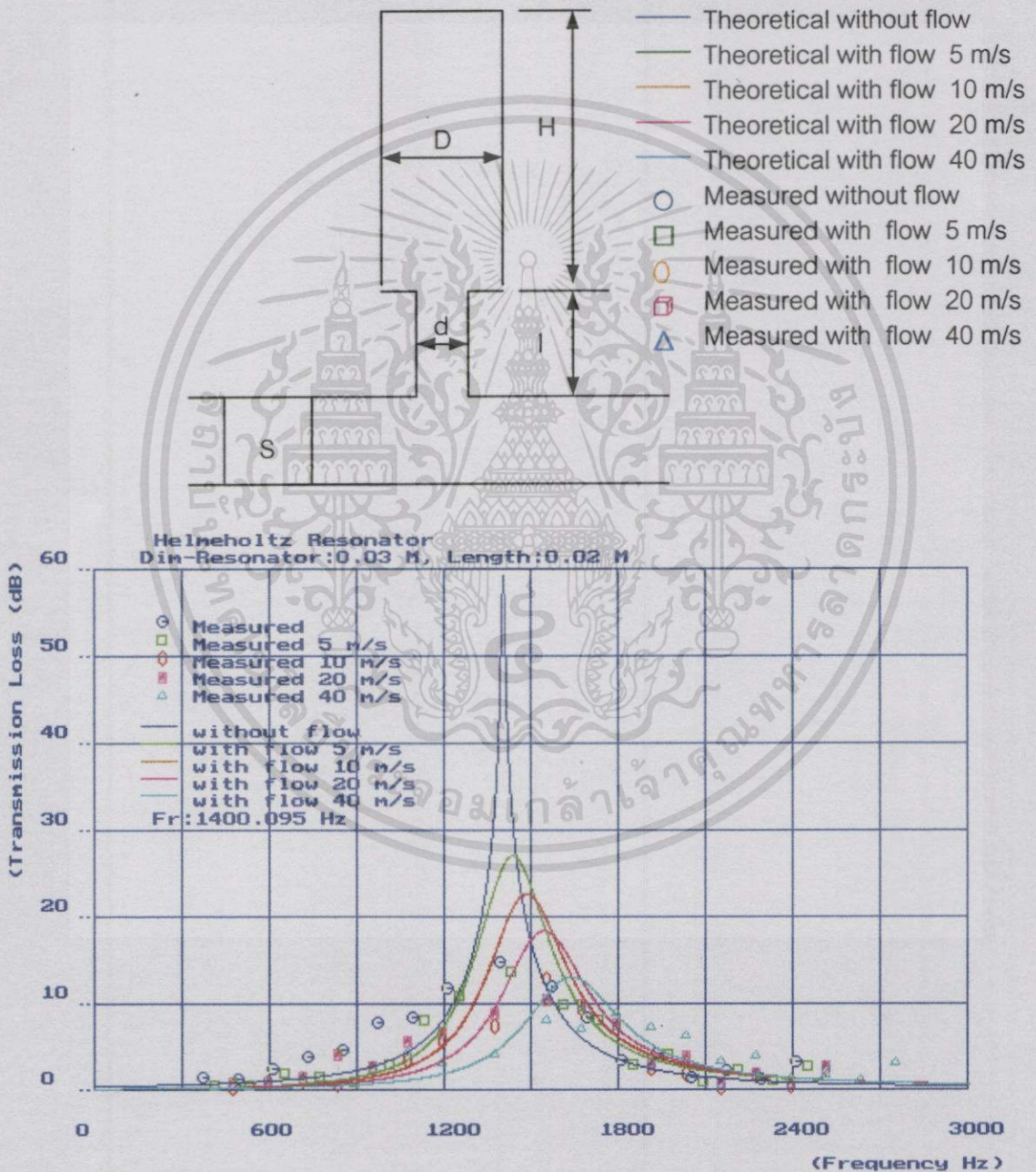
รูปที่ 4.23 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m

จากรูปที่ 4.24 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นในช่วงความถี่ระหว่าง $100\text{--}2200$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่ก้ำก๋อน $Fr = 960.6967$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5, 10, 20, 40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



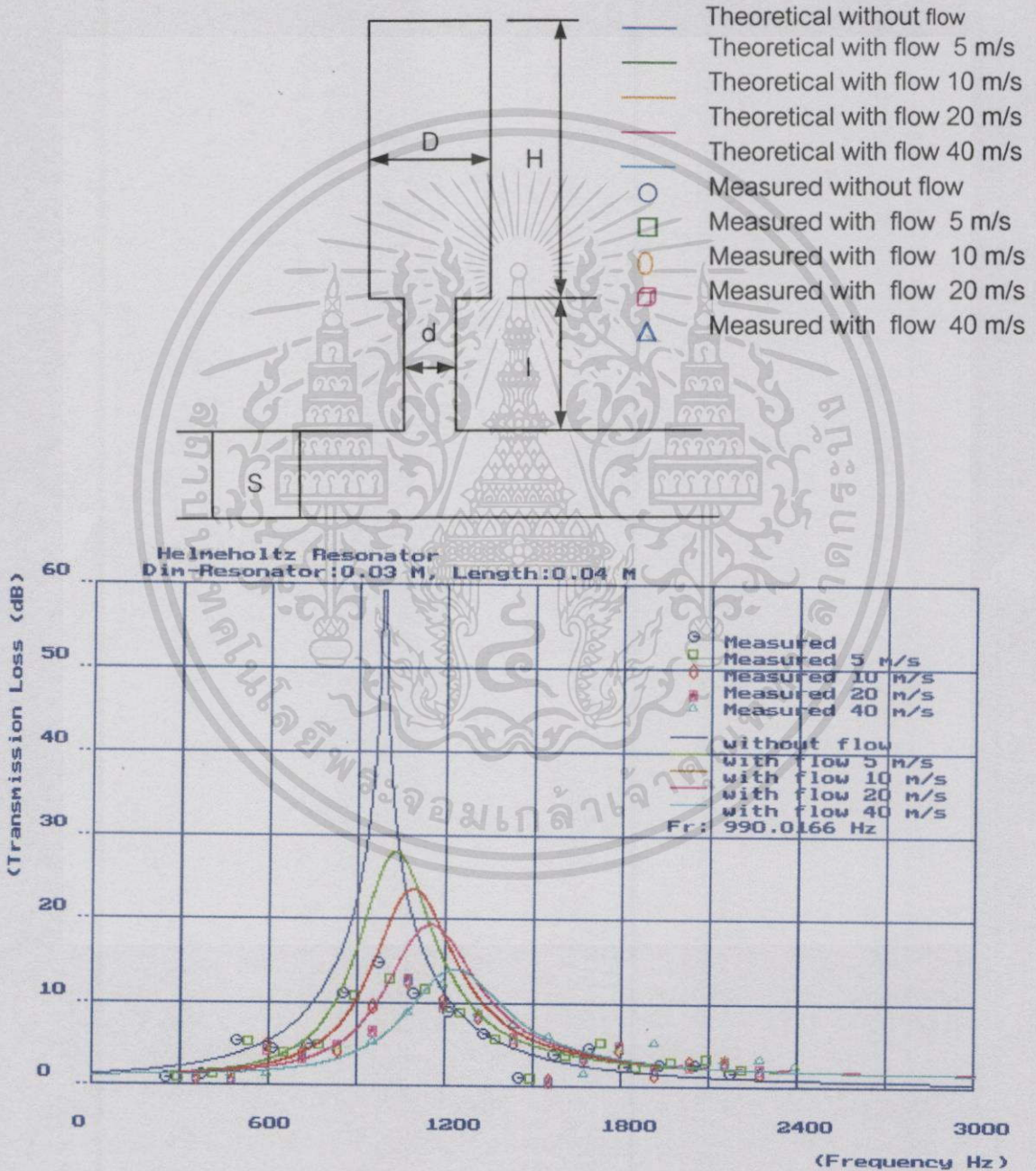
รูปที่ 4.24 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m

จากรูปที่ 4.25 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $400 \sim 2800$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 1400.095$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



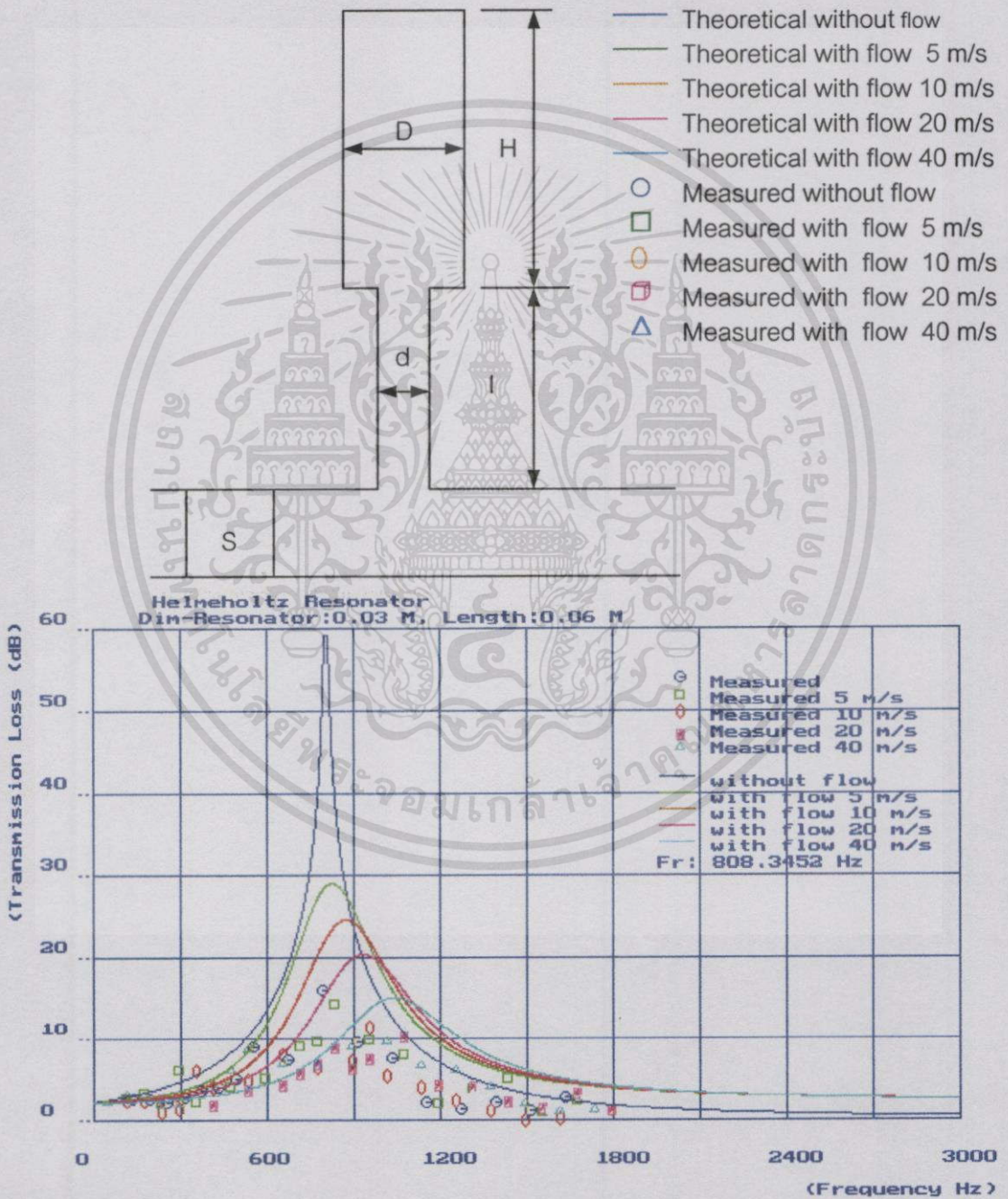
รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.01$ m

จากรูปที่ 4.26 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นในช่วงความถี่ระหว่าง $260 \sim 2400$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $Fr = 990.0166$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5, 10, 20, 40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.01$ m

จากรูปที่ 4.27 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.01$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $100 \sim 1800$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 808.3452$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



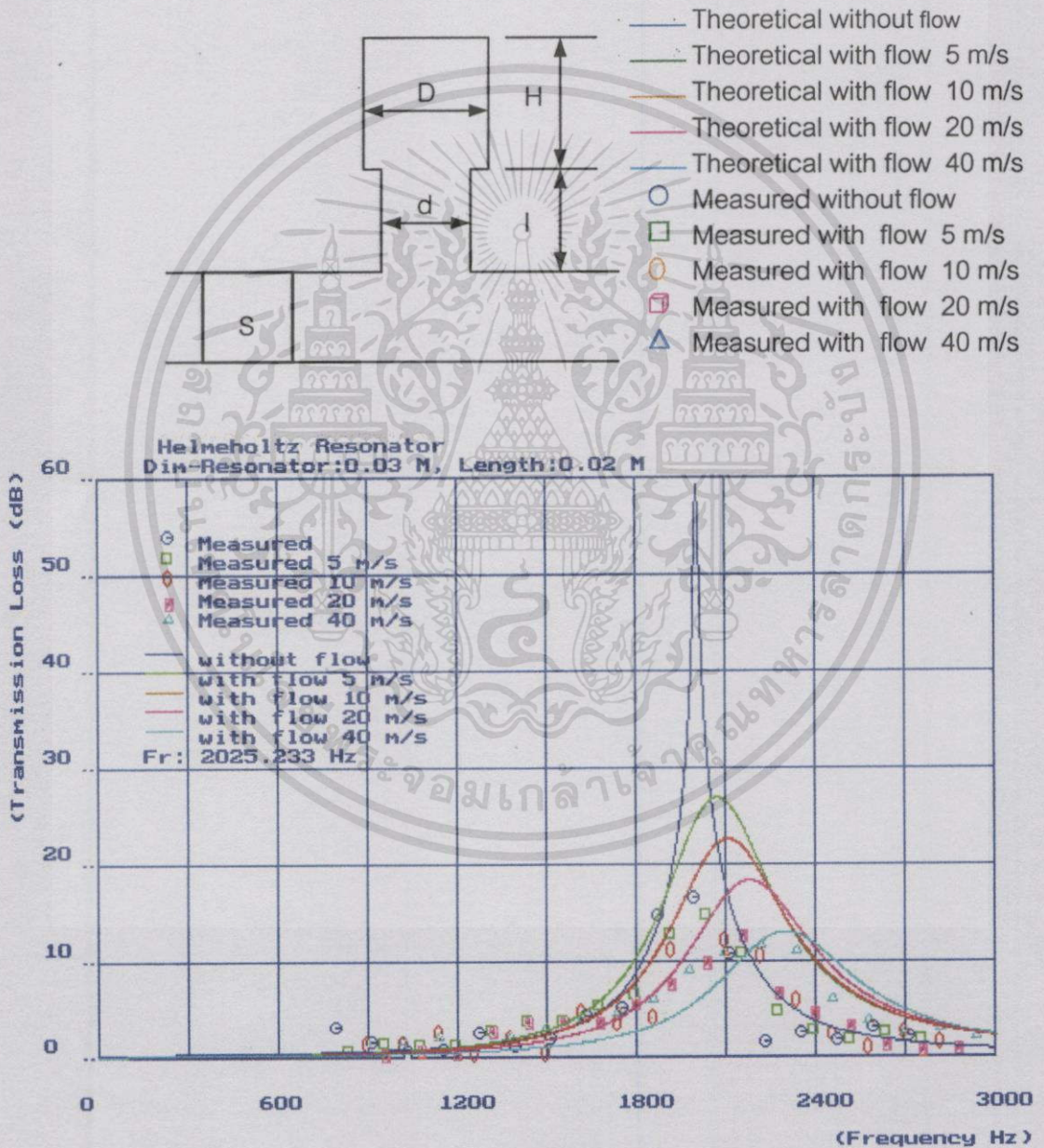
รูปที่ 4.27 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m,

