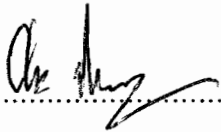


การใช้อะคูสติกอิมิชันสำหรับทดสอบการรั่วของท่อ

นายวัชรพันธ์ แสงห้าว วศ.บ. (เครื่องกล)

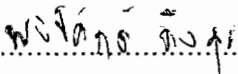
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่อง
กล วิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์



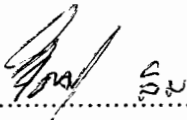
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

กรรมการ



(ดร.ปิณรุฑ์ ศรีโยธา)

กรรมการ



(ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้อะคูสติกอิมิชชันสำหรับทดสอบการรั่วของท่อ
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายวัชรพันธ์ แสงห้าว
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่อง
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เสนอวิธีการในการวัดอัตรารั่วที่เกิดจากการรั่วภายในท่อในระบบส่งก๊าซ ด้วยการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน โดยท่อที่นำมาใช้เป็นท่อเหล็กไร้ตะเข็บ Schedule 40 จำนวน 3 ขนาดคือ 1, 2 และ 3 นิ้ว ตามลำดับและความดันขาเข้าของท่อที่ใช้ทดสอบอยู่ระหว่าง 0 ถึง 80 Psi โดยอาศัยหลักการความดันแตกต่างที่เข้าไปในภาชนะปิดซึ่งทำหน้าที่วัดอัตรารั่วของท่อเพื่อเทียบกับวิธีอะคูสติกอิมิชชัน จากการศึกษาทางทฤษฎีพบว่าแหล่งกำเนิดเชิงกลของสัญญาณอะคูสติกที่เกิดจากการรั่วของท่อมีสาเหตุมาจากการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลตรงบริเวณรอยรั่ว จากการวิจัยพบว่าวิธีอะคูสติกอิมิชชันมีความไวในการตรวจจับสัญญาณการรั่วได้ดี ซึ่งเป็นสัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่องและเมื่อพิจารณาสัญญาณในรูปของอะคูสติกพารามิเตอร์คือ ระดับสัญญาณเฉลี่ย (Average Signal Level: ASL) พบว่าอะคูสติกพารามิเตอร์มีความสัมพันธ์เป็นอย่างสูงกับอัตรารั่วของท่อ ขนาดของท่อ และความดันในระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวออกมาในรูปของสมการสำหรับทำนายอัตรารั่ว ผลการเปรียบเทียบอัตรารั่วของท่อ ที่ได้จากการวัดในภาชนะปิดกับอัตรารั่วที่คำนวณได้จากสมการทำนายอัตรารั่ว ได้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.14 – 63.06 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้วิธีอะคูสติกอิมิชชันยังสามารถหาตำแหน่งการรั่วได้โดยการทดลองใช้หลักการสหสัมพันธ์สวนทาง(Cross Correlation) คือการตรวจจับคลื่นเสียงที่เกิดจากรอยรั่วที่เคลื่อนที่ไปยังหัวตรวจจับสัญญาณแล้วคำนวณผลต่างของเวลาเพื่อหาตำแหน่ง ผลการตรวจวัดให้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 1.15- 47.8 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : อะคูสติกอิมิชชัน / อัตรารั่ว / ท่อ / การทดสอบแบบไม่ทำลาย/ ตำแหน่ง

Thesis Title	Acoustic Emission for Leak Detection on Pipeline
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Watcharapan Sanghaw
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Asa Prateepasen
Program	Master of Engineering
Field of Study	Welding Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2006

Abstract

This thesis presents a method to measure leakage rate of gas through pipeline using Acoustic Emission (AE) techniques. Various sizes of steel pipe schedule 40 , ranging from one to three inches, were used and tested with pipe-inlet pressure of range from 0 to 80 psi. Leakage rates through artificial leak source was measured by calculating the pressure difference within the chamber and compared to AE technique. We found that the source mechanism generating AE signal in a leaking pipe was the decay of turbulence from fluid flow at the leaking area. In our experiment, we found that AE technique had high sensitivity to detect leakage signal. Typically, these signals were continuous AE signal and were converted to a set of AE parameters. The most signal used AE parameters which is the Average Signal Level (ASL) was employed in this work. The AE parameter exhibited high correlation with the leakage rates, pipe sizes and inlet pressures. Minitab program was used to analyze the correlation and to form an equation in order to predict the leakage rate. Our experiments showed that the error of the leakage rates from the equations was compared with the leakage rates from the chamber was in variation of 5.14 - 63.06 %. Beside, AE can find leakage location by using Cross Correlation technique which detects sound wave caused by leakage moving towards the sensor head, then calculate the difference approach time to find the location. The detection resulted in error variation of 1.15 – 47.8 %.

Keywords : Acoustic Emission / AE / Leakage Rate / Pipe / NDT/ Cross Correlation / Location

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณ รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คณะกรรมการสอบทุกท่าน คณะอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักวิจัย หน่วยงานอะคูสติกอิมิชันและการทดสอบโดยไม่ทำลายขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และผู้เกี่ยวข้องที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้ สำหรับคำแนะนำข้อเสนอแนะและแนวทางในการแก้ไขปัญหามาทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้องและคนใกล้ชิด สำหรับกำลังใจ และการสนับสนุนทางด้านการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ สำหรับคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฅ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฉ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับท่อ	6
2.2 ความเสียหายและการรั่วไหลของท่อ	8
2.3 หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง	9
2.4 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์	13
2.5 การหาตำแหน่งการรั่วของท่อ	31
3. การดำเนินการวิจัย	37
3.1 ขั้นตอนการเลือกปัจจัยในการออกแบบการทดลองและการเลือกวิธีวัดอัตราการรั่ว	37
3.2 ขั้นตอนการทดลองตรวจวัดสัญญาณรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์	48
3.3 ออกแบบการเก็บผลการทดลองเพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลในโปรแกรม Minitab	52
3.4 ขั้นตอนการทดลองหาตำแหน่งการเกิดการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์	57

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย	59
4.1 ผลการทดลองตรวจจับสัญญาณรบกวนของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์	59
4.2 ผลการออกแบบการเก็บผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab	74
4.3 ผลการทดลองหาตำแหน่งการเกิดการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์	104
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	111
5.1 สรุปผลการวิจัย	111
5.2 ข้อเสนอแนะ	112
เอกสารอ้างอิง	114
ภาคผนวก	116
ก การสอบเทียบหัวรับสัญญาณ	116
ข การใช้โปรแกรม Minitab	118
ค เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีอะคูสติกอิมพัลส์วัดการรั่ว	122
ประวัติผู้วิจัย	124

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณในหน่วย มิลลิโวลต์กับหน่วยเดซิเบล	20
2.2 แสดงความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง	21
2.3 หน่วยเดซิเบล กับ อัตราส่วนของแอมพลิจูดของสัญญาณ	26
4.1 ระดับสัญญาณที่วัดได้จากการหักใส่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิวSensor guide และ ตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD	60
4.2 ระดับสัญญาณที่วัดได้จากการหักใส่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิวSensor guide และตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15	61
4.3 ผลการตรวจวัดสัญญาณจากการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ 4 ตำแหน่ง	67
4.4 ตารางการเก็บข้อมูลอัตราการรั่วที่สัมพันธ์กับความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง	73
4.5 ผลการตรวจวัดสัญญาณรบกวนเบื้องต้นของระบบในรูปของอะคูสติกพารามิเตอร์	74
4.6 สัญญาณรบกวนของระบบในรูปของอะคูสติกพารามิเตอร์	76
4.7 ตารางการเก็บข้อมูลเพื่อหาสิ่งตัวอย่างของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับความดันในระบบ ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง	77
4.8 อัตราการรั่วของท่อทั้ง 3 ขนาดเทียบกับความดันและขนาดรูรั่วต่างๆ	92
4.9 ตารางการเก็บข้อมูลเพื่อหาสิ่งตัวอย่างของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว	94
4.10 ความผิดพลาดของสมการทำนายอัตราการรั่วของท่อเมื่อใช้อะคูสติกพารามิเตอร์ ASL	103
4.11 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนจากการหาดำเนินด้วยวิธี AE	110
ค.1 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีอะคูสติกอิมพัลส์วัดการรั่ว	123

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 แสดงปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ	9
2.2 แสดงประเภทของคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว	14
2.3 การตรวจจับคลื่นอะคูสติก	16
2.4 สัญญาณอะคูสติกแบบไม่ต่อเนื่อง	17
2.5 สัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่อง	17
2.6 คลื่นตามยาว	18
2.7 คลื่นตามขวาง	19
2.8 คลื่นที่ผิว	19
2.9 ระบบการตรวจสอบด้วยสัญญาณอะคูสติก	22
2.10 โครงสร้างของหัวรับสัญญาณเพียโซอิเล็กทริก	23
2.11 ชนิดของหัวรับสัญญาณอะคูสติก	24
2.12 อุปกรณ์ขยายสัญญาณปฐมภูมิ	26
2.13 เครื่อง LOCAN 320	27
2.14 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม	28
2.15 ลักษณะของรูปคลื่นและอะคูสติกพารามิเตอร์ที่สำคัญ	29
2.16 (a) sinusoidal function A(t) (b) sinusoidal function B(t) with $-\pi/6$ delay (c) ฟังก์ชันสหสัมพันธ์สวนทางของ A(t) และ B(t)	33
2.17 แสดงตัวอย่างฟังก์ชันสหสัมพันธ์สวนทางของสองฟังก์ชัน	34
2.18 การตรวจสอบหาตำแหน่งรอยร้าวในเส้นท่อ	34
2.19 ตัวอย่างสัญญาณของหัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 (ฟังก์ชัน A(t)) และหัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 (ฟังก์ชัน B(t))	35
2.20 การพรีทฟังก์ชันสหสัมพันธ์สวนทาง	36
3.1 ท่อทั้ง 3 ขนาดที่ใช้ในงานวิจัย	39
3.2 เครื่องอัดอากาศที่ใช้ในงานวิจัย	39
3.3 เรกูเลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	40
3.4 รูรั้วจำลอง ที่ใช้ในงานวิจัย 4 ขนาดที่ใช้แต่ละขนาดท่อ	41
3.5 เกจวัดความดัน ที่ใช้ในงานวิจัย	41
3.6 แท่นรองหัวตรวจสอบ ที่ใช้ในงานวิจัย	42

3.7 ชุดอุปกรณ์ระบบท่อความดัน ที่ใช้ในงานวิจัย	42
3.8 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.9 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)	44
3.10 แผนภาพการออกแบบติดตั้ง Flow Meter เข้ากับระบบเพื่อวัดอัตราการรั่วของท่อ	45
3.11 แผนภาพการออกแบบติดตั้ง Chamber สูญญากาศเข้ากับระบบเพื่อวัดอัตราการรั่วของท่อ	46
3.12 แผนภาพการออกแบบติดตั้ง Chamber วัดความดันแตกต่างเพื่อวัดอัตราการรั่วของท่อ	47
3.13 Chamber วัดอัตราการรั่วของท่อทั้ง 3 ขนาดที่ใช้ในงานวิจัย	47
4.1 เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากการหักไล่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิว Sensor guide และตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD	60
4.2 เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากการหักไล่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิว Sensor guide และตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15	61
4.3 สัญญาณรบกวนของระบบที่ได้จากหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองชนิดในโดเมนเวลา	63
4.4 สัญญาณรบกวนของระบบที่ได้จากหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองชนิดในโดเมนความถี่ กรณีไม่มีและมีความดันในท่อ	64
4.5 ลักษณะของสัญญาณการรั่วในโดเมนความถี่ที่ความดันต่างๆจากหัวตรวจจับสัญญาณ ชนิด WD	66
4.6 ลักษณะของสัญญาณการรั่วในโดเมนความถี่ที่ความดันต่างๆจากหัวตรวจจับสัญญาณ ชนิด R15	66
4.7 เปรียบเทียบสัญญาณจากการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ 4 ตำแหน่ง	67
4.8 ระดับสัญญาณที่ระยะห่างจาก source ที่ระยะต่างๆของท่อทั้ง 3 ขนาด	69
4.9 สัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับขนาดท่อ	70
4.10 สัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับขนาดรูรั่ว	70
4.12 เปรียบเทียบอัตราการรั่วที่วัดได้ด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ของท่อขนาด 1 นิ้วที่รูรั่วจำลอง ขนาด 0.3,0.5,0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	71
4.13 เปรียบเทียบอัตราการรั่วที่วัดได้ด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ของท่อขนาด 2 นิ้วที่รูรั่วจำลองขนาด 0.3,0.5,0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	72
4.14 เปรียบเทียบอัตราการรั่วที่วัดได้ด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ของท่อขนาด 3 นิ้วที่รูรั่วจำลองขนาด 0.3,0.5,0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	72
4.15 ตารางการเก็บข้อมูลอัตราการรั่วที่สัมพันธ์กับความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง	73
4.16 การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของสัญญาณรบกวนที่อยู่ในรูปของ ASL	75
4.17 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของสัญญาณรบกวนที่อยู่ในรูปของ ASL	75
4.18 จำนวนการเก็บผลการทดลอง	77

4.19	การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์ (ASL) ที่มีความสัมพันธ์ กับความดัน ขนาดท่อและขนาดรูรั่วจำลอง	86
4.20	การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์ (ASL) ที่มีความสัมพันธ์กับความดัน ขนาดท่อและขนาดรูรั่วจำลอง	86
4.21	ตรวจสอบความถูกต้องสำหรับข้อมูล ASL	87
4.22	ผลของ Interaction ระหว่าง 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อ ASL	88
4.23	ผลของ Interaction ระหว่าง 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อ ASL	89
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ASL กับขนาดรูรั่วและขนาดของท่อที่ความดันต่างๆ	90
4.25	สมการถดถอยสำหรับตัวแปร ASL ความดันในระบบ ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง	91
4.26	จำนวนการเก็บผลการทดลอง	93
4.27	การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์(ASL) ที่มีความสัมพันธ์ กับ ขนาดท่อและอัตราการรั่ว	98
4.28	การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์(ASL) ที่มีความสัมพันธ์ กับ ขนาดท่อและอัตราการรั่ว	98
4.29	ตรวจสอบความถูกต้องสำหรับข้อมูล ASL	99
4.30	ผลของ Interaction ระหว่าง 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อ ASL	100
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ASL กับอัตราการรั่วของท่อ 3 ขนาด	101
4.32	สมการถดถอยสำหรับตัวแปร ASL ขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว	102
4.33	สัญญาณคลื่นอะคูสติกในโดเมนเวลาของหัวตรวจจับที่ 1	104
4.34	สัญญาณคลื่นอะคูสติกในโดเมนเวลาของหัวตรวจจับ ที่ 2	105
4.35	ผลการ Cross correlation ของทั้งสองสัญญาณ	105
4.36	แสดงความสัมพันธ์ของการติดตั้ง sensor ที่ระยะ 0.3 เมตรจากรูรั่ว ทั้ง 2 หัว	106
4.37	แสดงความสัมพันธ์ของการติดตั้ง sensor ที่ระยะ 0.3 เมตรจากรูรั่ว ทั้ง 2 หัว	106
4.38	แสดงความสัมพันธ์ของการติดตั้ง sensor ระยะ L1= 0.3 m และ L2=0.6 m	107
ก.1	การทดสอบโดยวิธีหักไส้ดินสอ	117

ประมวลศัพท์และคำย่อ

a	=	จำนวนทริตเมนต์ของปัจจัย A
AE	=	Acoustic Emission
AErms	=	Root Mean Square of AE Energy
ANOVA	=	Analysis of Variance
ASL	=	Average Signal Level
ASME	=	American Society of Mechanical Engineering
A/D	=	Analog to Digital Converter
b	=	จำนวนทริตเมนต์ของปัจจัย B
c	=	จำนวนทริตเมนต์ของปัจจัย C
⁰ C	=	องศาเซลเซียส
D	=	ระยะห่างของหัวตรวจสอบ 2 หัว
Di	=	ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทริตเมนต์ใดๆ 2 ทริตเมนต์จนทำให้เกิดการปฏิเสธสมมุติฐาน
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง
dB	=	Decibel
D	=	ระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับสัญญาณ
DOE	=	Design of Experiment
ET	=	Eddy Current Testing
f	=	ความถี่
FRP	=	Fiber Reinforced Plastic
kg/m ²	=	Kilogram per Square Meter
kHz	=	Kilohertz
L	=	ความยาวรูรั่ว
L1	=	ระยะห่างของหัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 กับรูรั่ว
L2	=	ระยะห่างของหัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 กับรูรั่ว
MHz	=	Megahertz
ml	=	Milliliter
ml/sec	=	Milliliter per Second
MT	=	Magnetic particle Testing
mV	=	Millivolt

n	=	จำนวนตัวอย่างที่ทำการซ้ำ
NDE	=	Non-Destructive Examination
NDT	=	Non-Destructive Testing
OC	=	Operating Characteristic
P	=	ความดัน
p	=	ค่าร้อยละของความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดการปฏิเสธสมมุติฐาน
PAC	=	Physical Acoustic Corp.
psi	=	Pound per square inch
PT	=	Liquid penetrant Testing
PTFE	=	Poly Tetra Fluoro Ethylene
PVC	=	Polyvinyl Chloride
PZT	=	Lead Zirconate-Titanate
Q	=	อัตราเร็ว
Q_v	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
R	=	ความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์วัด
Re	=	Reynolds Number
R_{AB}	=	Cross Correlation function
R^2	=	Coefficient of Determination
r	=	รัศมีทรงกระบอก
RT	=	Radiographic Testing
Sch	=	Schedule
SS_E	=	Sum of Square Error
SS_{total}	=	Sum of Square Total
T	=	ช่วงเวลาที่พิจารณา
TFE	=	Tetra Fluoro Ethylene
U	=	พลังงานของคลื่นอะคูสติก
UT	=	Ultrasonic Testing
v	=	ความเร็วในการไหล
V	=	ปริมาตร
V(t)	=	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้
V_{in}	=	ค่าแรงดันไฟฟ้าเข้า

V_{out}	=	ค่าแรงดันไฟขาออก
V_s	=	ความเร็วคลื่นเสียง
V^{ref}	=	ระดับโวลต์เตจอ้างอิง
X	=	ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้
Y	=	ข้อมูล
Z	=	ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้
Φ	=	จำนวนตัวอย่างที่จะทำการทดลองเพื่อทำซ้ำ
α	=	ระดับความมีนัยสำคัญ
β	=	สมมุติฐานไม่จริง
ρ	=	ความหนาแน่นของไหล
σ	=	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล
η	=	ความหนืดจลน์ของไหล
μ	=	ค่าความหนืดของของไหล
μS	=	Microsecond
μV	=	Microvolt
λ	=	ความยาวคลื่น
τ'	=	Time delay
ΔP	=	ความดันแตกต่าง
ΔT	=	เวลาที่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันระบบท่อการขนถ่ายของไหลต่างๆมีอยู่หลากหลายลักษณะ เช่น ระบบท่อในการขนถ่ายน้ำ ระบบท่อในการขนถ่ายน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ ระบบท่อในการทำความร้อน(Boiler tube) ระบบท่อในการทำความเย็น(Refrigeration) เป็นต้น ซึ่งระบบท่อต่างๆเหล่านี้หากเกิดหากเกิดการรั่วขึ้นแม้เพียงเล็กน้อยหากไม่ได้รับการตรวจสอบแก้ไขก็จะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบที่กำลังดำเนินไปจากการสูญเสียของไหลต่างๆเหล่านั้นทั้งทางด้านเศรษฐกิจและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งปัจจุบันการตรวจสอบการรั่วของท่อของอุตสาหกรรมต่างๆ ในสายการผลิตใช้การอัดน้ำที่ความดันสูงหรือที่เรียกว่าวิธีการทดสอบทางไฮโดรสแตติก (Hydrostatic test) หรือใช้การอัดลมที่ความดันสูงหรือที่เรียกว่าวิธีการทดสอบทางนิวเมติกส์ (Pneumatic test) ซึ่งเป็นวิธีที่เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมากและต้องหยุดระบบ (Shut down) ก่อนทำการตรวจสอบอีกทั้งไม่สามารถระบุได้ว่าท่อรั่วด้วยอัตราเร็วเท่าไร ด้วยเหตุผลนี้โรงงานต่างๆ จึงนิยมนวางแผนในการตรวจสอบการรั่วของท่อประจำปี ซึ่งถ้ามีการรั่วเกิดขึ้นก่อนการตรวจสอบประจำปีก็จะก่อให้เกิดสูญเสียผลผลิต เงินตราและประสิทธิภาพของระบบดังนั้นจึงควรมีวิธีการตรวจสอบที่สามารถบอกได้ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) คือสามารถบอกได้ว่ารั่วหรือไม่ และเชิงปริมาณ (Quantitative) คือสามารถระบุได้ว่ารั่วด้วยอัตราเร็วเท่าไรและสามารถที่จะระบุตำแหน่งได้ด้วย มาตรการวัดการรั่วของท่อก็จะทำให้สะดวก รวดเร็วและประหยัดต้นทุนที่จะใช้ไปกับการจ้างบุคลากรหรือหน่วยงานซ่อมบำรุง (Maintenance) ในการตรวจวัดการรั่วของท่อ การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมิชัน (Acoustic Emission หรือ AE) เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถตรวจวัดการรั่วของท่อได้ทั้งในเชิงคุณภาพ เชิงปริมาณ และระบุตำแหน่งการรั่วได้ ซึ่งมีความไว (Sensitivity) ต่อปริมาณการรั่วที่มีค่าต่ำๆและใช้เวลาในการตอบสนองต่อการวัดเร็วกว่าการทดสอบแบบเดิมที่กล่าวมาสามารถทำได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานหรือถ่ายเทของไหลออกเพื่อตรวจสอบแต่สามารถตรวจสอบในขณะที่การใช้งานปกติได้ จึงเป็นวิธีที่น่าจะนำมาช่วยในการเฝ้าตรวจสอบเพื่อเตือนภัยได้ทันทั่วทั้งหรือตรวจสอบเพื่อหาความเสียหายที่กำลังเกิดขึ้นนั่นเอง

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาวิธีอะคูสติกอิมิชันมาตรวจสอบการรั่วของท่อ Silva และคณะ [1] ได้ศึกษาเทคนิคการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์แรงดันชั่วขณะ(Pressure-transients) จากการรั่วทั้งการหาและการระบุตำแหน่งความเสียหายของท่อ โดยใช้ท่อ PVC ขนาด 3/4 นิ้ว 2 ท่อ และใช้ตัวแปลงสัญญาณแรงดัน(Pressure transducers) 4 ตัว เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ท่อ

ยาว 433 เมตรและ 1248 เมตร การรั่วจะจำลองที่ตำแหน่งต่างๆบนท่อ และใช้อัตราการไหลของของไหลต่างๆกันที่สอดคล้องกับตัวเลขเรโนลด์ (Reynolds number) ในช่วง 2,000 ถึง 13,000 และเปอร์เซ็นต์การรั่วในช่วง 5% ถึง 50 % ของการไหลในท่อ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาให้ควบคุมการจำลองการรั่ว และอ่านค่า กรองสัญญาณแรงดัน และแสดงแรงดันชั่วขณะ และข้อมูลของตำแหน่งการรั่ว ซึ่งระบบแสดงประสิทธิภาพที่ดีในการหาการรั่วขนาดเล็กที่ 5 % ของอัตราการไหลในท่อ ตำแหน่งการรั่วหาจากช่วงแตกต่างของเวลา (Pulse time delay) ระหว่างหัวตรวจสอบซึ่งให้ค่าที่แม่นยำพอสมควร Miller และคณะ [2] ได้ศึกษาลักษณะและกลไกการรั่วของอากาศในท่อผ่านรูรั่วจำลองและการรั่วที่เกี่ยวข้อและหาตำแหน่งโดยจัดทำชุดทดลองการรั่วเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการตรวจที่หน้างานจริงพบว่าสัญญาณมีผลมาจากขนาดรอยรั่ว ความดันและอัตราการรั่ว Miller และคณะ [3] ได้ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณอะคูสติกและตำแหน่งที่เกิดจากการรั่วของของไหล 2 สถานะ (Two-phase flow) ในท่อฝังดินสามารถวัดอัตราการรั่วขนาดเล็กที่ 0.1 แกลลอนต่อชั่วโมงได้ และใช้เทคนิค Linear Location ในการหาตำแหน่งอย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์กับอัตรารั่วของท่อซึ่งเป็นการวัดเชิงปริมาณ Kosel และคณะ [4] ได้ศึกษาถึงการหาตำแหน่งของแหล่งเกิดสัญญาณอะคูสติกที่เกิดจากการรั่วไหลของอากาศโดยอธิบายการหาตำแหน่งขนาด 1 มม. ของสัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องหาตำแหน่ง (Intelligent locator) เครื่องนี้จะสามารถหาตำแหน่งจากสัญญาณแบบต่อเนื่องจากการรั่วของอากาศ ซึ่งให้ความแม่นยำสูง โดยการทดลองบนสายอะลูมิเนียมบาง (Thin Aluminium Band) ผลการศึกษาพบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะหาตำแหน่งที่มีความแม่นยำ โดยใช้การรวมกันของฟังก์ชันสหสัมพันธ์สวนทาง (Cross Correlation Function) กับตัวกรองแถบคลื่นที่เหมาะสม (Band pass filter) ซึ่งการใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแบบช่วงและแบบต่อเนื่อง สามารถระบุตำแหน่งได้ Shifeng Liu และคณะ [5] ได้ศึกษาถึงการใช้ AE หารอยรั่วของท่อใต้ดิน รวมทั้งวิธีการหาตำแหน่งการรั่ว บนพื้นฐานการลดทอน (Attenuation) เพื่อนำไปทดสอบกับงานจริง การไหลของตัวกลางในท่อที่ตรวจหา คือ อากาศ น้ำ และก๊าซในอุตสาหกรรม พบว่าสัญญาณลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นและพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุ ความหนา และการเคลือบของท่อ มีอิทธิพลที่ต่างกันต่อการแพร่ของสัญญาณการรั่ว ความไวของสัญญาณ ขึ้นกับความดันต่อในท่อ และอัตราของการรั่วอย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าไม่มีงานวิจัยใดที่หาความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ อัตรารั่วของท่อ กับขนาดของท่อและความดันในระบบ ซึ่งทั้งขนาดท่อและความดันเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญและส่งผลต่ออัตรารั่วของท่อโดยตรง

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้น การนำวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ไปตรวจวัดอัตรารั่วของท่อในระบบส่งก๊าซ โดยการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ อัตรารั่วของท่อ ขนาดของท่อ และความดันในระบบ เพื่อที่นำความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ เหล่านี้มาสรุป

เป็นสมการทำนายอัตราเร็วของท่อในหน่วยปริมาตรต่อเวลา รวมถึงแนวทางในการหาตำแหน่งการรั่วในเส้นท่อด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจจับสัญญาณรั่วของท่อโดยการตรวจสอบโดยไม่ทำลายด้วยวิธีวิธีอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission)
2. เพื่อหาอัตราเร็วของท่อที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจจับได้ด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน
3. เพื่อหาค่าอัตราเร็วของท่อได้ในหน่วยมิลลิลิตรต่อวินาที (ml/sec) ด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน
4. ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ (AE Parameter) กับอัตราเร็ว ขนาดของท่อ และความดันในระบบ
5. เพื่อแสดงความสามารถในการหาตำแหน่งการรั่วของท่อด้วยวิธี Acoustic Emission

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบการรั่วด้วย AE
2. ศึกษาแนวทางและเลือกวิธีการหาอัตราการรั่วขนาดเล็กที่สุด ในหน่วย ml/sec ของท่อจากตัวกลางที่เป็นอากาศ
3. ออกแบบสภาวะต่างๆของของไหลในท่อขนาด 1 นิ้ว 2 นิ้ว และ 3 นิ้วโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง ที่ช่วงความดัน 0- 80 Psi
4. แสดงการหาตำแหน่งของการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาประเภทและลักษณะของท่อรวมถึงสาเหตุที่ทำให้ท่อรั่ว
2. ศึกษาทฤษฎีอะคูสติกอิมิชชันและวิธีการใช้เครื่องมือในการตรวจวัดอัตราการรั่วของท่อ

3. ออกแบบการทดลองเสริมที่น่าเชื่อถือในการตรวจวัดอัตราการรั่วของท่อเทียบกับการตรวจวัดด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน
4. ออกแบบการทดลองเพื่อตรวจวัดอัตราการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน
5. ทดลองและทำการวิเคราะห์หาตัวแปรทางอะคูสติกที่ได้จากสัญญาณอะคูสติกที่เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous Acoustic Emission) ซึ่งเกิดจากการรั่วของท่อทั้งในทางโดเมนเวลาและโดเมนความถี่
6. หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางอะคูสติกกับอัตราการรั่ว ขนาดของท่อ และความดันในระบบด้วยโปรแกรม Minitab
7. นำสมการที่ทำนายอัตราการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชันไปตรวจวัดอัตราการรั่วของท่อที่รั่วจริง
8. ออกแบบและทดลองเพื่อหาตำแหน่งของการรั่วโดยสร้างสัญญาณอะคูสติกจากการรั่วให้เกิดที่ตำแหน่งบนท่อ
9. ทดลองและทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งของการรั่วด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน เพื่อแสดงความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งบนท่อ
10. สรุปผลและทำรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้วิธีการ AE ในการตรวจสอบการรั่วของท่อและหาตำแหน่งการรั่วได้
2. ทราบถึงความสัมพันธ์ของการเกิดการรั่วในท่อจากสถานะต่างๆของการไหลของของไหล กับพารามิเตอร์ทางอะคูสติกที่เกี่ยวข้องกันได้
3. สามารถให้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดการรั่วในท่อและระบุตำแหน่งของการรั่วที่เกิดขึ้นกับท่อขนถ่ายของไหลชนิดต่างๆ

4. เป็นการพัฒนาการทดสอบโดยไม่ทำลายด้วยวิธี AE ในประเทศไทย
5. เพื่อก่อให้เกิดการกระตุ้นการสร้างเทคโนโลยีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายด้วยวิธี AE

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยประกอบไปด้วย 5 ส่วนที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1. ทฤษฎีเกี่ยวกับท่อ
2. ความเสียหายและการรั่วไหลของท่อ
3. หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง
4. การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission)
5. การหาตำแหน่งการรั่วของท่อ

ระบบท่อเป็นส่วนสำคัญในการขนถ่ายของไหลในกระบวนการต่างๆ เพื่อให้เกิดผลผลิตอื่นๆ ตามมา ไม่ว่าจะเป็นระบบท่อเพื่อการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบท่อเพื่อการขนถ่ายน้ำมันในพื้นที่ห่างไกล หรือแม้แต่ระบบท่อที่ส่งผ่านน้ำประปาให้แก่ผู้บริโภค และอีกหลายๆ กระบวนการซึ่งเหล่านี้ นับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่เราจะต้องตรวจสอบบำรุงรักษาด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้คงประสิทธิภาพของการขนถ่าย และการตรวจสอบบำรุงรักษาด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชันก็เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากความสะดวกต่อการตรวจสอบโดยไม่กระทบต่อการหยุดขนถ่ายซึ่งสามารถตรวจสอบในขณะที่ระบบกำลังทำงานได้ ดังนั้นในการวิจัยเรื่องนี้จำเป็นต้องทราบรายละเอียดของเนื้อหาที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นไปตามรายละเอียดดังนี้