$H = 0.06$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.01$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ได้รับลิขสิทธิ์หรือสิ่งอื่นใดจากผู้จัดทำเอกสารนี้ และหากผู้ใดมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสาร

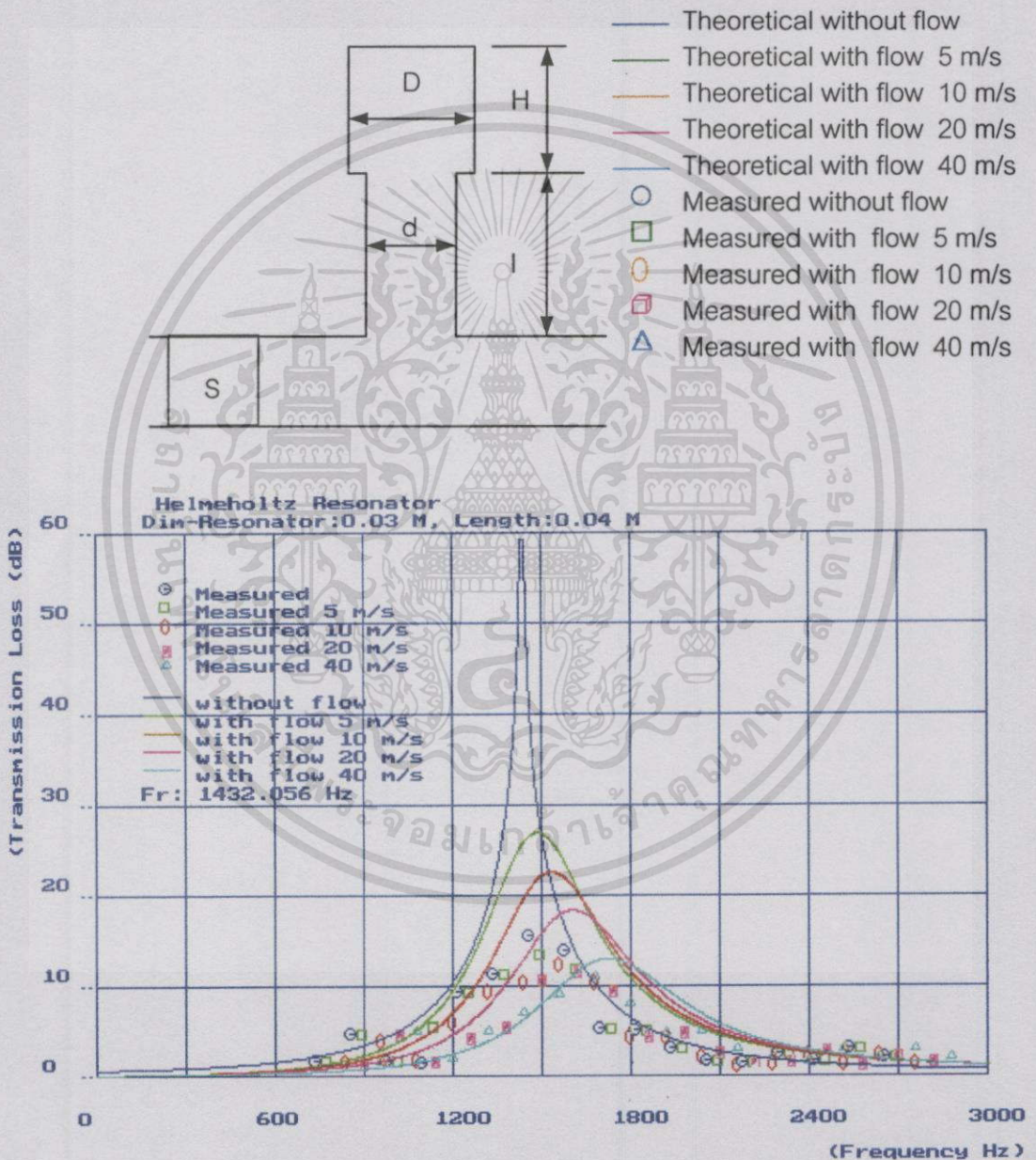
จากรูปที่ 4.28 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $800 \sim 2900$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $F_r = 2025.233$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.28 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m

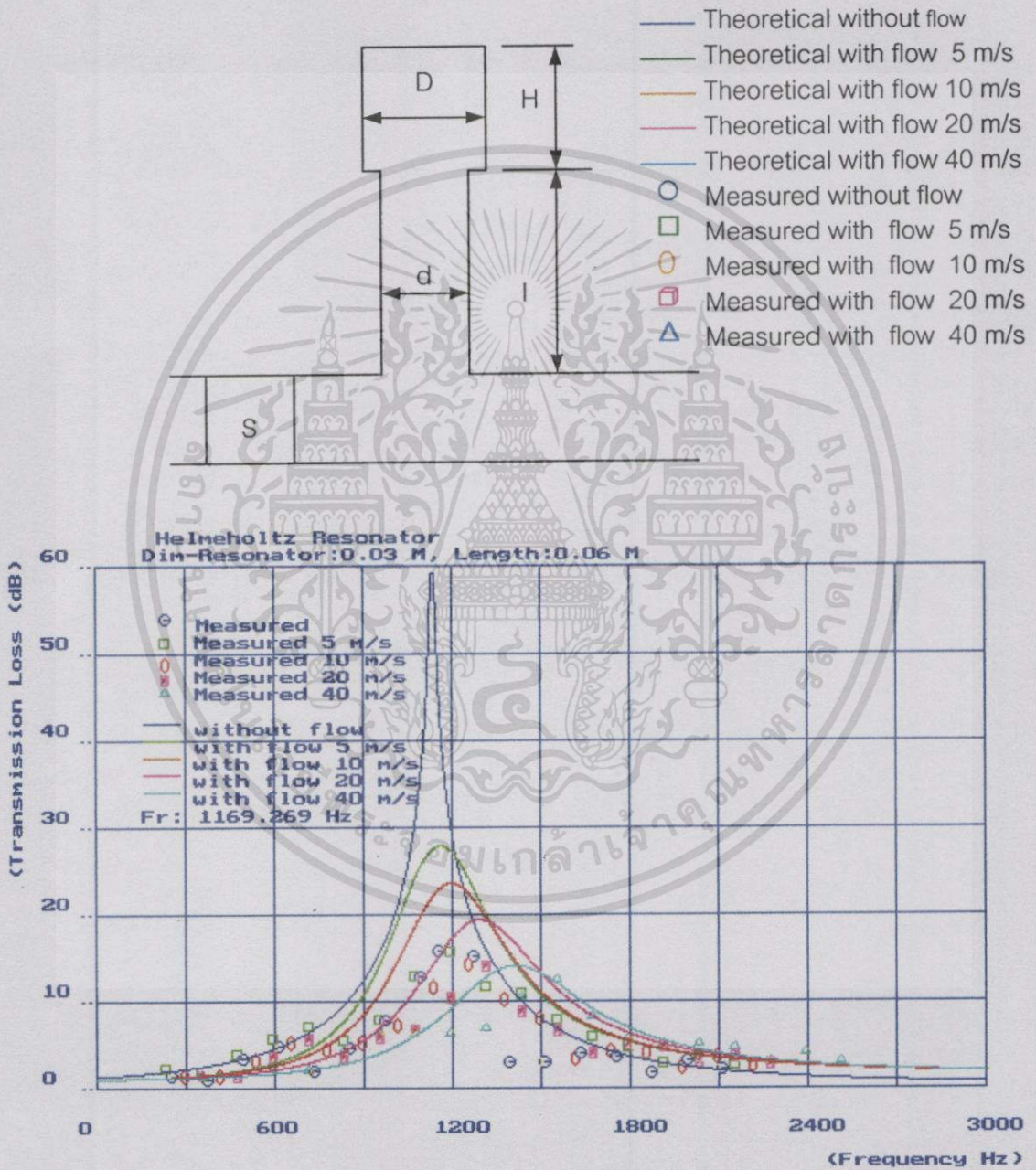
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไปว่าควรใช้กันอย่างจริงจัง ซึ่งจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถ และช่วยส่งเสริมให้วงการอุตสาหกรรมและวิชาชีพของเราไปใช้

จากรูปที่ 4.29 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นในช่วงความถี่ระหว่าง $740 \sim 2900$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $F_r = 1432.056$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



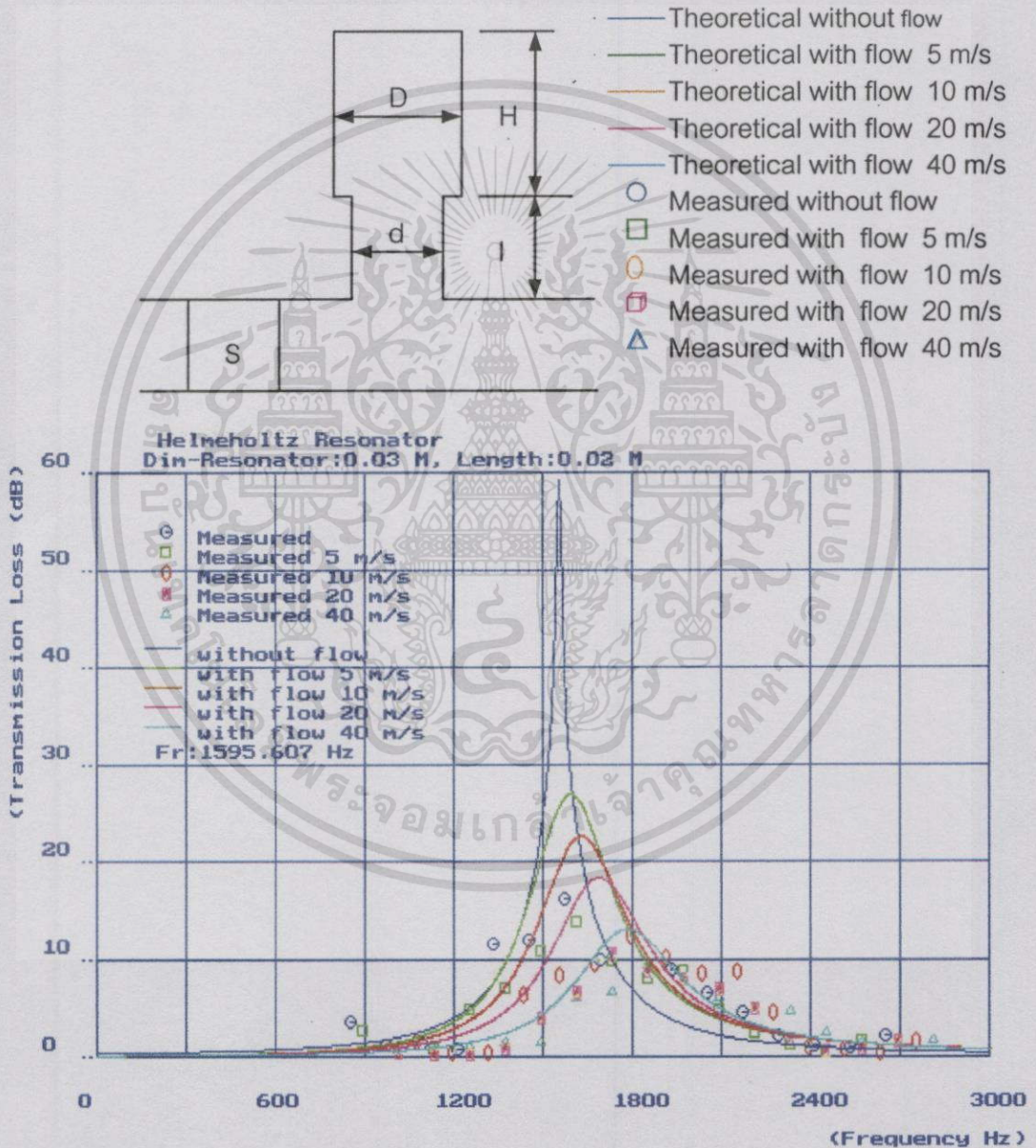
รูปที่ 4.29 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m

จากรูปที่ 4.30 แสดงผลการทดลองโดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.02$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $400 \sim 2500$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 1169.269$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



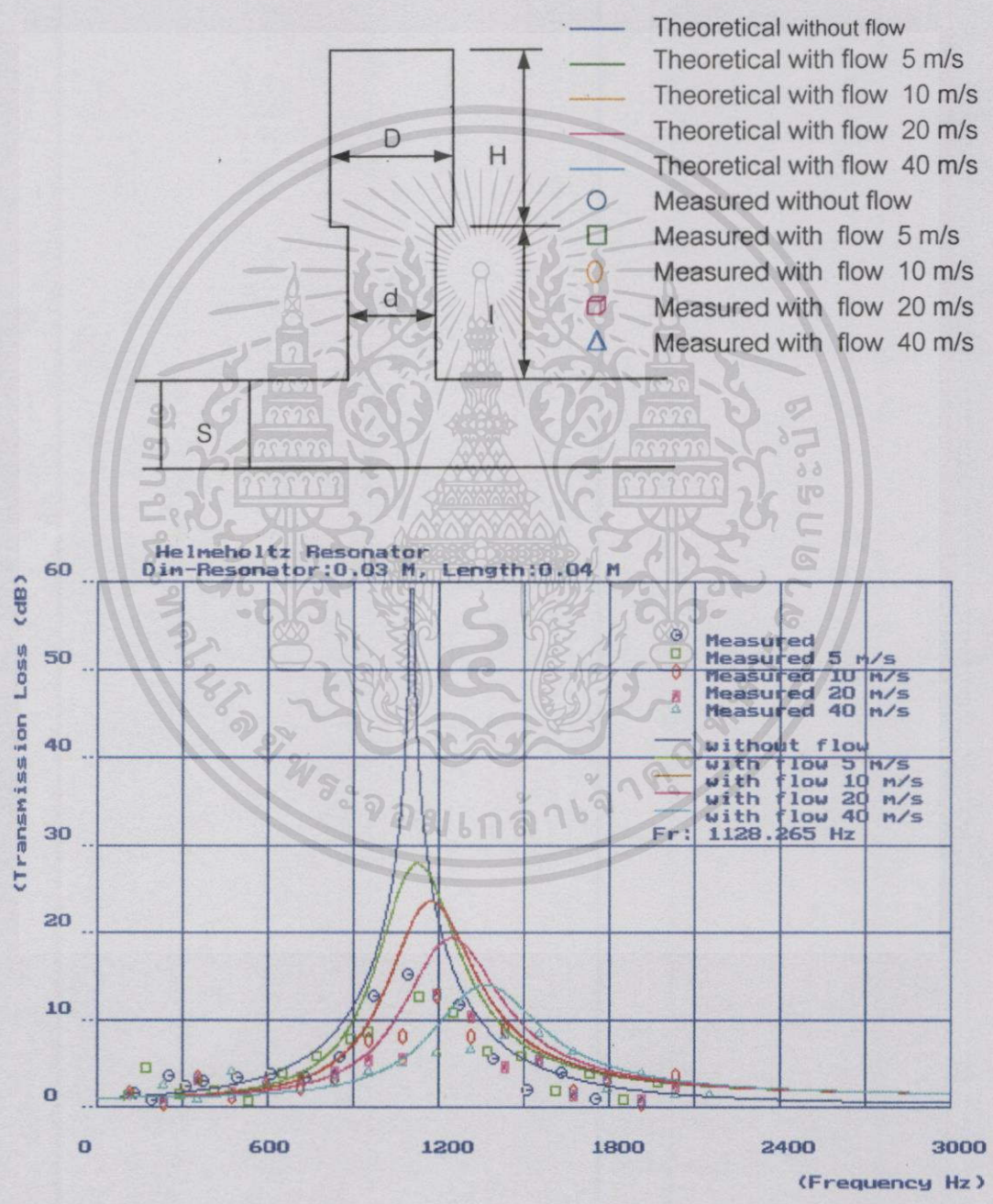
รูปที่ 4.30 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.02$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m

จากรูปที่ 4.31 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.04$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $800 \sim 2800$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $F_r = 1595.607$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5,10,20,40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.31 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m, $H = 0.04$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m

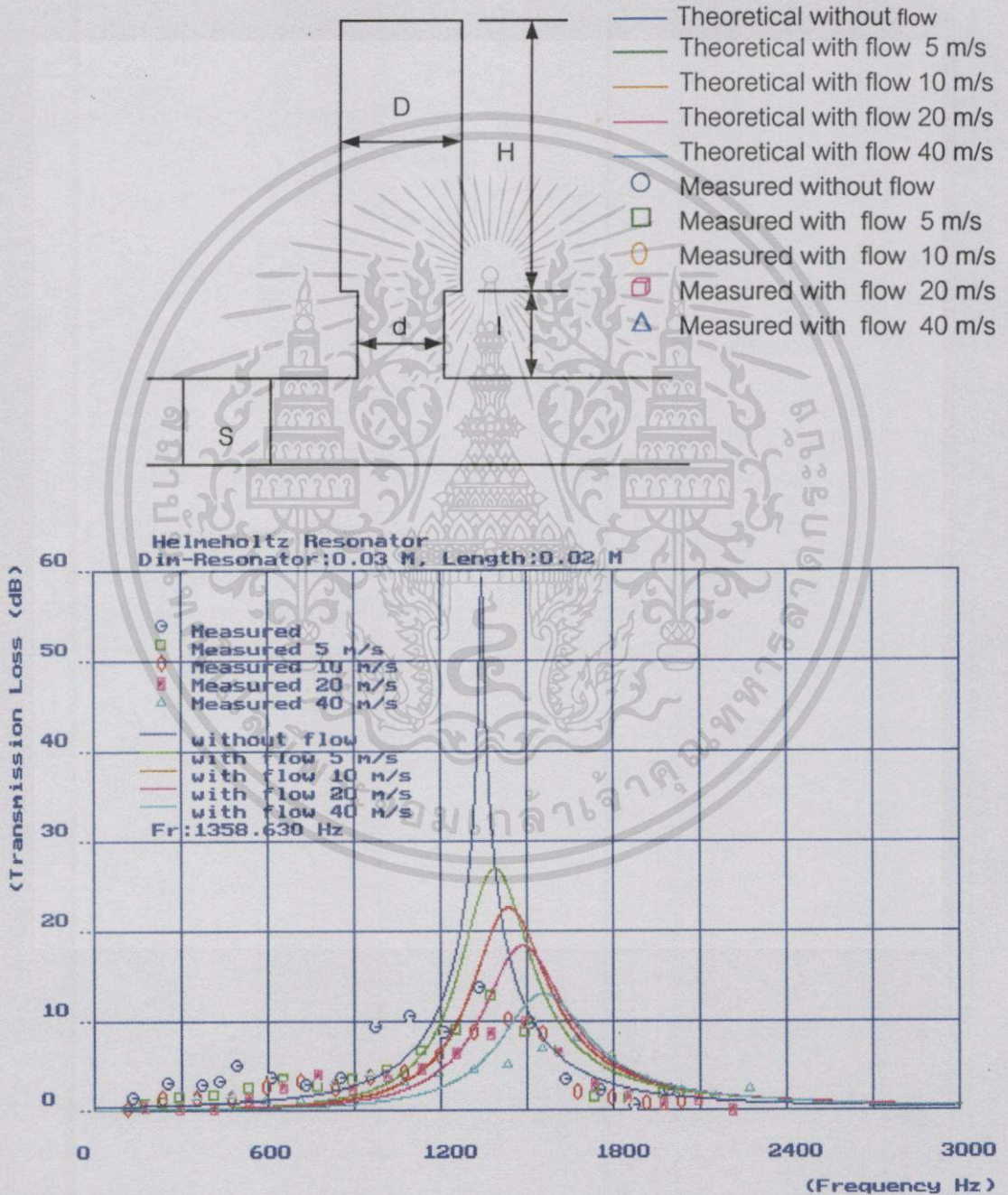
จากรูปที่ 4.32 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03 \text{ m}$, $H = 0.04 \text{ m}$ และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02 \text{ m}$ ความยาว $l = 0.04 \text{ m}$ ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด $0.025 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$ จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $150 \sim 2200 \text{ Hz}$ ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 1128.265 \text{ Hz}$ สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40 \text{ (m/s)}$ Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.32 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03\text{m}$,

$H = 0.04 \text{ m}$, $l = 0.04 \text{ m}$, $d = 0.02 \text{ m}$

จากรูปที่ 4.34 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.02$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $150 \sim 2300$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 1358.630$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5, 10, 20, 40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



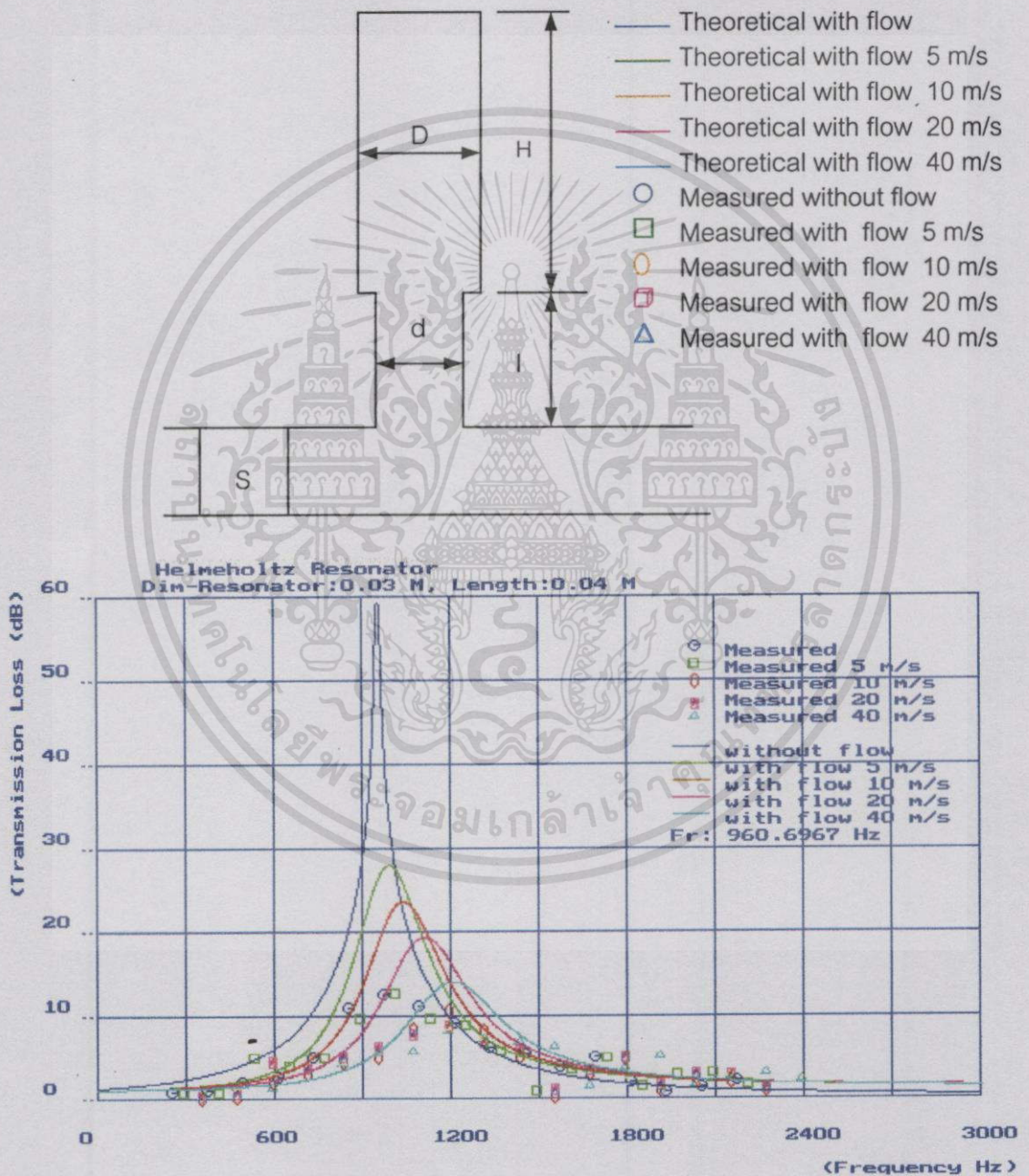
รูปที่ 4.34 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m,

$H = 0.06$ m, $l = 0.02$ m, $d = 0.02$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้จนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ได้รับลิขสิทธิ์หรือสิ่งอื่นใดจากผู้เผยแพร่ข้อมูลนี้โดยมีเงื่อนไขว่าผู้เผยแพร่ข้อมูลนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้

จากรูปที่ 4.35 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.04$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $260 \sim 2400$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำหนด $F_r = 960.6967$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม $5, 10, 20, 40$ (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง

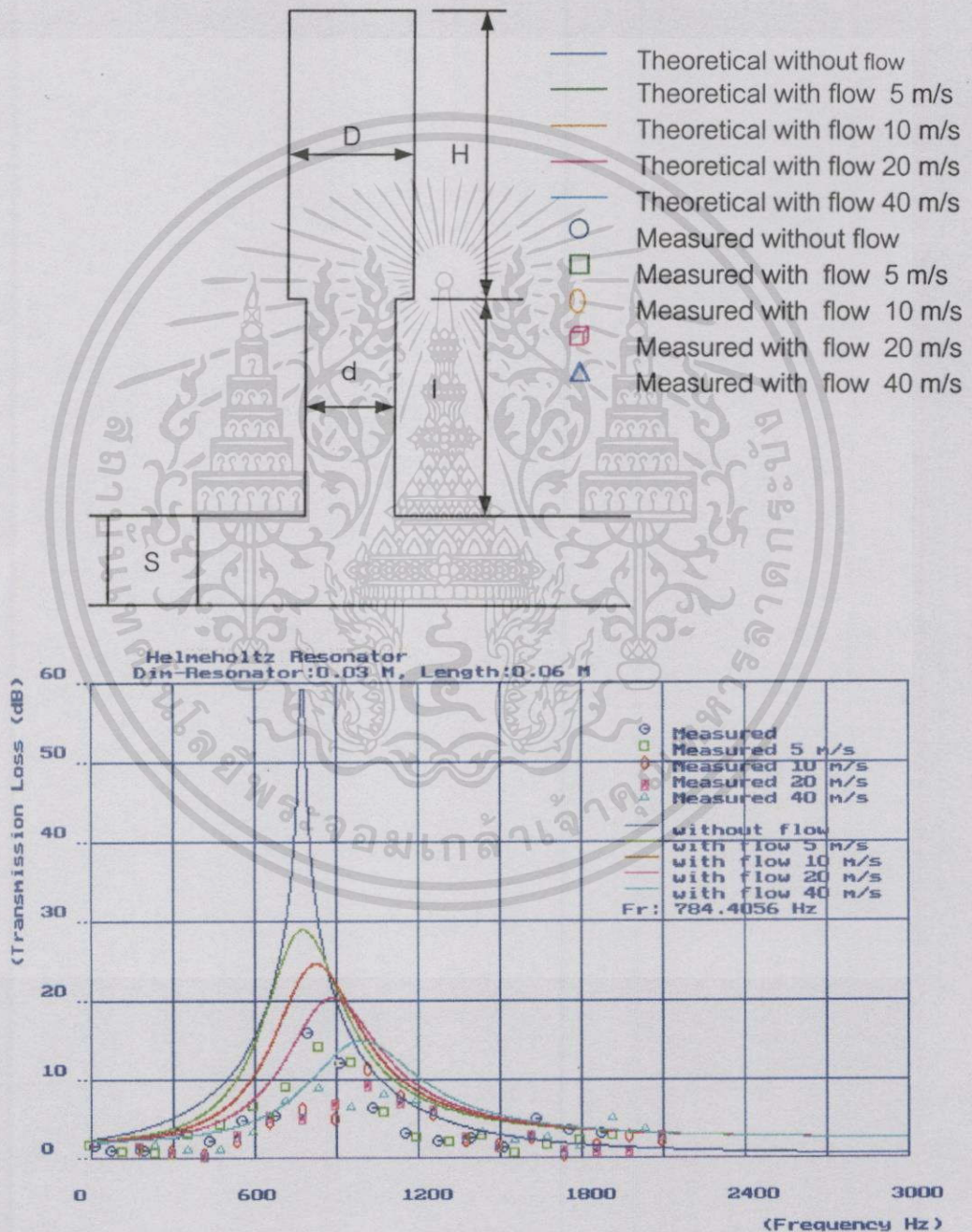


รูปที่ 4.35 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m, $l = 0.04$ m, $d = 0.02$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใดทั้งสี่นี้ ลึกซึ้งห่างเหินให้ชัดเจนไปเลยดีกว่า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานหรือผู้ที่มีกรรมสิทธิ์

จากรูปที่ 4.36 แสดงกราฟผลการทดลอง โดยใช้ Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 0.03$ m, $H = 0.06$ m และ Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.02$ m ความยาว $l = 0.06$ m ติดตั้งเข้าผนังท่อแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m จากผลการทดลองสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง $150 \sim 2100$ Hz ซึ่งตามทฤษฎีจะเกิดความถี่กำทอน $F_r = 784.4056$ Hz สำหรับการทดลองไม่มีความเร็วลม และเมื่อมีความเร็วลม 5, 10, 20, 40 (m/s) Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่ง Transmission Loss จะต่ำลง



รูปที่ 4.36 แสดงผลการทดลอง Helmholtz Resonator 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=0.03$ m,