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับท่อ

2.1.1 คุณสมบัติเฉพาะของท่อ [6]

ท่อโดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทตามมาตรฐานคุณสมบัติเฉพาะ (Pipe Specification Standard) ออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ ท่อ (Pipe) ท่อบาง (Tube) และท่ออ่อน (Hose) โดยแต่ละประเภทผลิตออกมาด้วยวัสดุได้หลายชนิดเช่น ท่ออาจผลิตจากเหล็กหล่อ เหล็กกล้า เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง โลหะผสมอื่นๆ ฯลฯ และท่ออ่อนอาจผลิตจากพลาสติก ผ้าใบเสริมใยหรือวัสดุเสริมความแข็งแรงอื่นๆ คุณสมบัติเฉพาะของท่อ (Pipe) กำหนดขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ (Nominal Diameter) และเลขระดับความหนา (Schedule number) เช่น “ขนาดระบุ 2 นิ้ว ระดับความหนา 40” (2” nominal schedule- 40) เป็นต้น เส้นผ่านศูนย์กลางระบุไม่จำเป็นต้องมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหรือภายนอกของท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางระบุแต่ละค่า จะกำหนดขึ้นเฉพาะกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเพียงค่าเดียวเท่านั้น เช่น ขนาดระบุ 2 ” ใช้เฉพาะกับท่อที่มีขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 2.375" เพียงขนาดเดียวเท่านั้น ส่วนระดับความหนา (Schedule) ของท่อกำหนดขึ้นตามความหนาของผนังท่อโดยค่าเลขระดับความหนาที่มากกว่าแสดงว่าผนังท่อมีความหนามากกว่าในท่อที่มีขนาดท่อที่ระบุขนาดเดียวกัน ท่อที่ระบุขนาดต่างๆตั้งแต่ 1/8" ถึง 40" โดยระดับความหนา Sch 40 (หรือขนาดมาตรฐาน) นิยมใช้โดยทั่วไปในงานทางวิศวกรรม

2.1.2 การไหลในท่อ [7]

ท่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับขนส่งของไหลภายใต้ความดันตามปกติท่อที่ใช้จะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม เนื่องจากของไหลในท่อมีความดัน ดังนั้นการไหลในท่อจึงมักเป็นแบบไหลเต็มท่อและมีการไหลเป็นแบบคงตัว (Steady flow) ในที่นี้จึงกล่าวถึงเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้(ของเหลวทุกชนิด)ที่มีการไหลแบบคงตัวและเป็นของไหลจริง ของไหลจริงจะมีความแตกต่างจากของไหลสมมติ เพราะมีความหนืด ทำให้การไหลในท่อเกิดความเสียดทานอันเนื่องมาจากแรงเฉือนระหว่างอนุภาคของของไหลกับผนังของท่อและระหว่างอนุภาคของของไหลเองอันเนื่องมาจากความหนืดของของไหลจริง ซึ่งจะทำให้สูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งในการไหลเพื่อเอาชนะความเสียดทานดังกล่าว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของการไหลด้วย การไหลในท่ออาจไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) หรือแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) โดยการไหลแต่ละแบบจะมีลักษณะและวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป ปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลในท่อส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการของพลังงาน สมการสภาพความต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียพลังงานของการไหลเมื่อมีการไหลผ่านข้อต่อต่าง ๆ ของท่อ ท่อโค้งและวาล์วที่ใช้บังคับการไหลอีกด้วย ซึ่งจะแสดงถึงวิธีการคำนวณการไหลในท่อเป็นสิ่งสำคัญในการนำของไหลไปใช้งานให้เป็นประโยชน์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การไหล 2 แบบจากการทดลองของเรย์โนลด์ (2-Type of flow Reynolds experiment)

ในปี พ.ศ. 2426 ออสบอร์น เรย์โนลด์ได้ทำการทดลอง พบว่าการไหลของของไหล แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบราบเรียบ และแบบปั่นป่วน โดยใช้ชุดทดลองที่ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำชนิดให้เกิดหลอดความดันคงที่ และมีถังเล็ก ๆ บรรจุอยู่ด้านบน ที่บริเวณกลางถังมีหลอดแก้ววางในแนวนอน ปลายข้างหนึ่งผายออก ปลายอีกข้างหนึ่งยื่นออกมาจนถึง และมีลิ้นควบคุมติดอยู่ น้ำจะไหลออกจากหลอดแก้วจะมีท่อเล็ก ๆ ต่อจากถังเพื่อปล่อยสีให้ผสมไปกับน้ำสีที่ใช้จะมีน้ำหมึกจำเพาะเท่ากับจากการทดลอง พบว่าเมื่อการไหลมีความเร็วต่ำ ลักษณะเส้นของสีที่ปรากฏจะราบเรียบ เป็นเส้นตรงนิ่งเหมือนไม่มีการเคลื่อนไหว แต่เมื่อเพิ่มความเร็วของการไหลขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงค่าหนึ่ง จะพบว่าเส้นของสีเริ่มสั่นพริ้วไม่เป็นระเบียบ และเป็นคลื่น และเมื่อเพิ่มความเร็วให้มากขึ้นอีก เส้นสีก็จะยิ่งสั่นมากและกระจายไปทั่วหน้าตัดของท่อ เรย์-โนลด์ได้สรุปผลการทดลองนี้ว่า เมื่อความเร็วในการไหลมีค่าต่ำ อนุภาคของของไหลจะไม่แตกกระจายและเคลื่อนที่ในแนวนอนเป็นชั้น ๆ ไม่ปะปนกัน ซึ่งเป็นลักษณะของการไหลแบบราบเรียบ แต่ที่ความเร็วสูง ๆ เส้นสีจะแตกกระจาย แสดงว่าอนุภาคของ

ของไหลเคลื่อนที่ปะปนไม่เป็นระเบียบ อันเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนช่วงของความเร็ววิกฤติ (Critical velocity) นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของของไหล อุณหภูมิ และลักษณะท่อ สำหรับสภาวะการไหลที่เกิดขึ้นระหว่างการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วนเรียกว่า “Transitional state” คือสภาวะที่การไหลมีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดลองดังกล่าว เรย์โนลด์ได้พบว่า สาเหตุของการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนนี้ เป็นผลมาจากแรงเฉื่อยและความหนืด กล่าวคือที่ความเร็วต่ำ แม้ว่าของไหลจะมีความหนืดน้อย แต่แรงอันเกิดจากความหนืดจะมีค่ามากกว่าแรงอื่น ๆ แต่ที่ความเร็วสูง ๆ แรงเฉื่อยจะมีค่ามากกว่าแรงอันเกิดจากความหนืด เรย์โนลด์แสดงความสัมพันธ์ของแรงเฉื่อยและแรงอันเกิดจากการความหนืดไว้ ซึ่งเรียกว่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จะไม่มีหน่วย ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Re = \rho \frac{vr}{\mu} \quad (2.1)$$

เมื่อ v = ความเร็วในการไหล
 r = รัศมีทรงกระบอก
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล
 μ = ค่าความหนืดของของไหล

2.2 ความเสียหายและการรั่วไหลของท่อ

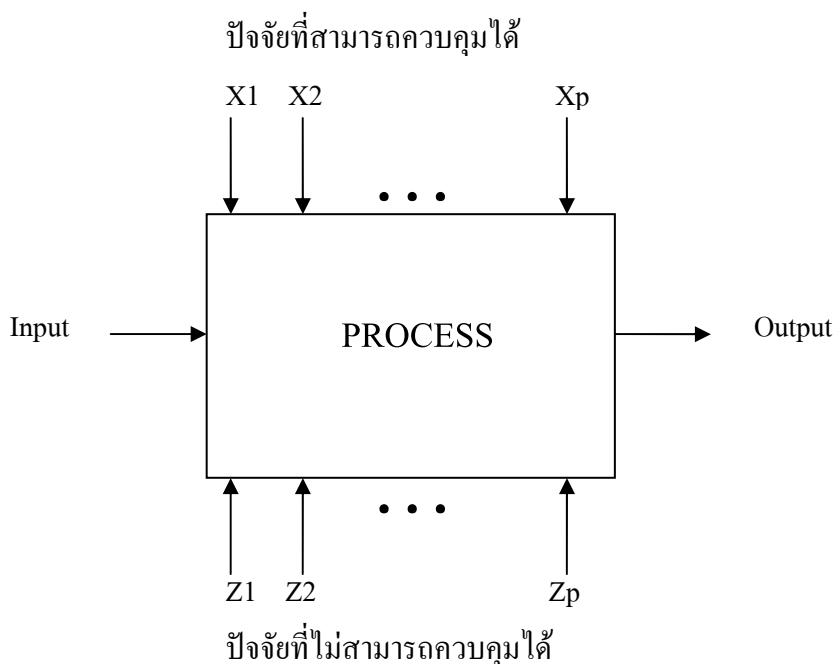
ความเสียหายและการรั่วไหลของท่อมีได้หลากหลายลักษณะขึ้นกับชนิดหรือประเภทของการขนถ่าย แต่กล่าวโดยรวมแล้วการรั่วมักเกิดตรงส่วนที่ท่อชำรุดหรือบริเวณที่มีจุดบกพร่องจากกระบวนการผลิตหรือการประกอบระบบเช่น รั่วเป็นรูเข็มหรือมีรอยรั่วตามดในเส้นท่อ และตามข้อต่อ ฟิตติง และวาล์ว หรืออาจเป็นเพราะสาเหตุภายใน หรือสาเหตุภายนอก เช่น อุณหภูมิ หรือ ความสั่นสะเทือนยิ่งไปกว่านั้น อายุการใช้งานที่ยาวนานประกอบกับคุณภาพของวัสดุและสภาพของสารเคมีก็เป็นสาเหตุให้เกิดการผุกร่อนของท่อ เช่น คุณภาพของของไหลที่มีสภาพเป็นกรดซึ่งมีคุณสมบัติกัดกร่อน หรือเป็นเพราะสาเหตุทางกายภาพเช่น อุณหภูมิ และอัตราการไหลนอกจากนี้ระบบท่อที่ฝังอยู่ใต้ดินอาจมีสาเหตุการรั่วได้จากการกระทำของมนุษย์ โดยมีการก่อสร้างเช่น การตอกเสาเข็ม การใช้รถตักดิน และการกระทำจากธรรมชาติเช่นปัญหาการทรุดของระดับดิน การเกิดฟ้าผ่าซึ่งทำให้เกิดประจุไฟฟ้าจำนวนมากพอเพียงพอต่อการหลอมละลายผนังของท่อส่งก๊าซที่เป็นเหล็กได้ เป็นต้น

2.3 หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง [8]

ในการออกแบบการทดลองเพื่อพิสูจน์ยืนยันว่าปัจจัยที่ได้รับการควบคุมหรือทริตเมนต์มีผลกระทบหรือเป็นสาเหตุที่ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความผันแปรแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งส่วนใหญ่จะทำการทดลองด้วยจำนวน 2 ทริตเมนต์ขึ้นไป จึงไม่สามารถทดสอบด้วยความมีนัยสำคัญของตัวแปรสถิติแบบปกติได้(โดยการทดลองเปรียบเทียบทริตเมนต์ทีละคู่)เพราะจะทำให้มีโอกาสตัดสินใจในการปฏิเสธสมมุติฐานที่ผิดพลาดได้ คือทำให้ระดับความมีนัยสำคัญ (α) มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความเสี่ยงที่จะตัดสินใจปฏิเสธสมมุติฐานทั้งที่สมมุติฐานนั้นเป็นความจริงเพราะฉะนั้นจะใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variation ; ANOVA) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นโดยอาศัยการแยกความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดออกเป็นความแปรปรวนย่อย ทั้งนี้เพื่อให้ระดับความมีนัยสำคัญสูงขึ้นซึ่งในกระบวนการผลิตหรือการทดลองนั้นจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่ง X หมายถึงปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และ Z หมายถึงปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งปัจจัย (factor) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable factor)
2. ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable factor)

โดยที่สารสนเทศที่อยู่ในข้อมูล (Y) คือ $Y = \text{ผลจากปัจจัยที่ได้รับการควบคุม}(X) + \text{ผลจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมซึ่งมาจากสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือควบคุมได้แต่ไม่ได้รับการควบคุม}(Z)$



รูปที่ 2.1 แสดงปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ดังนั้นค่าความแตกต่างของข้อมูลที่น่าสนใจ (Y) เกิดขึ้นเป็นผลมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ สาเหตุจากปัจจัยที่ได้รับการควบคุมและสาเหตุจากปัจจัยที่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งสามารถสรุปเป็นหลักการสำหรับการมีความแปรปรวนโดยรวมแล้วแยกออกเป็น ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยที่ได้รับการควบคุมหรือเรียกว่า ทรีตเมนต์ และความแปรปรวนเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมซึ่งหมายถึง รีพีทะบิลิตี (Repeatability) แล้วพิจารณาความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือไม่ เมื่อเทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างเงื่อนไขการทดลองหรือ รีโพรดิวซิบิลิตี (Reproducibility)

2.3.1 วัตถุประสงค์ในการออกแบบ

1. เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อสิ่งที่เราสนใจ
2. เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้สิ่งที่เราสนใจใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากที่สุด
3. เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ความแตกต่างของสิ่งที่เราสนใจน้อยที่สุด
4. เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีค่าน้อยสุด

2.3.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

1. การตั้งปัญหา การกำหนดปัญหาว่าจะศึกษาอะไรในกระบวนการทดลองซึ่งการกำหนดนี้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลอง
2. เลือกตัวแปรตาม (Response Variable) จะต้องเลือกตัวแปรตามที่เราจะแน่ใจว่าจะได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา
3. การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย ซึ่งระดับของปัจจัยที่ใช้แบ่งได้เป็น
 - ก. แบบกำหนด (Fixed levels) หมายถึงระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้หรือกำหนดค่าได้แน่นอน
 - ข. แบบสุ่ม (Random levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน
 - ค. แบบผสม (Mixed levels) หมายถึง การผสมระหว่างปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดค่าได้และกำหนดไม่ได้
4. การเลือกแบบการทดลอง ต้องเลือกแบบการทดลองที่ให้ข้อมูลที่ถูกต้อง
5. การกำหนดการทดลอง โดยทำตามที่กำหนดไว้
6. การวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติมาวิเคราะห์และสรุปผล
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะเมื่อทำการวิเคราะห์จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ซึ่งอาจแสดงในกราฟตาราง หรือแผนภูมิ

2.3.3 รูปแบบของการทดลอง

แบ่งออกเป็นรูปแบบในกรณีปัจจัยเดียว และกรณีสองปัจจัยขึ้นไป ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงรูปแบบที่มีสองปัจจัยขึ้นไป (Multi Factor) ซึ่งมีรูปแบบการทดลองดังนี้

- แบบการทดลองที่มี 2 ปัจจัยขึ้นไป (General Factor) โดยที่จำนวนทรีตเมนต์แต่ละปัจจัยไม่เท่ากัน การที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยทำให้เกิดผลของอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) และอิทธิพลหลัก (Main Effect) ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยรวมคือผลที่เกิดจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงแล้วทำให้อิทธิพลของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย สามารถแบ่งได้ดังนี้

ก. รูปแบบการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยเท่ากับ k จำนวน โดยที่แต่ละปัจจัยมี 2 ทรีตเมนต์เท่ากันทุกปัจจัย (The 2k Factorial Design)

ข. รูปแบบการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยเท่ากับ k จำนวน โดยที่แต่ละปัจจัยมี 3 ทรีตเมนต์เท่ากันทุกปัจจัย (The 2k Factorial Design)

ค. รูปแบบการทดลองโดยปัจจัยที่พิจารณาเป็นเชิงซ้อน (Nested Design) โดยการทดลองที่มี 2 ปัจจัยขึ้นไปนี้จะต้องเก็บข้อมูลอย่างสุ่ม

2.3.4 การกำหนดหาขนาดตัวอย่าง (Choice of Sample Size)

คือจำนวนตัวอย่างที่จะทำการทดลองเพื่อทำซ้ำ กรณีแบบอิทธิพลคงที่ (Fixed Effect Model) จะใช้พารามิเตอร์ที่สนใจคือ Φ ซึ่งสามารถหาได้โดยการเปิดจากเส้นโค้งโอซี สำหรับสูตรที่ใช้คำนวณคือ

$$\Phi^2 = [(1+0.01p)^2 - 1]n \quad (\text{กรณีปัจจัยเดียว}) \quad (2.2)$$

$$\Phi^2 = naDi^2 / 2b\sigma^2 \quad (\text{กรณีมี 2 ปัจจัย}) \quad (2.3)$$

$$\Phi^2 = nabDi^2 / 2c\sigma^2 \quad (\text{กรณีมี 3 ปัจจัย}) \quad (2.4)$$

เมื่อ p คือค่าร้อยละของความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดการปฏิเสธสมมุติฐาน

D คือค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทรีตเมนต์ใดๆ 2 ทรีตเมนต์จนทำให้เกิดการปฏิเสธสมมุติฐาน

n คือจำนวนตัวอย่างที่ทำการซ้ำ

a คือจำนวนทรีตเมนต์ของปัจจัย A

b คือจำนวนทรีตเมนต์ของปัจจัย B

c คือจำนวนทรีตเมนต์ของปัจจัย C

σ คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

ในการออกแบบจะพยายามให้ค่าความเสี่ยงที่จะยอมรับสมมุติฐานทั้งที่สมมุติฐานไม่จริง (β) มีค่าต่ำที่สุดซึ่งการจะทำให้ β มีค่าลดลงก็พยายามให้ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีขนาดเล็กลงด้วย การพิจารณาถึงค่าเหมาะสมของสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองดังนั้นในการพิจารณา β จะต้องเริ่มต้นมาจากการใช้ความรู้ในด้านวิศวกรรมศาสตร์เพื่อกำหนดว่าพารามิเตอร์ที่มีค่าเท่าใดจึงทำให้มีการปฏิเสธ

สมมุติฐาน จากนั้นจะทำการพิจารณาขนาดสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสมจากเส้นโค้ง โอซี (Operating Characteristic Curve ; OC Curve) ซึ่งจะต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) จึงจะได้ขนาดสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสม

2.3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Accuracy Checking)

เมื่อทำการทดลองเก็บข้อมูลครบแล้วจะยังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้เนื่องจากอาจเกิดการทดลองที่ผิดพลาดได้ เช่น การจดบันทึกข้อมูลผิดพลาด เครื่องมือการทดลองไม่ดี เป็นต้น ซึ่งไม่ได้เกิดมาจากสาเหตุธรรมชาติ โดยที่การวิเคราะห์ข้อมูลผ่านทางการใช้หลักการทางสถิติจะเกิดผลอย่างมีประสิทธิภาพนั้นข้อมูลที่ได้จะต้องมีการกระจายแจกแจงแบบปกติเท่านั้น ดังนั้นจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบซึ่งเป็นการตรวจสอบรูปแบบของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาดังนี้

1. ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน (Independent) ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลแต่ละตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติจะต้องเป็นอิสระต่อกันอันมาจากความสุ่ม ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่สุ่มแล้วจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ยหรือค่าความคาดหมายดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่สุ่มแล้วแสดงว่าข้อมูลมีความลำเอียง จำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนวิเคราะห์
2. ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ (Normal Shape) ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลแต่ละตัวที่เป็นตัวแปรสุ่มจะต้องมีแนวโน้มที่จะเข้าหาค่าค่าหนึ่งที่คงที่ แล้วมีการกระจายรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตร ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลมิได้เป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติแล้วแสดงว่าข้อมูลได้มาจากกระบวนการที่มีได้กำหนดมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนวิเคราะห์
3. ข้อมูลมีความผันแปรที่สม่ำเสมอ (Variance Stability) ซึ่งหมายความว่าข้อมูลจะต้องได้รับการเก็บมาจากกระบวนการที่ได้จัดทำเป็นมาตรฐานแล้วจึงทำให้ความแตกต่างของข้อมูลเกิดมาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระบบที่ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น ดังนั้นถ้าหากข้อมูลมีความแปรปรวนที่ไม่เสถียรภาพแล้วแสดงว่าข้อมูลเกิดจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้จึงมีความจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนวิเคราะห์ต่อไป

ในการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลและการทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนนั้นจะทดสอบผ่านแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือ (Residuals) กับค่าใดค่าหนึ่งในสองค่านี้คือ ลำดับต่อเนื่องในการเก็บข้อมูลและค่าประมาณการที่ควรจะเป็นของข้อมูล

2.3.6 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของการทดลอง

หลังจากที่ได้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลแล้วจะต้องมีการทวนสอบว่าการออกแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ถูกต้องหรือกำหนดจำนวนปัจจัยไว้เหมาะสมหรือไม่ โดยจะใช้วิธีสัมประสิทธิ์แสดง

การตัดสินใจ (R^2 ; Coefficient of Determination) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถอธิบายว่าข้อมูลที่ใช้นั้นมีประสิทธิภาพเท่าใด สามารถนำข้อมูลที่ได้มาให้ได้มากน้อยแค่ไหนหรืออาจกล่าวได้ว่าการทำ R^2 เป็นการทดสอบคุณภาพของข้อมูลว่าดีมาน้อยเพียงใดซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$R^2 = 1 - (SS_e/SS_{total}) \times 100\% \quad (2.5)$$

เมื่อ SS_e คือ ความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อน (Sum of Square Error)

SS_{total} คือ ความแปรปรวนโดยรวม (Sum of Square Total)

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) จะต้องมีค่าสูงๆจึงจะหมายความว่าความแปรปรวนที่เกิดกับปัจจัยที่เราสนใจอยู่ภายใต้การควบคุมแสดงว่ามี Uncontrolled ไม่มากนัก แต่ถ้า R^2 มีค่าต่ำแสดงว่ามีเงื่อนไขที่ไม่ได้ควบคุมอยู่มาก ไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยที่ต้องการตรวจสอบมีผลกระทบจริงหรือไม่ การออกแบบการทดลองนั้นเหมาะสมดีแล้วโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ(R^2) ไม่ต่ำกว่า 80% จึงเรียกว่าดีมาก

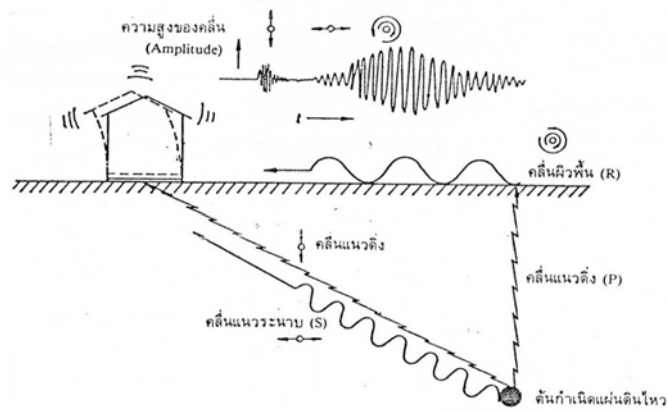
2.4 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน [9,10]

2.4.1 ความหมายของอะคูสติกอิมิชชัน

AE นั้นเป็นอักษรย่อจากคำว่า Acoustic Emission (อะคูสติกอิมิชชัน) ซึ่งคือการให้เสียงออกมาจากวัสดุนั้นเอง ประสพการณ์ที่มักพบเห็นกันอยู่เป็นประจำคือ ถ้วยชาหรือกาแฟที่เป็นเครื่องปั้นดินเผาหรือแก้วนั้น ถ้าแตกก็จะเกิดเสียงขึ้น บ้านใหม่ๆ ที่สร้างจากไม้ นั้น เมื่อไม้เกิดแห้งมากขึ้น และแตกก็จะมีเสียงลั่นปริ๊ยะเกิดขึ้น แผ่นดินบางๆ ถ้าตัดงอ ก็จะเกิดเสียงกึ่งกึ่งที่เรียกกันว่า ดินกร๊อง (Tin Cry) ที่เป็น ที่รู้จักกันมา ตั้งแต่โบราณ เทहतตุ่ๆๆ ไปก่อนที่จะเกิดการแตกหักขึ้นสุดท้ายนั้น บริเวณภายในจะมีรอยแตกเล็กๆ เกิดขึ้น จากนั้นก็จะขยายตัวเรื่อยไปจนเกิดการแตกหักในขั้นสุดท้าย กล่าวคือ ในขณะที่ของแข็งเกิดการแตกหัก หรือมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะเปลี่ยนพลังงานที่อยู่ในรูปของความเครียดนั้น ส่งออกมาในรูปของคลื่นเสียง หรือ คลื่นอีลาสติก (Elastic Wave) เราเรียกปรากฏการณ์การส่งคลื่นเสียงแบบนี้ว่า AE ซึ่งแม้จะเรียกว่าเป็นเสียง แต่เนื่องจากเป็นคลื่นอีลาสติก ดังนั้นบ่อยครั้งที่จะดังจนได้ยินเป็นเสียงออกมาเหมือนกับดินกร๊องโดยทั่วไปมักจะเป็นคลื่นอัลตราโซนิกที่หูคนรับฟังไม่ได้โดยตรงมากกว่า

ปรากฏการณ์ในระดับจุลภาค (ละเอียดหรือเล็กมาก) นั้น จะเป็นดังนี้ คือ ก่อนที่จะเกิดการแตกหักนั้น เมื่อความเค้นมีค่าสูงขึ้นจนทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในช่วงของพลาสติกแล้ว ดิสโลเคชัน (Dislocation) หรือการอยู่ผิดตำแหน่งของผลึกก็จะเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดมี คลื่นอีลาสติก (AE)

ออกมา ถ้าความเค้นที่กระทำต่อวัสดุมีค่าสูงขึ้นเกินกว่าขีดจำกัดหนึ่ง บริเวณปลายของรอยแตกเล็กๆ นั้น ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกแล้วก็จะเกิดการแตกร้าว ทำให้รอยร้าวขยายตัวมากขึ้น ในกรณีนี้จะเกิด AE แบบทันทีทันใดขึ้น AE แบบนี้จะมีความสูงของคลื่น (Amplitude) หรือความดังมากกว่าในกรณีการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน



รูปที่ 2.2 แสดงประเภทของคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว

แม้แผ่นดินไหวเองเราก็อาจคิดได้ว่าเป็นการที่มี AE เกิดขึ้นในตัวเอง (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) ซึ่งในกรณีนี้คลื่น P (คลื่นตามยาว) จะมาถึงได้เร็วที่สุด จากนั้นจึงเป็นคลื่น S (คลื่นตามขวาง) และคลื่น R (คลื่นที่พื้นผิว) ที่จะติดตามมา คลื่นต่างๆ ดังกล่าวนี้นี้ ถ้าในตัวกลางที่เป็นอากาศหรือน้ำแล้ว การเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน ดังนั้นจึงมีเฉพาะคลื่นในแนวตั้งอย่างเดียว แต่ในตัวกลางที่เป็นของแข็งนั้นจะมีคลื่นในแนวระนาบที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลและคลื่นที่พื้นผิวที่มีการเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณพื้นผิวเกิดปะปนกัน

ในกรณีของวัสดุโครงสร้างทั้งหลายนั้น AE มักจะเกิดการเคลื่อนที่ที่อยู่ในระนาบขนาดใหญ่ ดังนั้นคลื่นจึงมักสะท้อนกลับไปกลับมาระหว่างผิวหน้าด้านต่างๆ คลื่นในแนวตั้งส่วนหนึ่งกลายเป็นคลื่นในแนวระนาบ ทำให้ลักษณะของคลื่นซับซ้อนมาก แม้ว่าแหล่งกำเนิดคลื่นจะก่อให้เกิด AE ที่มีรูปคลื่น (คลื่นเริ่มแรก) เป็นลักษณะคลื่นกระแทก (Impulse) แบบธรรมดาก็ตาม แต่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางหนึ่งแล้ว รูปคลื่นก็จะเกิดการแทรกซ้อน ความกว้างระหว่างคลื่นแต่ละลูกก็ขยายออกไป ทำให้รูปคลื่นต่างไปจากคลื่นเริ่มแรกได้

2.4.2 การทดสอบ AE ในการทดสอบแบบไม่ทำลาย

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing : NDT) เป็นการทดสอบวัสดุชิ้นงานโดยไม่ทำลายให้เกิดความเสียหาย ซึ่งทางสมาคมวิศวกรรมเครื่องกลของอเมริกา (ASME) จะเรียกว่าการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Examination : NDE) ซึ่งการทดสอบแบบไม่ทำลายเป็น

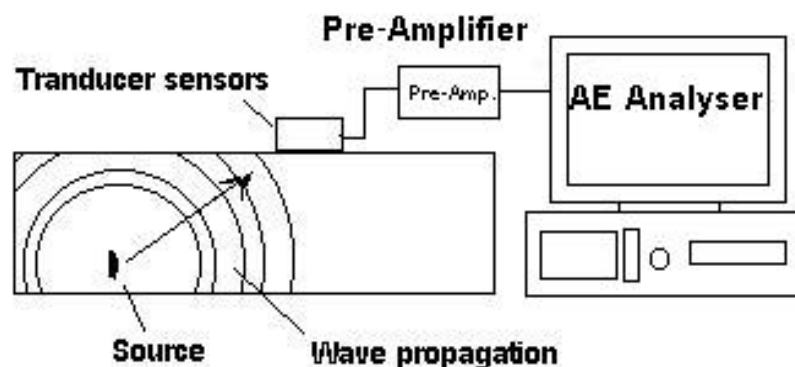
การทดสอบชิ้นงาน วัสดุ อุปกรณ์ หรือ โครงสร้าง โดยไม่ก่อให้เกิดรอยขีดข่วน การแยกส่วนหรือการแตกหักเสียหายเกิดขึ้น หรือเป็นการตรวจสอบ ลักษณะ คุณสมบัติ สมรรถภาพ โครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องภายใน โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด หรือสมรรถนะไปจากเดิม โดยจะใช้ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นทดสอบ เช่น ความร้อน รังสี คลื่นเสียง ไฟฟ้า หรืออำนาจแม่เหล็กซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่มีอยู่แล้ว ใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายวัดลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์เหล่านี้ เพื่อประเมินความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ได้ การทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน เช่น การทดสอบด้วยวิธีถ่ายภาพรังสี (Radiographic Testing: RT) วิธีกระแสไหลวน (Eddy Current Testing: ET) วิธีการใช้ผงแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing: MT) วิธีใช้สารละลายแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing: PT) หรือวิธีใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic Testing: UT) เป็นต้น

การทดสอบแบบไม่ทำลายดังวิธีที่กล่าวมานี้ จะเป็นวิธีการตรวจสอบสิ่งผิดปกติหรือรอยบกพร่องที่ได้เกิดเป็นรูปเป็นร่างขึ้นแล้ว นอกจากนี้ยังมีวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่ประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบรอยบกพร่องที่กำลังเกิดการขยายตัวอยู่หรือเป็นการตรวจสอบสภาพเวลาจริงในปัจจุบัน ซึ่งก็คือการตรวจสอบแบบเฝ้าระวังในเวลาจริง นั่นคือวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ โดยเป็นการตรวจสอบคลื่นเสียงที่อยู่ในรูปของคลื่นอัลตราซาวด์ที่เกิดขึ้นจากการที่วัสดุเกิดการขาดเสถียรภาพ หรือเกิดรอยบกพร่องขึ้นแล้วมีขยายตัวออกทำให้เกิดคลื่นเสียงออกมาซึ่งการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์นั้นสามารถนำไปใช้ในการทดสอบการวิบัติทางวัสดุ การควบคุมการผลิตในงานเชื่อมหรือการตรวจสอบความแข็งแรงมั่นคงในวัสดุ โดยในปัจจุบันนี้ได้มีการประยุกต์นำมาตรวจสอบใช้กับวัสดุต่างๆ มากมายหลายชนิด เช่น พลาสติกเสริมแรง (Fiber Reinforced Plastic: FRP) เซรามิกส์ คอนกรีต หิน แก้ว ไม้ และถ่านหิน เป็นต้น สิ่งต่างๆ ที่ประยุกต์ใช้งานนั้น นอกจากวัสดุที่ก่อเป็นโครงสร้างแล้ว ยังใช้ในการตรวจสอบการเลื่อนไหลของพื้นดิน แผ่นดินไหวในการทำเหมืองแร่ เหมืองถ่านหิน พลังงานความร้อนใต้พิภพ เขื่อนคอนกรีต โครงสร้างที่ใช้ในทะเลและมหาสมุทร และการตรวจหาตำแหน่งรอยร้าวในท่อและวาล์วของระบบส่งอีกด้วย

ในการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้กันมาแต่ก่อนนั้นเป็นวิธีการตรวจสอบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นและเป็นรูปเป็นร่างแล้ว แต่ว่าการทดสอบ AE นั้นเป็นการตรวจสอบเสียงที่เกิดขึ้น จากการที่วัสดุเกิดการขาดเสถียรภาพ มีรอยบกพร่องเกิดขึ้น แล้วขยายตัวออกก่อให้เกิดเสียงดังกล่าวดังนั้น จึงเป็นการประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบ กระบวนการที่รอยบกพร่องเกิดการขยายตัวอยู่เท่านั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้กันมานั้นเป็นการตรวจสอบสภาพที่ “เกิดขึ้นแล้ว” ส่วนการทดสอบ AE นั้น เป็นการตรวจสอบสภาพ “ปัจจุบัน” เป็นวิธีการแสดงสภาพเวลาจริงในปัจจุบันนั้นก็คือเป็นการตรวจสอบแบบเฝ้าระวังแบบเวลาจริง (Real-Time) ซึ่งในเนื้อหาและวิธีการจะมีความแตกต่างจากวิธีการอื่นๆ

2.4.3 สัญญาณอะคูสติก (AE Signal)

สัญญาณอะคูสติก หมายถึง สัญญาณของพลังที่อยู่ในรูปของคลื่นยืดหยุ่นแบบชั่วคราว (Transient Elastic Wave) หรือคลื่นเสียงนั่นเอง ซึ่งปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเนื่องจากวัสดุนั้นเกิดการแตกร้าวหรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ซึ่งความถี่ของสัญญาณอะคูสติกที่นำไปวิเคราะห์โดยทั่วไปมักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 25 kHz จนถึง 3 MHz แต่ความถี่ที่นิยมนำไปใช้วิเคราะห์ในงานต่างๆ มักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 1 MHz จะทำให้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์มีความไว (Sensitivity) ในการตรวจสอบสูงมาก โดยที่แสดงการตรวจจับคลื่นอะคูสติกดังรูปที่ 2.3

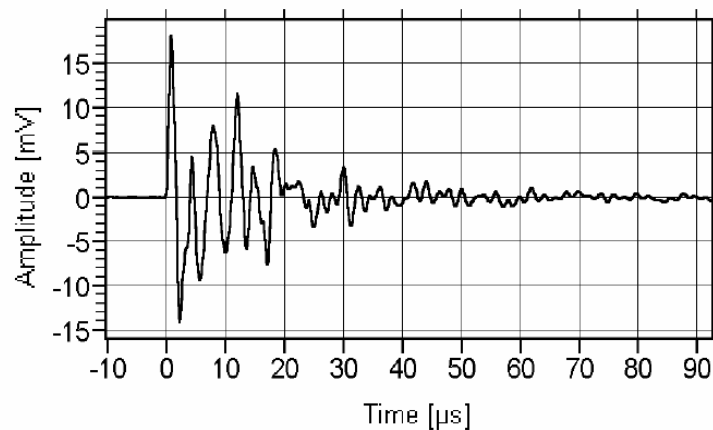


รูปที่ 2.3 การตรวจจับคลื่นอะคูสติก

สัญญาณอะคูสติกพื้นฐานสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ ดังต่อไปนี้

ก. สัญญาณอะคูสติกแบบไม่ต่อเนื่อง (Burst Acoustic Emission)

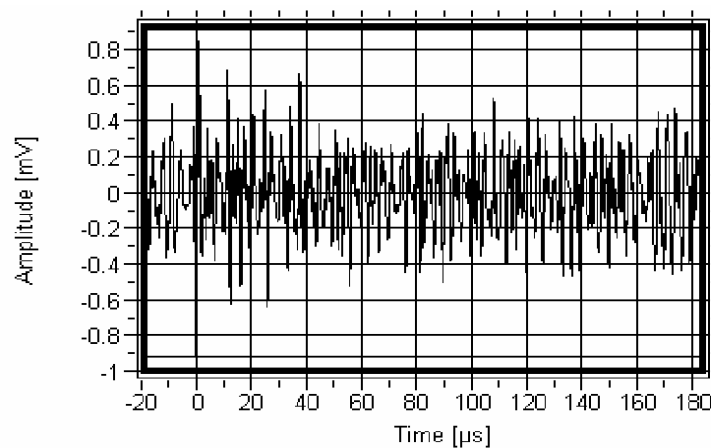
สัญญาณอะคูสติกแบบไม่ต่อเนื่อง หมายถึง สัญญาณอะคูสติกที่สามารถแยกแยะจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณได้ โดยทั่วไปสัญญาณอะคูสติกแบบไม่ต่อเนื่องมักถูกตรวจพบกับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายในงานตรวจสอบการกัดกร่อน (Corrosion) ตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมแบบจุด (Spot Welding) หรือการแตกร้าวของวัสดุ (Crack) เป็นต้น ซึ่งมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สัญญาณอะคูสติกแบบไม่ต่อเนื่อง

ข. สัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่อง (Continuous Acoustic Emission)

สัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่อง หมายถึง สัญญาณอะคูสติกที่ไม่สามารถระบุ หรือกำหนดจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดของสัญญาณได้ โดยทั่วไปลักษณะของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบนี้เป็นลักษณะแหล่งพลังงานเสมือน (Pseudo Source) เช่น การร้าวซึมของแก๊สในภาชนะทนแรงดันสูง การร้าวของของไหล ในท่อและวาล์ว คาวีเตชัน ความเสียดทาน การเรียงตัวในโดเมนแม่เหล็ก การกลายเป็นของเหลว การแข็งตัว และการเปลี่ยนแปลงเฟสในสภาพของแข็ง เป็นต้น การปลดปล่อยของสัญญาณอะคูสติกแบบนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่อง

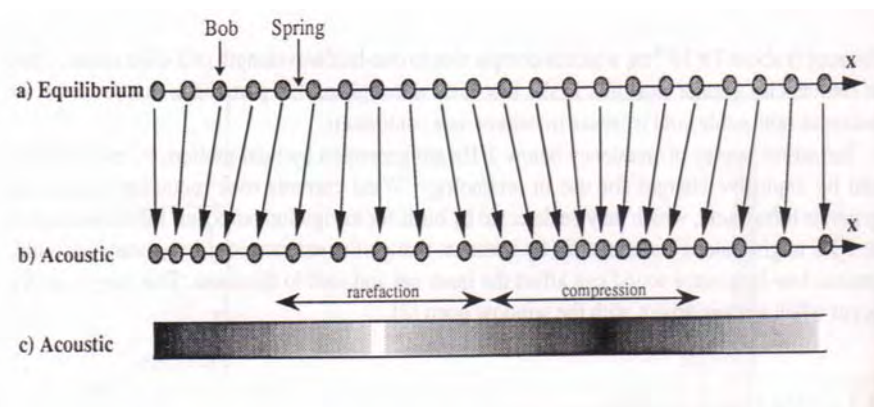
2.4.4 คุณสมบัติของคลื่น

โดยทั่วไปคลื่นมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน คลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกจะแพร่กระจายออกไปในทุกทิศทางรอบจุดกำเนิด เปรียบได้กับคลื่นน้ำระหว่างยอดคลื่นแต่ละยอดวิ่งตามกันไป หากเป็นคลื่นในตัวกลางที่ไม่มีขอบเขต (ตัวกลางอิสระ) หรือคลื่นเสียงที่เดินทางในอากาศจะมีระยะยอดคลื่น

แต่ละยอดหรือความยาวคลื่น ที่มีค่าคงที่สม่ำเสมอแต่คลื่นอะคูสติกจะมีความซับซ้อนกว่าเพราะตัวกลางเป็นของแข็งเมื่อพบรอยต่อของพื้นผิวก็จะมีการหักเหและสะท้อนกลับของคลื่น และของแข็งจะมีความต้านทานต่อแรงเฉือนด้วยซึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลื่นอีกด้วย รูปแบบคลื่นคือการเคลื่อนที่ของจุดต่างๆ บนคลื่นและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีลักษณะที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลต่อความเร็วของคลื่นเสียง โดยที่คลื่นเสียงจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ คลื่นตามยาว คลื่นตามขวาง และคลื่นที่ผิว

ก. คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave)

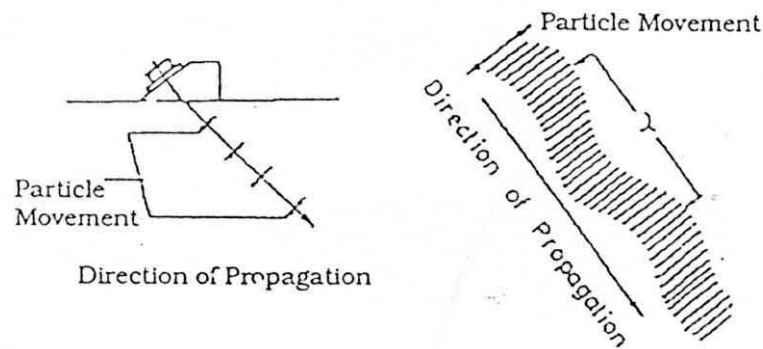
กรณีที่การเดินทางของคลื่นเสียงในอากาศ การเคลื่อนตัวของคลื่นจะเคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกับการสั่นสะเทือนของโมเลกุลของตัวกลางดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นแบบจำลองแสดงการสั่นสะเทือนของโมเลกุลที่มีการอัดตัวและขยายตัวในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.6 คลื่นตามยาว

ข. คลื่นตามขวาง (Transverse Wave)

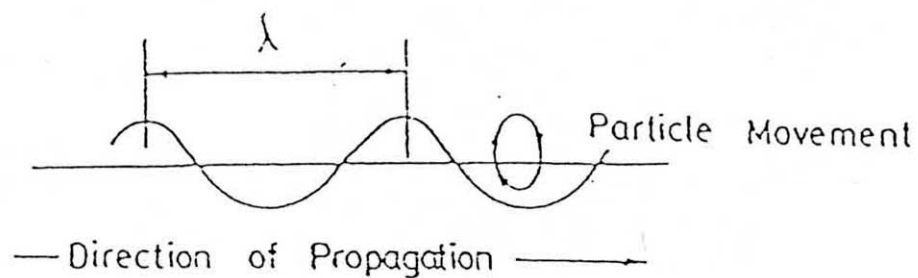
หากการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลางอิสระ หน้าคลื่นเป็นระนาบและไม่มีขอบเขตจำกัดอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นแบบอัดและขยายในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง แต่หากคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ไม่เป็นอิสระ เช่น ของเหลว หรือ ของแข็ง อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกันกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ดังรูปที่ 2.7 เนื่องจากตัวกลางเหล่านี้นี้มีความต้านทานต่อแรงเฉือนเป็นผลทำให้เกิดการเดินทางอย่างมีขอบเขตจำกัด คลื่นตามขวางนั้นจะมีอยู่ในเฉพาะในของแข็งจะไม่ปรากฏในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ และมีความเร็วคลื่นน้อยกว่าคลื่นตามยาว



รูปที่ 2.7 คลื่นตามขวาง

ค. คลื่นที่ผิว (Surface Wave)

คลื่นที่ผิวเป็นคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่คลื่นตามยาวจากแหล่งกำเนิดเดินทางมาถึงบนผิวของตัวกลางแล้วเปลี่ยนเป็นคลื่นตามขวางเดินทางไปบนพื้นผิวของตัวกลางนั้นดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 คลื่นที่ผิว

2.4.5 ขนาดของสัญญาณอะคูสติก

สัญญาณอะคูสติกส่วนใหญ่ที่ได้มีการศึกษานั้นจะมีขนาดของสัญญาณที่ต่ำมาก ซึ่งจำเป็นจะต้องมีหัวตรวจสอบที่มีความไว และการขยายสัญญาณที่สูงสำหรับการตรวจจับอย่างมีประสิทธิภาพ การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วที่ต่ำถึง 10^{-12} นิ้ว สามารถที่จะถูกตรวจจับได้โดยการใช้หัวตรวจสอบที่มีความไวโดยทั่ว ๆ ไปได้ แต่กลไกของแหล่งกำเนิดบางอย่างนั้นจะให้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วงกว้างในหน่วยไมโครโวลต์ จนถึง หน่วยโวลต์ ดังนั้นเพื่อที่จะอธิบายถึงการเกิดช่วงที่กว้างของสัญญาณให้อยู่ในทิศทางเดียวกัน ทางอุตสาหกรรมจึงกำหนดให้สัญญาณอะคูสติกแสดงแอมพลิจูดในหน่วย เดซิเบล (dB) ซึ่งหน่วย เดซิเบล จะใช้เป็นมาตรฐานทางอุตสาหกรรมที่ง่ายต่อการอธิบายถึงแอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติกให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยการเปรียบเทียบของหน่วย มิลลิโวลต์ กับหน่วยเดซิเบล จะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณในหน่วย มิลลิโวลต์ กับ หน่วยเดซิเบล

แอมพลิจูดที่วัดจากสัญญาณขาเข้าของอุปกรณ์ขยาย สัญญาณเบื้องต้นในหน่วย มิลลิโวลต์	แอมพลิจูด ในหน่วย เดซิเบล (dB)
1	0
10	20
100	40
1,000	60
10,000	80
100,000	100

ซึ่งสมการสำหรับการคำนวณค่าของ dB คือ

$$dB = 20 \log\left(\frac{V_{in}}{V_{ref}}\right) \quad (2.6)$$

โดยที่ V^{ref} คือ ระดับโวลต์อ้างอิง ซึ่งกำหนดให้เป็น 1 มิลลิโวลต์ที่สัญญาณขาเข้าของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น

2.4.6 ความเร็วของคลื่นเสียง

ตัวกลางที่คลื่นเสียงผ่านแต่ละชนิดจะมีความเร็วที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและชนิดของคลื่นเสียงดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าคลื่นตามยาว คลื่นตามขวางและคลื่นที่ผิวมีความเร็วสูงเรียงตามลำดับความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$V_s = \lambda \times f \quad (2.7)$$

เมื่อ V_s = ความเร็วคลื่นเสียง หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
 λ = ความยาวคลื่น หน่วยเป็นเมตร
 f = ความถี่ หน่วยเป็นครั้งต่อวินาที หรือ Hz

ในตารางที่2.2 จะแสดงความเร็วของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 แสดงความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง

วัสดุ	ความเร็วคลื่นตามยาว (m/s)	ความเร็วคลื่นตามขวาง(m/s)
เหล็กกล้า	5900	3230
เหล็กหล่อ	4600	2160-2550
ทองแดง	4700	2260
นิกเกิล	5600-5894	2960-3219
อลูมิเนียม	6300	3080
ทองเหลือง	3800-4400	2050-2120
น้ำ (20°C)	1480	-
อากาศ	340	-
กระจกอินทรีซ์	2720	1460
ดีบุก	3210	1530
ตะกั่ว	2160	700
สังกะสี	4120	2350

2.4.7 แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกจากการรั่วของท่อ [11]

สาเหตุที่ทำให้เกิดสัญญาณอะคูสติกจากการรั่วของท่อ (Leak Noise) คือ การผันแปรของความดันในระบบซึ่งก็คือการเกิด Turbulence ของของไหล อันเป็นผลมาจากความไม่มีเสถียรภาพในการไหลของของของไหลประเภท ไอ น้ำ อากาศ และก๊าซต่างๆ ตรงบริเวณรอยรั่วด้านความดันขาออกของท่อ ถ้าปราศจากซึ่งการไหลแบบ Turbulence ก็จะไม่มีความสัญญาณจากการรั่วนี้ โดยการเกิด Turbulence สามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนของ Inertial Effect ต่อความหนืด หรือที่ถูกรเรียกว่า Reynolds Number (Re) โดยการไหลผ่านรูทรงกระบอกเป็นไปตามสมการที่ 2.1 ซึ่งได้ถูกกำหนดไว้ว่า Reynolds Number ระหว่าง 1000 ถึง 10000 จะสามารถประมาณการรั่วด้วยสัญญาณอะคูสติกได้ โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q_v) สามารถคำนวณได้จากสูตรของ Poiseuille ดังสมการที่ 2.8

$$Q_v = \frac{\text{Pr}^4}{8L\eta} \quad (2.8)$$

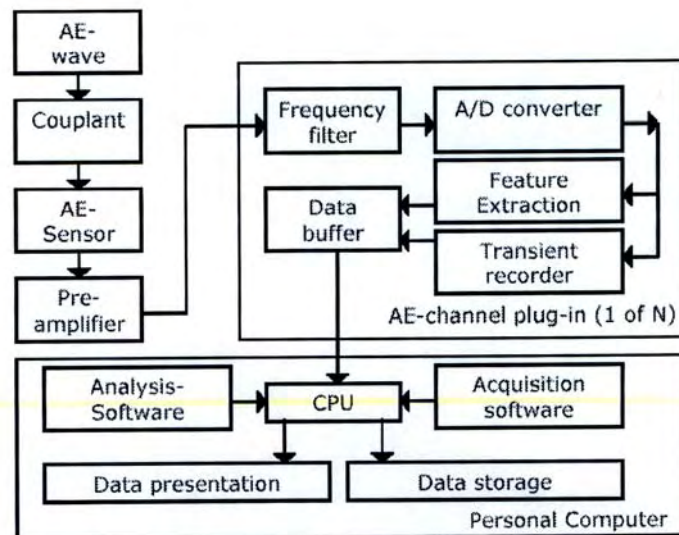
เมื่อ P คือ ความดันแตกต่างที่คร่อมทั้งสองด้านของรูรั่วซึ่งยาว L และมีรัศมี r ในกรณีการรั่วของก๊าซจากท่อ สัญญาณอะคูสติกที่เกิดจากการรั่วจะเป็น แบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถตรวจจับ ได้ด้วยระบบ

อะคูสติกอิมิชันจะมีความเด่นชัดที่ด้านความดันต่ำของท่อคือด้านผิวนอกท่อ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะการที่ก๊าซไหลจากด้านที่มีความดันสูงผ่านรูรั่วไปยังด้านที่มีความดันต่ำกว่าจะทำให้ Turbulence เกิดบริเวณด้านความดันขาออกหรือบริเวณที่มีความดันต่ำ

สำหรับสาเหตุที่ทำให้เกิดสัญญาณอะคูสติกจากการรั่วของท่อในกรณีของไหลเป็นของเหลว คือ การเกิดคาวิเทชัน (Cavitation) โดยสัญญาณอะคูสติกจะเกิดจากการที่ของเหลวบางส่วนเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอหรือฟอง จากนั้นฟองเหล่านี้มีการระเบิดหรือยุบตัวลงกลับกลายเป็นของเหลวเดิม โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคาวิเทชันจะไม่ขออธิบายในที่นี้ เนื่องจากขอบเขตของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การรั่วของท่อจากของไหลที่เป็นก๊าซหรืออากาศ

2.4.8 ระบบการตรวจสอบด้วยอะคูสติกอิมิชัน

การตรวจสอบโดยใช้คลื่นอะคูสติก เป็นวิธีที่ตรวจสอบได้เฉพาะในขณะที่ชิ้นงานกำลังเกิดความเสียหายเช่น ในขณะที่เกิดการแตกของชิ้นงาน หรือในขณะที่ชิ้นงานถูกแรงกระทำจนถึงช่วงการแปรรูปถาวร คือ เปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติก เป็นต้น ในขณะที่ชิ้นงานกำลังเกิดความเสียหายจะปลดปล่อยพลังงานกลในรูปของคลื่นเสียงออกมา พลังงานกลนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงระบบการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้ดังรูปที่ 2.9



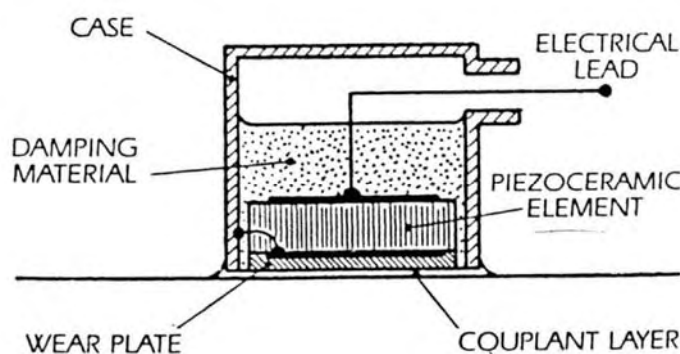
รูปที่ 2.9 ระบบการตรวจสอบด้วยสัญญาณอะคูสติก

ซึ่งระบบการตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

ก. หัวรับสัญญาณ (Sensor or Transducer)

อุปกรณ์ชนิดนี้จะเป็นตัวรับสัญญาณ เพื่อตรวจจับคลื่นสัญญาณอะคูสติกและทำหน้าที่แปลงสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ได้เป็นคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยหัวรับสัญญาณสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดตามวิธีการวัด คือ

1. **หัวรับสัญญาณอิเล็กโตรแมกเนติก (Electromagnetic Transducer)** เป็นหัวรับสัญญาณแบบไม่ต้องสัมผัสชิ้นงานซึ่งใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดเหนี่ยวนำกระแสไหลวน เมื่อพื้นผิวมีการขยับเคลื่อนที่ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง อิมพีแดนซ์ ซึ่งตรวจวัดได้ด้วยวงจรบริดจ์อิมพีแดนซ์
2. **หัวรับสัญญาณคาปาซิแตนซ์ (Capacitance Transducer)** เป็นหัวรับสัญญาณแบบไม่ต้องสัมผัสกับผิวชิ้นงานอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้ค่าความจุไฟฟ้าของช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนที่มีความไวของหัวรับสัญญาณกับพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อพื้นผิวมีการขยับเคลื่อนที่ค่าความจุไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนไปซึ่งตรวจวัดได้ด้วยบริดจ์ความจุไฟฟ้า
3. **หัวรับสัญญาณเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer)** ใช้หลักชนิดเดียวกันกับควอตซ์ หรือใช้วัสดุเซรามิกส์ ที่เรียกว่า เฟอโรอิเล็กทริก (Ferroelectric) เช่น ตะกั่ว ซิรอนเกต-ไททาเนต (Lead Zirconate-Titanate: PZT) โดยให้ได้รับสนามไฟฟ้าความเข้มสูงกับเพียโซอิเล็กทริก-ทรานสดิวเซอร์ เมื่อผลึกควอตซ์เกิดการสั่นสะเทือนก็จะเกิดประจุไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์ Piezoelectricity นั่นคือ การเกิดขึ้นของประจุทางไฟฟ้าซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปทางกลของวัสดุ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ย้อนกลับได้เช่นกัน นั่นคือเมื่อทำการจ่ายประจุไฟฟ้าให้กับวัสดุ วัสดุก็จะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เช่นกัน ซึ่ง Piezoelectricity เป็นปรากฏการณ์เฉพาะที่มีอยู่ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเท่านั้นหัวรับสัญญาณเพียโซอิเล็กทริก แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของหัวรับสัญญาณเพียโซอิเล็กทริก

ซึ่งหัวรับสัญญาณอะคูสติกนี้จะมีชนิดของการตอบสนองต่อความถี่ของสัญญาณที่ทำการตรวจวัดอยู่สองชนิด ดังรูป 2.11 คือ

- แบบ **Resonant** เป็นชนิดของหัวรับสัญญาณที่มีการตอบสนองต่อสัญญาณอะคูสติกเฉพาะช่วงความถี่หนึ่งๆ ซึ่งเป็นช่วงแคบๆ ได้ดีที่สุด

- แบบ **Broadband** เป็นชนิดของหัวรับสัญญาณที่มีการตอบสนองต่อสัญญาณอะคูสติกในช่วงความถี่กว้าง ๆ ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่ต่างๆ ในช่วงนั้นๆ จะมีการตอบสนองที่ไม่ต่างกันมากนัก



(ก) แบบ Broadband

(ข) แบบ Resonant

รูปที่ 2.11 ชนิดของหัวรับสัญญาณอะคูสติก

ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกหัวรับสัญญาณเพื่อการใช้งานด้านต่าง ๆ

1. ช่วงความถี่ในการใช้งาน เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดโดยจะต้องพิจารณาว่าประเภทของงาน หรือ ลักษณะของสัญญาณที่ต้องการทำการตรวจจับนั้นมีความถี่สัญญาณอยู่ในช่วงความถี่เท่าไร เพื่อมาทำการเลือกหัวรับสัญญาณที่ตอบสนองต่อความถี่ในช่วงนั้นมากที่สุด ซึ่งจะทำให้การตรวจจับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2. ความไวในการตอบสนอง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมสำหรับงานจะต้องคำนึงถึงความไวของหัวรับสัญญาณที่ว่าสามารถตรวจจับสัญญาณอะคูสติกและแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ดีเพียงใด หากเลือกหัวรับสัญญาณที่มีความไวต่ำในงานบางประเภทก็จะทำให้การวิเคราะห์ผลเกิดความผิดพลาดหรือมีประสิทธิภาพต่ำได้ โดยความไวนี้จะมีค่าคงที่ไม่เกี่ยวกับการเลือกช่วงความถี่ใช้งาน

3. ขนาดของหัวรับสัญญาณ โดยจะต้องคำนึงถึงขนาดของพื้นที่ หรือ โครงสร้างนั้นๆ ว่ามีขนาดเท่าไร เพื่อการเลือกขนาดของหัวรับสัญญาณให้มีความเหมาะสมสำหรับการติดตั้งบนวัสดุหรือโครงสร้างที่ต้องการตรวจสอบ

ข. สารช่วยสัมผัส (Couplant)

สารช่วยสัมผัส คือ สารประกอบที่มีความจำเป็นในการติดตั้ง เพื่อป้องกันการเกิดช่องว่างของอากาศ (Air Gap) ระหว่างหัวรับสัญญาณกับชิ้นงานหรือ โครงสร้าง ทำให้การส่งผ่านของพลังงานคลื่นอะคูสติกจากชิ้นงานสู่หัวรับสัญญาณเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวอย่างของสารช่วยสัมผัสที่ใช้ในระบบอะคูสติกอิมมersion เช่น กาว ซิลิโคน สารช่วยสัมผัสที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิก และปิโตรเลียม-เจล เป็นต้น โดยคุณสมบัติเฉพาะที่จำเป็นของสารช่วยสัมผัสจะต้องมีการส่งผ่านพลังงานคลื่นอะคูสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องเป็นสารที่มีลักษณะเปียกและต้องมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกล่าวคือ จะต้องไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ กับผิวทดสอบ หรือหัวรับสัญญาณ นอกจากนี้จะต้องไม่ทำให้เกิดการไหลบนพื้นผิวเมื่อทำการวางวัสดุทดสอบในแนวดิ่ง หรือที่อุณหภูมิสูงและจะต้องไม่เกิดการชะล้างเมื่อถูกฝนได้สุดท้ายจะต้องมีความสามารถในการขจัดออกได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ เมื่อต้องการเคลื่อนย้าย หรือ เปลี่ยนตำแหน่งของการติดตั้งหัวรับสัญญาณ จะต้องสามารถทำได้ง่ายไม่เกิดการเกาะติดอย่างถาวรบนวัสดุนั้นๆ

ค. อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น (Preamplifier)

อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น ทำหน้าที่ในการขยายขนาดของสัญญาณหรือค่าแรงดัน (Voltage) ของสัญญาณ ให้เกิดความเหมาะสมสำหรับการวัดหรือการส่งผ่านต่อไป โดยอัตราการขยาย (Gain) สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วน หรือในหน่วยของเดซิเบล (dB) ก็ได้ โดยในหน่วย เดซิเบล สามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.9)$$

$$dB_{AE} = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.10)$$

โดย V_{out} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากผ่านการขยาย

V_{in} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนผ่านการขยาย

ในการตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชันนั้น สัญญาณอะคูสติกที่ได้จากหัวรับสัญญาณซึ่งถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วนั้น โดยปกติจะเป็นแรงดันไฟฟ้าระดับไมโครโวลต์(μV) ถึง มิลลิโวลต์ (mV) สัญญาณนี้จะผ่านเข้าเครื่องขยายสัญญาณเบื้องต้นและจะถูกขยายเพิ่มด้วยอัตรา 40 ถึง 100 เดซิเบล(10^2 ถึง 10^5 เท่า) โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณปฐมภูมินี้จะวางในตำแหน่งที่ใกล้กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้โดยในงานตรวจสอบทั่วไปจะใช้การขยายสัญญาณขึ้นเป็นขนาดประมาณ 40 เดซิเบล โดยในอุปกรณ์นี้จะมีส่วนที่เป็นการกรองสัญญาณรวมอยู่ด้วย ซึ่งอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นแสดง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์ขยายสัญญาณปฐมภูมิ

ตารางที่ 2.3 หน่วยเดซิเบล กับ อัตราส่วนของแอมพลิจูดของสัญญาณ

หน่วยเดซิเบล กับ อัตราส่วนของแอมพลิจูดของสัญญาณ			
เดซิเบล (dB)	อัตราส่วนของสัญญาณ	เดซิเบล (dB)	อัตราส่วนของสัญญาณ
0	1.00 : 1	11	3.55 : 1
0.5	1.06 : 1	12	3.98 : 1
1	1.12 : 1	13	4.47 : 1
2	1.26 : 1	14	5.01 : 1
3	1.41 : 1	15	5.62 : 1
4	1.58 : 1	16	6.31 : 1
5	1.78 : 1	17	7.08 : 1
6	2.00 : 1	18	7.94 : 1
7	2.24 : 1	19	8.91 : 1
8	2.51 : 1	20	10.00 : 1
9	2.82 : 1	40	100.00 : 1
10	3.16 : 1	60	1000.00 : 1