$H = 0.06$ m, $l = 0.06$ m, $d = 0.02$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปทางอื่นโดยไม่ขออนุญาต หรือเผยแพร่เป็นข้อมูลสาธารณะ และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ว่าเอกสารเหล่านี้ที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพฤติกรรมการลดเสียงของอุปกรณ์ลดเสียงแบบ Helmholtz Resonator เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 m และใช้ท่อนำเสียงแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 m และแบบสี่เหลี่ยมขนาด 0.025 m x 0.025 m เพื่อศึกษาพฤติกรรมการลดเสียงของ Helmholtz Resonator แบบ Single – Chamber Resonator ศึกษาว่า Helmholtz Resonator แต่ละขนาดมีพฤติกรรมการลดเสียงในช่วงความถี่ Resonant ได้อย่างไร ซึ่งหลักการของความถี่ Resonant ที่เกิดขึ้นจาก Standing Wave ส่งผ่านเข้าไปในระบบท่อ พลังงานเสียงในระบบท่อจะส่งผ่านความถี่เดียวกับความถี่ Resonant นั้นของอุปกรณ์ลดเสียงแบบ Helmholtz Resonator แต่ละขนาด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่าง Frequency กับสมการ Transmission loss รวมทั้งกรณีที่มีความเร็วลมไหลผ่าน ($U=5,10,20,40$ m/s) และไม่มีความเร็วลมไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.36 จะทำการ Vary Volume , Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ($d=0.01,0.02$ m) และ Connector length มีความยาว ($l = 0.02,0.04,0.06$ m)

1. จากผลการทดลองเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ลดเสียงแบบ Helmholtz Resonator เข้ากับผนังท่อนำเสียงแบบกลม และท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม พบว่า Helmholtz Resonator ที่มีปริมาตรน้อยจะสามารถลดเสียงในย่านความถี่สูง ส่วน Helmholtz Resonator ที่มีปริมาตรมากจะสามารถลดเสียงในย่านความถี่ต่ำ

2. Connector length (l) ที่เชื่อมต่อระหว่างท่อนำเสียงกับ Helmholtz Resonator พบว่า Connector length สั้นๆจะให้ค่า Peak Frequency และค่า Transmission Loss สูงกว่า Connector length มีความยาวมาก ซึ่งช่วงความถี่ในการลดเสียงจะแคบลง ส่วน Connector length มีความยาวมากๆ ช่วงความถี่ในการลดเสียงจะกว้างมากขึ้น

3. จากผลการทดลองพบว่า Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะสามารถลดเสียงในย่านความถี่สูงกว่า Connector length มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการลดเสียงจะแตกต่างกันเล็กน้อย

4. จากผลการทดลองใช้ท่อนำเสียงแบบกลมเปรียบเทียบกับท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม พบว่าความสามารถในการลดเสียงสำหรับท่อนำเสียงแบบกลมจะให้ค่า Transmission Loss สอดคล้องกับทฤษฎี มากกว่าท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งเมื่อพิจารณาท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยมจะเกิดการกระจายของค่า Transmission Loss ในบางช่วงไม่เป็นระเบียบ

5. จากผลการทดลองเมื่อติดตั้ง Helmholtz Resonator เข้ากับผนังท่อนำเสียงแบบกลมเปรียบเทียบกับท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม พบว่าท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยมจะให้ Peak Frequency สูงกว่าท่อนำเสียงแบบกลม เนื่องจากท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยมมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าท่อนำเสียงแบบกลม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการลดเสียงจะแตกต่างกันเล็กน้อย

6. เมื่อมีความเร็วลมเพิ่มขึ้น Peak Frequency จะเลื่อนไปในย่านความถี่สูงขึ้น ซึ่งความสามารถในการลดเสียงจะน้อยลง เมื่อทำการทดลอง ณ. ความเร็วลมมากกว่า 40 m/s คลื่นจะเกิดการแกว่งมากไม่สามารถทำการวัดค่าสำหรับท่อनाเสียงที่ทำการวิจัยได้

7. จากการทดลองในการวัดค่า Resonance แต่ละ Peak ขณะทำวิจัยจะเกิดการแกว่งของคลื่นทำให้ในการวัดค่าบางช่วงเกิด Error ขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าของผลการทดลองบางช่วงมี Error



สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ พฤติกรรมการลดเสียงของอุปกรณ์ลดเสียงความถี่สูงแบบ Helmholtz ได้กล่าวถึงวิธีการลดเสียงรบกวน และลักษณะของอุปกรณ์ลดเสียง จากสมการพื้นฐานของคลื่น ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์สมการ Transmission loss เป็นทฤษฎีหาค่าความสามารถในการลดเสียง เปรียบเทียบกับผลการทดลองในย่านความถี่ต่างๆ กรณีมี และไม่มีความเร็วลมไหลผ่านในระบบท่อ

จากการวิจัย พฤติกรรมการลดเสียงของอุปกรณ์ลดเสียงความถี่สูงแบบ Helmholtz สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ค่าการคำนวณตามทฤษฎี Transmission loss ของอุปกรณ์ลดเสียงแบบ Helmholtz Resonator สามารถกำหนด Peak Frequency ที่เกิดขึ้นว่า Helmholtz Resonator แต่ละขนาดสามารถลดเสียงได้ในช่วงความถี่ใด

5.1.2 Helmholtz Resonator มีปริมาตรน้อยความสามารถในการลดเสียงในย่านความถี่สูง และ Helmholtz Resonator มีปริมาตรมากจะสามารถลดเสียงในย่านความถี่ต่ำ

5.1.3 Connector length มีความยาวมากช่วงความถี่ในการลดเสียงจะกว้างมากกว่า Connector length สั้น

5.1.4 เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการลดเสียงระหว่างท่อนำเสียงแบบกลมและท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งท่อนำเสียงแบบกลมสามารถลดเสียงได้สอดคล้องกับทฤษฎี

5.1.5 เมื่อมีความเร็วลมไหลผ่านในระบบท่อนำเสียง ความเร็วลมเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการลดเสียงจะเลื่อนไปในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งความสามารถในการลดเสียงจะลดลง

5.1.6 ผลการทดลองค่า Transmission loss ที่ได้จากการทดลองเป็นไปได้อย่างดีกับ Peak Frequency

5.1.7 จากเรื่องดังกล่าวข้างต้นความสามารถในการลดเสียงของ Resonator ชนิด Helmholtz จะสามารถลดเสียงรบกวนในช่วงความถี่ที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังสามารถคาดการณ์ Peak Frequency เป็นไปตามทฤษฎี

5.1.8 Helmholtz Resonator เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่สามารถนำมาลดเสียงในระบบท่อได้ดี และยังประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งรวมถึงประหยัดวัสดุในการออกแบบ

5.2 ข้อเสนอนณะ

จากการศึกษาพฤติกรรมการลดเสียง โดยใช้อุปกรณ์ลดเสียงแบบ Helmholtz Resonator เนื่องจากคลื่นเสียงมีความดัน และความเร็ว ดังนั้น Connector length มีความยาว (l) จะมีค่าความยาวเปลี่ยนไปเป็น (le) ส่งผลทำให้ย่านความถี่ในการลดเสียงต่ำลง จากผลการวิจัยพฤติกรรมลดเสียงสามารถทำการแก้ไขอุปกรณ์ลดเสียงแบบ Helmholtz Resonator โดยการเพิ่มคอมมิเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดของท่อ นำเสียงให้มีความยาวเท่ากับค่า Δl เชื่อมระหว่าง Connector length กับท่อ นำเสียง และทำการวิจัยวิธีการเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะส่งผลทำให้ Peak Frequency สูงขึ้น

5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์

- 5.3.1 ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ลดเสียงในระบบท่อไอเสีย ก่อนที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม
- 5.3.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมลดเสียงของ Helmholtz Resonator ว่าสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ใด เพื่อที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงความถี่ที่ต้องการได้
- 5.3.3 สามารถออกแบบอุปกรณ์ลดเสียง Resonator เพื่อพัฒนาประยุกต์ในการออกแบบรูปร่างของ Resonator หลากๆ รูปแบบในอนาคต
- 5.3.4 ในการลดเสียงรบกวนในระบบท่อต่างๆ เช่น ท่อระบายอากาศ,ท่อแอร์ ,ท่อส่งอากาศของ Intake Port เครื่องยนต์ เป็นต้น
- 5.3.5 เพื่อออกแบบรูปร่างของ Resonator ให้เหมาะสมกับสภาพของการลดเสียงนั้นๆ

5.4 แนวทางวิจัยในอนาคต

- 5.4.1 ออกแบบอุปกรณ์ลดเสียง Resonator ขณะมีความเร็วลมไหลผ่านในระตอที่มากขึ้น
- 5.4.2 ออกแบบท่อ นำเสียงที่สามารถปรับพื้นที่หน้าตัด และความยาวของท่อ นำเสียงได้ รวมทั้งสามารถปรับขนาดของอุปกรณ์ลดเสียง Resonator โดยใช้ Microcontroller
- 5.4.3 หาวิธีการลดเสียงรบกวนอื่น ๆ เช่น Material Absorption

บรรณานุกรม

- [1] Don D., Davis, Jr. George, L. Stevens, Jr. Dewey Moore and George M. Stokes. **Theoretical and measured attenuation of mufflers at room temperature without flow , with comments on engine - exhaust muffler design.** NACA Technical Note.2893 .1954. pp.1-111
- [2] Harold W. Lord, William S. Gattey and Harold A. Evenson **Noise Control for Engineers.** McGraw – Hill Book Company. 1980.
- [3] David A. Bies and Colin H. Hansen. **Engineering Noise Control.** E&FN Spon an Imprint of Chapman & Hall .1996.
- [4] M.O.Tokhi and R.R.Leitch. **Active Noise Control.** Published in the United States by Oxford University.1992.
- [5] Leo L. Beranek. **Noise Reduction.** McGraw – Hill Book Company.Co.,Inc.1960
- [6] 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) 1936
- [7] Czarnecki. K.R., and Davis, Don D.,Jr. **Dynamometer-Stand Investigation of the Muffler Uses in the Demonstration of Light-Airplane Noise Reduction** NACA TN1688,1948
- [8] R.I.Woods. **Noise Control in Mechanical Services.** Jointly Published by Sound Attenuators limited and / Sound Research laboratories limited ,1976
- [9] E & F.N. Spon **Noise Control in Industry** Sound Research Laboratories Ltd.,1991
- [10] วิฑูรย์ สิมะโชคดี ,ยี่งยง เตโชฬาร . **เทคนิคการควบคุม และลดเสียงดัง** กรุงเทพมหานคร หจก.สำนักพิมพ์ลิกส์เซ็นเตอร์ . 2537.
- [11] Shuntaro Murakami, Sanni Hagi and Minoru Maeda "Acoustical Performance of Conical Side – Branch Tubes" Proc. Nat.Acad.Sci.(1919-5) .pp.159 –164 1980
- [12] บุญชัย ศิลปกิจวงษ์กุล "สมรรถนะของเครื่องลดเสียงชนิด Helmholtz " วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.

ภาคผนวก ก

ส่วน A

การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ชนิด EXPANSION-CHAMBER

สมมุติฐานและวิธีการทั่วไปสมการที่ใช้หาค่า attenuation ของ mufflers ชนิด expansion-chamber นั้นมีการกำหนดดังนี้

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

ดังนั้น นิยามค่าของ ค่า attenuation สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$TL = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{ค่าเฉลี่ยการส่งผ่าน sound power}}{\text{ค่าเฉลี่ยการสะท้อนกลับ sound power}} \right] \quad (A1)$$

ตามเอกสารอ้างอิง 1, แทนค่า ความเร็วของการส่งผ่านและสะท้อนกลับของคลื่นตามแนวแกน x สามารถเขียนได้

$$\xi_i = Ae^{i(\omega t - kx)} \quad \xi_r = i\omega Ae^{i(\omega t - kx)} \quad (A2)$$

$$\xi_{re} = Be^{i(\omega t + kx)} \quad \xi_{re} = i\omega Be^{i(\omega t + kx)}$$

เมื่อ ทิศทาง x เป็นบวก คือ ทิศทางของคลื่นตกกระทบและค่าคงที่ A และ B มีค่าเป็น $\pm \rho c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x}$ เมื่อ ρ คือ ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของอากาศ ดังนั้นค่าความดันส่งผ่านและสะท้อนกลับ สามารถเขียนได้

$$P_i = i\omega \rho c A e^{i(\omega t - kx)} \quad (A3)$$

$$P_{re} = i\omega \rho c B e^{i(\omega t + kx)}$$

ค่าเฉลี่ยพลังเสียงในคลื่นส่งผ่านคือ

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

เมื่อมีการคำนวณค่าพลังงานจริง (actual power) จะพิจารณาในส่วนของค่า p_i และ

เอกสารอ้างอิง 1, หลังจาก Integration แล้วจะได้กำลังเฉลี่ยของเสียงดังนี้

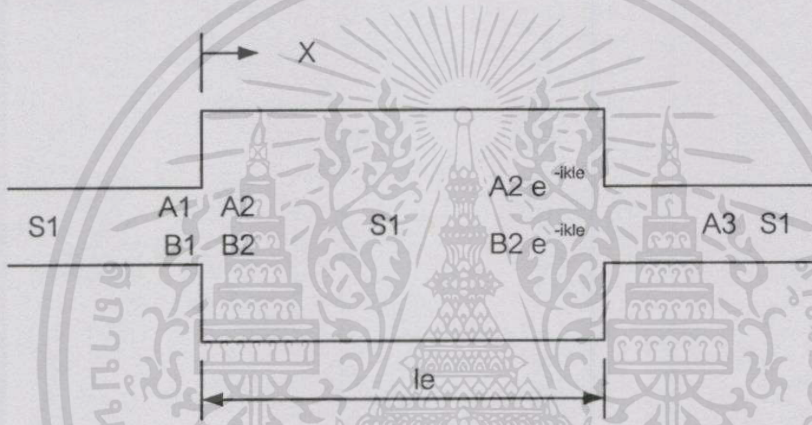
เอกสารอ้างอิง 1, หลังจาก Integration แล้วจะได้กำลังเฉลี่ยของเสียงดังนี้

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

ถ้าค่า attenuation สองค่าอยู่ระหว่างภาคตัดขวางที่มีพื้นที่เท่ากัน สามารถเขียนสูตรได้ดังนี้

$$\text{Attenuation} = 10 \log_{10} \left| \frac{A_1}{A_2} \right|^2 \tag{A4}$$

เมื่อกำหนดให้ไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นในจุดที่สอง Expansion chamber ชนิดเดียว แสดงใน ไดอะแกรม ดังนี้



รูปที่ ก. 1 แสดงไดอะแกรม Expansion chamber ชนิดเดียว

จุดเชื่อมต่อของแกน x สมการต่อเนื่องของความดัน และปริมาตรการไหลที่จุดต่อ 1 สามารถเขียนสมการช่วย ของสมการ (A2) และ (A3) ดังนี้

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \tag{A5}$$

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

หรือ

$$A_1 - B_1 = m(A_2 - B_2) \tag{A6}$$

จุดต่อที่ 2 อธิบายได้ดังนี้

$$A_2 e^{-ikl_e} + B_2 e^{-ikl_e} = A_3 \tag{A7}$$

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

ถ้าสมการ (A5),(A6),(A7) และ (A8) นำมาแก้สมการเขียนเป็นอัตราส่วน A1/A3 ได้ผลดังนี้

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

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

และค่า attenuation ด้ได้จากสมการ A4

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

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

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

จากจุด x จะพบว่า ค่าตกระทบและสะท้อนของคลื่นจะรวมกันซึ่งมีการวัดค่า attenuation สูงสุดดังนี้