ข้อมูลจากตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณในหน่วย เดซิเบล กับ อัตราส่วนของสัญญาณขาออกและขาเข้า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราขยายของสัญญาณในงานตรวจสอบต่างๆ ไปจะอยู่ที่ 40 dB ซึ่งสามารถจะปรับเปลี่ยนได้ตามฟังก์ชันของวงจรการขยายนั้น เพื่อให้มีความเหมาะสมกับประเภทของงาน และขนาดของสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบนั้นๆ ซึ่งการขยายสัญญาณในวิธีอะคูสติกอิมิชชันนี้ จะมีส่วนการขยายสองส่วนคือ การขยายเบื้องต้นและการขยายหลัก โดยการขยายหลักจะเป็นการขยายโดยใช้โปรแกรมในเครื่องประมวลผลสัญญาณ

ง. อุปกรณ์กรองสัญญาณ (Filter)

ในระบบการตรวจวัดนั้นอาจมีสัญญาณรบกวน (Noise) ทั้งสัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ และสัญญาณทางจักรกลเนื่องจากสภาวะแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณพิเศษที่ตัดสัญญาณอื่นๆ ที่ไม่จำเป็นออกไป อุปกรณ์กรองสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งแบบอนาล็อก (Analog) และแบบดิจิทัล (Digital) สำหรับอุปกรณ์กรองสัญญาณแบบอนาล็อกจะติดตั้งอยู่ภายในอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น ส่วนอุปกรณ์กรองสัญญาณแบบดิจิทัลจะทำการกรองสัญญาณโดยใช้โปรแกรมภายในเครื่องประมวลผล AE

จ. อุปกรณ์รับและประมวลผลสัญญาณ (Discriminator)

คลื่นสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นนั้น จะป้อนเข้าสู่อุปกรณ์อนาล็อกโดยตรงและส่วนหนึ่งจะผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D) ที่จะย้อนเข้าสู่อุปกรณ์จัดการสัญญาณ อุปกรณ์นับ (Counter) หรืออุปกรณ์จัดการข่าวสาร (Information Processing) อื่นๆ ต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์ในการประมวลผลดังนี้

- LOCAN 320

เป็นเครื่องประมวลผลของสัญญาณอะคูสติกที่แสดง ค่าตัวแปรทางอะคูสติกต่างๆ ที่สำคัญ โดยจะแสดงออกมาในรูปของตัวเลข และ กราฟความสัมพันธ์แบบต่างๆ ซึ่งเครื่องประมวลผลนี้ยังสามารถวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกได้อีกด้วย



รูปที่ 2.13 เครื่อง LOCAN 320

- เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyser)

เป็นเครื่องแสดงคุณลักษณะของสัญญาณอะคูสติกในรูปของโดเมนเวลาและโดเมนความถี่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่างๆ สำหรับงานวิจัย



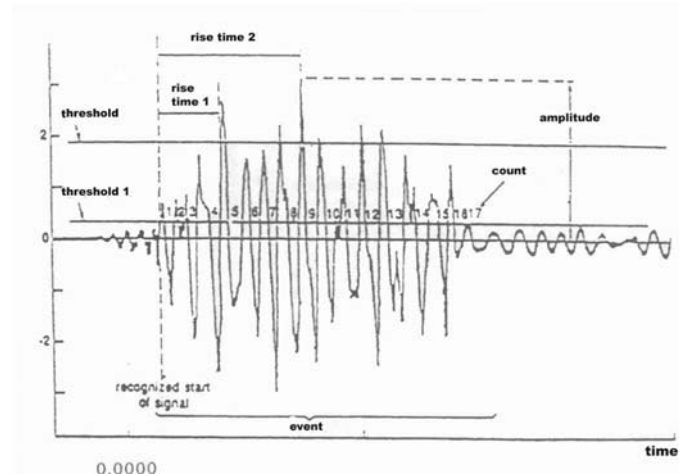
รูปที่ 2.14 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

2.4.9 อะคูสติกพารามิเตอร์ (AE Parameter)

เมื่อได้รับสัญญาณแปลงคลื่นความยืดหยุ่นเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณจะถูกขยาย แสดงผลและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ประมวลผลลักษณะรูปคลื่นอะคูสติกต่างๆ ไปสู่สัญญาณอะคูสติกที่ได้จากระบบการตรวจสอบอะคูสติกอิมิชชันจะบ่งถึงแหล่งกำเนิดและความสำคัญตลอดจนคุณลักษณะของคลื่นอะคูสติกโดยมีการแสดงสาระสำคัญและแปลความหมายสัญญาณอะคูสติกออกมาในรูปตัวแปรที่เป็นปริมาณสเกลาร์ (Scalar) เรียกว่า อะคูสติกพารามิเตอร์ ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าวัสดุสามารถปล่อยสัญญาณอะคูสติกแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ การปล่อยคลื่นอะคูสติกแบบเป็นไปอย่างต่อเนื่อง (Continuous Emission) และเป็นการปล่อยคลื่นอย่างเป็นช่วง (Burst Emission) ดังนั้นการประมวลผลอะคูสติกพารามิเตอร์จึงสามารถแบ่งออกได้ตามชนิดของสัญญาณอะคูสติกดังนี้

ก. สัญญาณอะคูสติกแบบไม่ต่อเนื่อง

รูปแบบของสัญญาณอะคูสติกในโดเมนเวลาจะแสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งสัญญาณที่ได้รับจะบ่งถึงแหล่งกำเนิดและความสำคัญตลอดจนคุณลักษณะของคลื่นอะคูสติก แต่เนื่องจากคลื่นหรือสัญญาณรบกวน (Noise) การวิเคราะห์และการประเมินผลสัญญาณจึงต้องมีการกำหนดค่าจำกัดเริ่มต้น (Threshold) ของสัญญาณเพื่อให้สามารถตรวจวัดข้อมูลได้ถูกต้องมากขึ้นและเพื่อเป็นการกำจัดสัญญาณรบกวนในระบบอีกด้วย ซึ่งคุณลักษณะของสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลมีตัวแปรต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.15 ลักษณะของรูปคลื่นและอะคูสติกพารามิเตอร์ที่สำคัญ

- **AE Count (or Ringdown Count)** คือ จำนวนครั้งที่สัญญาณคลื่นอะคูสติกมีขนาดสูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น
- **AE Amplitude** คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณคลื่นอะคูสติก
- **AE Rise Time** คือ ระยะเวลาระหว่างช่วงตั้งแต่สัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้นครั้งแรกจนถึงสัญญาณที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด
- **AE Duration Time** คือ ระยะเวลาตั้งแต่สัญญาณแรกที่มีแอมพลิจูดสูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้นจนถึงเวลาของแอมพลิจูดของสัญญาณสุดท้ายที่สูงกว่าค่าจำกัดปิดเริ่ม
- **AE Event** คือ จำนวนครั้งที่เกิดสัญญาณการปล่อยคลื่นอะคูสติก ทั้งนี้โดยไม่ได้คำนึงถึงระยะเวลาในการเกิดสัญญาณ เวลาในการเกิดแอมพลิจูดสูงสุด (Rise Time) หรือคุณลักษณะอื่นๆ
- **AE Energy** คือ พลังงานที่มีในสัญญาณของคลื่นอะคูสติก โดยค่าพลังงานของคลื่นอะคูสติกนี้จะหาได้จากการอินทิเกรตของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พิเศษตามสมการ ซึ่งค่าพลังงาน (U) นี้จะช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีแอมพลิจูดต่ำได้ดี

$$U = \frac{1}{R} \int_0^T V^2(t) dt \quad (2.11)$$

โดยที่ R คือความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์วัด และ V(t) คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ นอกจากพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้แล้ว ยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอยู่อีกมากมาย ซึ่งในขั้นตอนนี้ขอกล่าวไว้เพียงเท่านี้เพื่อความเข้าใจ

ข. สัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่อง

สัญญาณอะคูสติกแบบต่อเนื่องนิยมพิจารณาตัวแปรทางอะคูสติกทั้ง 2 โดเมน คือ ทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ โดยเหตุผลของสัญญาณรบกวนจึงมีการกำหนดค่าจำกัดเริ่มต้น (Threshold) เช่นเดียวกับการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งตัวแปรทางอะคูสติกมีดังนี้

1. โดเมนเวลา

- **Average Signal Level (ASL)** คือ ระดับของสัญญาณอะคูสติกทางโดเมนเวลาโดยเฉลี่ยในหน่วยโวลต์ ซึ่งหาได้จากสูตร

$$ASL_v = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{(t_0+T)} |v(t)| dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |v(i)| \quad (2.12)$$

เมื่อ T คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา t_0 คือ เวลาเริ่มต้น v คือ โวลต์เตจที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาของสัญญาณอะคูสติกและ N คือจำนวนข้อมูลที่ได้จากการสุ่ม
สำหรับระดับสัญญาณเฉลี่ยในหน่วยเดซิเบล (dB)

$$dB_{AE} = 20 \log \frac{ASL_v}{1\mu V} \quad (2.13)$$

- **Energy in Time Domain (AErms)** คือ รากที่สองของค่าสัญญาณทางเวลาเฉลี่ย (Root-Mean-Square) ซึ่งหาได้จากสูตร

$$AErms = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v^2(i)} \quad (2.14)$$

เมื่อ T คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา t_0 คือ เวลาเริ่มต้น v คือ โวลต์เตจที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาของสัญญาณอะคูสติกและ N คือจำนวนข้อมูลที่ได้จากการสุ่มเท่ากับ 401 จุดของสัญญาณอะคูสติกภายในช่วงเวลา T ซึ่งในงานนี้ใช้ T เท่ากับ 381.25 μs

2. โดเมนความถี่

- **AE Amplitude** คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณคลื่นอะคูสติกในโดเมนความถี่

- **Energy in Frequency Domain (AErms)** คือ อินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณในโดเมนเวลา

$$AErms = \sqrt{\frac{1}{F} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(f) df} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v^2(i)} \quad (2.15)$$

เมื่อ F คือ ช่วงความถี่ที่พิจารณา t_0 คือ เวลาเริ่มต้น v คือ โวลต์เตจที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาของสัญญาณอะคูสติก และ N คือจำนวนข้อมูลที่ได้จากการสุ่มเท่ากับ 978 จุดของสัญญาณอะคูสติกภายในช่วงความถี่ F

2.5 การหาตำแหน่งการรั่วของท่อ [12,13]

การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่นของวิธีอะคูสติกอิมิตชันจะแบ่งตามลักษณะของแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกคือ

1. การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่นแบบต่อเนื่อง(Continuous Emission Source Location) เช่นคลื่นที่เกิดจากรอยรั่ว
2. การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่นแบบไม่ต่อเนื่อง(Discrete Emission Source Location) เช่น คลื่นที่เกิดจากรอยแตกร้าวที่กำลังขยายตัวออก

ดังนั้นการหาตำแหน่งการรั่วของท่อจึงเป็นการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่นแบบต่อเนื่องซึ่งหลักการที่ใช้อย่างกว้างขวางและได้ผลในการทดสอบเป็นอย่างดีคือหลักการสหสัมพันธ์สวนทาง(Cross Correlation) เป็นหลักการที่วัดความแตกต่างของเวลา(Time difference) หรือการมาช้าของสัญญาณ(Time delay) ระหว่างคลื่นอะคูสติก 2 คลื่นซึ่งทำได้ทั้งคลื่นที่ไม่ต่อเนื่องหรือคลื่นที่ต่อเนื่องเช่นการรั่ว

2.5.1 หลักการสหสัมพันธ์สวนทาง (Cross Correlation)

ฟังก์ชันสหสัมพันธ์สวนทาง (Cross Correlation function) : $R_{AB}(\tau)$ ของสองฟังก์ชัน $A(t)$ และ $B(t + \tau')$ ในช่วงจำกัดของช่วงเวลาหนึ่งๆจะมีค่าสูงสุด (Peak) ที่ $\tau = \tau'$ โดย $A(t)$ คือฟังก์ชันคงที่ (Arbitrary function) และ τ' เป็นการมาช้าของสัญญาณ $B(t)$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ $A(t)$ วิธีการทางสหสัมพันธ์สวนทาง นำไปหาตำแหน่งของการเกิดคลื่นต่อเนื่องโดยการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ A ที่รับคลื่น $A(t)$ จากแหล่งกำเนิดและหัวตรวจจับสัญญาณ B รับสัญญาณคลื่น $B(t + \tau')$ โดยมีช่วงต่างของสัญญาณ τ' ดังนั้นความแตกต่างของเวลาการกระจายของคลื่นจากแหล่งกำเนิดไปที่หัวตรวจสอบเท่ากับ $\Delta t_{AB} = \tau'$ ซึ่งหาจากค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $R_{AB}(\tau)$

$$R_{AB}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t)B(t+\tau)dt \quad (2.16)$$

โดย T คือช่วงของเวลา

สมการที่ 2.16 ต้องการหาผลลัพธ์ของ $A(t)$ และ $B(t+\tau')$ โดยอินทิเกรตสมการเทียบกับเวลา t ดังนั้นถ้า τ ที่พิจารณาเป็นตัวแปรตาม ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ส่วนทาง: $R_{AB}(\tau_j)$ เป็นฟังก์ชันของ τ และกำหนดให้ τ_j จะได้ $R_{AB}(\tau_j)$ มาจากการอินทิเกรตของ $A(t)B(t)$

ให้ $A(t)$ และ $B(t)$ ถูกแบ่งด้วยช่วงเวลาเล็กๆเท่ากันจำนวน n ช่วงและเท่ากับช่วงเวลา T เมื่อ $t=t_i$ ดังนั้น $A(t)=a_i$, $B(t)=b_i$ และ $i=0,1,2,\dots,n$ ถ้า $B(t)$ มีการมาช้าของสัญญาณ τ' ซึ่งสัมพันธ์กับ $A(t)$ ดังนั้นเมื่อ $j=0,1,2,\dots,n$:

$$R_{AB}(\tau_j) = \sum_{i=0}^n a_i b_{i+j} \quad (2.17)$$

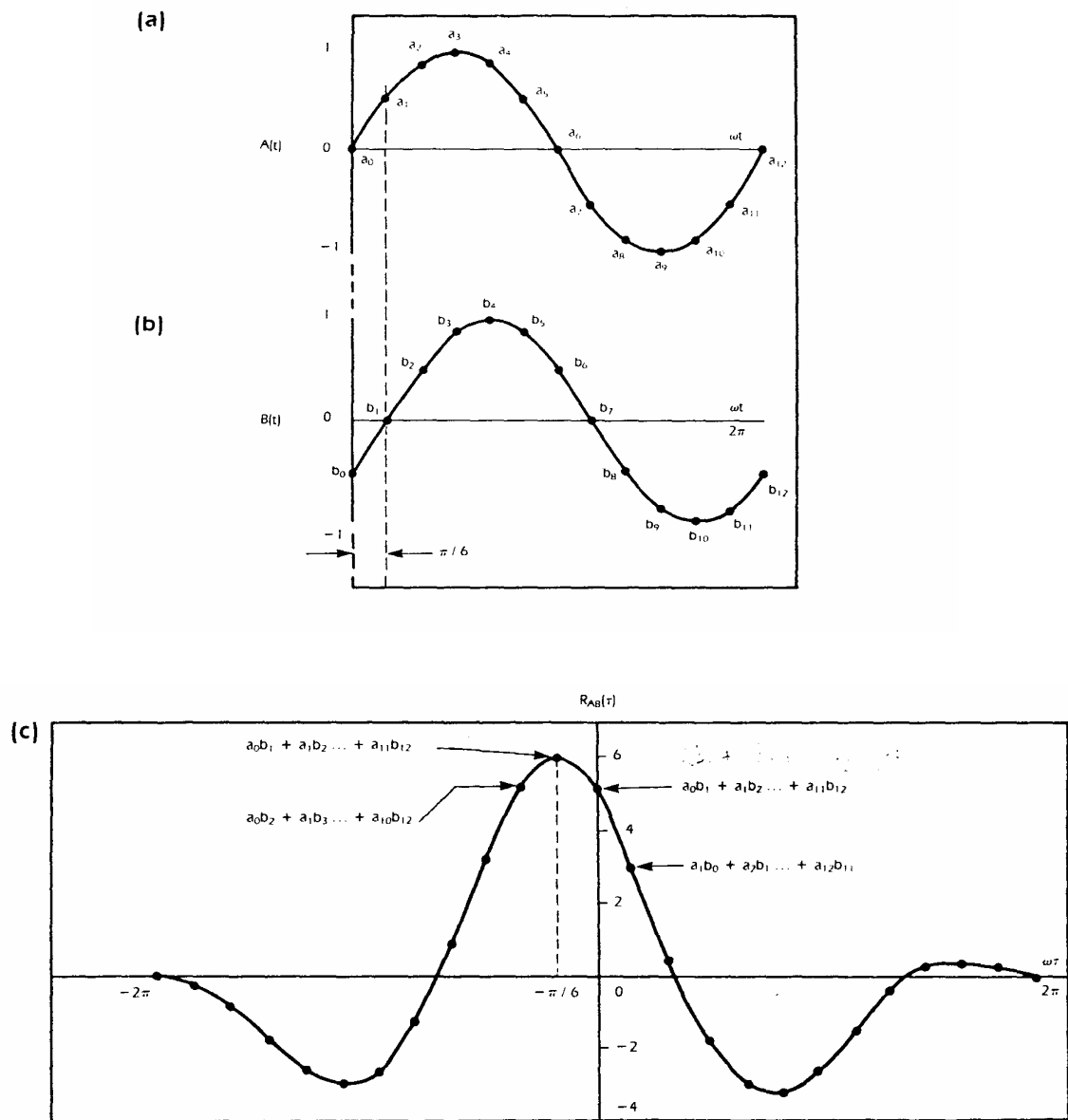
หรือเมื่อ $j=-1,-2,\dots,-n$:

$$R_{AB}(\tau_j) = \sum_{i=0}^n a_i b_{i-j} \quad (2.18)$$

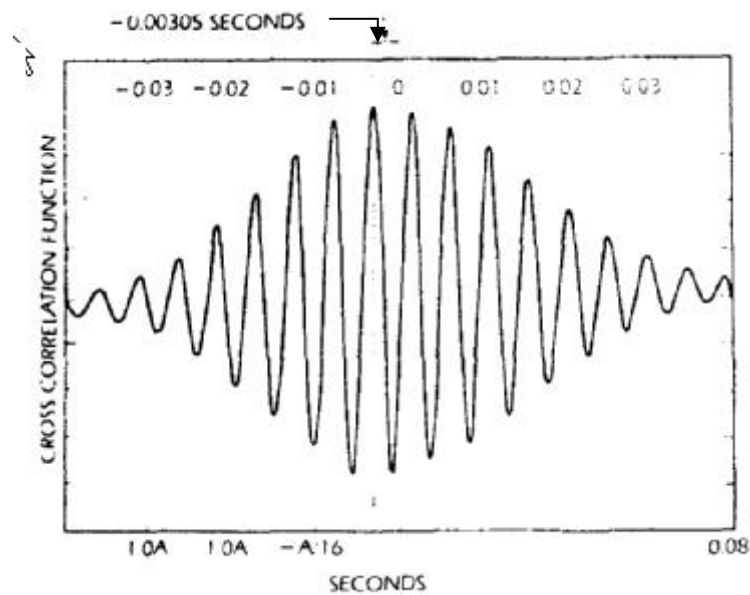
หรือเมื่อ $j=0$

$$R_{AB}(0) = \sum_{i=0}^n a_i b_i \quad (2.19)$$

เช่น สมมติ $A(t)$ และ $B(t)$ เป็น Sinusoidal function ดังนั้น $A(t) = A_0 \sin(\omega t)$ รูปที่ 2.16 a) และ $B(t) = B_0 \sin[\omega t - (\frac{\pi}{6})]$ รูปที่ 2.16 b) แกน ωt ของทั้ง $A(t)$ และ $B(t)$ ถูกแบ่งเป็นช่วงๆเท่ากัน 12 ช่วง $A(t) = a_0, a_1, a_2, \dots, a_{12}$ และ $B(t) = b_0, b_1, b_2, \dots, b_{12}$ ดังนั้นใช้สมการ 2.17 และ 2.18 จะได้ผลลัพธ์ของสหสัมพันธ์ส่วนทางกันที่ $j = -12, -11, \dots, 0, \dots, 11, 12$ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (c)



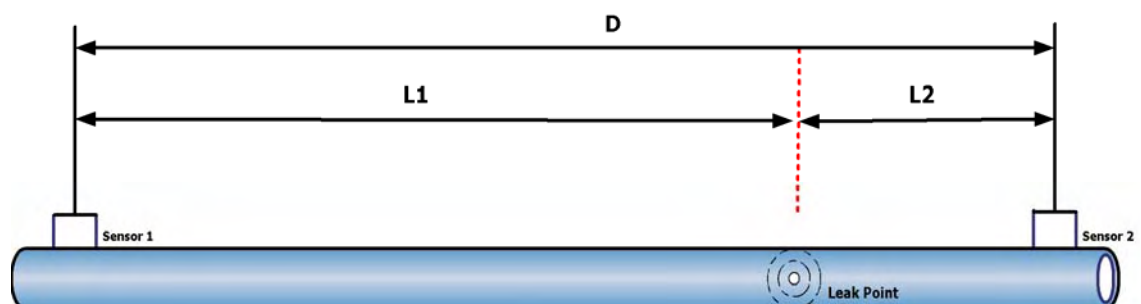
รูปที่ 2.16 (a) sinusoidal function $A(t)$ (b) sinusoidal function $B(t)$ with $-\frac{\pi}{6}$ delay
(c) ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ส่วนทางของ $A(t)$ และ $B(t)$



รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างฟังก์ชันสหสัมพันธ์ส่วนทางของสองฟังก์ชัน

จากรูปที่ 2.17 สัญญาณคลื่นที่ต่อเนื่องตรึงโดยสองหัวตรวจสอบฟังก์ชันสหสัมพันธ์ส่วนทางจะพร้อมฟังก์ชัน τ ในหน่วยวินาทีจาก -0.04 s ถึง $+0.04$ s เป็นช่วงเวลารวม 0.08 s เมื่อ $\tau = -0.00305$ s (-3.05 ms) ค่าสูงสุดของฟังก์ชันสหสัมพันธ์ส่วนทาง คือค่าสูงสุดตามตำแหน่งลูกศร ค่าเวลาแตกต่างคือ -3.05 ms

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคสหสัมพันธ์ส่วนทางในการตรวจสอบการรั่วของของไหลในท่อ โดยการรับสัญญาณคลื่นเสียงจากสัญญาณการรั่วสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 การตรวจสอบหาตำแหน่งรอยรั่วในเส้นท่อ

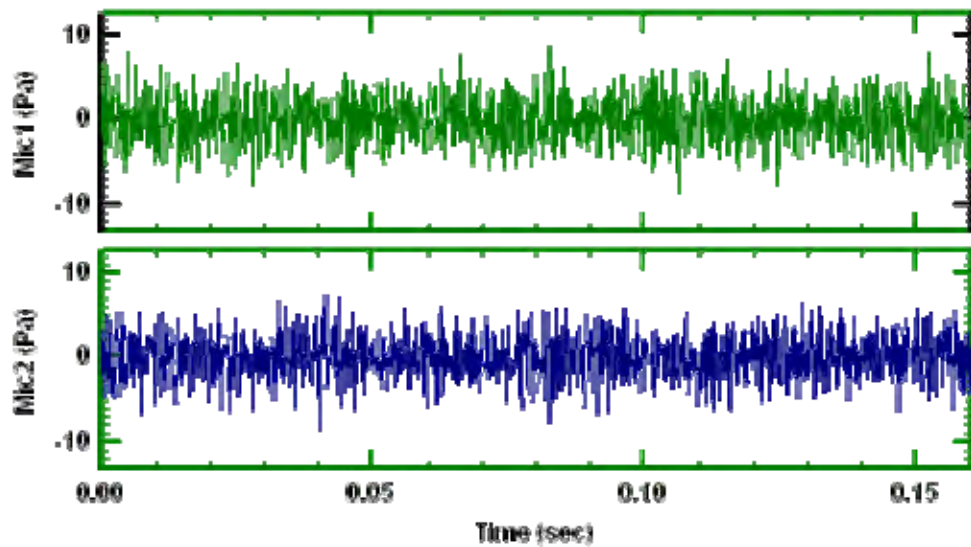
พิจารณาเส้นท่อที่มีของไหลไหลผ่านและติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณสำหรับวัดสัญญาณ AE จำนวน 2 ตัวที่ระยะห่างเท่ากับ D คลื่นเสียงที่เกิดจากรอยรั่วจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นท่อด้วยความเร็วที่ทราบค่า v

(ในทางปฏิบัติต้องทำการปรับเทียบค่าความเร็วนี้ก่อนทำการตรวจหาตำแหน่งรอยร้าว) ค่า v นี้จะขึ้นกับชนิดและขนาดของท่อ ระบบ AE จะทำการตรวจจับคลื่นที่วิ่งจากแหล่งกำเนิดรอยร้าวไปยังหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองแล้วคำนวณหาผลต่างของเวลาที่คลื่นจะวิ่งไปถึงหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองฝั่ง ซึ่งคือค่าของเวลาที่แตกต่าง ($\Delta t_{AB} = \tau'$) ของสัญญาณโดยได้จากการสหสัมพันธ์ส่วนทางกันของสัญญาณทั้งสอง ถ้าตำแหน่งที่เกิดรอยร้าวอยู่ตรงกึ่งกลางของหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสอง ดังนั้นคลื่นเสียงที่วิ่งออกจากรอยร้าวจะวิ่งไปถึงหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองในเวลาเท่ากัน นั่นคือ $\tau' = 0$ หากตำแหน่งที่เกิดรอยร้าวอยู่ห่างจากหัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 และหัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 เป็นระยะทางเท่ากับ $L1$ และ $L2$ ตามลำดับ คลื่นเสียงจะวิ่งไปถึงหัวตรวจจับสัญญาณตัวที่อยู่ใกล้ก่อน จากนั้นถึงระยะเวลาสักครู่หนึ่งจึงวิ่งไปถึงหัวตรวจจับสัญญาณตัวที่อยู่ห่างออกไปเวลาที่แตกต่างกัน (Time delay: τ') ของคลื่นที่วิ่งไปที่หัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองมีค่า จากรูปที่ 2.18

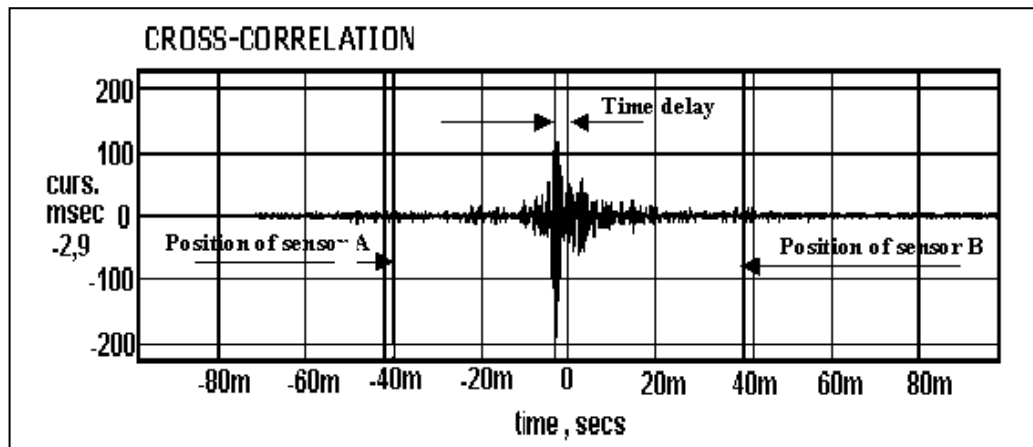
$$\tau' = \frac{(L2 - L1)}{v} \quad (2.20)$$

จากรูป เมื่อแทนค่า $L2 = D - L1$ ในสมการ (2.20) จะได้

$$L1 = \frac{(D - v \cdot \tau')}{2} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างสัญญาณของหัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 (ฟังก์ชัน A(t)) และหัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 (ฟังก์ชัน B(t))



รูปที่ 2.20 การพรีอทฟังก์ชันสหสัมพันธ์สวนทาง

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยได้มีการแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน เรียงเป็นลำดับการดำเนินการคือ

- ขั้นตอนการทดลองเบื้องต้นเพื่อเลือกปัจจัยในการออกแบบการทดลอง ในส่วนการเลือกวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และการประกอบชุดทดลองทั้งในส่วนชุดระบบท่อแรงดันและอุปกรณ์ในส่วนชุดการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ และการเลือกวิธีวัดอัตราการรั่วของท่อ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการทดลองมากที่สุด
- ขั้นตอนการทดลองตรวจวัดสัญญาณรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์เพื่อแสดงความสามารถในการตรวจจับสัญญาณรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ โดยกล่าวถึงวิธีการติดตั้งระบบตรวจวัดการรั่วของท่อ การหาประสิทธิภาพการรับสัญญาณของหัวตรวจจับสัญญาณจากการติดตั้งกับ Sensor guide ลักษณะของสัญญาณรบกวน (Background Noise) ที่เกิดขึ้น การเลือกหัวตรวจจับสัญญาณที่มีความไวต่อการตรวจวัดสัญญาณที่ดีที่สุด การหาตำแหน่งของการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจจับสัญญาณการรั่วที่น้อยที่สุด และเก็บผลการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณอะคูสติกที่สัมพันธ์ กับขนาดของท่อ ขนาดรั่วของท่อและความดันในระบบ และศึกษาสัญญาณที่เกิดจากตำแหน่งการติดตั้งหัวตรวจสอบที่ระยะห่างต่างๆจากรอยรั่ว การหาอัตราการรั่วของท่อที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจสอบได้จากวิธีอะคูสติกอิมพัลส์
- ขั้นตอนการออกแบบและเก็บผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ ขนาดของท่อ ความดันในระบบ และอัตราการรั่วของท่อ ในรูปของสมการทำนายอัตราการรั่ว ด้วยโปรแกรม Minitab
- ขั้นตอนการทดลองหาตำแหน่งการเกิดการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์เป็นสัญญาณคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการใช้หลักการสหสัมพันธ์สวนทาง (Cross Correlation) ซึ่งในรายละเอียดและวิธีการดำเนินการในแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้

3.1 ขั้นตอนการเลือกปัจจัยในการออกแบบการทดลองและการเลือกวิธีวัดอัตราการรั่วของท่อ

การเลือกปัจจัยในการออกแบบการทดลองและการเลือกวิธีวัดอัตราการรั่วของท่อมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อเลือกปัจจัยในการออกแบบการทดลอง ในส่วนการเลือกระบบจำลองการขนถ่ายของไหลผ่านท่อ การเลือกวัสดุท่อ และการประกอบชุดทดลอง ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัย
2. เพื่อเลือกวิธีการตรวจวัดอัตราการรั่วในท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ให้เกิดความเหมาะสมกับการทดลองมากที่สุด

3.1.1 การเลือกระบบจำลองการขนถ่ายของไหลผ่านท่อและวัสดุของท่อ

เนื่องจากในงานที่เกี่ยวข้องกับการขนถ่ายของไหลผ่านท่อโดยทั่วไปมีอยู่หลากหลายซึ่งแสดงว่าของไหลที่เป็นตัวกลางในการขนถ่ายในท่อก็มีอยู่อย่างหลากหลายเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นอยู่ในสถานะของเหลวเช่น ท่อน้ำประปา ท่อน้ำมัน ท่อน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ท่อสารเคมีที่เป็นของเหลว อยู่ในสถานะก๊าซ เช่น ท่อก๊าซธรรมชาติ ท่อลมอัด อยู่ในสถานะผสมเช่น ท่อไอน้ำ และท่อที่นำมาใช้ในการขนถ่ายก็ต้องใช้ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของของไหลเช่น ความสามารถในการทนแรงดัน ทนต่อการกัดกร่อน ดังนั้นวัสดุของท่อที่นำมาใช้จึงขึ้นกับความเหมาะสมกับชนิดการขนถ่ายดังกล่าวที่ผลิตมาจากวัสดุหลายชนิดเช่น ท่อเหล็กหล่อ ท่อเหล็กกล้า ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ท่อเหล็กหล่อท่อพลาสติก ท่อทองแดง เป็นต้น เนื่องจากการทดลองเป็นการตรวจจับสัญญาณการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชั่น ดังนั้นในการทดลองจึงต้องใช้ระบบที่จำลองการขนถ่ายของไหลในท่อรวมถึงเกี่ยวข้องกับความดันในระบบการเลือกระบบเพื่อทดสอบจึงใช้ปัจจัยที่ในการเลือกคือ

- เป็นระบบซึ่งสามารถจำลองสภาวะการไหลของของไหลในท่อและสามารถควบคุมการไหลให้ได้ระดับแรงดันที่ต้องการ
- เป็นระบบที่สามารถจะประกอบติดตั้งให้เกิดความปลอดภัยในขณะที่ทำการทดลองเช่น ท่อ ต้องสามารถทนแรงดันได้มากกว่าค่าแรงดันที่ใช้ในการทดลอง ตัวกลางที่เป็นของไหลต้องไม่ติดไฟ และไม่มีสารเคมีที่อาจเกิดอันตรายต่อผู้ทดลอง
- สอดคล้องกับงบประมาณที่มีอยู่จำกัด

เนื่องจากก่อนการทดลองมีอุปกรณ์สร้างของไหลอยู่แล้วคือเครื่องอัดอากาศซึ่งสามารถจะจำลองการไหลของของไหลในสถานะก๊าซได้ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยทั้ง 3 ข้อข้างต้นส่วนท่อควรเป็นท่อที่ทำได้ง่าย นิยมใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ทนแรงดันได้ดี และวัสดุเป็นตัวกลางที่คลื่นเสียงสามารถจะเคลื่อนที่ได้ดี จึงสรุปได้ว่าระบบที่ใช้จะใช้อากาศเป็นตัวกลางให้เกิดการไหลภายในท่อโดยอาศัยเครื่องอัดอากาศที่สามารถสร้างแรงอัดอากาศได้ตามต้องการและท่อที่ใช้เป็นท่อเหล็กกล้าไร้ตะเข็บ Schedule 40 ซึ่งเป็นท่อมาตรฐานทนความดันที่นิยมใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้ใช้ 3 ขนาด คือ 1 นิ้ว , 2 นิ้ว , 3 นิ้ว ซึ่งมีความหนาของผนังท่อ 0.179, 0.218 และ 0.3 นิ้ว ตามลำดับ และมีความยาวท่อนละ 6 เมตร



รูปที่ 3.1 ท่อทั้ง 3 ขนาดที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.2 ส่วนประกอบต่างๆของชุดระบบท่อแรงดันประกอบด้วย

3.1.2.1 เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor)

เครื่องอัดอากาศเป็นเครื่องที่สร้างอากาศให้เกิดการไหลภายในท่อ โดยเป็นเครื่องอัดอากาศแบบ 2 สูบ (Reciprocation Compressor) ขนาด 0.5 แรงม้า มีความจุ 88 ลิตร สามารถสร้างแรงดันใช้งานได้ในช่วง 0-150 psi ลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดอากาศที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.2.2 เรกูเลเตอร์และตัวกรองอากาศ (Regulator and Filter)

เรกูเลเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อคงความดันด้านออกให้มีค่าคงที่ตามต้องการเนื่องจากอากาศที่ออกจากเครื่องอัดอากาศนั้นจะมีความดันลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความดันในระบบมีค่าไม่คงที่ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมความดันในการทดลองได้ โดยเรกูเลเตอร์ที่ใช้มีย่านการใช้งานอยู่ที่ในช่วง 0-150 psi ส่วนตัวกรองอากาศเป็นอุปกรณ์ที่กรองฝุ่นละอองไอน้ำที่ออกมาจากปั๊มลม ทำให้อากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบการวัดเป็นอากาศที่บริสุทธิ์ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้เรกูเลเตอร์ที่มีตัวกรองอากาศในตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เรกูเลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.2.3 รูรั่วจำลอง (Simulate leak plug)

เนื่องจากการทดลองต้องการสร้างรอยรั่วจำลองขึ้นมาในท่อซึ่งไม่สามารถเจาะที่ผนังท่อได้โดยตรงเพราะจะไม่สามารถปรับเปลี่ยนให้สามารถทำการทดลองกับรูรั่วได้หลายๆขนาดหรือทำได้ก็เป็นการสิ้นเปลืองที่ต้องใช้ท่อหลายเส้นมาทำการทดลองในแต่ละขนาดรูรั่ว ดังนั้นจำเป็นต้องใช้รูรั่วจำลองซึ่งต้องเป็นเหล็กชนิดเดียวกับท่อด้วยและสามารถจะเปลี่ยนเข้าออกกับผนังท่อได้หลายขนาดเพื่อทดสอบที่สถานะต่างๆดังนั้นจึงใช้เหล็กเกลียวตัวหนอนขนาด 8 มิลลิเมตร ความหนาของเนื้อเหล็ก 5 มิลลิเมตรแต่กลึงให้เป็นรูกลึงได้ความหนาเท่ากับผนังของท่อแต่ละขนาดและ เจาะรูขนาดเล็กด้วยเครื่อง Super drill ขนาด 0.3 , 0.5 , 0.8 และ 1 มิลลิเมตรเพื่อจำลองขนาดรูรั่ว 4 ขนาด ในแต่ละขนาดท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รู้วาลอง ที่ใช้ในงานวิจัย 4 ขนาดที่ใช้แต่ละขนาดท่อ

3.1.2.4 เกจวัดความดัน (Pressure gauge)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความดันภายในท่อในช่วงความดันเกจ มีช่วงการใช้งานซึ่งแสดงผลเป็น 2 หน่วยวัดคือ 0-150 psi และ 0-10 bar โดยเกจที่ใช้เป็นแบบ Bourdon ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เกจวัดความดัน ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.2.5 แท่นรองรับหัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor guide)

เนื่องจากผนังท่อโดยทั่วไปจะมีลักษณะผิวโค้ง การใช้หัวตรวจสอบที่มีผิวสัมผัสเป็นผิวเรียบตรง ติดตั้งเข้ากับผนังท่อโดยตรงจะทำให้ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุทั้งสองไม่แนบสนิท ซึ่งจะมีผลต่อสัญญาณที่ตรวจวัดที่อาจให้ค่าที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีวัสดุตัวกลางที่สามารถรองรับผิวสัมผัสของหัวตรวจสอบและรองรับกับผิวโค้งของท่อได้แนบสนิท และต้องมีผลลดทอนของสัญญาณน้อยที่สุด จึงต้องใช้แท่งเหล็กวัสดุชนิดเดียวกับผิวท่อกลึงโค้งเข้ารูปกับผิวท่อทั้ง 3 ขนาดเพื่อติดตั้งหัวตรวจสอบกับท่อให้ได้การสัมผัสผิวหน้าได้เต็มที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แท่นรองหัวตรวจสอบ ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์ทั้งหมดนำมาประกอบรวมกันเป็นระบบต่อความดันที่นำไปทดลองหาอัตราการรั่วตลอดจนการหาตำแหน่งการรั่วของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์ระบบต่อความดัน ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.3 อุปกรณ์สำหรับการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์

ชุดการตรวจจับสัญญาณประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆคือ

3.1.3.1 หัวตรวจจับสัญญาณ (AE sensor)

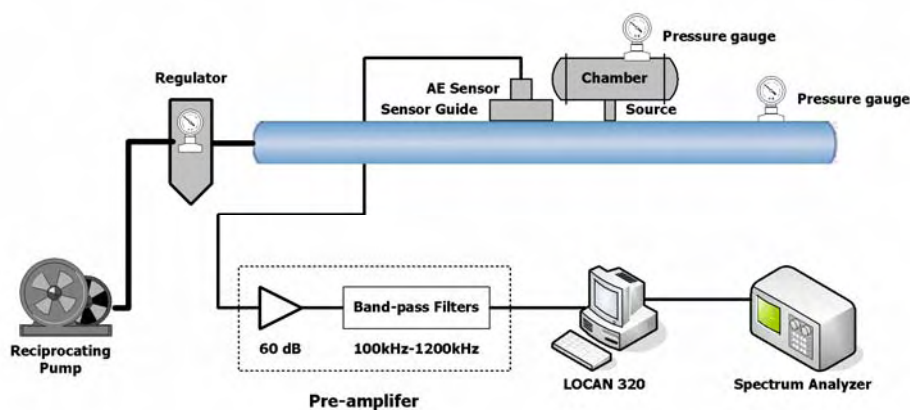
หัวรับสัญญาณที่มีใช้เป็นหัวตรวจจับสัญญาณแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer) จากบริษัท Physical Acoustic Corp. (PAC) หัวตรวจจับสัญญาณที่ใช้เป็นชนิด Resonant R15 ซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ที่ 150 kHz และหัวตรวจจับสัญญาณแบบ Wide Band (WD) ซึ่งมีความถี่แบนวิดท์อยู่ที่ 0-1MHz โดยจะนำมาทดสอบและเลือกหัวตรวจจับสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

3.1.3.2 อุปกรณ์ขยายสัญญาณปฐมภูมิ (Pre-Amplifier)

อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นที่มีอยู่เป็นของบริษัท PAC รุ่น 1220A ทำหน้าที่ขยายสัญญาณโดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นจะมีอัตราการขยาย 2 ค่า คือ 40 dB และ 60 dB โดยภายในจะประกอบด้วย ตัวกรองสัญญาณแบบ Band Pass ที่มี Pass Band ตั้งแต่ 100 kHz-300 kHz กับ ตั้งแต่ 100 kHz-1200 kHz สามารถใช้กับหัวรับสัญญาณแบบ Resonant และ Broadband ได้

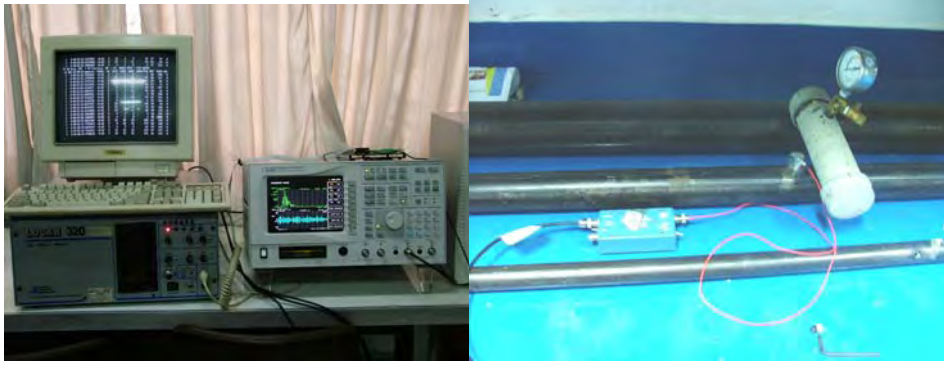
3.1.3.3 หน่วยประมวลผลสัญญาณ

ในการประมวลผลและวิเคราะห์สัญญาณจะใช้ LOCAN 320 ซึ่งเป็นเครื่องประมวลผลของสัญญาณอะคูสติกโดยเฉพาะ โดยจะแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญในรูปของตัวเลขและกราฟและจะใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบ Vector Analyzer ของบริษัท Hewlett Packard (HP) รุ่น Agilent 89410A ที่มี อัตราการสุ่ม (Sampling Rate) เท่ากับ 10 MHz สัญญาณอะคูสติกในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่เพื่อใช้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่างๆ



(ก) ไดอะแกรมออกแบบการทดลอง

รูปที่ 3.8 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ที่ใช้ในงานวิจัย



(ข) การจัดอุปกรณ์ในการทดลองจริง

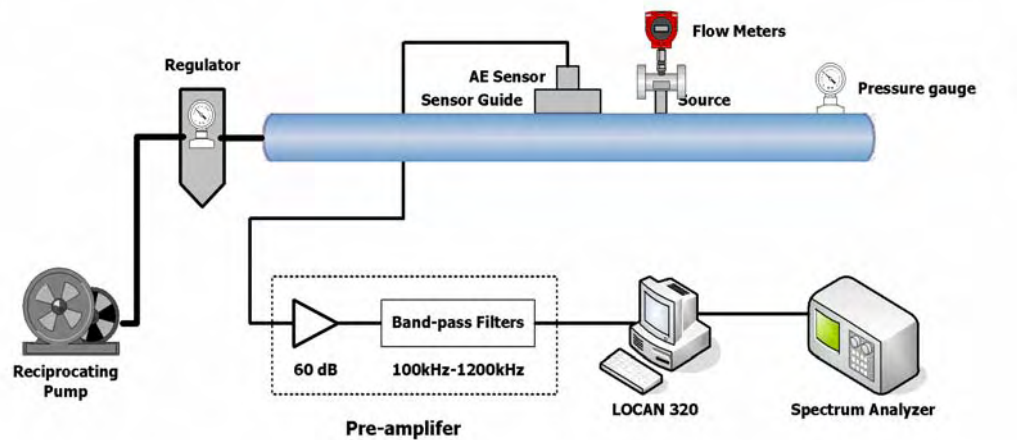
รูปที่ 3.9 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

3.1.4 การเลือกวิธีการตรวจวัดอัตราการรั่วในท่อด้วยอะคูสติกอิมพัลส์

เนื่องจากขอบเขตของงานวิจัยนี้คือ ใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ตรวจวัดอัตราการรั่วที่เกิดจากการรั่วภายในท่อในระบบส่งก๊าซ และท่อที่ใช้เป็นท่อเหล็กกล้าไร้ตะกั่วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 เมตรใช้สว่านเจาะรูที่ผนังท่อและทำเกลียวขนาดเท่าเกลียวตัวหนอนขนาด 8 มิลลิเมตรที่เจาะรูรั่วจำลองตัวละขนาดคือรูรั่วนั้นขนาด 0.3 , 0.5 , 0.8 และ 1 มิลลิเมตร การควบคุมหรือการปรับการรั่วของท่อไม่สามารถกำหนดให้มีอัตราการรั่วตามต้องการได้จึงต้องใช้การวัดอัตราการรั่วจากการเปลี่ยนรูรั่วจำลองขนาดต่างๆที่ความดันค่าต่างๆ

เนื่องจากการวัดอัตราการรั่วจากวิธีตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ ไม่สามารถบอกปริมาณของการรั่วได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการวัดหรือการทดลองเสริมที่น่าเชื่อถือได้เพื่อหาอัตราการรั่วของท่อซึ่งค่าปริมาณการรั่วที่เปลี่ยนแปลงไปที่วัดได้จากวิธีอะคูสติกอิมพัลส์นี้จะถูกนำมาใช้ร่วมในการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติก ความดัน และขนาดของท่อ โดยในระยะเวลาที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาวิธีการหาอัตราการรั่วของท่อได้ 3 แบบ ดังนี้

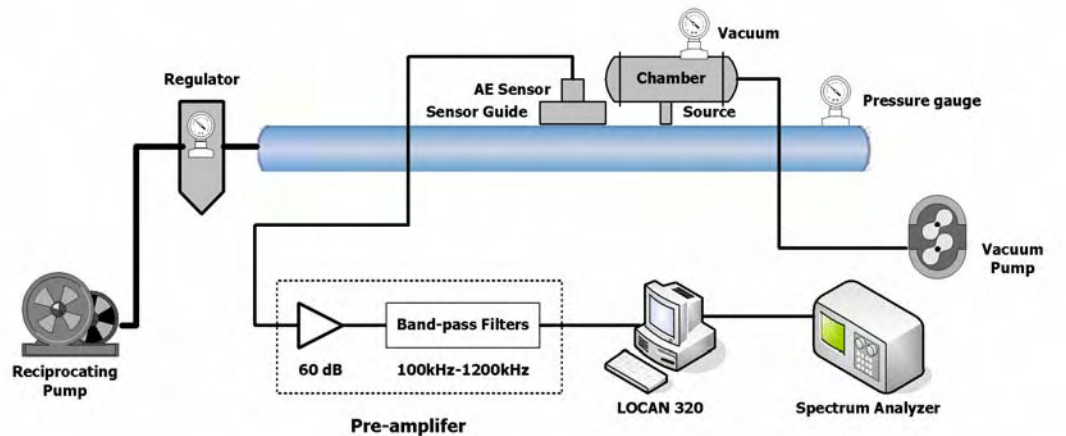
ก. ใช้ Flow Meter วัดอัตราเร็ว



รูปที่ 3.10 แผนภาพการออกแบบติดตั้ง Flow Meter เข้ากับระบบเพื่อวัดอัตราเร็วของท่อ

Flow Meter เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้วัดอัตราการไหลของของไหลที่มีหลักการวัดหลายแบบซึ่งการใช้งานมักจะขึ้นอยู่กับชนิดของของไหลที่จะทำการวัด สำหรับการประยุกต์ใช้ Flow Meter กับงานวัดอัตราเร็วของก๊าซ หรืออากาศแล้ว ควรจะเป็นชนิดที่สามารถวัดอัตราการไหลของของไหลที่มีค่าน้อยๆ ได้ ซึ่ง Flow Meter ที่เหมาะสมกับงานประเภทนี้มักจะเป็นแบบใช้หลักการนำพาความร้อน (Heat Transfer) การนำ Flow Meter มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้สามารถติดตั้งได้จากแผนภาพ ดังรูปที่ 3.10 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ความดันต่างๆ ได้แก่ เครื่องอัดอากาศ เรกกูเลเตอร์ เกจวัดความดัน ประกอบเข้ากับท่อที่เจาะรูและสามารถปิดเปิดให้มีการรั่วได้โดยใช้เกลียวตัวหนอน โดยทำการติดตั้ง Flow Meter เข้าที่ปลายของเกลียวหรือรูรั่วจำลอง เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้วก็สามารถวัดอัตราเร็วของท่อที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาดรูรั่วจำลองด้วย Flow Meter ได้ ข้อดีที่เห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดของการใช้ Flow Meter วัดอัตราเร็วของท่อคือ สามารถอ่านค่าจากจอแสดงผลได้ทันทีทั้งในหน่วยเชิงมวลและเชิงปริมาตร แต่เนื่องจากการวัดปริมาณการไหลน้อยๆ ต้องการใช้ Flow Meter ที่มีหลักการทำงานที่ซับซ้อนจึงทำให้มีราคาสูงดังนั้น ด้วยงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงไม่สามารถใช้ Flow Meter วัดอัตราเร็วของท่อในงานวิจัยนี้ได้

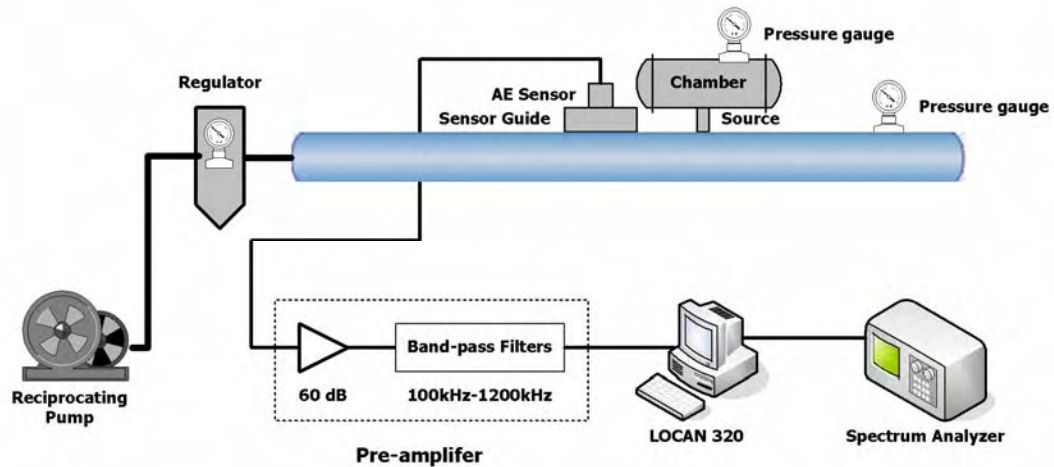
ข. ใช้ Chamber สูญญากาศวัดความดันที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 3.11 แผนภาพการออกแบบติดตั้ง Chamber สูญญากาศเข้ากับระบบเพื่อวัดอัตราการรั่วของท่อ

เทคนิคการวัดอัตราการรั่วโดยวิธีสูญญากาศเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันมาก หลักการของวิธีนี้คือ มีการใช้ Chamber สูญญากาศครอบชิ้นงานที่ต้องการวัดอัตราการรั่ว โดยมีเกจวัดสูญญากาศเป็นอุปกรณ์ที่แสดงความดันที่เปลี่ยนแปลงไปใน Chamber ในขณะที่มีการรั่วของท่อซึ่งการนำ Chamber สูญญากาศมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้สามารถติดตั้งได้จากแผนภาพ ดังรูปที่ 3.11 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ความดันรวมทั้งท่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำ Chamber ที่รู้ปริมาตรซึ่งต่อเข้ากับปั๊มสูญญากาศมาครอบท่อตำแหน่งที่ต้องการวัดอัตราการรั่ว ข้อดีของวิธีการวัดอัตราการรั่วของท่อโดยใช้ Chamber สูญญากาศ คือ ไม่ไวต่ออุณหภูมิประกอบกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสูญญากาศมีราคาถูกกว่า Flow Meter แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ไม่สามารถอ่านปริมาณการรั่วได้โดยตรงแต่จะต้องผ่านการคำนวณก่อน ส่วนข้อเสียที่เห็นได้เด่นชัดที่สุด คือ ทำให้เกิดความยุ่งยากในการทดลองมาก เนื่องจากจะต้องสร้าง Chamber ครอบรอบท่อและหัวรับสัญญาณ ดังนั้นจึงมีปัญหาในเรื่องการกันซึมของ Chamber เอง

ค. ใช้ Chamber วัดความดันแตกต่าง



รูปที่ 3.12 แผนภาพการออกแบบติดตั้ง Chamber วัดความดันแตกต่างเพื่อวัดอัตราเร็วของท่อ

วิธีการใช้ Chamber วัดความดันแตกต่างมีหลักการคล้ายกับเทคนิคการวัดอัตราเร็วโดยวิธีสุญญากาศแต่ต่างกันตรงที่ความดันใน Chamber ของวิธีการนี้เป็นความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นความยุ่งยากในการกันซึมของ Chamber จึงไม่มี ประกอบกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้วัดมีราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการวัดอัตราเร็วทั้ง 3 วิธี ด้วยเหตุผลนี้วิธีการนี้จึงเป็นวิธีการวัดอัตราเร็วของท่อที่เหมาะสมที่สุด โดย Chamber ที่ใช้วัดอัตราเร็วของท่อซึ่ง Chamber ที่ใช้จะวัดอัตราเร็วของท่อทั้ง 3 ขนาดมีปริมาตร 530 มิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 Chamber วัดอัตราการรั่วของท่อทั้ง 3 ขนาดที่ใช้ในงานวิจัย

สรุปคือ งานวิจัยนี้ใช้วิธีวัดอัตราการรั่วของท่อโดยอาศัยหลักการใช้เกจวัดความดันที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นใน Chamber ที่รู้ปริมาตรที่แน่นอน ซึ่งใช้ 1 ขนาด คือ 530 ml สำหรับใช้หาอัตราการรั่วของท่อขนาด 1 นิ้ว 2 นิ้ว และ 3 นิ้ว ตามลำดับ โดยที่ Chamber ทำมาจากท่อเหล็กที่เจาะรูและต่อเข้ากับท่อโดยหมุนเข้ากับเกลียวตัวหนอนปลายตัดและที่ Chamber จะติดตั้งเกจวัดความดันเพื่อวัดความดันที่เพิ่มขึ้น โดยสูตรคำนวณหาอัตราการรั่ว [14] เป็นดังนี้

$$Q = V \times \frac{(\Delta P / P_1)}{\Delta T} \quad (3.1)$$

เมื่อ Q คือ อัตรารั่ว

ΔT คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

V คือ ปริมาตรของ Chamber

P คือ ความดันในท่อ

ΔP คือ ผลของความดันแตกต่างที่เพิ่มขึ้นใน Chamber

3.2 ขั้นตอนการทดลองตรวจวัดสัญญาณรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน

หลังจากการเลือกวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือทดลองจนประกอบชุดทดลองและเลือกวิธีการตรวจวัดอัตราการรั่วได้แล้วจึงดำเนินการทดลองตรวจวัดสัญญาณการรั่วซึ่งต้องเริ่มดำเนินการตั้งแต่การติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณกับผิวของท่อ ตรวจจับลักษณะของสัญญาณรบกวน (Background Noise) ที่เกิดขึ้น การเลือกหัวตรวจจับสัญญาณสอบที่มีความไวต่อการตรวจวัดสัญญาณที่ดีที่สุด การเลือกตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุด และเก็บผลการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณอะคูสติก โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.2.1 หาประสิทธิภาพการรับสัญญาณของหัวตรวจจับสัญญาณโดยการหักใส่ดินสอจาก การ ติดตั้งกับแท่นรองรับหัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor guide)

เนื่องจากการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณโดยตรงกับผิวท่ออาจทำให้ผิวสัมผัสของหัวตรวจจับสัญญาณไม่แนบสนิทกับผิวของท่อที่มีลักษณะโค้งมนดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการรองรับให้ผิวสัมผัสของหัวตรวจจับสัญญาณกับผิวท่อสัมผัสกันได้อย่างสนิทซึ่งก็คือ Sensor guide ดังนั้นก่อนนำหัวตรวจจับสัญญาณที่มีอยู่มาใช้ในการทดลองจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบก่อนว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สองอย่างดังกล่าวเข้าด้วยกันแล้วจะส่งผลต่อสัญญาณอะคูสติกที่จะตรวจวัดอย่างไร ทั้งในแง่ของการลดลง

ของสัญญาณ และประสิทธิภาพของการรับสัญญาณโดยประยุกต์ใช้การหักโง้ดินสอในการทดสอบ แล้วเทียบกับมาตรฐานของความสมบูรณ์ของการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณดังรายละเอียด

- วัตถุประสงค์

1.เพื่อหาว่าหัวตรวจจับสัญญาณมีประสิทธิภาพที่จะใช้วัดสัญญาณได้หรือไม่ เมื่อใช้ติดตั้งกับแท่นรองรับหัวตรวจจับสัญญาณ

- วิธีการทดลอง

- 1.ติดตั้ง Sensor guide บนผิวท่อโดยตรวจสอบความสะอาดของผิวท่อและหยดสารช่วยการสัมผัส (Couplant) เพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัส
- 2.ติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD บน Sensor guide หยดสารช่วยการสัมผัส(Couplant)เพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสและรัดหัว Sensor โดยกระดากเทป
- 3.ตรวจสอบความสมบูรณ์ของการติดตั้งและประสิทธิภาพของการรับสัญญาณโดยการหักโง้ดินสอ จำนวน 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งแรกบนผิวหน้าของ Sensor guide และตำแหน่งที่สองบนผิวท่อติดกับขอบ Sensor guide ตำแหน่งละ 10 ครั้ง
- 4.บันทึกค่า Amplitude เป็นหน่วย dB ที่อ่านได้จากการหักโง้ดินสอจากเครื่อง LOCAN 320
- 5.ทดลองเหมือนข้อ 1. ถึงข้อ 4. อีกครั้งแต่เปลี่ยนติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15 แทน
- 6.นำค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งมาเฉลี่ยและเปรียบเทียบระดับของสัญญาณที่เกิดขึ้น

3.2.2 การตรวจจับสัญญาณรบกวนของระบบ

- วัตถุประสงค์

- 1.เพื่อดูว่าระดับของสัญญาณรบกวนในระบบมีขนาดเท่าไร ความถี่อยู่ในช่วงไหนและมีลักษณะอย่างไร
- 2.เพื่อศึกษาระดับแนวโน้มของสัญญาณรบกวนจากสภาวะต่างๆเพื่อจะสามารถนำไปปรับตั้งค่าการทดลองเพื่อตัดสัญญาณรบกวนของระบบ

- วิธีการทดลอง

- 1.ประกอบชุดทดลองเริ่มจากท่อขนาด 1 ,2 และ 3 นิ้วตามลำดับ และอุดรูรั่วจำลองโดย plug ที่ไม่ได้เจาะรูเพื่อให้ได้ชุดท่อที่ไม่มีการรั่ว

- 2.ติดตั้งหัวจับสัญญาณชนิด WD ที่ระยะติดกับ plug และตรวจสอบความสมบูรณ์ของการติดตั้งโดยการหักไล่ดินสอ และบันทึกค่า
- 3.ตรวจจับสัญญาณคลื่นจากสถานะไม่เปิดวาล์วความดัน และสถานะการเปิดวาล์วความดันให้มีความดันในท่อ บันทึกค่าข้อมูลโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา
- 4.ติดตั้งหัวจับสัญญาณชนิด R15 ที่ระยะติดกับ plug และตรวจสอบความสมบูรณ์ของการติดตั้งโดยการหักไล่ดินสอ และบันทึกค่า
- 5.ตรวจจับสัญญาณคลื่นจากสถานะไม่เปิดความดัน และสถานะการเปิดความดันให้มีความดันในระบบ บันทึกค่าข้อมูลโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา

3.2.3 การเลือกหัวตรวจจับสัญญาณที่เหมาะสมในการทดลอง

- วัตถุประสงค์

- 1.เพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณการรั่วของท่อจากโดเมนความถี่และดูว่าการรั่วของท่อมีช่วงความถี่เท่าไร
- 2.เพื่อที่จะสามารถนำผลที่ได้ไปเลือกหัวตรวจจับสัญญาณที่มีอยู่ 2 ชนิดคือ R15 และ WD ให้ได้ชนิดที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