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

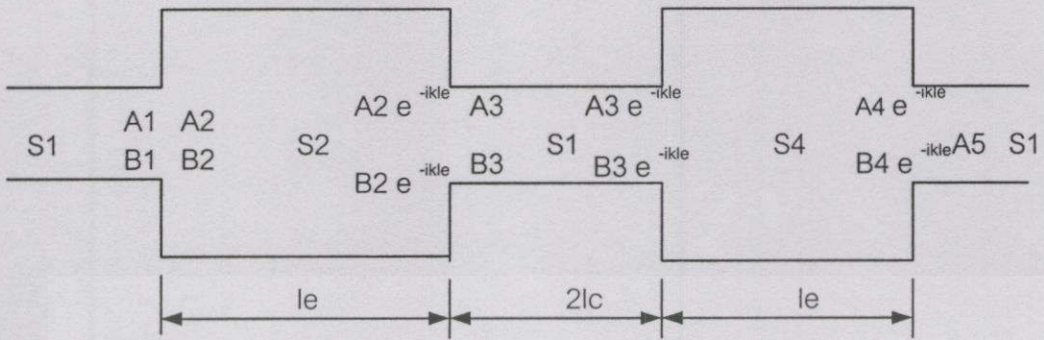
แทนค่า สมการ (A9) และ (A11) จะได้สมการ (A12)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปเพื่อการใดก็ตาม ซึ่งสิ่งนี้ยังมิใช่ข้อบ่งชี้ถึง ความถูกต้องหรือความน่าเชื่อถือของเอกสารหรือข้อมูลที่มีอยู่หรือไม่

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 จุดต่อ ดังนี้

จุดต่อ 1

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2$$

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

จุดต่อ 2

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

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

จุดต่อ 3

$$A_3 e^{-ik2l_c} + B_3 e^{ik2l_c} = A_4 + B_4$$

$$(A_3 e^{-ik2l_c} - B_3 e^{ik2l_c}) = m(A_4 - B_4)$$

จุดต่อ 4

$$A_4 e^{-ikl_e} + B_4 e^{ikl_e} = A_5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับใช้ภายใน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปเพื่อการใดก็ตาม สิ่งนี้เป็นการใช้ผิดเงื่อนไข และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแก้ปัญหาคสมการได้ดังนี้

$$\frac{A_1}{A_5} = \frac{1}{16m^2} \begin{pmatrix} 2 ik(l_e+l_c) & -2 ik(l_e+l_c) & 2 ik l_e \\ (m+1)^4 e^{-ik(l_e+l_c)} & -(m^2-1)^2 e^{-ik(l_e+l_c)} & -2(m^2-1)^2 e^{-ik l_e} \\ 2(m^2-1)^2 e^{-2 ik l_e} & -(m^2-1)^2 e^{-2 ik(l_e-l_c)} & +(m-1)^4 e^{-2 ik(l_e-l_c)} \end{pmatrix}$$

สมการนี้เมื่อเขียนตามเทอมของตรีโกณมิติได้

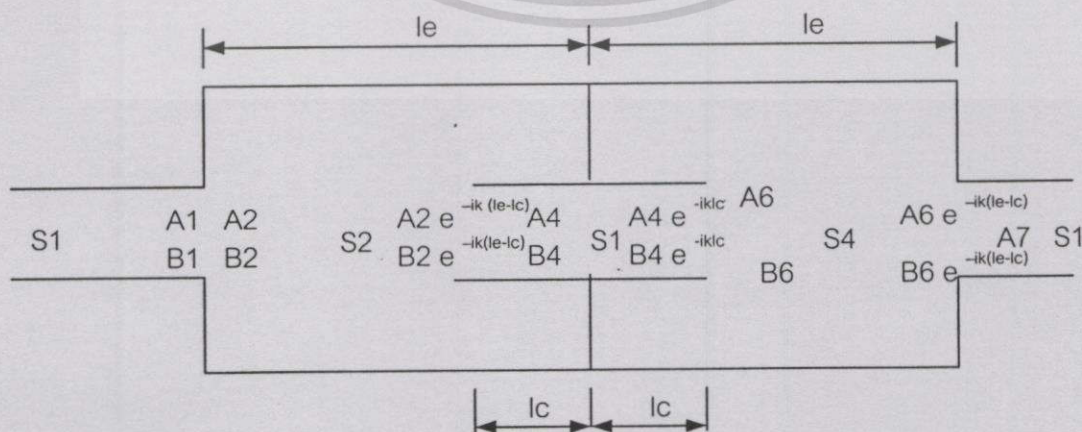
$$\frac{A_1}{A_5} = \frac{1}{16m^2} \left\{ \begin{aligned} & [4m(m+1)^2 \cos 2k(l_e+l_c) - 4m(m-1)^2 \cos 2k(l_e-l_c)] + \\ & i \left[\begin{aligned} & 2(m^2+1)(m+1)^2 \sin 2k(l_e+l_c) - \\ & 2(m^2+1)(m+1)^2 \sin 2k(l_e-l_c) - 4m(m^2-1)^2 \sin k l_e \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad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

ค่า attenuation คือ

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

เมื่อ R และ I ใช้เป็นค่า จริง และ จินตนาการ ตามลำดับ

Expansion chamber ชนิดคู่ที่ต่อ internal connecting tube แสดงดังไดอะแกรม ดังนี้



รูปที่ ก.3 แสดงไดอะแกรม Expansion chamber ชนิดคู่ที่ต่อ internal connecting tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปทางธุรกิจโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัด

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

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

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

จุดต่อ 3

$$A_4 e^{-2ik2l_c} + B_4 e^{2ik2l_c} = A_5 + B_5 = A_6 + B_6$$

$$A_4 e^{-2ik2l_c} - B_4 e^{2ik2l_c} + (m-1)(A_5 - B_5) = m(A_6 - B_6)$$

จุดต่อ 4

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

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

เพิ่มเติม, เพราะผลรวมของการสะท้อนจาก bulkhead ถูกแยกเป็นสอง chambers, ดังนี้

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

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

ผลของการแก้ปัญหาสมการ ได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ค่า attenuation คือ

$$\text{Attenuation} = 10 \log_{10} \left\{ R \begin{pmatrix} A_1 \\ - \\ A_7 \end{pmatrix} \right\}^2 + \left\{ I \begin{pmatrix} A_1 \\ - \\ A_7 \end{pmatrix} \right\}^2 \right\} \quad (\text{A17})$$

ความถี่ช่วง Cut-off

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

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

ได้ค่าเป็นที่น่าพอใจ สามารถดูได้จากตารางที่ ก.4



ตารางที่ ก.1 ค่าที่ได้จากการคำนวณการแก้ค่า ATTENUATION ที่ได้จากการวัด

เปอร์เซ็นต์การสะท้อนกลับ	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	∞	∞

ตารางที่ ก.2 เปรียบเทียบค่า C_0 ที่ได้จากการคำนวณกับค่า C_0 ที่มาจากรายการตัวเลข 12

ถึง 14

Muffler β	จำนวนของ connectors / chamber	จำนวน ของ chambers	l_c (นิ้ว)	2a (นิ้ว)	คำนวณ C_0 (ft)		รายการ C_c (ft)
					$\pi/4$	$\pi/2$	
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 ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้ลอกเลียนแบบหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์

ตารางที่ ก.3 เปรียบเทียบสองวิธีการคำนวณค่า ATTENUATION ของ SINGLE-RESONATOR MUFFLER กับ TAIL PIPE [ค่าคงที่ Muffler: $C_0 = 0.261$ ft; $V = 0.338$ ft³; $c = 2000$ fps; ความยาวของ Tail-pipe = 20 in]

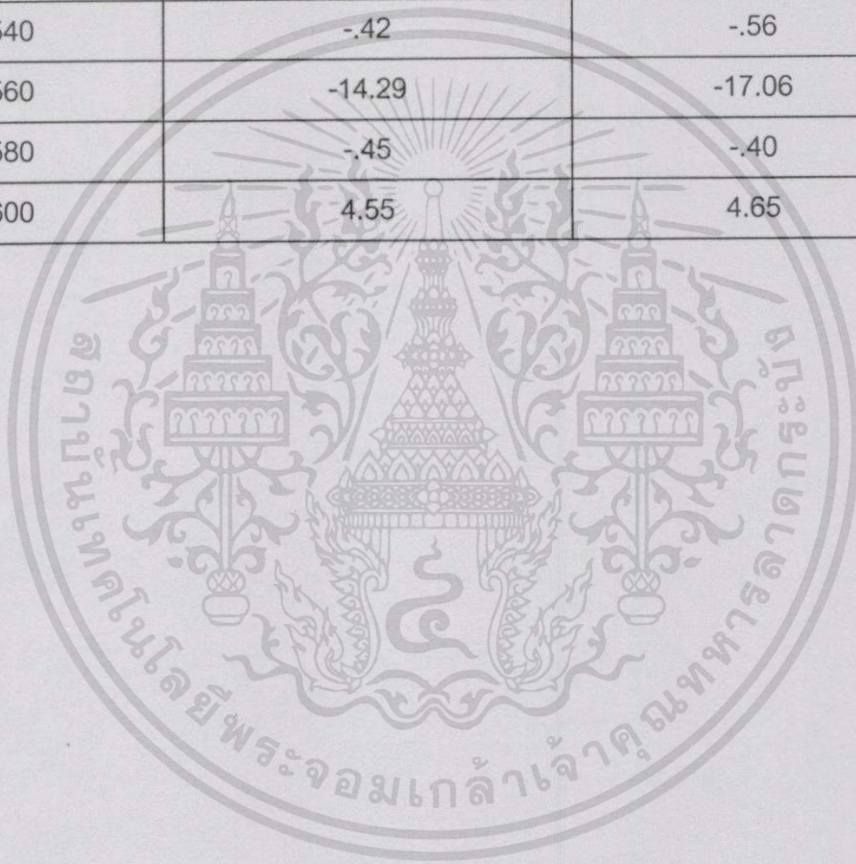
ความถี่, f (cps)	Attenuation (dB)	
	คำนวณโดยใช้ค่าที่แน่นอนของ tail-pipe impedance	คำนวณโดยใช้ค่าที่ประมาณของ tail-pipe impedance
20	-0.81	-0.81
40	-4.10	-4.10
60	-9.63	-9.65
80	-2.24	-2.24
100	5.09	5.10
120	9.86	9.87
140	13.67	13.67
160	17.09	17.10
180	20.28	20.29
200	23.37	20.37
220	27.08	27.09
240	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
460	16.00	16.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ดัดแปลงหรือแก้ไขเนื้อหา หรือใช้ข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

ความถี่, f (cps)	Attenuation (dB)	
	คำนวณโดยใช้ค่าที่แน่นอนของ tail-pipe impedance	คำนวณโดยใช้ค่าที่ประมาณ ของ tail-pipe impedance
480	13.37	13.39
500	10.32	10.34
520	6.34	6.33
540	-4.2	-5.6
560	-14.29	-17.06
580	-4.5	-4.0
600	4.55	4.65



ตารางที่ ก.4 ความถี่ CUT-OFF สำหรับ EXPANSION CHAMBERS แบบคู่ [c= 1140 fps]

Muffler	m	l_e (ft)	l_c (ft)	f_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

ส่วน B

การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ชนิด RESONATOR

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

- (4) คลื่นความดันแนวระนาบมีการเพิ่มขึ้นภายในท่อไอเสียและท่อนำเสียง
- (5) อิทธิพลของความหนืด โดยทั่วไปมีผลน้อยมากยกเว้นในท่อที่มีการต่อของ 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 คุณลักษณะ 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_i/P_{tr} , ดังนี้

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

เพราะฉะนั้น ค่า attenuation คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปทางธุรกิจอื่น สิ่งที่ยังคงมีใช้คือของมือเขา และต้องอ้างถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

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

โดยแทนค่า X_b ที่เป็นไปได้เข้าไปในสมการ (B9)

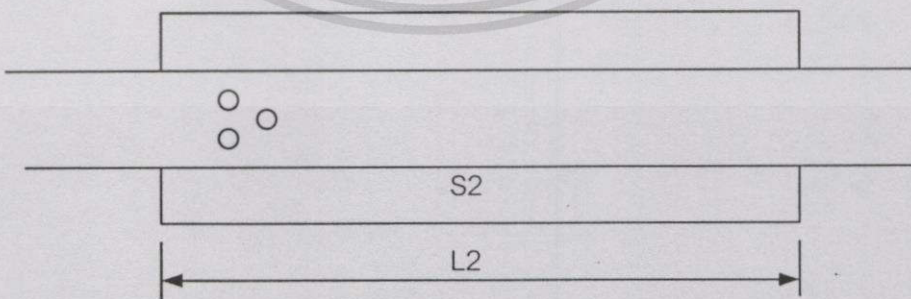
$$\text{Attenuation} = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\left(\frac{\sqrt{C_0 V}}{2S} \right)^2}{\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f}} \right) \tag{B10}$$

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

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

$$X_b = \frac{\rho c}{S_c} \left(\frac{\tan k l_c - \frac{S_c}{k V}}{\frac{S_c}{k V} \tan k l_c + 1} \right) \tag{B11}$$

ในกรณีที่ connector สั้น และ chamber ยาว ดังโครงสร้าง, จะประมาณค่าที่ใช้ ดังรูป



รูปที่ ก.5 แสดงไดอะแกรมกรณี connector สั้นและ chamber ยาว

ปัญหาอีกส่วนในการหาค่า branch impedance สำหรับ chamber แบบปิด (ไม่คิด

ค่าความหนืด) จะได้ค่า branch impedance ดังนี้

เอกส... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ค่า Attenuation ได้ดังนี้

$$10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{m}{\frac{kS_2}{c_0} - \cot kl_c} \right)^2 \right] \quad (B13)$$

Resonators แบบหลายตัว

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

$$\text{Attenuation} = 8.69 M \cosh^{-1} \left| \cos kl_1 + i \frac{Z_0}{2Z_b} \sin kl_1 \right| \quad (B14)$$

เมื่อ

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

โดยแทนค่า $\sqrt{\frac{c_0}{V}} = \frac{2\pi f_r}{c}$, ในสมการ เขียนได้ดังนี้

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

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


$$\text{Attenuation} = 8.69 M \cosh^{-1} \left[\cos \frac{f}{f_r} kl_1 \right] + \frac{\sqrt{c_0 V}}{2S} \frac{f}{f_r} \left[\sin \frac{f}{f_r} kl_1 \right] \quad (B15)$$

เมื่อกลับค่า hyperbolic cosine นำไปใช้ผลที่เป็นลบ . ค่าความถี่ของ attenuation / chamber แบบ multiple-resonator ได้ พังก์ชัน 3 ตัวแปรคือ : $\sqrt{c_0}V / 2S$: , $k_1 l_1$ และ $\sqrt{c_0} / V$ (เมื่อ f_r ขึ้นกับ $\sqrt{c_0} / V$) เส้นโค้งในรูปที่ 2-18 คำนวณได้จากสมการ (B15)

ในบรรณานุกรม1 ความถี่ cut-off ได้ดังนี้

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

ในเทอมของ resonant frequency ในสมการ (B16) สามารถเขียนเป็น

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


ส่วน C

การหาค่า ATTENUATION ของ MUFFLERS ใน
TAIL PIPES

Expansion chamber แบบเดี่ยว

เมื่อพิจารณาส่วนประกอบของ expansion chamber กับ expansion ratio m ที่ 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, ผลรวมของการสะท้อนกลับจากปลายของ 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