-วิธีการทดลอง

- 1.ติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15 และชนิด WD ที่ตำแหน่งติดกับรูรั่วจำลองที่เลือกมา 1 ขนาดคือขนาด 0.3 มิลลิเมตรและใช้ท่อขนาด 1 นิ้ว ตรวจจับสัญญาณการรั่วโดยการเปิดให้มีความดันในระบบโดยปรับเปลี่ยนความดันตั้งแต่ 10 ,20 ,30 และ 40 Psi และบันทึกสัญญาณในโดเมนความถี่

3.2.4 การเลือกตำแหน่งการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ

- วัตถุประสงค์

- 1.เพื่อกำหนดตำแหน่งในการตรวจจับสัญญาณการรั่วของท่อที่ให้สัญญาณการรั่วได้ชัดเจนที่สุดในการทดลอง

-วิธีการทดลอง

- 1.ติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15 บนท่อทั้ง 3 ขนาดที่ละขนาดที่ตำแหน่งต่างๆในชั้นแรกติดกับรูรั่วจำลองขนาด 0.3 มิลลิเมตร 4 ตำแหน่งคือด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวา และใช้ความดันคงที่ที่ 40 psi
- 2.บันทึกค่าสัญญาณในโดเมนเวลาและนำค่าที่ได้มาแปลงในรูปของระดับสัญญาณเฉลี่ย(Average Signal Level,ASL) ในหน่วยเดซิเบลที่ตำแหน่งต่างๆที่ติดตั้งทั้ง 4 ตำแหน่งเพื่อตรวจสอบว่าตำแหน่งใดให้ค่าสัญญาณสูงสุด
- 3.เมื่อได้ทราบว่าตำแหน่งใดทั้ง 4 ตำแหน่งมีค่าสัญญาณสูงสุดก็เลือกตำแหน่งนั้นแล้วติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณตามแนวยาวของท่อที่ระยะห่างจากรูรั่วต่างๆคือที่ระยะติดกับรูรั่ว ระยะห่างจากรูรั่ว 10,20,30,40,50,60,70,90,100,120,150,180,210 และ 240 cm ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่สัญญาณสูงสุดที่จะใช้เป็นตำแหน่งในการตรวจจับสัญญาณการรั่วตามสภาวะต่างๆและสามารถใช้เป็นข้อมูลในการตรวจสอบการลดทอนของคลื่น (Attenuation) ของท่อด้วยโดยทดลองกับท่อทั้ง 3 ขนาด โดยใช้ความดันและขนาดรูรั่วเท่าเดิม

3.2.5 การเก็บผลการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณอะคูสติก

เป็นขั้นตอนที่ต้องการทราบลักษณะพื้นฐานของสัญญาณว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไรเมื่อปรับเปลี่ยนสภาวะการทดลองต่างๆโดยแบ่งเป็นตามวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1.เพื่อศึกษาสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับขนาดท่อ
- 2.เพื่อศึกษาสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับขนาดรูรั่ว
- 3.เพื่อศึกษาสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับความดัน

-วิธีการทดลอง

- 1.ติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ R15 (จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่ามีเหมาะสมที่สุดในการทดลอง) ตำแหน่ง ติดกับรูรั่วด้านบนฝั่ง Up Stream (จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าเป็นตำแหน่งที่ตรวจจับสัญญาณได้ดีที่สุด) เข้ากับชุดท่อทั้ง 3 ขนาด เลือกรูรั่วติดตั้งที่ท่อทั้ง 3 ขนาดที่ละขนาดรูรั่วตั้งแต่ 0.3 , 0.5 ,0.8 ,1.0 มิลลิเมตร ทดลองโดยปรับความดันให้เกิดในท่อตั้งแต่ 0 , 10 ,20 ,30 ,40 และ 50 Psi ในแต่ละขนาดท่อและขนาดรูรั่วต่างๆ พร้อมบันทึกสัญญาณในโดเมนความถี่

3.2.6 การหาอัตราเร็วของท่อที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจสอบได้จากวิธีอะคูสติกอิมพัลส์

- วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาอัตราการรั่วของท่อที่น้อยที่สุดที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์

- วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ R15 (จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่ามีความเหมาะสมที่สุดในการทดลอง) ตำแหน่ง ติดกับรูรั่วด้านบนฝั่ง Up Stream (จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าเป็นตำแหน่งที่ตรวจจับสัญญาณได้ดีที่สุด) เข้ากับชุดท่อขนาด 1 นิ้ว ที่มี Chamber ปริมาตร 530 มิลลิลิตรติดตั้งอยู่ และใช้รูรั่วจำลองที่ขนาดคือขนาด 0.3 , 0.5 , 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร และบันทึกสัญญาณในโดเมนความถี่และโดเมนเวลาของแต่ละขนาดรูรั่วตามระดับของความดันอากาศที่เปิดให้ระบบที่ระดับ 5,10,15,20,30,40,50,60,80 psi พร้อมกับจับเวลาความดันที่เพิ่มขึ้นใน Chamber จนความดันเพิ่มขึ้นเท่ากับความดันในท่อเพื่อนำไปคำนวณอัตราการรั่วจากสูตร $Q = Vx \frac{(\Delta P / P_0)}{\Delta T}$

2. เปลี่ยนขนาดรูรั่วจำลองที่เหลือครั้งละขนาดคือขนาด 0.5 , 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร ติดตั้งกับท่อขนาด 2 นิ้ว และ 3 นิ้ว แล้วทำการทดลองปรับแรงดันและตรวจวัดอัตราการรั่วตามขั้นตอนเหมือนข้อ 1 เช่นกันทั้งนี้เพื่อดูแนวโน้มของสัญญาณและอัตราการรั่วของท่อทั้ง 3 ขนาด

3.3 ขั้นตอนการออกแบบและเก็บผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ ขนาดของท่อ ความดันในระบบ และอัตราการรั่วของท่อ ในรูปของสมการทำนายอัตราเร็ว ด้วยโปรแกรม Minitab

หลังจากได้ศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ของสัญญาณเบื้องต้นแล้ว จึงต้องมีการดำเนินการทดลองในขั้นตอนต่อมาในการที่จะนำเอาผลการทดลองไปสร้างรูปแบบที่จะสามารถนำไปประยุกต์ในการใช้งานจริงในรูปสมการ ซึ่งขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อทดลองตามหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ ขนาดของท่อ ความดันในระบบ และอัตราการรั่วของท่อ ในรูปของสมการทำนายอัตราเร็ว ด้วยโปรแกรม Minitab

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติกกับอัตราการรั่วของไหลในท่อ โดยใช้หลักการการออกแบบการทดลองและนำเอาโปรแกรมทางสถิติ Minitab (Release 13) มาช่วย

ออกแบบวิเคราะห์ผลการทดลองและการศึกษาหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอะคูสติก อัตราเร็วภายในท่อ ความดัน และขนาดของท่อ แต่เนื่องจากอัตราเร็วเป็นตัวแปรตามที่มีขนาดของรูรั่ว และความดันที่แตกต่างกันและการทดลองไม่สามารถปรับขนาดให้รูรั่วมีขนาดต่างๆได้ตามต้องการ เพื่อให้ได้ค่าอัตราเร็วตามต้องการที่จะนำมาหาความสัมพันธ์ ดังนั้นเราต้องนำค่าอัตราเร็วที่วัดได้และสัญญาณอะคูสติกที่ได้จากหัวข้อ 3.2.6 มาวิเคราะห์ก่อนว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับขนาดท่อ ขนาดรูรั่ว และความดันในท่อ โดย อะคูสติกพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้เลือก ASL (หน่วย dB) มาทำการศึกษา

โดยต้องพิจารณาถึงการหาขนาดของสิ่งตัวอย่างที่จะทำการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของสัญญาณรบกวนในระบบที่สามารถวัดได้ด้วยหัวรับสัญญาณที่เหมาะสมที่ถูกเลือกจากการทดลองก่อนหน้านี้ และการหาขนาดสิ่งตัวอย่างของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่วัดได้ ซึ่งจากหัวข้อ 3.2.6 ต้องตรวจสอบก่อนว่าขนาดของสิ่งตัวอย่างเพียงพอหรือไม่ก่อนจะนำผลทั้งหมดไปตรวจสอบถึงอัตราเร็วที่ได้ ซึ่งขั้นตอนในการหาขนาดสิ่งตัวอย่างมีดังนี้

3.3.1 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของสัญญาณรบกวน

การหาขนาดของสัญญาณรบกวนในรูปของปริมาณสเกล่า เป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาค่าของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วของท่อที่สภาวะของความดันและขนาดของท่อต่างๆ ที่วัดได้จากการทดลอง โดยปริมาณสเกล่าดังกล่าวจะอยู่ในรูปของ ASL ซึ่งก่อนจะหาขนาดของสิ่งตัวอย่างของสัญญาณรบกวนจะต้องมีการเก็บข้อมูลบางส่วนมาก่อนเพื่อนำมาพิจารณา โดยขั้นตอนในการหาขนาดของสิ่งตัวอย่างของสัญญาณรบกวนทำได้โดยใช้โปรแกรม Minitab โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Basic Statistics > Display Descriptive Statistics เพื่อพิจารณาหาข้อมูลพื้นฐานทางสถิติของข้อมูลบางส่วนที่เก็บมาได้ โดยจะพิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นสำคัญ จากนั้นเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Power and Sample size > 1-Sample Z เพื่อพิจารณาหาขนาดของสิ่งตัวอย่างที่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.3.2 ความสัมพันธ์ของอะคูสติกพารามิเตอร์กับ ความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

การดำเนินการเป็นไปตามขั้นตอนดังนี้

3.3.2.1 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับ ความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

จากหัวข้อ 3.2.6 เราได้หาอะคูสติกพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัย ความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง แต่เป็นค่าที่ตรวจวัดเพียงหนึ่งค่าของแต่ละปัจจัยซึ่งอาจจะยังไม่เพียงพอต่อการนำมา

วิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ตามหลักการออกแบบการทดลองดังนั้นจึงใช้โปรแกรม Minitab ในการหาขนาดที่เหมาะสมโดยการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง กำหนดปัจจัยดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ความดันที่ 5,10,15,20,30,40,50,60 และ 80 psi

ปัจจัยที่ 2 ขนาดท่อที่ 1 , 2 และ 3 นิ้ว

ปัจจัยที่ 3 ขนาดรูรั่วจำลองที่ 0.3 , 0.5 , 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

เนื่องจากอะคูสติคพารามิเตอร์ซึ่งเป็นตัวแปรตามหรือที่เรียกว่า ค่าตอบสนอง (Response) ของการทดลอง โดยเป็นผลมาจากความดัน ขนาดของท่อและขนาดรูรั่วจำลอง ซึ่งเป็น ตัวแปรต้นหรือที่เรียกว่า ปัจจัย (Factor) ของการทดลอง ซึ่งอะคูสติคพารามิเตอร์ในหัวข้อนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนั้นขั้นตอนในการหาขนาดสิ่งตัวอย่างจะแตกต่างจากกรณีของสัญญาณรบกวน แต่จะพิจารณาค่า ASL เช่นเดียวกับในกรณีของสัญญาณรบกวน ซึ่งขั้นตอนการหาขนาดสิ่งตัวอย่างเริ่มจากใช้โปรแกรม Minitab โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design เพื่อออกแบบการเก็บข้อมูลเบื้องต้นที่สภาวะความดัน ขนาดของท่อและขนาดรูรั่วจำลองต่างๆ โดยจะนำมาวิเคราะห์แบบสุ่มเมื่อเก็บข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการออกแบบเสร็จก็เข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Basic Statistics > Display Descriptive Statistics เพื่อพิจารณาหาข้อมูลพื้นฐานทางสถิติของอะคูสติคพารามิเตอร์ที่เก็บมาได้ โดยจะพิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นสำคัญ จากนั้นเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Power and Sample size > One-way ANOVA เพื่อพิจารณาหาขนาดของสิ่งตัวอย่างที่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.3.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและความเหมาะสมในการออกแบบการทดลองของ

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

เมื่อทำการเก็บผลการทดลองให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยหลักของ Design of Experiment ก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์นั้นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาเสียก่อนโดยการทำการ Model Adequacy Checking โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Regression > Residual Plot เพื่อดูว่าข้อมูลนั้นได้มาอย่างสุ่มหรือเปล่า โดยดูได้จากกราฟ I-Chart of Residuals และการกระจายตัวของข้อมูลจากกราฟ Normal Plot of Residual และกราฟ Histogram of Residual สุดท้ายพิจารณาเสถียรภาพของข้อมูลได้จากกราฟ Residual vs. Fits ก่อนที่จะทำ ANOVA หลังจากนั้นพิจารณาความเหมาะสมในการออกแบบการทดลองได้จากค่า R-square ทั้งนี้ถ้าค่า R-square มีค่าน้อยจะต้องหาสาเหตุจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้แล้วทำการแก้ไข

3.3.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองความสัมพันธ์ของ ความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลและพิจารณาความเหมาะสมในการออกแบบการทดลองแล้ว จากนั้นทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย สำหรับในการทดลองนี้มี 3 ปัจจัย

คือ ความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง ว่ามี Interaction ระหว่างกันหรือไม่ โดยพิจารณาทั้งในกรณีที่มี Interaction พร้อมกันทั้ง 3 ปัจจัย และกรณีที่มี Interaction ระหว่าง 2 ปัจจัยใดๆ สุดท้ายทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหมดโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยเข้าโปรแกรม Minitab ที่ฟังก์ชัน Stat > Regression > Regression... เพื่อหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์กับ ความดันในระบบ ขนาดของท่อและขนาดของรูรั่วจำลอง

3.3.3 ความสัมพันธ์ของอะคูสติกพารามิเตอร์กับ ความดันในท่อ ขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว

การทดลองในส่วนนี้เป็นการนำผลการทดลองวัดอัตราการรั่วที่ได้ก่อนหน้านี้มาวิเคราะห์แล้วทำให้ทราบว่าสิ่งที่เราต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองคือ อะคูสติกพารามิเตอร์ กับปัจจัยที่เราสามารถกำหนดเป็นค่าคงที่คือ ขนาดท่อ และขนาดความดันในระบบ เช่นเดียวกับค่าอัตราการรั่วเราก็คาดหวังว่าจะสามารถกำหนดเป็นตัวแปรต้นได้ แต่จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าไม่สามารถจะทำให้ได้ค่าอัตราการรั่วเป็นค่าคงที่ตามที่ต้องการให้เป็นได้ เนื่องจากเราไม่สามารถปรับรูรั่วให้มีขนาดที่หลากหลายเพื่อให้เกิดเป็นอัตราการรั่วที่หลากหลายตามต้องการได้ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ผลที่ผ่านมาพบว่าที่ขนาดความดันหนึ่งค่าและรูรั่วหนึ่งขนาดจะให้ผลอัตราการรั่วที่ใกล้เคียงกัน จึงได้กำหนดตัวแปรที่เป็นค่าที่สอดคล้องกันคือความดันและรูรั่วจำลองเป็นค่าที่ต้องกำหนดให้เป็นค่าที่คู่กัน ณ อัตราการรั่วค่าหนึ่งดังนั้นจึงเหลือตัวแปรที่สามารถหาความสัมพันธ์ได้เพียง อัตราการรั่ว และขนาดท่อ เพื่อดูผลของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่เป็นค่าตอบสนอง ซึ่งขั้นตอนดำเนินการจะเหมือนกับหัวข้อ 3.3.2 ตามลำดับดังนี้

3.3.3.1 การหาสิ่งตัวอย่างของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับ ขนาดของท่อและอัตราการรั่ว

โดยกำหนดปัจจัยดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ขนาดท่อที่ 1, 2 และ 3 นิ้ว

ปัจจัยที่ 2 อัตราการรั่วของท่อ ที่ 15, 35, 40, 45, 18, 46, 52, 65, 27, 64, 66, 89, 29, 94, 97 และ 122 มิลลิลิตรต่อวินาที

และใช้โปรแกรม Minitab ในการหาขนาดสิ่งตัวอย่างเหมือนที่ผ่านมา

3.3.3.2 การตรวจความถูกต้องของข้อมูลและความเหมาะสมในการออกแบบการทดลอง

เมื่อทำการเก็บผลการทดลองให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยหลักของ Design of Experiment ก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์นั้นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาเสียก่อนโดย

การทำ Model Adequacy Checking โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Regression > Residual Plot เพื่อดูว่าข้อมูลนั้นได้มาอย่างสุ่มหรือเปล่า โดยดูได้จากกราฟ I-Chart of Residuals และการกระจายตัวของข้อมูลจากกราฟ Normal Plot of Residual และกราฟ Histogram of Residual สุดท้ายพิจารณาเสถียรภาพของข้อมูลได้จากกราฟ Residual vs. Fits ก่อนที่จะทำ ANOVA หลังจากนั้นพิจารณาความเหมาะสมในการออกแบบการทดลองได้จากค่า R-square ทั้งนี้ถ้าค่า R-square มีค่าน้อยจะต้องหาสาเหตุจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้แล้วทำการแก้ไข

3.3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและความเหมาะสมในการออกแบบการทดลองของ

ความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว

เมื่อทำการเก็บผลการทดลองให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยหลักของ Design of Experiment ก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์นั้นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่นำมาเสียก่อนโดยการทำ Model Adequacy Checking โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Regression > Residual Plot เพื่อดูว่าข้อมูลนั้นได้มาอย่างสุ่มหรือเปล่า โดยดูได้จากกราฟ I-Chart of Residuals และการกระจายตัวของข้อมูลจากกราฟ Normal Plot of Residual และกราฟ Histogram of Residual สุดท้ายพิจารณาเสถียรภาพของข้อมูลได้จากกราฟ Residual vs. Fits ก่อนที่จะทำ ANOVA หลังจากนั้นพิจารณาความเหมาะสมในการออกแบบการทดลองได้จากค่า R-square ทั้งนี้ถ้าค่า R-square มีค่าน้อยจะต้องหาสาเหตุจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้แล้วทำการแก้ไข

3.3.3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองความสัมพันธ์ของขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลและพิจารณาความเหมาะสมในการออกแบบการทดลองแล้ว จากนั้นทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย สำหรับในการทดลองนี้มี 2 ปัจจัย คือ ขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว ว่ามี Interaction ระหว่างกันหรือไม่ โดยพิจารณาทั้งในกรณีที่ Interaction พร้อมกันทั้ง 2 ปัจจัย และกรณีของปัจจัยหลัก สุดท้ายทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหมดโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยเข้าโปรแกรม Minitab ที่ฟังก์ชัน Stat > Regression > Regression... เพื่อหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกรามีเตอร์กับขนาดของท่อและอัตราการรั่ว

3.4 ขั้นตอนการทดลองหาตำแหน่งการเกิดการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ ซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นแบบต่อเนื่อง(Continuous)โดยการใช้หลักการ สหสัมพันธ์สวนทาง (Cross Correlation)

นอกจากการตรวจสอบเพื่อให้สามารถทราบว่ามีระบบมีการรั่วหรือไม่และมีปริมาณเท่าไรแล้ว การทดสอบเพื่อการหาตำแหน่งการรั่วก็เป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้การตรวจสอบการรั่วของท่อมีความสมบูรณ์มากขึ้น การหาตำแหน่งการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ซึ่งสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง การใช้วิธีการตรวจสอบทำได้หลายวิธี

- วัตถุประสงค์

1. เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการหาตำแหน่งของการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์
2. เพื่อแสดงถึงความแม่นยำในการหาตำแหน่งการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่จำลองให้เกิดการรั่วขึ้นจริง

- วิธีการทดลอง

3.4.1 ออกแบบการทดลองการหาตำแหน่งการรั่วด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์

ในการทดลองเป็นการหาตำแหน่งที่เกิดการรั่วด้วยหลักการ Cross Correlation โดยเลือกขนาดท่อขนาดรูรั่วขึ้นมาใช้ในการทดลอง 1 ขนาดเนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาทราบแล้วว่าแนวโน้มของสัญญาณที่ได้มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันในแต่ละขนาดของอุปกรณ์การทดลองดังนั้นจึงเลือกตัวแทนขึ้นมาคือท่อขนาด 2 นิ้วและรูรั่วจำลองขนาด 0.3 มาใช้ในการทดลองหาตำแหน่งการรั่วและนอกจากนี้ต้องกำหนดความดันที่ใช้ในการทดลองที่เป็นความดันคงที่ค่าหนึ่งโดยในการทดลองนี้ใช้ค่าความดันคงที่ที่ 40 Psi ใช้หัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15 จำนวน 2 หัวติดตั้งที่ท่อในตำแหน่งที่กำหนดอ้างอิง อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นเลือกการขยายเท่ากับ 60 dB การเก็บข้อมูลใช้เครื่อง LOCAN320 ของ PAC และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เป็นส่วนของการแสดงค่า AE Parameter จากหลักการของการ Cross Correlation ซึ่งสัญญาณ 2 สัญญาณที่วัดได้จากหัวตรวจสอบทั้ง 2 หัวต้องมีการแบ่งช่วงเวลาออกเป็นส่วนเล็กๆเท่ากัน(Time main length)เพื่อการ Cross Correlation กันแล้วจะให้ค่าสูงสุดของสัญญาณ (Max Point) เพื่อนำไปอ้างอิงว่าห่างจากจุดศูนย์เท่าไร ซึ่งจะได้ค่า Time Delay (T) ที่นำไปหาตำแหน่งการรั่วจากสูตร $L1 = (D - VT)/2$ การคำนวณและการ Cross Correlation กันของสัญญาณ คำนวณโดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นใน MatLab ดังนั้นต้องตั้งค่า Time main length ที่เหมาะสมในการวัดในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ซึ่งค่าที่เหมาะสมต้องดูจากสัญญาณทั้ง 2 ที่ตั้งค่า Time main length ต่างๆที่มา Cross Correlation กันแล้วให้ผลการหาตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงมากที่สุด การตั้งค่า Time main length ในการทดลองนี้ใช้ค่า 10, 1, 0.5, 0.04 และ 0.01 msec

โดยความกว้างของการ Correlation กำหนดไว้ที่ 2049 จุดคือด้านบวก 1024 จุด ตำแหน่งศูนย์ 1 จุด และด้านลบ -1024 จุด ตามรูปตัวอย่างลักษณะการ Cross Correlation กันของ 2 สัญญาณ

3.4.2 ขั้นตอนการทดลองหาตำแหน่งการร่วด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชัน

ทดลองหาตำแหน่งการร่วโดยตรวจจับสัญญาณการร่วในโดเมนเวลา ซึ่งกำหนดตำแหน่งการติดตั้ง เป็น 2 ลักษณะและใช้ค่า Time main length ที่เหมาะสมในข้อ 1.ติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณดังนี้

ก. ระยะห่างจากรอยร่วเท่ากัน

- กำหนดให้หัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 เป็นระยะ L1 ห่างจากรูร่วจำลอง 30 เซนติเมตร หัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 เป็นระยะ L2 ห่างจากรูร่วจำลอง 30 เซนติเมตร เท่ากัน
- กำหนดให้หัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 เป็นระยะ L1 ห่างจากรูร่วจำลอง 60 เซนติเมตร หัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 เป็นระยะ L2 ห่างจากรูร่วจำลอง 60 เซนติเมตร เท่ากัน

ข. ระยะห่างจากรอยร่วที่ระยะต่างกัน

- กำหนดให้หัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 เป็นระยะ L1 ห่างจากรูร่วจำลอง 30 เซนติเมตร หัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 เป็นระยะ L2 ห่างจากรูร่วจำลอง 60 เซนติเมตร
- กำหนดให้หัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 เป็นระยะ L1 ห่างจากรูร่วจำลอง 60 เซนติเมตร หัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 เป็นระยะ L2 ห่างจากรูร่วจำลอง 150 เซนติเมตร

โดยในการเก็บข้อมูลจะเก็บผลการคำนวณหาตำแหน่งการร่วโดยตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณยึดถือค่าที่ได้จากหัวตรวจจับสัญญาณหัวที่ 1 จำนวน 5 ค่าที่ตำแหน่งต่างๆ ข้างต้นจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมผ่านเครื่อง LOCAN320 และนำมาหาค่าเฉลี่ย พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ทำการจำลองให้เกิดการร่วขึ้นจริง ๆ เพื่อเปรียบเทียบ และ แสดงถึงความแม่นยำในการนำวิธี AE มาใช้ในการระบุตำแหน่งของการการร่วของท่อ ซึ่งการเปรียบเทียบเพื่อแสดงความแม่นยำในการวิเคราะห์ตำแหน่งกับตำแหน่งอ้างอิง จะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามสมการที่ 3.2

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ตำแหน่งอ้างอิง} - \text{ตำแหน่งจากการคำนวณโดยวิธี AE}|}{\text{ตำแหน่งอ้างอิง}} \times 100\% \quad (3.2)$$

สมการคำนวณ %ความคลาดเคลื่อนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบระยะของหัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 ที่คำนวณได้จากผลการ Cross Correlation ซึ่งก็คือตำแหน่งของการร่วที่หาได้ เทียบกับระยะตำแหน่งอ้างอิงที่ทราบตำแหน่งที่แน่นอน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากหรือน้อยอาจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยประกอบอื่นๆ ก็ได้ ไม่ใช่เพียงความสามารถของวิธีการเท่านั้น เช่น อาจเกิดจากการติดตั้งหัวตรวจสอบที่ไม่สมบูรณ์ ค่าความเร็วของคลื่นอะคูสติกที่กำหนดในการคำนวณ เป็นต้น

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

ผลของการวิจัยที่จะนำเสนอแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

- 1.ผลของการทดลองตรวจจับสัญญาณรบกวนของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชันเพื่อแสดงความสามารถในการตรวจจับสัญญาณรบกวนของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชัน
2. ผลของการออกแบบและเก็บผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ขนาดของท่อ ความดันในระบบ และอัตราการรั่วของท่อ ในรูปของสมการทำนายอัตรารั่ว ด้วยโปรแกรม Minitab
- 3.ผลของการทดลองหาตำแหน่งการเกิดการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชันซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการใช้หลักการสหสัมพันธ์สวนทาง(Cross Correlation)

4.1 ผลของการทดลองตรวจจับสัญญาณรบกวนของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชัน

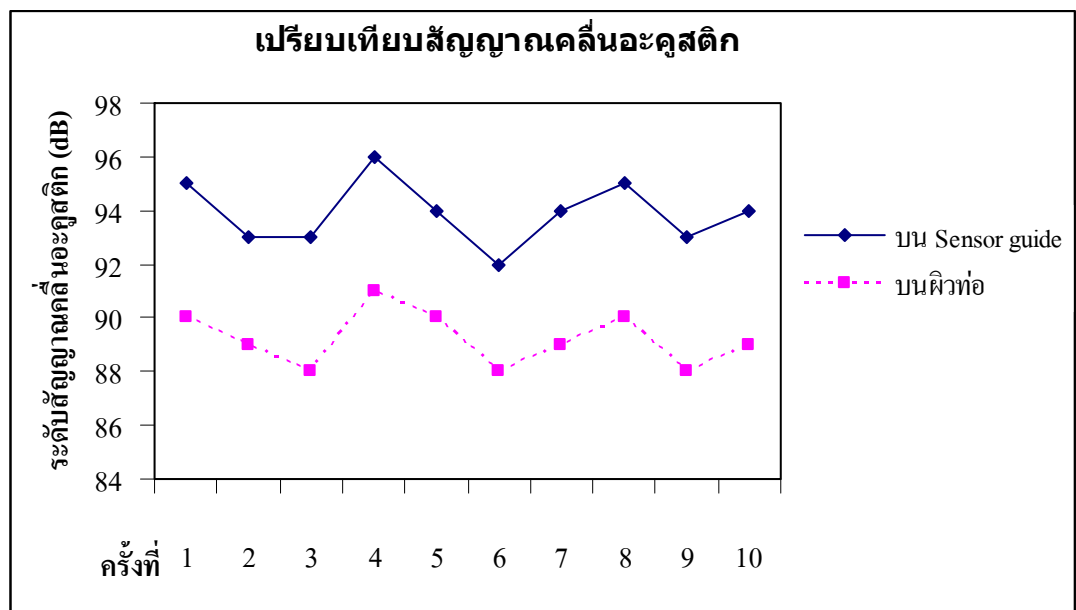
4.1.1 ผลการหาประสิทธิภาพการรับสัญญาณของหัวตรวจจับสัญญาณโดยการหักไล่ดินสอจากการ ติดตั้งกับแท่นรองรับหัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor guide)

ตารางที่ 4.1 ระดับสัญญาณที่วัดได้จากการหักไล่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิวSensor guide และตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD

ครั้งที่	ระดับสัญญาณอะคูสติก	บนSensor guide (dB)	บนผิวท่อ (dB)
1		95	90
2		93	89
3		93	88
4		96	91
5		94	90
6		92	88

ตารางที่ 4.1 ระดับสัญญาณที่วัดได้จากการหักใส่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิวSensor guide และตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD (ต่อ)

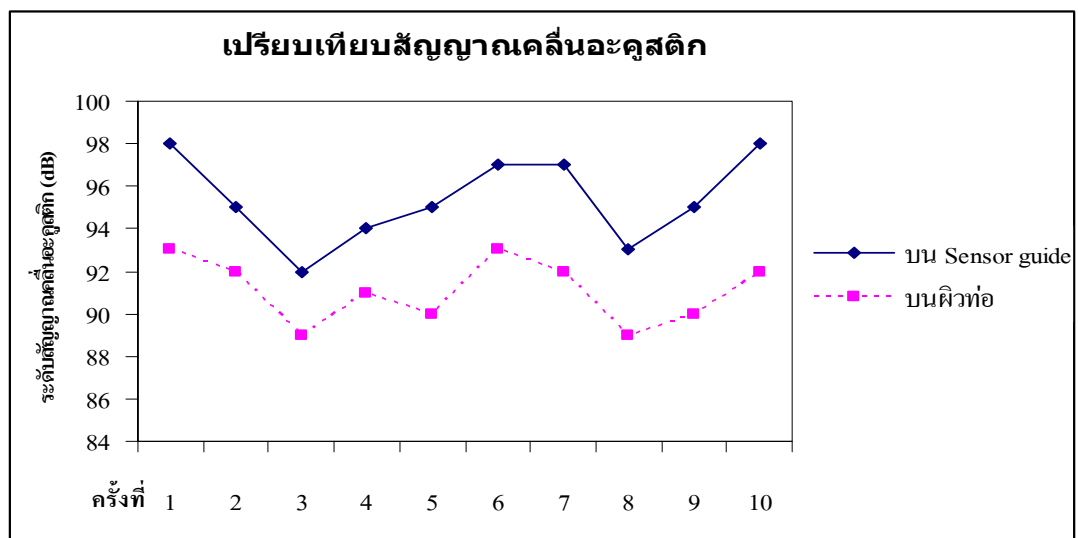
ครั้งที่	ระดับสัญญาณอะคูสติก	บนSensor guide (dB)	บนผิวท่อ (dB)
7		94	89
8		95	90
9		93	88
10		94	89
เฉลี่ย		93.9	89.2



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากการหักใส่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิวSensor guide และตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD

ตารางที่ 4.2 ระดับสัญญาณที่วัดได้จากการหักใส่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิวSensor guide และตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15

ครั้งที่	ระดับสัญญาณอะคูสติก	บนSensor guide (dB)	บนผิวท่อ (dB)
1		98	93
2		95	92
3		92	89
4		94	91
5		95	90
6		97	93
7		97	92
8		93	89
9		95	90
10		98	92
เฉลี่ย		95.4	91.1

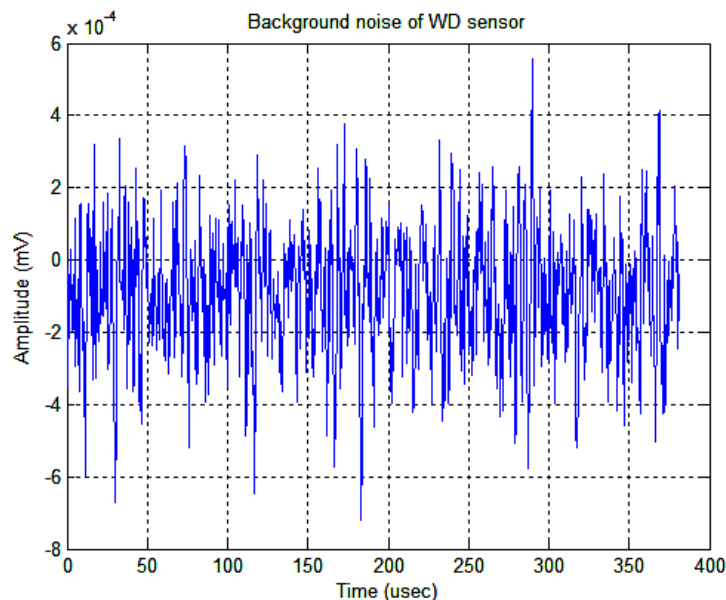


รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากการหักใส่ดินสอที่ตำแหน่งบนผิวSensor guide และตำแหน่งบนผิวท่อ จากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15

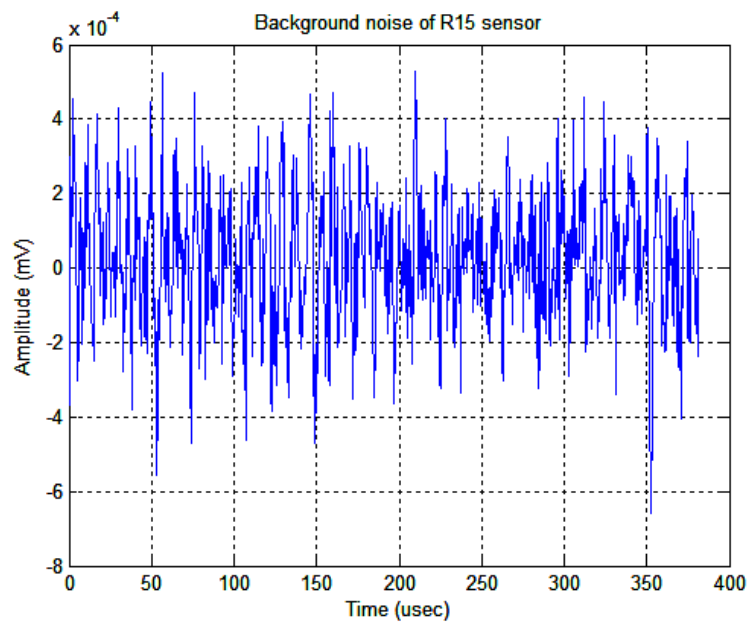
เนื่องจากการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณโดยตรงกับผิวท่อจากการทดลองตรวจวัดสัญญาณโดยใช้หัวตรวจจับทั้งสองชนิดพบว่าแนวโน้มของสัญญาณมีค่าไปในทิศทางเดียวกันคือค่าสัญญาณที่วัดได้จากการหักไล่ดินสอดำแหน่งบนผิว Sensor guide มีค่ามากกว่าที่วัดได้จากตำแหน่งบนผิวท่อทั้งนี้เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่คลื่นวิ่งเข้าหัวตรวจสอบโดยตรง ในขณะที่การหักไล่ดินสอดบนผิวท่อซึ่งไม่ได้สัมผัสกับหัวตรวจสอบโดยตรงทำให้สัญญาณลดลงเนื่องจากต้องผ่านตัวกลางโลหะอื่นก่อนเข้าหัวตรวจสอบ โดยสัญญาณของหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD ลดลงประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์และสัญญาณของหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15 ลดลงประมาณ 4.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเทียบเคียงได้กับการรับสัญญาณการรบกวนจากผิวท่อกรณีที่ทำติดตั้งแนบกับผิวท่อได้โดยตรงกับการติดตั้งกับ Sensor guide ให้ผลของสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถใช้หัวตรวจสอบทั้งสองชนิดติดตั้งบน Sensor guide ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพที่ดีในการทดลองได้

4.1.2 ผลการตรวจจับสัญญาณรบกวนของระบบ

ในการทดลองได้ทำการตรวจจับสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่โดยลักษณะของสัญญาณในโดเมนเวลามีลักษณะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีลักษณะคล้ายๆกันไม่สามารถบอกค่าที่ชัดเจนได้หากไม่นำไปหาค่าจากโปรแกรมการคำนวณต่างๆโดยลักษณะสัญญาณรบกวนของระบบในโดเมนเวลามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.3



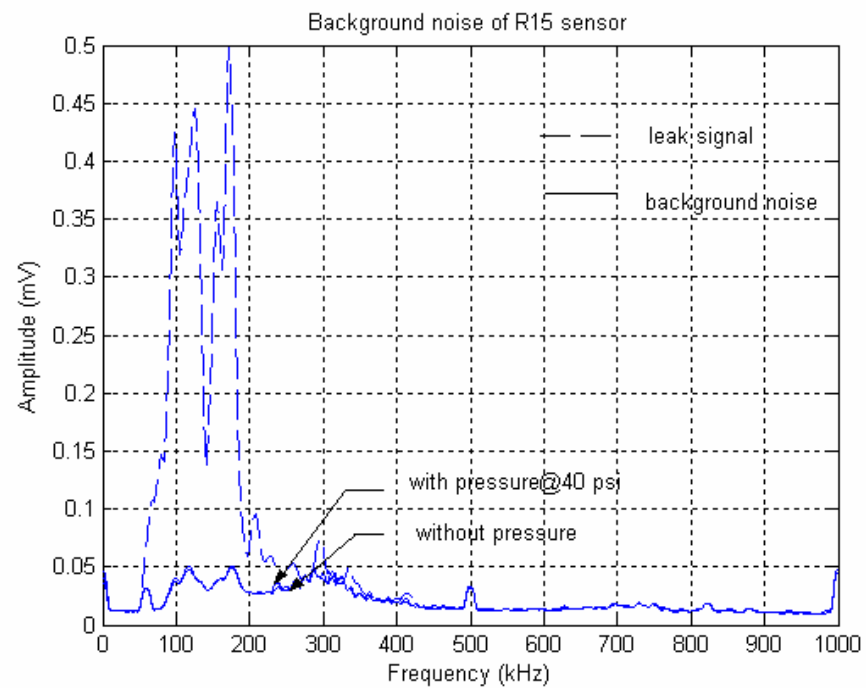
(ก) สัญญาณรบกวนจากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD



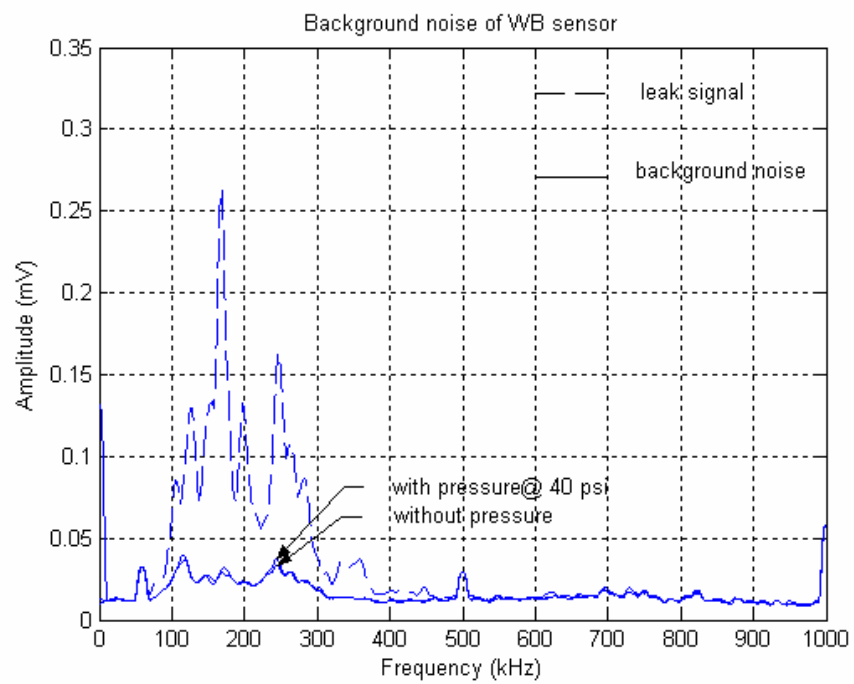
(ข) สัญญาณรบกวนจากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15

รูปที่ 4.3 สัญญาณรบกวนของระบบที่ได้จากหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองชนิดในโดเมนเวลา

เนื่องจากกราฟในโดเมนเวลาไม่สามารถจะบอกความชัดเจนในการแสดงค่าของสัญญาณดังนั้นจึงนำกราฟที่บันทึกในโดเมนความถี่มาแสดงถึงขนาด ช่วงความถี่ และลักษณะคลื่นของสัญญาณรบกวนในระบบนี้ ซึ่งจากการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆบน Sensor guide รองรับกับผิวท่ออีกชั้นหนึ่งที่ยังไม่มีการรั่ว กราฟที่ได้กรณีที่ไม่มีความดันและความดันในท่อจะมีลักษณะเดียวกันและมีขนาดใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.4 แต่ในรูปที่ 4.4 (ก) แสดงให้เห็นกรณีที่สัญญาณรบกวนเมื่อมีความดันในท่อและมีการรั่วของอากาศผ่านข้อต่อหรือเกลียวของตัวหนอนที่ไม่ได้เจาะรูรั่วทำให้สัญญาณมีระดับแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นมาจากระดับที่ควรจะเป็นที่เมื่อกับระบบที่ไม่มีแรงดัน แต่หากมีการซีลข้อต่อหรือพันเกลียวให้แน่นด้วยวัสดุพันเกลียวเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วของอากาศ จะทำให้สัญญาณรบกวนที่ได้มีขนาดเท่ากัน



(ก) หัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15



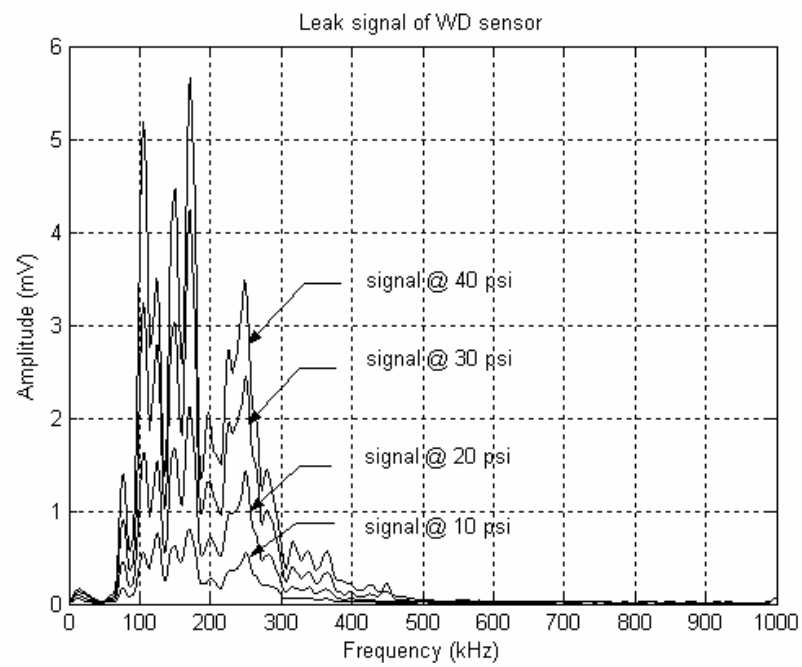
(ข) หัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD

รูปที่ 4.4 สัญญาณรบกวนของระบบที่ได้จากหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองชนิดในโดเมนความถี่กรณี
ไม่มีและมีความดันในท่อ

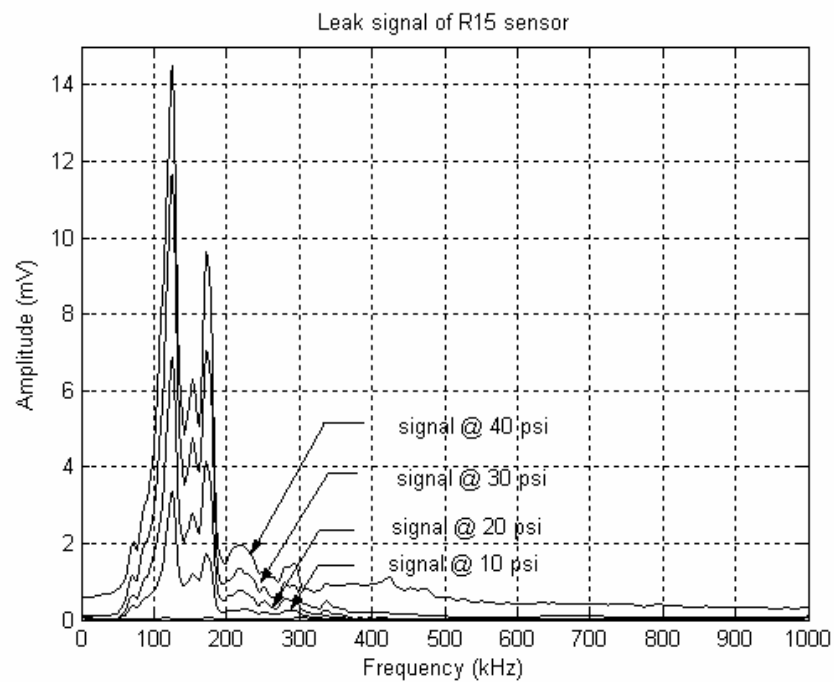
เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณคลื่นอะคูสติกของหัวตรวจสอบทั้งสองชนิดในโดเมนความถี่พบว่าหัว WD สามารถวัดค่าความถี่ได้ในย่านที่กว้างซึ่งแอมพลิจูดแต่ละความถี่มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ในขณะที่ R15 จะเห็นแอมพลิจูดในช่วง 100-200 kHz ได้เด่นชัดและลักษณะของ สัญญาณรบกวน ทั้งสองหัวพบว่ามึระดับใกล้เคียงกันแต่สัญญาณเมื่อระบบมีความดันจะสูงกว่าเมื่อไม่มีความดันเล็กน้อย เนื่องจากอาจมีการรบกวนของอากาศบริเวณจุดต่อต่างๆของชุดทดลอง แต่เมื่อทำแก้ไขการรบกวนที่รอยต่อต่างๆแล้วจะทำให้ได้ลักษณะของสัญญาณที่ใกล้เคียงมากจนแทบไม่มีความแตกต่าง ทั้งเมื่อมีความดันและไม่มีความดัน ดังนั้นความดันในระบบขณะที่ไม่มีการรบกวนไม่มีผลต่อสัญญาณรบกวนโดยกราฟดังกล่าวเกิดจากการเก็บข้อมูลที่ระบบมีการกำจัดสัญญาณรบกวนทั้งทางด้านไฟฟ้าและทางกลออกไป ซึ่งได้แก่ การสั่นสะเทือนของเครื่องอัดอากาศ หรือสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเมื่อเครื่องอัดอากาศทำงาน เป็นต้น ด้วยการตั้งค่าจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม สรุปคือสัญญาณรบกวนที่ได้เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากระบบการตรวจวัดแบบอะคูสติกอิมมิชชัน ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้

4.1.3 ผลการเลือกหัวตรวจจับสัญญาณที่เหมาะสมในการทดลอง

เมื่อติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD และชนิด R15 ตรวจจับสัญญาณในโดเมนความถี่โดยการกำหนดให้ขนาดรูรั่วมีขนาดคงที่แต่ปรับความดันในท่อให้มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าแนวโน้มของสัญญาณที่ได้จากหัวตรวจจับทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเหมือนกันคือสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาย่านความถี่ที่ตรวจวัดได้พบว่าสัญญาณของหัวตรวจจับชนิด WD พบว่าย่านความถี่ที่ปรากฏชัดเจนมีช่วงที่กว้างประมาณช่วง 100-250 kHz ความถี่ที่ชัดที่สุดประมาณ 175 kHz ลักษณะสัญญาณของหัวตรวจจับสัญญาณ R15 พบว่าย่านความถี่ที่ปรากฏชัดเจนมีช่วงประมาณ 100-200 kHz ความถี่ที่ชัดที่สุดประมาณ 130 kHz ดังนั้นสัญญาณการรั่วน่าจะมีช่วงที่ชัดเจนประมาณ 130-175 kHz และหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15 ยังให้ค่าแอมพลิจูดที่มากกว่าชนิด WD ซึ่งการเลือกใช้หัวตรวจสอบ R15 ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 150 kHz จะทำให้การวัดสัญญาณการรั่วได้ดีกว่าชนิด WD ดังนั้นจึงเลือกใช้หัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15 ในการทดลอง



รูปที่ 4.5 ลักษณะของสัญญาณการรั่วในโดเมนความถี่ที่ความดันต่างๆจากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด WD



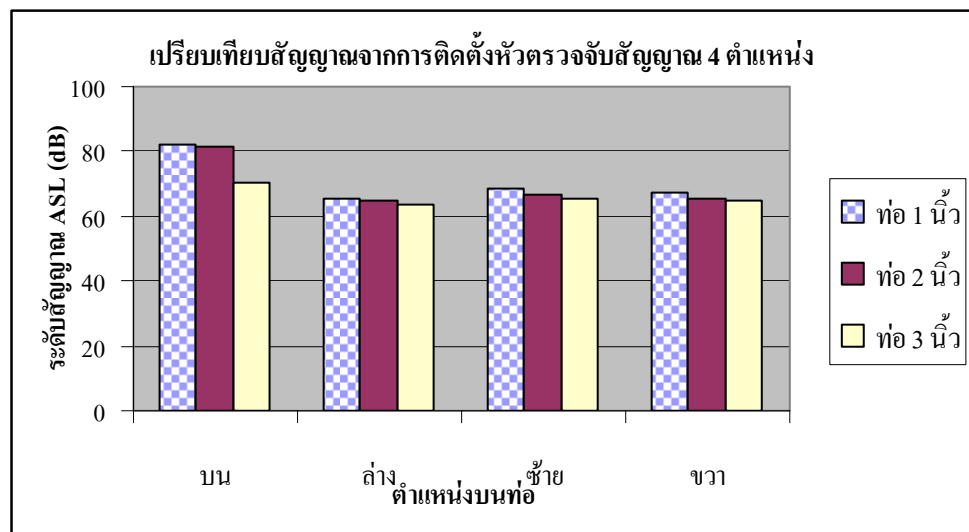
รูปที่ 4.6 ลักษณะของสัญญาณการรั่วในโดเมนความถี่ที่ความดันต่างๆจากหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15

4.1.4 ผลการเลือกตำแหน่งการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ

เมื่อได้หัวตรวจจับสัญญาณที่จะใช้ในการตรวจวัดซึ่งคือชนิด R15 แล้ว ขั้นตอนนี้จะพิจารณาถึงตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสมในการที่จะตรวจวัดสัญญาณซึ่งผลการติดตั้งในตำแหน่ง 4 ตำแหน่งคือ ด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวา จากตำแหน่งติดกับรูรั่วจำลอง ผลการตรวจวัดในโดเมนเวลาแล้วทำการเปลี่ยนสัญญาณให้อยู่ในรูปอะคูสติคพารามิเตอร์คือ ASL เป็นดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจวัดสัญญาณจากการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ 4 ตำแหน่ง

ขนาดท่อ	ASL (dB)			
	ด้านบน	ด้านล่าง	ด้านซ้าย	ด้านขวา
1 นิ้ว	82.1	65.3	68.5	67.3
2 นิ้ว	81.2	64.9	66.8	65.1
3 นิ้ว	70.5	63.5	65.4	64.8

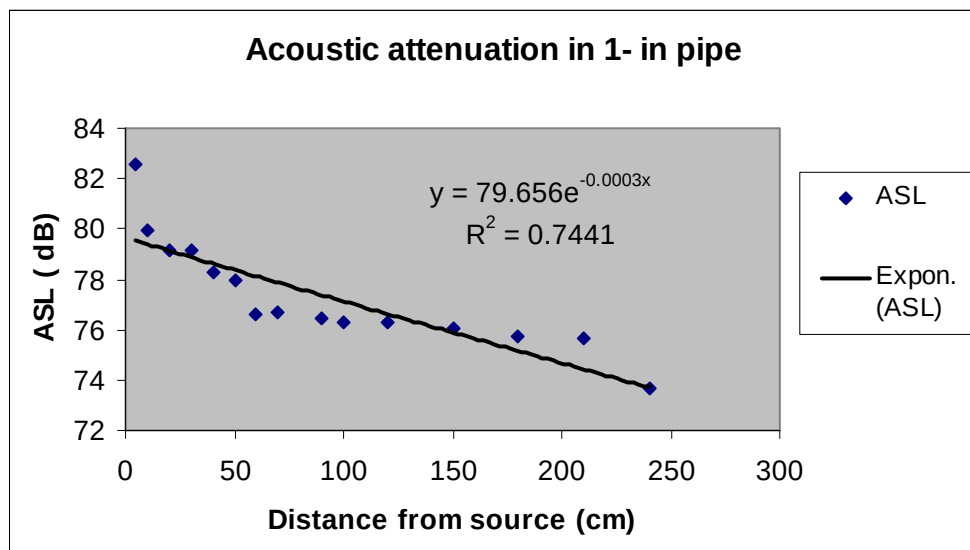


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบสัญญาณจากการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณ 4 ตำแหน่ง

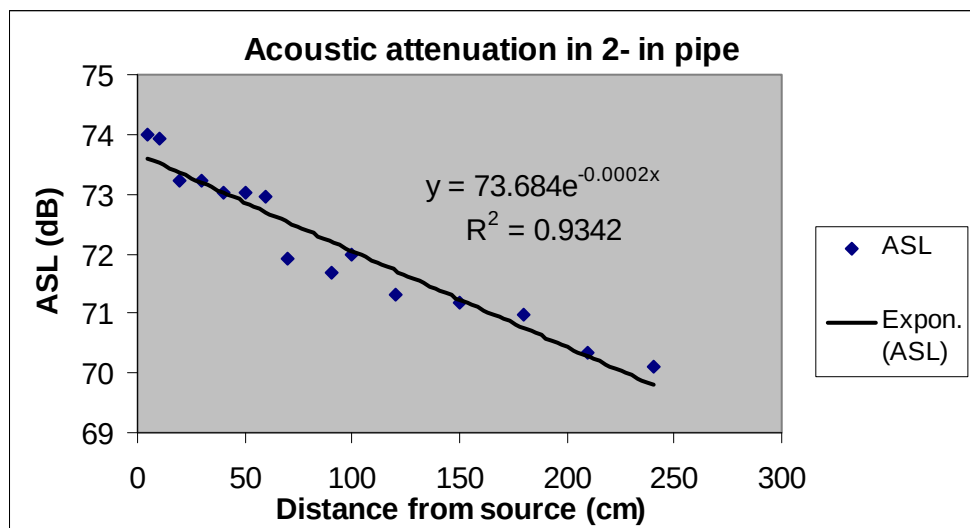
จากผลการทดลองพบว่าระดับสัญญาณที่ตรวจวัดไว้ที่ตำแหน่งด้านบนติดกับรูรั่วจำลองมีขนาดสัญญาณที่แรงมากที่สุดทั้งนี้เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่สัญญาณคลื่นวิ่งเข้าหัวตรวจจับสัญญาณได้ใกล้ที่สุดและตำแหน่งที่เหลือจะมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะด้านข้างซ้ายขวามีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุดเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณในระยะห่างจากตำแหน่งรูรั่วเท่ากันซึ่งระยะที่คลื่นวิ่งเข้าหัวตรวจจับสัญญาณจึงใกล้เคียงกันมากทั้งนี้โดยทฤษฎีน่าจะได้ขนาดเท่ากันแต่เนื่องด้วย

อาจมีความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่ขนาดของสัญญาณที่ตำแหน่งล่างสุดจากตำแหน่งรูรั่วให้ขนาดของคลื่นที่ต่ำที่สุด เนื่องจากระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไกลที่สุดนั่นเอง

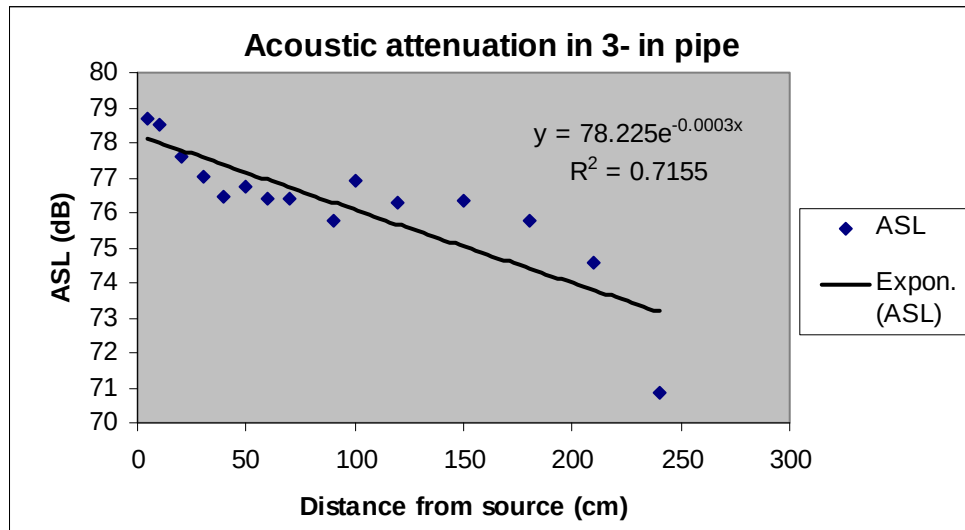
เมื่อทราบว่าตำแหน่งบนผิวท่อมีขนาดของสัญญาณที่สูงที่สุดแล้วผลการทดลองเพื่อตรวจสอบระดับของสัญญาณที่ได้จากการติดตั้งที่ระยะห่างจากรูรั่วจำลอง (source) ที่ระยะต่างๆหรืออาจกล่าวว่าเป็นผลการลดทอนของคลื่น (Attenuation) ของท่อทั้ง 3 ขนาดด้วย ซึ่งมีลักษณะดังนี้



(ก) ระดับสัญญาณที่ระยะห่างจาก source ที่ระยะต่างๆของท่อ 1 นิ้ว



(ข) ระดับสัญญาณที่ระยะห่างจาก source ที่ระยะต่างๆของท่อ 2 นิ้ว



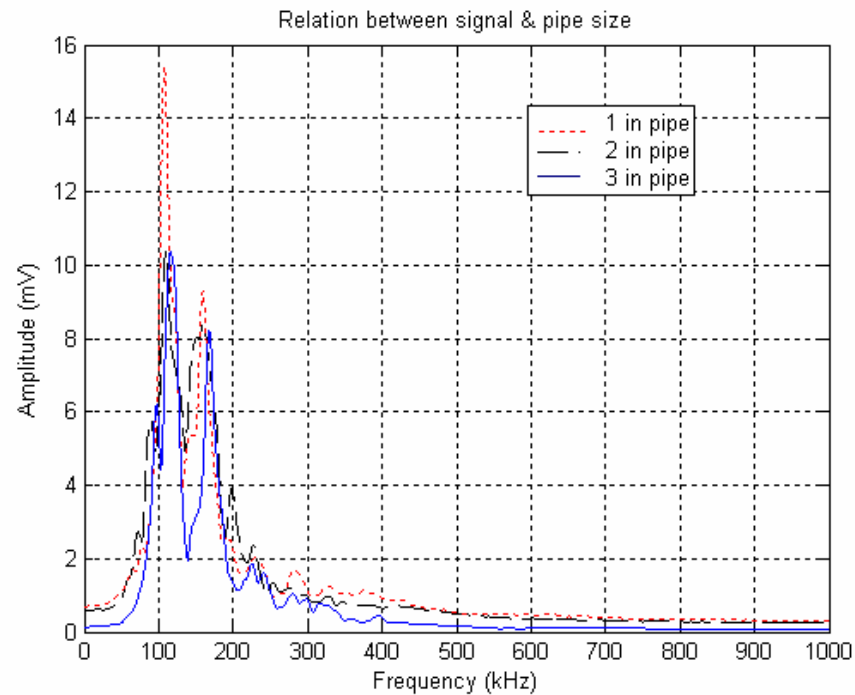
(ก) ระดับสัญญาณที่ระยะห่างจาก source ที่ระยะต่างๆของท่อ 3 นิ้ว

รูปที่ 4.8 ระดับสัญญาณที่ระยะห่างจาก source ที่ระยะต่างๆของท่อทั้ง 3 ขนาด

จากท่อทั้ง 3 ขนาดพบว่าที่ตำแหน่งแรกของการติดตั้งคือระยะติดกับรูรั่วจำลองให้ระดับสัญญาณคลื่นสูงที่สุดและมีแนวโน้มของสัญญาณลดลงเมื่อระยะห่างการตรวจวัดห่างจากจุดรั่วมากขึ้นเมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองของท่อทั้ง 3 ขนาดพบว่าแนวโน้มที่สอดคล้องกับสมการพื้นฐานของการลดทอนลงของคลื่นเสียง คือ $A = A_0 e^{-\alpha x}$ เมื่อ A = flux density at selected point , A_0 = flux density at the source , α = attenuation coefficient , x = distance from the source ซึ่งเราจะนำสมการการลดทอนของท่อทั้ง 3 ขนาดไปพิจารณาในการหาอัตราการรั่วเมื่อทราบตำแหน่งของการรั่วแล้วโดยเปรียบเทียบกับสมการหาอัตราการรั่วซึ่งได้จากการนำค่าสัญญาณที่ตรวจวัด ณ ตำแหน่งที่ให้สัญญาณสูงที่สุดนั้นก็คือระยะที่ติดกับรูรั่วจำลอง