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

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

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

ความถี่ช่วง cut-off โดยประมาณ จะพบได้จากกำหนด สูตรเท่ากับศูนย์และ หาค่า k , โดยประมาณ ได้ดังนี้

$$\sin kl_e = kl_e$$

$$\sin 2kl_e = 2kl_e$$

$$\sin 2kl_e = 2kl_e$$

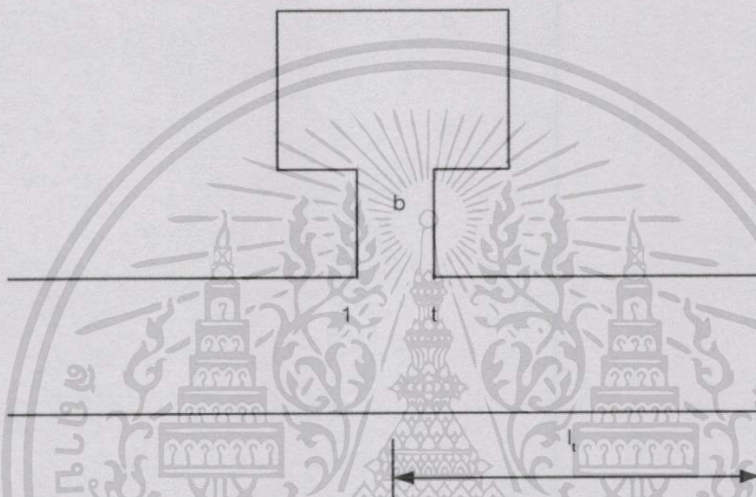
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับค $\cos kl_e$ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ผลลัพธ์คือ

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

Resonator แบบเดี่ยว

แสดงดังรูปของ single-resonator muffler กับ tail pipe ที่ยาวไม่จำกัด ได้ดังนี้



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

สมการ 1

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

จากความสัมพันธ์

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

เมื่อ Z_1 เป็น impedance ของ branch และ tail pipe ในแนวขนาน ดังนี้

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (C8)$$

สมการต่อเนื่องของความดันที่จุดต่อ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $A_1 + B_1$ ใช้งานเพื่อ $A_1 + B_1$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\frac{A_t}{A_i} = \frac{1 + \frac{B_t}{A_t}}{1 + \frac{B_i}{A_i}}$$

แทนค่าจาก สมการ(C7) และ (C8) ได้

$$\frac{A_t}{A_i} = \frac{Z_t}{Z_t} \frac{Z_t + Z_0}{Z_t + Z_0}$$

แทนค่า

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

ถ้า Substitution คือ

$$\frac{A_t}{A_i} = 1 + \frac{Z_0/Z_b}{Z_0/Z_t + 1}$$

ถ้าได้ค่า Z_0/Z_b และ Z_0/Z_t นำไปแทนในสมการนี้ จะได้ค่า attenuation ที่สามารถหาได้จากการคำนวณที่สมการ (A4) ยกตัวอย่าง, ค่าสมการหาค่า attenuation ซึ่งพัฒนาขึ้นกรณี ค่า Z_b เป็นค่า reactance เท่านั้น และผลรวมของการสะท้อนโดยกำหนด tail pipe เป็นแบบปลายเปิด ได้ดังนี้

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

และ

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

การแทนที่, สำหรับ single-branch resonator กับ tail pipe จะได้

$$Z_0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน = cot kl ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไปว่ากรณีใดกรณีอื่น...
 X_t

$$kl_t = k_l l_t \frac{f}{f_r}$$

และ

$$\frac{Z_0}{X_b} = \frac{\sqrt{c_0 V}}{S \begin{pmatrix} \frac{f}{f_r} & \frac{f_r}{f} \\ \frac{f_r}{f} & \frac{f}{f_r} \end{pmatrix}}$$

ผลลัพธ์ที่ได้

$$\text{Attenuation} = 10 \log_{10} \left[1 + \frac{\sqrt{c_0 V} \frac{f}{f_r} \sin 2kl_t}{S \begin{pmatrix} \frac{f}{f_r} & \frac{f_r}{f} \\ \frac{f_r}{f} & \frac{f}{f_r} \end{pmatrix}} + \frac{\sqrt{c_0 V} \frac{f}{f_r} \sin 2kl_t}{S^2 \begin{pmatrix} \frac{f}{f_r} & \frac{f_r}{f} \\ \frac{f_r}{f} & \frac{f}{f_r} \end{pmatrix}^2} \right] \quad (C10)$$

ความถี่ผ่านได้จากการกำหนดผลรวมของเทอมที่สองและตามจากสมการ (C10) เท่ากับศูนย์
ได้ผลดังนี้

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

ค่า attenuation ที่เป็นศูนย์ สำหรับค่า k ใดๆ มีผลเป็นที่น่าพอใจจากสมการนี้.
สำหรับความถี่ช่วง cut-off สมการนี้ก็สามารกำหนดค่าโดยประมาณได้

$$\tan kl_t = kl_t$$

ผลลัพธ์ที่ได้

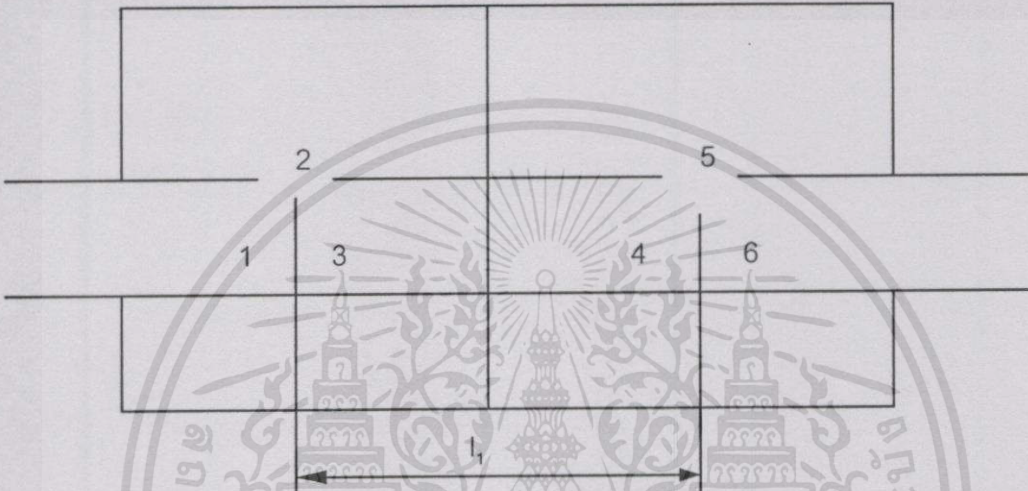
$$f_c = \frac{f_r}{1 + \frac{\sqrt{c_0 V}}{2S} k_l l_t} = \frac{f_r}{1 + \frac{c_0 l_t}{2S}} \quad (C12)$$

ส่วน D

การรวมกัน

Two resonators tuned at different frequencies

ดังไดอะแกรม ที่ประกอบเป็น muffler ซึ่งใช้ สอง resonators ที่ความถี่แตกต่างกัน
แสดงดังรูปข้างล่าง



รูปที่ ก.7 แสดงไดอะแกรมที่ใช้ Resonators 2 ชุด ที่ความถี่แตกต่างกัน

สมมติฐานเหมือนกับ single resonators ในภาคผนวก ก ส่วน C

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

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

ให้ $Z_6 = Z_0$ ดังนั้น

$$A_4 = A_3 e^{-ikl_1}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

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

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

ค่า attenuation ที่หาโดยการแทนค่าสมการ (D2),(D3) และ (D4) ในสมการ (D1) และใช้สูตร ดังนี้

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

ถ้าค่าของ branch impedances ไม่มีองค์ประกอบความต้านทาน จะได้ผลดังนี้

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

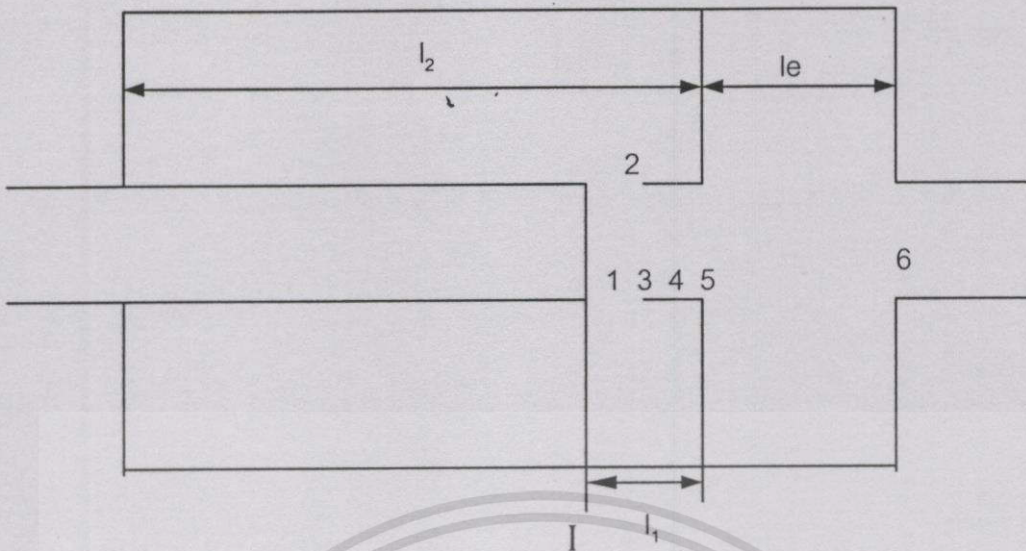
เมื่อ

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

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

The resonator และ expansion chamber

ตั้งในโดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของ muffler ร่วมกับ expansion chamber แสดงดังรูปด้านล่าง



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

$$A_2 - B_2 = \frac{\rho c}{S_2 l_2} (A_2 + B_2) = \frac{\rho c}{S_2 Z_2} (A_3 + B_3) \quad (D11)$$

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 $Z_2 = Z_0$, สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$A_1 = \left(1 + \frac{Z_c}{2Z_2}\right) A e^{kl_1} + \frac{Z_0}{2Z_2} B_4 e^{-ikl_1} \quad (D12)$$

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

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

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

ใช้สมการ (D12), (D13), และ (D14), ที่อัตราส่วนของ A_1/A_6 เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{Z_0}{2iX_b}\right) \left[\cos kl_e + i \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e \right] e^{kl_1} + \frac{Z_0}{2iX_b} \left[-i \frac{1}{2} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin kl_e \right] e^{-ikl_1} \\ &= \left\{ \left[1 - i \frac{Z_0}{2X_b}\right] \left[\cos kl_e + i \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e \right] - \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin kl_e e^{-2ikl_1} \right\} e^{kl_1} \\ &= \left\{ \begin{aligned} & \cos kl_e + \frac{Z_0}{4X_b} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e - \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \cos 2kl_1 \sin kl_e + \\ & i \left[\frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e - \frac{Z_0}{2X_b} \cos kl_e + \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin 2kl_1 \sin kl_e \right] \end{aligned} \right\} e^{kl_1} \quad (D15) \end{aligned}$$

ค่า attenuation จะได้

$$\text{Attenuation} = 10 \log_{10} \left| \frac{A_1}{A_6} \right|^2$$

$$= 10 \log_{10} \left(\left[\begin{array}{c} \cos kl_e + \frac{Z_0}{4X_b} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e - \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \cos 2kl_1 \sin kl_e \\ \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m}\right) \sin kl_e - \frac{Z_0}{2X_b} \cos kl_e + \frac{Z_0}{4X_b} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin 2kl_1 \sin kl_e \end{array} \right]^2 \right) \quad (D16)$$



ภาคผนวก ข

โปรแกรมสำหรับการทดลอง

Program DAVIS

สำหรับโปรแกรม DAVIS เป็นโปรแกรม เพื่อแก้ไขความผิดพลาดจากการสะท้อนกลับของคลื่นที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

```

REM -----
REM  DAVIS CURVE TRANSMISSION LOSS
REM  HELMHOLTZ RESONATOR
REM  MR PRAMOT RUANGRIT
REM  -----
REM  D = 30,d=10,l=20,H=20
CLEAR
INPUT "DATA NO.:"; DANO
FILE$ = "DATA." + RIGHT$("000" + MID$(STR$(DANO), 2), 3)
INPUT "DATA NO KAZU="; DK
V = 3.52E-06
D = 30
R = 10
H = 20
FR = 1924.46
TL = 13.09
DIM B(5, DK), X(53), Y(53)
GOSUB 50
FOR C = 1 TO DK
GOSUB 9
9 B(0, 1) = 1800: B(1, 1) = 113.69: B(2, 1) = 107.67
  B(0, 2) = 1820: B(1, 2) = 112.36: B(2, 2) = 110.62
  B(0, 3) = 1840: B(1, 3) = 111.22: B(2, 3) = 105.95
  B(0, 4) = 1860: B(1, 4) = 100.35: B(2, 4) = 95.49

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้นำออกนอกระบบ หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปิโตรเลียมแห่งชาติ

$B(0, 5) = 1880: B(1, 5) = 96.82: B(2, 5) = 85.76$

$B(0, 6) = 1900: B(1, 6) = 95.58: B(2, 6) = 81.28$

$B(0, 7) = 1920: B(1, 7) = 99.78: B(2, 7) = 87.17$

$B(0, 8) = 1924: B(1, 8) = 101.85: B(2, 8) = 85.91$

$B(0, 9) = 1940.4: B(1, 9) = 110.42: B(2, 9) = 80.48$

$B(0, 10) = 1960: B(1, 10) = 102.15: B(2, 10) = 82.43$

$B(0, 11) = 1980: B(1, 11) = 100.17: B(2, 11) = 84.49$

$B(0, 12) = 2000: B(1, 12) = 95.52: B(2, 12) = 86.57$

$B(0, 13) = 2020: B(1, 13) = 95.52: B(2, 13) = 88.75$

$B(0, 14) = 2040: B(1, 14) = 95.23: B(2, 14) = 89.51$

$B(0, 15) = 2060: B(1, 15) = 93.25: B(2, 15) = 90.56$

$B(0, 16) = 2080: B(1, 16) = 95.3: B(2, 16) = 93.42$

$B(0, 17) = 2100: B(1, 17) = 95.3: B(2, 17) = 94.62$

NEXT C

REM YN1

10 PRINT "DATA OK (Y/N)";: ANS\$ = INPUT\$(1)

IF ANS\$ = "N" THEN INPUT "NUMBER OF DATA =": C: GOSUB 32

IF ANS\$ = "Y" THEN 11

GOTO 11

REM HOSEI

11 FOR C = 1 TO DK

$B(3, C) = (B(1, C) - B(2, C))$

DD = INT(B(3, C)): IF DD > 53 THEN DD = 53

IF B(3, C) < 1 THEN DD = 0

$B(4, C) = X(DD) + (Y(DD) - X(DD) * (B(3, C) - \text{INT}(B(3, C))))$

$B(5, C) = B(3, C) - B(4, C)$

IF B(3, C) <= 0 THEN B(4, K) = 0: B(5, C) = -B(3, C) - B(4, C)

NEXT C

```
PRINT TAB(15); A220 - 10
```

```
11.1 PRINT TAB(15); USING "V=###.#####[m^3] "; V
```

```
11.2 PRINT TAB(15); "Dim.Resonator ="; D; "[mm]"
```

```
11.3 PRINT TAB(15); "Re-long ="; R; "[mm]"
```

```
11.4 PRINT TAB(15); "Hole ="; H; "[mm]"
```

```
11.5 PRINT TAB(15); "FREQUENCY ="; FR; "(Hz)"
```

```
11.6 PRINT TAB(15); "TRANSMISSION LOSS ="; TL; "(dB)"
```

```
FOR C = 1 TO DK
```

```
12 IF C = 1 THEN PRINT TAB(30); "GENSUI SOKUTEIEI"
```

```
13 IF C = 1 THEN LPRINT TAB(15); "-----"
```

```
14 IF C = 1 THEN PRINT TAB(15); "SYUHA HOSEIGO IN(dB) OUT(dB)
```

```
SONSITU HOSEI"
```

```
A$ = "#####.###"
```

```
15 PRINT TAB(15); B(0, C); USING A$; TAB(23); B(5, C); TAB(34); B(1, C); TAB(45); B  
(2, C); TAB(56); B(3, C); TAB(65); B(4, C)
```

```
16 IF C = DK THEN LPRINT TAB(15); "-----"
```

```
NEXT C
```

```
REM YN2
```

```
20 PRINT "DATA SAVE ?(Y/N)"; : ANS$ = INPUT$(1)
```

```
IF ANS$ = "Y" THEN 30
```

```
IF ANS$ = "N" THEN 31
```

```
GOTO 30
```

```
REM DATA.SAVE
```

```
30 OPEN FILE$ FOR OUTPUT AS #1
```

```
FOR I = 1 TO DK
```

```
PRINT #1, B(0, I), B(1, I), B(2, I)
```

```
NEXT I
```

```
CLOSE
```

```
31 END
```

```
REM DATA.TEISEI
```

```
32 PRINT "f(Hz)="; B(0, C); "IN(dB)="; B(1, C), "OUT(dB)="; B(2, C)
```

```
DATA.SET
```

```
40 PRINT "NO.": : PRINT USING "##"; C;
```

```
INPUT "f(Hz)="; B(0, C)
```

```
INPUT "          IN(dB)="; B(1, C)
```

```
INPUT "          OUT(dB)="; B(2, C)
```

```
RETURN
```

```
DATA.READ
```

```
50 RESTORE 100
```

```
FOR I = 0 TO 53
```

```
READ X(I), Y(I)
```

```
NEXT I
```

```
RETURN
```

```
90 REM SET DATA MEASURE
```

```
100 REM DD
```

```
DATA 0.00,0.42
```

```
DATA 0.42,0.92
```

```
DATA 1.40,1.75
```

```
DATA 1.75,2.15
```

```
DATA 2.15,2.55
```

```
DATA 2.55,2.82
```

```
DATA 2.82,3.10
```

```
DATA 3.10,3.38
```

```
DATA 3.38,3.67
```

```
DATA 3.67,4.05
```

```
DATA 4.05,4.25
```

```
DATA 4.25,4.45
```

```
DATA 4.45,4.62
```



DATA 4.62,4.75

DATA 4.75,4.90

DATA 4.90,5.05

DATA 5.05,5.15

DATA 5.15,5.25

DATA 5.25,5.30

DATA 5.30,5.40

DATA 5.40,5.45

DATA 5.45,5.55

DATA 5.55,5.56

DATA 5.56,5.61

DATA 5.61,5.67

DATA 5.67,5.70

DATA 5.70,5.73

DATA 5.73,5.77

DATA 5.77,5.80

DATA 5.80,5.82

DATA 5.82,5.85

DATA 5.85,5.87

DATA 5.87,5.89

DATA 5.89,5.91

DATA 5.91,5.92

DATA 5.92,5.94

DATA 5.94,5.94

DATA 5.94,5.96

DATA 5.96,5.97

DATA 5.97,5.98

DATA 5.98,5.99

DATA 5.99,5.99

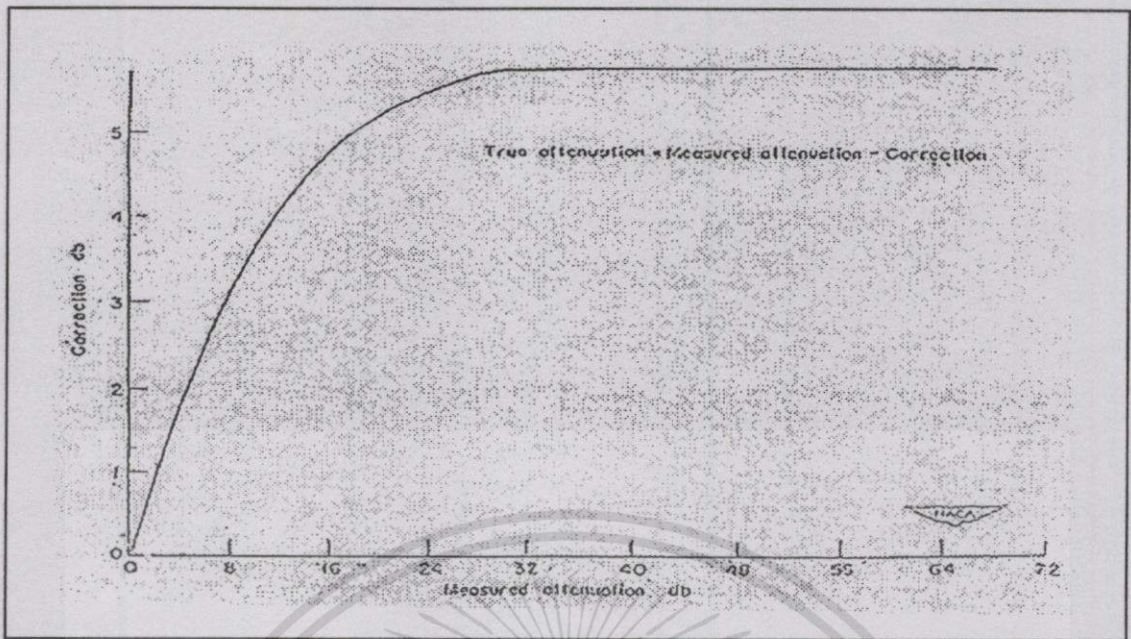
DATA 5.99,5.99

DATA 5.99,5.99



DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,5.99
 DATA 5.99,6.00

1. ป้อนข้อมูล Frequency (Hz) ช่วงที่ทำการทดลองจำนวน $n = 1,2,3,\dots,n$
2. ป้อนข้อมูลของ Peak ที่เกิดด้านหน้า Resonator ที่ได้จากการบันทึกผลการทดลอง โดยอ่านค่าจาก FFT Analyzer (dB)
3. ป้อนข้อมูลของ Peak ที่เกิดด้านหลังผ่าน Resonator ที่ได้จากการบันทึกผลการทดลอง โดยอ่านค่าจาก FFT Analyzer (dB)
4. หลังจากป้อนข้อมูลเสร็จแล้วทำการ Run ผลของข้อมูลจะแสดงดังรูปที่ ข.2
5. Program จะให้ป้อนจำนวนข้อมูล DATA NO. = ?
6. Program จะให้ป้อนจำนวนข้อมูลจริงที่เก็บผลจากการทดลอง DATA NO KAZU = ?
7. Program จะให้ยืนยันว่าข้อมูลถูกต้องหรือไม่ DATA NO.(Y/N)
8. Program จะแสดงผลของข้อมูล ซึ่ง SYUHA = Frequency (Hz) ,HOSEIGO = Transmission loss(TL),SONSITU = Different ของข้อมูลด้านหน้าและหลัง Resonator และ HOSEI = DAVIS Value คือค่าปรับแก้ที่ได้รูปที่ ข.1
8. Program จะให้ยืนยันการบันทึกผลของข้อมูล DATA SAVE (Y/N)



รูปที่ ข.1 ค่าแก้ไขความถูกต้องจากการวัดค่า attenuation

Finished - Microsoft QuickBASIC

Auto

DATA NO.? 17
 DATA NO KAZU=? 17
 DATA OK (Y/N) GENSUI SOKUTEITI

SYUHA	HOSEIGO	IN(dB)	OUT(dB)	SONSITU	HOSEI
1000	0.156	113.690	107.670	6.020	5.864
1100	0.711	112.360	110.620	1.740	1.029
1200	0.589	111.220	105.950	5.270	4.681
1300	2.009	100.350	95.490	4.860	2.851
1400	2.615	96.820	85.760	11.060	8.445
1600	6.075	95.580	81.280	14.300	8.225
1700	6.255	99.780	87.170	12.610	6.355
1800	10.596	101.850	85.910	15.940	5.344
1920	23.772	110.420	80.480	29.940	6.168
2000	12.836	102.150	82.430	19.720	6.884
2200	9.062	100.170	84.490	15.680	6.618
2300	5.111	95.520	86.570	8.950	3.839
2400	3.021	95.520	88.750	6.770	3.749
2500	2.186	95.230	89.510	5.720	3.534
2600	0.506	93.250	90.560	2.690	2.184
2800	0.910	95.300	93.420	1.880	0.970
2900	0.260	95.300	94.620	0.680	0.420

DATA SAVE?(Y/N)_

รูปที่ ข.2 แสดงผลการทดลองโดยการปรับแก้ข้อมูลความถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางผู้จัดทำเอกสารนี้

พฤติกรรมเสียงของอุปกรณ์ลดเสียงความถี่สูงแบบ Helmholtz Acoustical Characteristic of Helmholtz Resonator at High Frequency

อัครเดช สินธุภักดิ์, จำลอง ปราบแก้ว และ ปราโมทย์ เรืองฤทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร 10520

โทร (02)326-9987 ,โทรสาร (02)326-9053,E-Mail : Ruangrit.Pramot@kmitl.ac.th

Akradech Sindhuphak ,Chamlong Prabkeao and Pramot Ruangrit

Department of Mechanical Engineering , Faculty of Engineering ,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , Bangkok 10520 ,Thailand

Tel:(662)326-9987, Fax: (662)326-9053

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงพฤติกรรมของการลดเสียงโดยใช้ Helmholtz Resonator ที่สามารถปรับปริมาตรได้ ซึ่งนำมาติดตั้งเข้ากับผนังท่อกลม และท่อสี่เหลี่ยม เพื่อหาค่าการลดเสียงในช่วงความถี่ต่างๆกัน สมการ Transmission loss(TL) ได้มาจากทฤษฎีพื้นฐานมิติเดียว โดยคำนวณหาค่า Transmission loss เปรียบเทียบกับผลการทดลอง เมื่อมีและไม่มีความเร็วลมที่อุดหุุ่มิห้อง จากการทดลองพบว่าปริมาตรของ Helmholtz Resonator มีพฤติกรรมต่อเสียงที่ลดลงซึ่งปริมาตรน้อยจะทำให้ความสามารถการลดเสียงได้ในช่วงความถี่สูง ส่วนปริมาตรมากสามารถลดเสียงได้น้อยลง แต่ช่วงความถี่ในการลดเสียงกว้างขึ้น

Abstract

This paper indicates the acoustic characteristic of noise reduction. The Helmholtz Resonator can be adjust volume and located on the wall of circle duct and square duct which are used for attenuation the noise of particular frequency regions. The transmission loss(TL) equation derived from one- dimensional theory. The calculated of transmission loss characteristic

experiment with and without velocity flow at room temperature. The result of experiment found that volume of Helmholtz Resonator has the acoustic characteristic of noise reduction. Less volume can reduce noise at high frequency and high volume makes more band width at frequency of noise reduction.

1.บทนำ

เสียงรบกวน หมายถึงเสียงที่เราไม่ต้องการได้ยินนั่นเอง จะมีโทษมากกว่าผลดี และทำให้มนุษย์เกิดความรำคาญ,ความดันโลหิตสูง,เกิดความเหนื่อยล้า มีผลทำให้หัวใจผิดปกติ และประสิทธิภาพในการทำงานลดลง เสียงจะเคลื่อนที่ใน ลักษณะรูปคลื่นซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั้งในอากาศ,ของแข็ง และของเหลว เป็นเสียงที่เกิดขึ้นซ้ำๆ กัน จะส่งผ่านระบบท่อ คลื่นเสียงจะถูกขนส่งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และผ่านออกไปยังปลายท่อ ในบทความนี้ใช้ Helmholtz Resonator เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งเข้ากับผนังของท่อ เพื่อจำกัดเสียงให้ลดน้อยลงก่อนที่จะเสียงจะผ่านไปยังปลายท่อ จากการศึกษาค้นคว้าวิจัยการลดเสียงนี้สามารถ เลือก Helmholtz Resonator ไปใช้ในช่วงความถี่ที่ต้องการได้

2. ทฤษฎีการคำนวณ

ในการพิจารณาทางทฤษฎี อ้างถึง One - dimensional sound waves ส่งผ่านท่อ Ducts ไม่มีการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัด (Cross - Sectional Area) และ Resonator ซึ่งเงื่อนไขในการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงมีอยู่สองเงื่อนไข คือ ประการแรก เงื่อนไขของความดัน และประการสองเงื่อนไขของความเร็วกับการพิจารณาเกี่ยวกับการป้องกันเสียงสะท้อน

$$Z_o = \frac{\text{Pressure}}{\text{Volume Velocity}} = \frac{P}{U}$$

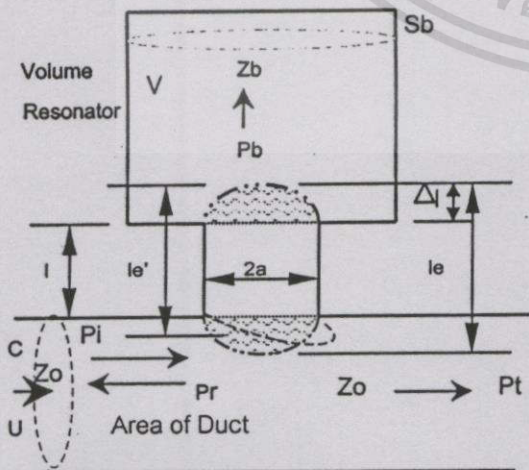
$$= \frac{p}{S \cdot u} = \frac{z}{S} \quad (1)$$

เนื่องจากต้องขึ้นกับ Cross - Sectional Area ดังนั้น Total Acoustic power ที่ประกอบอยู่ใน Plane Wave จะเป็น

$$W = I \times S = (p^2 / \rho c) \times S = p^2 / Z_o \quad (2)$$

2.1 Helmholtz Resonator

Helmholtz Resonator เป็นเรื่องที่หน้าสนใจ จะประกอบด้วย Volume โดยเชื่อมต่อระหว่างท่อกลมเล็กๆ เข้ากับท่อ ที่ความยาว l เมื่อมีความดันเสียงและความเร็วลมจะทำให้ Connector length เปลี่ยนไป



รูปที่ 1 Schematic diagram of Helmholtz Resonator ดังนั้นสมการ Transmission loss without flow จะได้

$$TL = 10 \log \left[1 + \left(\frac{Z_o^2}{4Xb^2} \right) \right] \quad (3)$$

และสมการ Transmission loss with flow หาได้จาก

$$TL = 10 \log \left| \frac{\left\{ M(1+M)^2 + \left(\frac{Xb}{Z_o} \right)^2 \right\} - \frac{(1-M)^4}{4} \left(\frac{Xb}{Z_o} \right)^2}{\left\{ 4M^2 + \left(\frac{Xb}{Z_o} \right)^2 \right\}^2} \right| \quad (4)$$

เมื่อ M คือ Mach number

เมื่อ

$$\frac{Xb}{Z_o} = S_o \left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right) \sqrt{\frac{l_e}{S \cdot V}} \quad (5)$$

และความถี่ resonance จะได้

$$f_r = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot l_e}} \quad (6)$$

และ $l_e = l + \beta d$

เมื่อ Z_o คือ Characteristic Impedance

β คือ coefficient ของ Connector length

C คือ Sound velocity

S คือ Cross - Sectional Area ของ Connector

S_o คือ Cross - Sectional Area ของ Ducts

V คือ Volume ของ Resonator

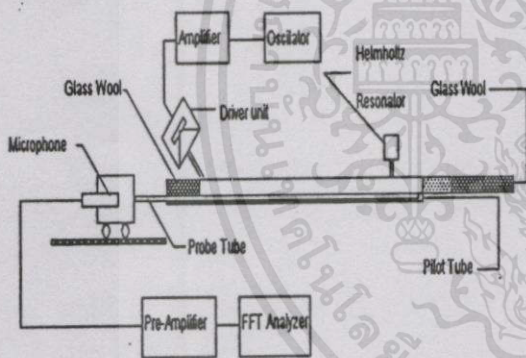
l_e คือ effective length ของ Connector



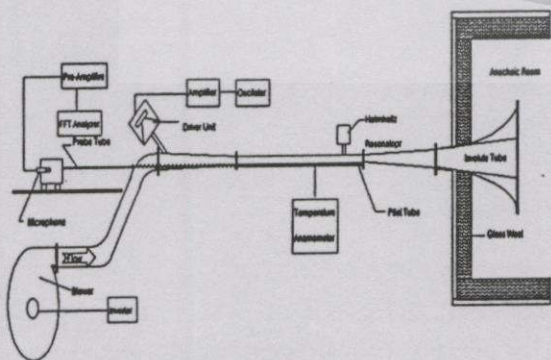
รูปที่ 2 Attenuation values for Helmholtz Resonator

Transmission loss ที่คาดการณ์เอาไว้จะขึ้นไปถึงค่าอนันต์ (rises to infinity) ณ ความถี่ Resonant $f / fr = 1$ ถ้า effective length ของความยาว l ไม่สั้นเพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นเสียง

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3 อุปกรณ์ทดลองสำหรับ without flow



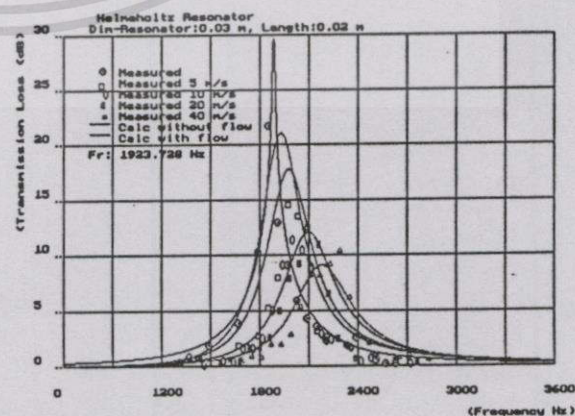
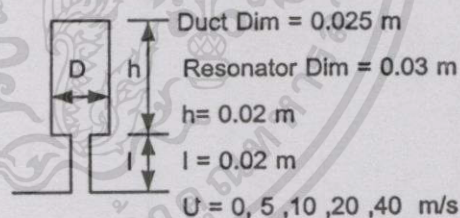
รูปที่ 4 อุปกรณ์ทดลองสำหรับ With flow

4. วิธีการทดลอง

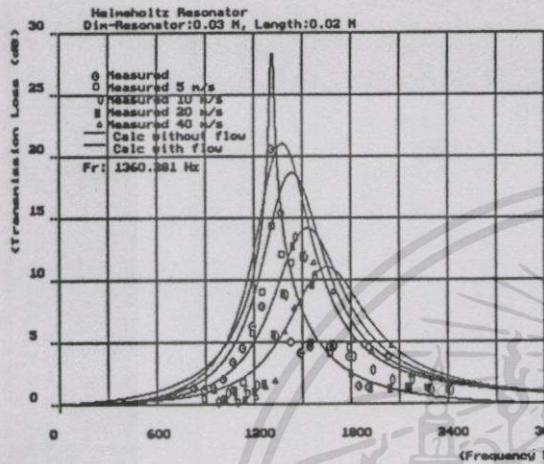
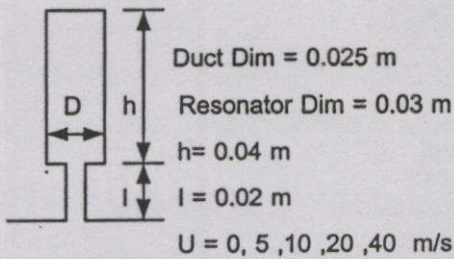
จากรูปที่ 3 และ 4 เมื่อสัญญาณเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง Oscillator ผ่าน Amplifier ขยายสัญญาณเสียง และผ่าน Driver Unit ส่งคลื่นเสียงเข้าไปในระบบท่อ ซึ่งจะมีเสียงเกิดขึ้นที่ความถี่นั้นในระบบท่อ จากนั้นใช้ Microphone วัดสัญญาณเสียงผ่าน Probe tube โดยวัดค่าก่อนตำแหน่งหน้า Resonator และตำแหน่งหลัง Resonator โดยอ่านค่าจาก FFT Analyzer ซึ่งจะแปลงสัญญาณความดันเสียง บันทึกผลการทดลองเป็นหน่วยเดซิเบล (dB) และทำการเปลี่ยนค่าความถี่ที่ Oscillator หลายๆ ความถี่ และนำข้อมูลที่ได้อ่านปรับแก้โดยใช้ทฤษฎีของ Davis curve เมื่อได้ค่าที่ถูกต้องแล้วจึงนำข้อมูล TL มา Plot กราฟเปรียบเทียบกับทฤษฎี Transmission loss (TL)

5. ผลการทดลอง

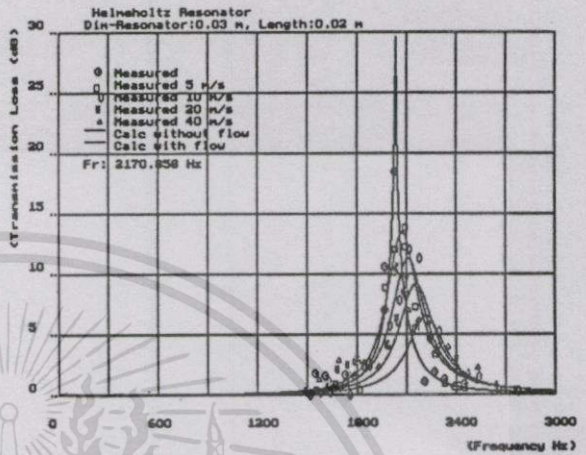
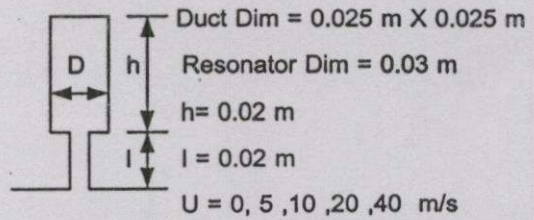
รูปที่ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 แสดงผลการทดลองพฤติกรรมเสียงของอุปกรณ์ลดเสียง Helmholtz Resonator โดยใช้ท่อนำเสียงแบบกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 m และท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม 0.025 m x 0.025 m โดยใช้ Resonator เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 m ซึ่งจะ Vary ความถี่ 400 ~ 3000 Hz



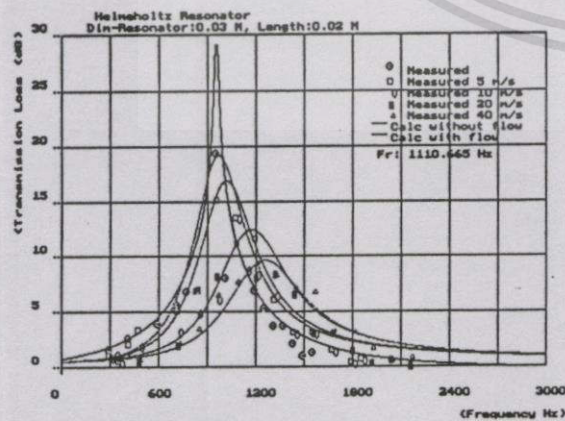
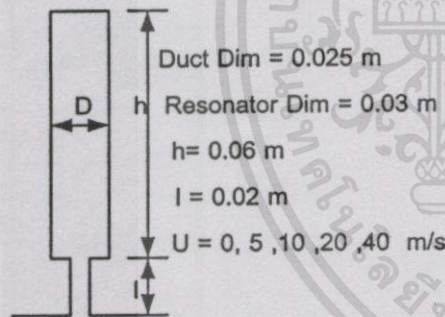
รูปที่ 5 แสดงพฤติกรรมผลการลดเสียง without flow และ with flow สามารถลดเสียงความถี่ 1923.729 Hz



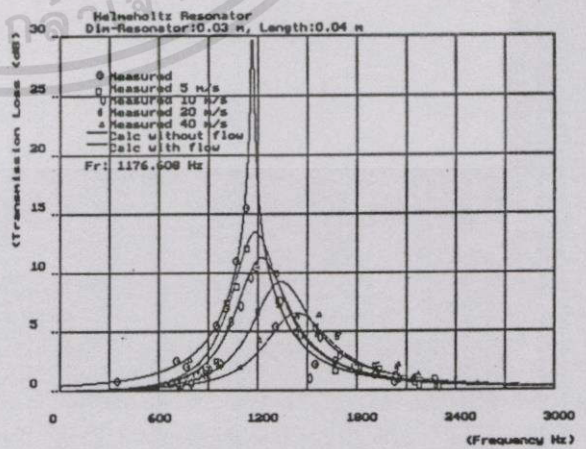
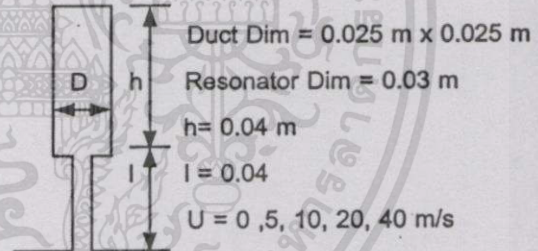
รูปที่ 6 แสดงพฤติกรรมผลการลดเสียง Without flow และ with flow สามารถลดเสียงความถี่ 1360.28 Hz



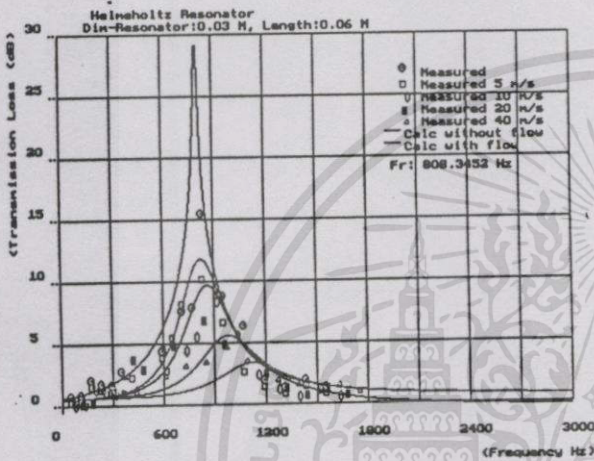
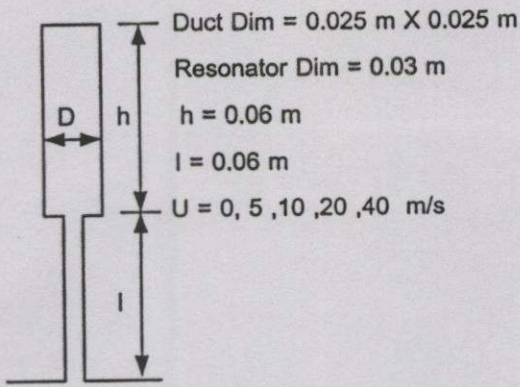
รูปที่ 8 แสดงพฤติกรรมผลการลดเสียง without flow และ with flow สามารถลดเสียงความถี่ 2170.858 Hz



รูปที่ 7 แสดงพฤติกรรมผลการลดเสียง without flow และ with flow สามารถลดเสียงความถี่ 1110.665 Hz



รูปที่ 9 แสดงพฤติกรรมผลการลดเสียง Without flow และ with flow สามารถลดเสียงความถี่ 1176.608 Hz



รูปที่ 10 แสดงพฤติกรรมของการลดเสียง without flow และ with flow สามารถลดเสียงความถี่ 808.345 Hz

จากรูปที่ 5,6,7 แสดงการลดเสียงโดยใช้ท่อนำเสียงแบบกลม และ รูปที่ 8,9,10 แสดงการลดเสียงโดยใช้ท่อแบบสี่เหลี่ยม ใช้ Helmholtz Resonator เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 m จากผลการทดลองซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี Transmission loss เมื่อ Volume ของ Helmholtz Resonator น้อยจะสามารถลดเสียงได้ในช่วงความถี่สูง ส่วน Volume ของ Helmholtz Resonator มากจะลดเสียงในช่วงความถี่ได้กว้างขึ้น เมื่อมีความเร็วลมมากๆ การลดเสียงจะน้อยลงสำหรับท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม Volume และ Connector length ของ Resonator น้อยจะทำให้การลดเสียงในช่วงความถี่ที่แคบกว่าท่อนำเสียงแบบกลม

6. สรุปผลและวิจารณ์

จากการวิจัยพฤติกรรมของการลดเสียงโดยใช้อุปกรณ์ลดเสียงแบบ Helmholtz Resonator สามารถสรุปผลการ

ทดลองได้ดังนี้

6.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการลดเสียงของ Helmholtz Resonator ว่าสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ต่างๆ กันได้ จากผลการทดลองลดเสียงเป็นไปตามทฤษฎี Transmission loss (TL)

6.2 Volume ของ Helmholtz Resonator น้อยๆ จะสามารถลดเสียงได้ในช่วงความถี่สูง และ Volume ของ Helmholtz Resonator มากจะสามารถลดเสียงในช่วงความถี่ได้กว้างขึ้น

6.3 Connector length ยาวจะสามารถลดเสียงได้ช่วง band width ความถี่มากกว่า Connector length สั้น

6.4 ท่อนำเสียงแบบกลมสามารถลดเสียงได้ดีกว่าท่อนำเสียงแบบสี่เหลี่ยม

6.5 เมื่อมีความเร็วลมมากๆ จะทำให้การลดเสียงน้อยลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Don D. Davis, Jr., George L. Stevens, Jr., Dewey Moore and George M. Stokes, "Theoretical and measured attenuation of mufflers at room temperature without flow, with comments on engine-exhaust muffler design", NACA Technical Note, 2893, 1954, pp.1-111
- [2] Harold W. Lord, William S. Gattey, Harold A. Evenson "Noise Control for Engineers" McGraw - Hill Book Company, 1980
- [3] David A. Bies and Colin H. Hansen "Engineering Noise Control" E&FN Spon an Imprint of Chapman & Hall, 1996
- [4] M.O. Tokhi, R.R. Leitch "Active Noise Control" Published in the United States by Oxford University, 1992
- [5] Leo L. Beranek "Noise Reduction" McGraw - Hill Book Company, Co., Inc, 1960
- [6] บุญชัย ศิลปกิจวงษ์กุล "สมรรถนะของเครื่องลดเสียงชนิด Helmholtz" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