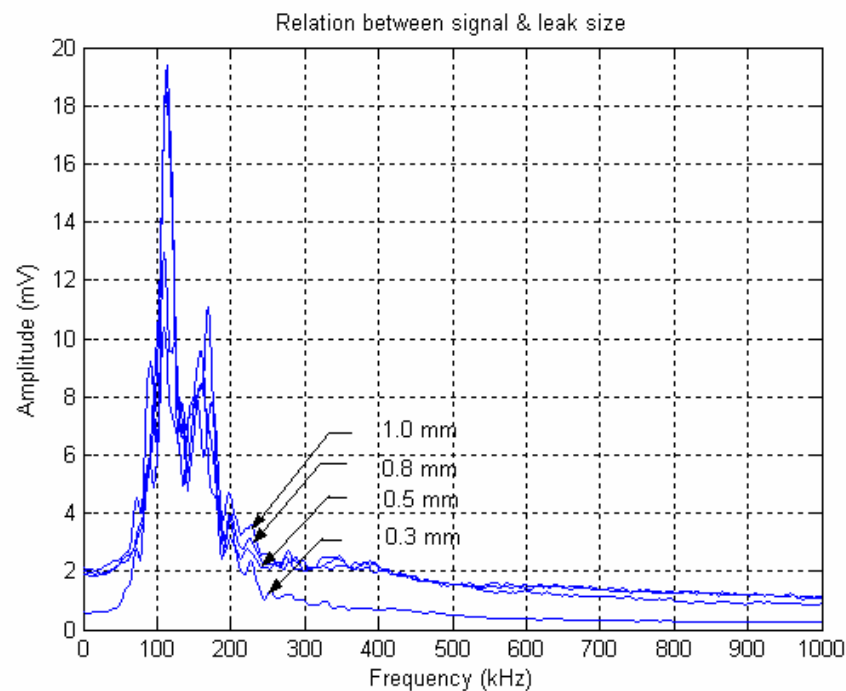
4.1.5 ผลการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณอะคูสติก

ลักษณะพื้นฐานของสัญญาณว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไรเมื่อปรับเปลี่ยนสภาวะการทดลองต่างๆ โดยแบ่งเป็นตามวัตถุประสงค์ซึ่งผลการตรวจวัดพบว่าสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับขนาดท่อที่มีการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ผ่านสอบเทียบและระบบท่อไม่มีการรั่วไหลออกจากตำแหน่งอื่นๆ นอกจากรูรั่วจำลอง ซึ่งผลที่ได้คือไม่ว่าจะตั้งตัวแปรใดคงที่เช่นขนาดของรูรั่วคงที่ ขนาดของความดันคงที่ เพื่อนำสัญญาณที่ตรวจวัดมาเปรียบเทียบกับกันของท่อทั้งสามขนาดพบว่าเมื่อเปลี่ยนจากท่อ 1 นิ้ว เป็นท่อ 2 นิ้วและเป็น 3 นิ้ว สัญญาณที่ได้จะมีค่าลดลงเมื่อขนาดท่อเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับขนาดท่อ

และลักษณะสัญญาณพื้นฐานต่อมาคือสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับขนาดรูรั่วจำลองที่เตรียมไว้ 4 ขนาดซึ่งไม่ว่าจะกำหนดให้ขนาดท่อคงที่ หรือความดันคงที่ในแต่ละขนาดท่อ แนวโน้มที่ได้จะเป็นไปในทางเดียวกันคือสัญญาณมีขนาดสูงขึ้นตามขนาดของรูรั่วที่ใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10

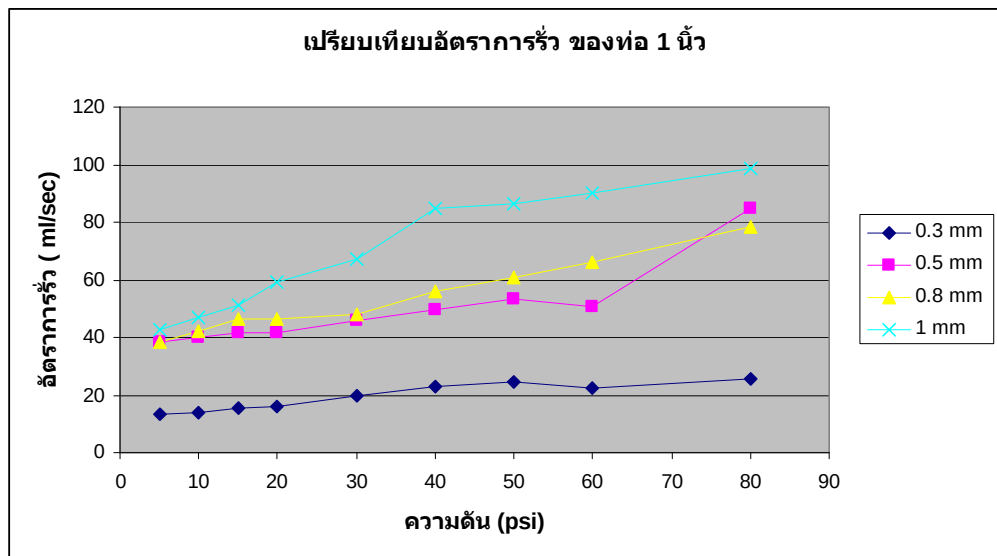


รูปที่ 4.10 สัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับขนาดรูรั่ว

ในส่วนสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่สัมพันธ์กับความดันพบว่าแต่ละขนาดของท่อไม่ว่าจะกำหนดให้ใช้ขนาดท่อเท่าใด และแต่ละขนาดรูรั่วที่คงที่ พบว่าแนวโน้มของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6

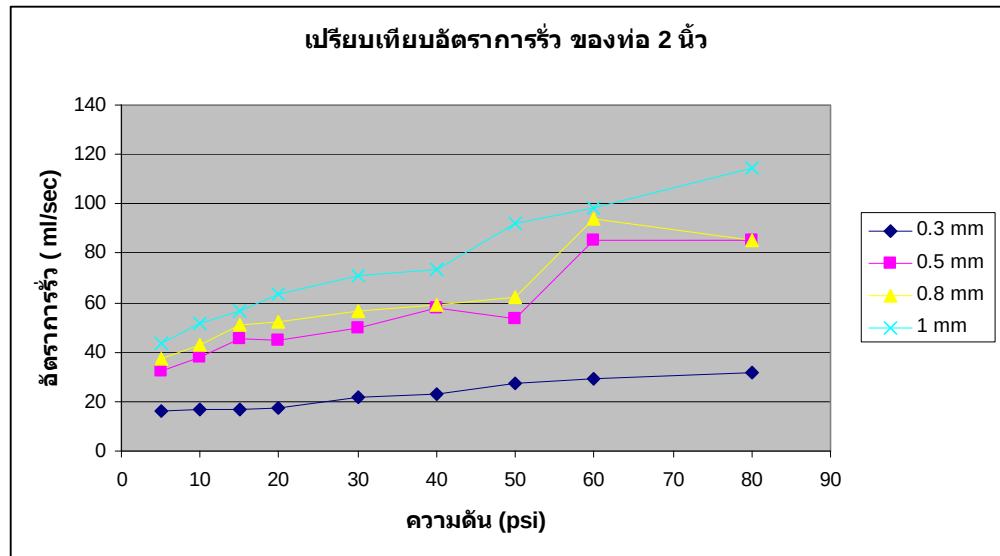
4.1.6 ผลการหาอัตราการรั่วของท่อที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจสอบได้จากวิธีอะคูสติกอิมพัลส์

ผลการตรวจจับสัญญาณและจับเวลาของชุดท่อขนาด 1 นิ้วที่มี Chamber ปริมาตร (V) 530 มิลลิลิตร ติดตั้งอยู่และใช้รูรั่วจำลองทีละขนาดคือขนาด 0.3 , 0.5 , 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร และบันทึกสัญญาณในโดเมนความถี่และโดเมนเวลาของแต่ละขนาดรูรั่วตามระดับของความดันอากาศที่เปิดให้ระบบที่ระดับ 5,10,15,20,30,40,50,60,80 psi พร้อมกับจับเวลาความดันที่เพิ่มขึ้นใน Chamber จนความดันเพิ่มขึ้นเท่ากับความดันในท่อเพื่อนำไปคำนวณอัตราการรั่วจากสูตร $Q = V \times \frac{(\Delta P / P_0)}{\Delta T}$ ซึ่งผลการตรวจวัดเป็นดังแสดงในรูป ที่ 4.12



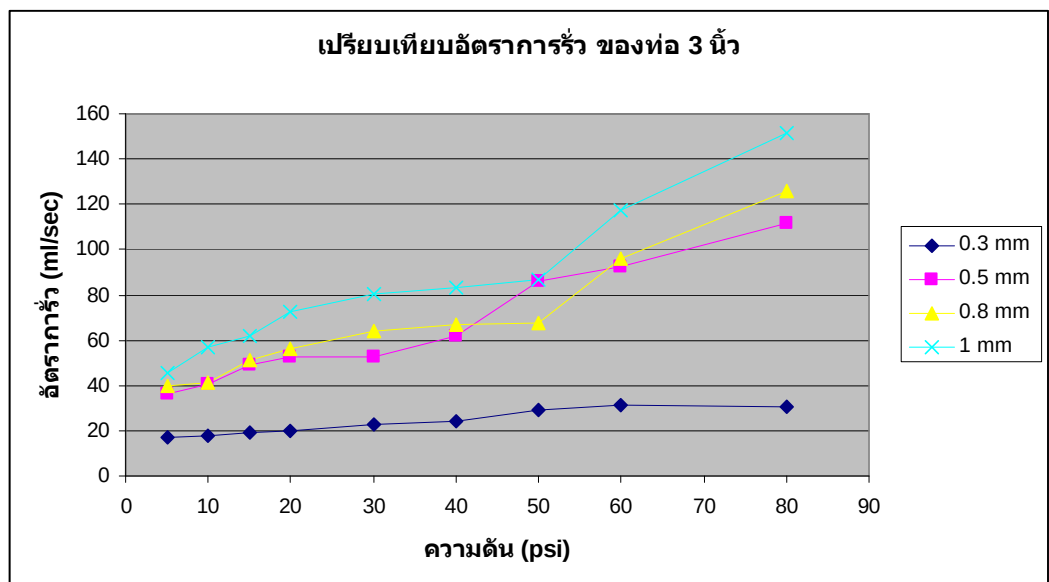
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราการรั่วที่วัดได้ด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ของท่อขนาด 1 นิ้วที่รูรั่วจำลองขนาด 0.3,0.5,0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ผลการตรวจวัดอัตราการรั่วของท่อ 1 นิ้วของทุกขนาดรูรั่วจำลองมาเปรียบเทียบพบว่าการตรวจวัดอัตราการรั่วได้ค่าต่ำสุดมีค่า 13.368 ml/sec ที่ความดัน 5 psi และที่ขนาดรูรั่วจำลองขนาดเล็กที่สุดคือ 0.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราการรั่วที่วัดได้ด้วยวิธีอะคูสติคมิชชั่นของท่อขนาด 2 นิ้วที่รูรั่วจำลองขนาด 0.3,0.5,0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

และเมื่อนำผลการตรวจวัดอัตราการรั่วของท่อ 2 นิ้วของทุกขนาดรูรั่วจำลองมาเปรียบเทียบพบว่าการตรวจวัดอัตราการรั่วได้ค่าต่ำสุดมีค่า 15.8768 ml/sec ที่ความดัน 5 psi และที่ขนาดรูรั่วจำลองขนาดเล็กที่สุดคือ 0.3 มิลลิเมตร



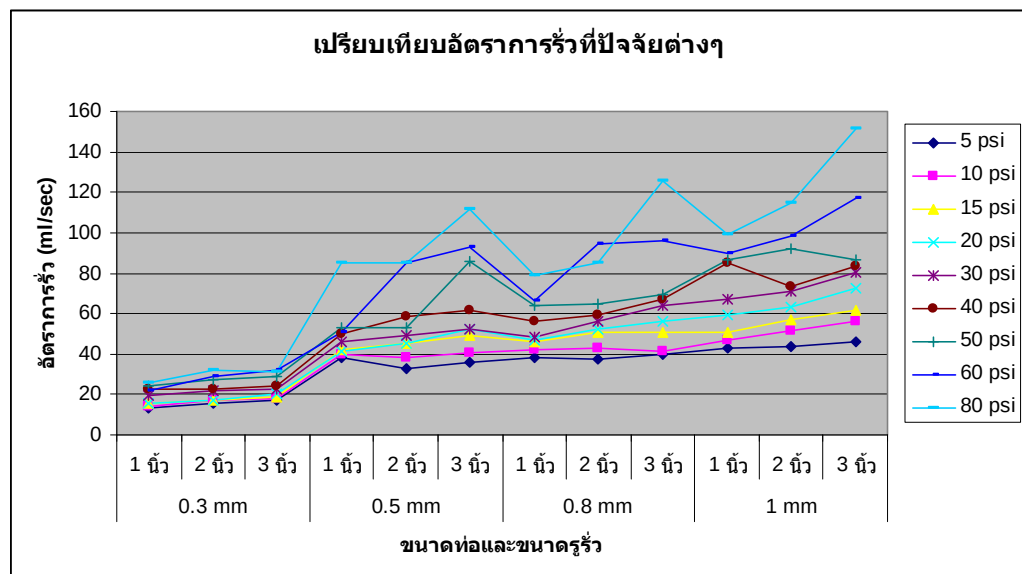
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราการรั่วที่วัดได้ด้วยวิธีอะคูสติคมิชชั่นของท่อขนาด 3 นิ้วที่รูรั่วจำลองขนาด 0.3,0.5,0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

และเมื่อนำผลการตรวจวัดอัตราการรั่วของท่อ 3 นิ้วของทุกขนาดรูรั่วจำลองมาเปรียบเทียบพบว่าการตรวจวัดอัตราการรั่วได้ค่าต่ำสุดมีค่า 16.9032 ml/sec ที่ความดัน 5 psi และที่ขนาดรูรั่วจำลองขนาดเล็กที่สุดคือ 0.3 มิลลิเมตร

จากการเปรียบเทียบท่อทั้ง 3 ขนาดดังข้อมูลในตาราง

ตารางที่ 4.4 ตารางการเก็บข้อมูลอัตราการรั่วที่สัมพันธ์กับความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

ความดัน (psi)	อัตราการรั่ว (ml/sec)											
	0.3 mm			0.5 mm			0.8 mm			1 mm		
	1 in	2 in	3 in	1 in	2 in	3 in	1 in	2 in	3 in	1 in	2 in	3 in
5	13.3	15.8	16.9	38.2	32.5	35.9	38.5	37.2	40.0	42.6	43.6	45.7
10	13.8	16.9	17.9	39.9	38.2	40.6	42.1	42.8	41.5	46.9	51.7	56.5
15	15.3	16.8	18.9	41.7	45.2	49.3	46.2	51.1	51.0	51.0	56.7	61.8
20	15.9	17.4	19.9	41.7	45.0	52.3	46.6	52.2	56.4	59.4	63.4	72.4
30	19.7	21.9	22.8	45.7	49.5	52.2	48.1	56.5	63.6	67.1	70.9	80.3
40	22.7	22.9	24.2	49.6	58.1	61.9	55.9	59.2	66.8	84.9	73.1	83.2
50	24.2	27.3	29.1	53.2	53.3	86.1	63.9	64.5	69.2	86.5	92.2	86.8
60	22.1	29.0	31.6	50.4	84.9	92.7	66.2	94.1	96.0	89.8	98.6	117.2
80	25.5	31.9	30.8	84.9	84.9	111.4	78.5	84.9	125.7	98.8	114.5	151.6



รูปที่ 4.15 การเก็บข้อมูลอัตราการรั่วที่สัมพันธ์กับความดัน ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

พบว่าแนวโน้มของอัตราการรั่วมีลักษณะเดียวกันคือที่ความดันค่าเดียวกันอัตราการรั่วจะมากขึ้นตามขนาดของรูรั่วที่ใหญ่ขึ้นและอัตราการรั่วที่วัดได้น้อยที่สุดจะได้จากขนาดรูรั่วที่เล็กที่สุด โดยในการทดลองนี้สามารถตรวจสอบอัตราการรั่วได้น้อยที่สุดคือ 13.368 ml/sec ซึ่งวัดได้จากท่อขนาด 1 นิ้วที่ความดัน 5 psi โดยสามารถสรุปได้ว่ายิ่งท่อมีขนาดเล็กรวมถึงขนาดรูรั่วมีขนาดเล็กและที่ความดันในระบบมีค่าสูงถึงค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการไหลเป็นแบบ Turbulence ก็จะทำให้ได้อัตราการรั่วที่น้อยที่สุด ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า ที่ท่อขนาดเล็ก รูรั่วจำลองที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาที่ความดันในระบบเท่ากันจะทำให้เกิดความเร็วในการไหลของของไหลผ่านรูรั่วเร็วกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการ Reynolds Number พบว่าเมื่อความเร็วมีค่ามากทำให้เกิด Turbulence มาก และเมื่อความดันในระบบมีค่าสูงก็จะทำให้เกิดแรงอัดสูงดังนั้นความเร็วที่ไหลผ่านรูรั่วจึงมีค่าสูงมาก ดังนั้นที่ท่อขนาดเล็กและความดันสูงจะทำให้สัญญาณอะคูสติกที่แปรผันตามการเกิด Turbulence เกิดขึ้นก่อนในขณะที่อัตราการรั่วยังมีค่าน้อยอยู่

4.2 ผลการออกแบบและเก็บผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ ขนาดของท่อ ความดันในระบบ และอัตราการรั่วของท่อ ในรูปของสมการทำนายอัตราการรั่ว ด้วยโปรแกรม Minitab

4.2.1 ผลการหาขนาดสิ่งตัวอย่างของสัญญาณรบกวน

การทดลองได้เก็บค่าสัญญาณรบกวนด้วยหัวตรวจจับสัญญาณชนิด R15 จำนวนในเบื้องต้น 10 สัญญาณแล้วทำการเปลี่ยนสัญญาณให้อยู่ในรูปของอะคูสติกพารามิเตอร์คือ ASL แล้วทำการใช้โปรแกรม Minitab พิจารณาข้อมูลพื้นฐานในทางสถิติว่าเพียงพอที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ต่อหรือไม่ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นจำนวน 10 ค่าเป็นไปตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวัดสัญญาณรบกวนเบื้องต้นของระบบในรูปของอะคูสติกพารามิเตอร์

อะคูสติกพารามิเตอร์ ลำดับของสัญญาณครั้งที่	ASL (dB)
1	43.33
2	42.94
3	43.88
4	43.23
5	42.92

อะคูสติกพารามิเตอร์ ลำดับของสัญญาณครั้งที่	ASL (dB)
6	44.14
7	44.15
8	43.39
9	43.20
10	44.11

นำข้อมูลที่มีวิเคราะห์ความเหมาะสมในโปรแกรม Minitab โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Basic Statistics > Display Descriptive Statistics เพื่อพิจารณาหาข้อมูลพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล ซึ่งผลของการวิเคราะห์เป็นดังนี้

Descriptive Statistics: ASL

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3
ASL	10	0	43.533	0.157	0.496	42.921	43.137	43.365	44.123
Variable	Maximum								
ASL	44.153								

รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของสัญญาณรบกวนที่อยู่ในรูปของ ASL

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของสัญญาณรบกวนต้องการนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ไปใช้งานต่อ โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Power and Sample size > 1-Sample Z เพื่อพิจารณาหาขนาดของตัวอย่างที่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ต่อไป โดยกำหนดให้ปริมาณ Difference และ Sigma มีค่าเท่ากับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ โดยที่ปริมาณ Power Value เท่ากับ 0.8

Power and Sample Size

1-Sample Z Test

Testing mean = null (versus not = null)
Calculating power for mean = null + difference
Alpha = 0.05 Sigma = 0.496

Difference	Sample Size	Target Power	Actual Power
0.496	8	0.8000	0.8074

รูปที่ 4.17 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของสัญญาณรบกวนที่อยู่ในรูปของ ASL

จากวิธีการดังกล่าวพบว่าขนาดของสิ่งตัวอย่างของสัญญาณที่เพียงพอและเหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์ต่อไปของทั้งสองอะคูสติกพารามิเตอร์ คือ 8 ค่า เมื่อได้จำนวนสิ่งตัวอย่างแล้วทำการเฉลี่ยออกมา ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้จะเป็นตัวแทนของข้อมูลเชิงปริมาณของสัญญาณรบกวน โดยจากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของอะคูสติกพารามิเตอร์ ASL เท่ากับ 43.50 ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สัญญาณรบกวนของระบบในรูปของอะคูสติกพารามิเตอร์

อะคูสติกพารามิเตอร์ ลำดับของสัญญาณครั้งที่	ASL (dB)
1	43.33
2	42.94
3	43.88
4	43.23
5	42.92
6	44.14
7	44.15
8	43.39
ค่าเฉลี่ย	43.50

4.2.2 ผลการหาขนาดสิ่งตัวอย่างของอะคูสติกพารามิเตอร์ มีความสัมพันธ์กับ ความดันขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

เนื่องจากข้อมูลอะคูสติกพารามิเตอร์ที่ต้องการจะเก็บในหัวข้อนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนั้นในการหาสิ่งตัวอย่างจะต้องมีการออกแบบเพื่อเก็บข้อมูลเบื้องต้นเสียก่อน ซึ่งการหาขนาดสิ่งตัวอย่างเริ่มจากใช้โปรแกรม Minitab โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design เพื่อออกแบบการเก็บข้อมูลเบื้องต้น โดยกำหนดค่าของปัจจัย (Factor) เท่ากับ 3 อันได้แก่ ความดันในระบบ ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง คือ อะคูสติกพารามิเตอร์ นอกจากนี้ยังต้องกำหนดว่าแต่ละปัจจัยมีกี่ระดับและประกอบไปด้วยค่าอะไรบ้าง โดยกำหนดดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ความดันที่ 5,10,15,20,30,40,50,60 และ 80 psi

ปัจจัยที่ 2 ขนาดท่อที่ 1, 2 และ 3 นิ้ว

ปัจจัยที่ 3 ขนาดรูรั่วจำลองที่ 0.3 , 0.5 , 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

นอกจากนี้ยังต้องกำหนดด้วยว่าจะเก็บผลการทดลองซ้ำกี่ค่า ในที่นี้กำหนดให้การทำซ้ำ (Replicates) มีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งผลการแทนค่าต่างๆเป็นดังนี้

Factorial Design

General Factorial Design

Factors: 3 Factor Levels: 9, 3, 4
Runs: 216 Replicates: 2

รูปที่ 4.18 จำนวนการเก็บผลการทดลอง

จากโปรแกรมพบว่าจะต้องเก็บผลการทดลองโดยการทำซ้ำ 2 ครั้ง ที่เงื่อนไขต่างๆ จำนวน 216 ค่า ซึ่งการออกแบบการเก็บผลการทดลองเพื่อที่จะนำไปพิจารณาถึงขนาดสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสม เป็นดังตารางที่ 4.7 โดยอะคูสติคพารามิเตอร์ที่แทนค่าในตารางดังกล่าวเกิดจากการนำอะคูสติคพารามิเตอร์ที่เป็นสัญญาณรบกวนลบออกจากอะคูสติคพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากสัญญาณอะคูสติคที่วัดได้จากปัจจัยต่างๆ

ตารางที่ 4.7 ตารางการเก็บข้อมูลเพื่อหาสิ่งตัวอย่างของอะคูสติคพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับความดันในระบบ ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
1	60	3	0.3	44.5
2	10	1	0.5	30.4
3	5	3	1	34.0
4	20	1	1	43.8
5	30	3	0.8	44.8
6	50	2	0.3	43.4
7	60	3	0.3	42.8

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
8	40	3	0.3	41.0
9	60	1	1	49.2
10	60	3	0.8	46.0
11	50	2	1	48.2
12	30	1	0.3	41.8
13	20	3	1	42.1
14	60	1	0.3	45.4
15	50	1	0.5	46.8
16	60	3	0.8	47.3
17	5	2	1	31.7
18	15	3	0.5	32.3
19	50	1	1	47.9
20	60	2	1	48.1
21	40	1	0.8	47.3
22	15	2	0.8	39.8
23	20	3	1	43.4
24	30	2	0.5	41.7
25	15	1	1	40.8
26	40	3	0.5	43.5
27	40	1	0.3	42.0
28	15	2	0.3	26.7
29	10	3	0.8	35.9
30	40	2	0.5	44.4
31	20	2	0.5	40.7
32	50	3	0.5	45.3
33	30	2	0.8	43.6
34	80	3	1	47.4

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
35	10	1	0.3	25.7
36	80	1	0.8	48.7
37	80	3	1	48.1
38	30	1	0.8	45.1
39	30	3	0.5	41.8
40	10	3	0.3	21.8
41	50	3	1	47.3
42	80	1	1	49.5
43	30	3	0.3	37.8
44	40	2	0.3	41.6
45	10	3	0.8	35.1
46	40	1	1	48.4
47	15	2	1	39.1
48	30	2	1	44.7
49	5	1	1	36.3
50	5	1	0.8	33.9
51	60	1	0.5	46.7
52	20	2	1	43.2
53	5	3	0.8	29.9
54	5	2	0.8	31.2
55	60	3	1	47.0
56	30	3	1	44.8
57	5	2	0.3	19.4
58	60	1	0.5	46.9
59	40	1	1	47.4
60	30	1	0.3	40.6
61	50	1	1	49.0

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
62	15	2	0.5	33.7
63	30	3	1	43.5
64	60	2	0.3	44.8
65	50	3	0.3	42.6
66	15	2	1	39.7
67	50	2	1	46.9
68	10	1	0.8	37.7
69	80	1	0.5	47.2
70	60	1	0.3	44.5
71	15	2	0.8	38.7
72	80	2	0.5	46.9
73	30	2	1	45.6
74	5	1	1	35.7
75	60	1	0.8	47.7
76	15	3	1	39.0
77	40	3	0.8	43.5
78	50	3	1	46.6
79	10	2	0.3	25.1
80	30	1	0.8	45.8
81	60	1	0.8	48.1
82	50	1	0.5	45.9
83	20	1	0.3	34.6
84	5	3	1	31.9
85	80	2	0.3	45.0
86	50	2	0.8	46.7
87	50	2	0.5	45.7
88	20	1	0.8	43.6

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
89	10	3	0.3	21.0
90	15	1	0.8	41.7
91	50	3	0.8	45.7
92	30	2	0.5	42.7
93	60	2	0.5	46.8
94	20	2	0.3	30.2
95	15	3	1	38.8
96	40	1	0.3	43.7
97	40	2	0.3	41.1
98	80	1	0.3	46.0
99	40	1	0.8	45.7
100	20	1	0.5	42.8
101	30	1	0.5	43.3
102	80	2	0.8	47.8
103	80	1	0.8	48.6
104	80	2	0.5	47.6
105	15	2	0.5	34.5
106	30	3	0.8	42.7
107	15	1	0.5	35.9
108	40	3	0.8	44.8
109	20	3	0.5	36.7
110	80	3	0.3	43.7
111	50	3	0.5	43.3
112	50	2	0.5	45.8
113	40	3	0.3	40.5
114	40	2	0.8	45.6
115	40	3	0.5	42.6

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
116	60	1	1	49.3
117	5	1	0.5	25.8
118	20	1	0.8	44.8
119	80	1	1	50.2
120	10	2	1	37.7
121	80	2	1	49.7
122	20	2	0.5	39.7
123	20	2	0.3	31.8
124	40	2	0.5	43.1
125	60	2	0.5	47.8
126	10	1	1	38.2
127	40	1	0.5	45.8
128	30	1	0.5	44.9
129	40	2	1	46.7
130	5	2	0.8	29.7
131	30	3	0.3	37.9
132	10	2	1	37.1
133	5	1	0.8	32.9
134	10	2	0.8	35.7
135	80	3	0.8	46.6
136	60	2	0.8	47.7
137	80	3	0.5	45.0
138	20	3	0.3	28.6
139	5	3	0.8	29.2
140	40	3	1	46.3
141	30	2	0.3	39.7
142	50	3	0.3	42.5

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
143	10	3	1	36.6
144	5	2	0.5	23.7
145	20	2	0.8	42.6
146	20	2	1	43.6
147	50	3	0.8	45.6
148	50	2	0.8	47.2
149	30	3	0.5	41.1
150	60	3	0.5	45.7
151	15	1	0.8	39.6
152	15	2	0.3	27.7
153	15	1	0.3	28.3
154	15	3	0.8	35.2
155	10	3	0.5	29.0
156	20	1	0.3	34.0
157	50	1	0.8	47.1
158	80	1	0.5	47.7
159	5	3	0.3	18.9
160	40	2	0.8	46.6
161	30	2	0.8	45.3
162	50	2	0.3	42.7
163	5	1	0.3	21.7
164	10	2	0.5	29.6
165	10	3	0.5	25.4
166	80	3	0.5	45.8
167	30	1	1	46.7
168	40	2	1	46.8
169	10	1	0.3	25.9

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
170	5	3	0.3	17.4
171	10	3	1	37.6
172	5	3	0.5	22.8
173	15	3	0.5	33.1
174	5	2	0.5	25.1
175	60	2	0.8	47.5
176	40	3	1	45.6
177	15	1	0.5	36.8
178	50	1	0.3	44.6
179	15	3	0.3	24.4
180	10	2	0.3	23.7
181	15	1	1	42.2
182	20	1	0.5	42.2
183	15	3	0.3	21.8
184	80	2	0.8	48.8
185	15	1	0.3	28.6
186	60	2	1	49.1
187	20	3	0.5	37.9
188	60	3	0.5	43.9
189	10	1	1	38.7
190	20	2	0.8	42.8
191	80	2	1	48.6
192	30	1	1	45.7
193	50	1	0.8	47.5
194	10	2	0.5	29.0
195	20	1	1	44.8
196	20	3	0.3	28.0

RunOrder	Pressure (Psi)	Pipe size (inch)	leak hole (mm)	ASL (dB)
197	5	2	1	32.5
198	60	2	0.3	44.9
199	20	3	0.8	40.7
200	10	1	0.5	31.7
201	80	3	0.3	44.5
202	15	3	0.8	38.0
203	80	2	0.3	44.9
204	60	3	1	48.2
205	5	1	0.3	20.5
206	30	2	0.3	39.1
207	5	1	0.5	25.1
208	5	2	0.3	20.7
209	20	3	0.8	42.0
210	80	3	0.8	47.5
211	40	1	0.5	44.7
212	50	1	0.3	43.8
213	5	3	0.5	23.3
214	10	1	0.8	37.0
215	80	1	0.3	46.6
216	10	2	0.8	37.0

หลังจากออกแบบและเก็บผลการทดลองเบื้องต้นแล้ว ได้นำข้อมูลของอะคูสติกพารามิเตอร์ไปวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Basic Statistics > Display Descriptive Statistics ซึ่งผลของการวิเคราะห์เป็นดังนี้

Descriptive Statistics: ASL

Variable	N	Mean	Median	TrMean	StDev	SE Mean
ASL	216	40.083	42.875	40.653	7.918	0.539
Variable	Minimum	Maximum	Q1	Q3		
ASL	17.413	50.211	35.794	45.947		

รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์ (ASL) ที่มีความสัมพันธ์กับความดัน ขนาดท่อและขนาดรูรั่วจำลอง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับความดัน ขนาดท่อและขนาดรูรั่วจำลอง ต้องการนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ไปใช้งานต่อ โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Power and Sample size > One-way ANOVA โดยกำหนดค่าของปัจจัย (Factor) เท่ากับ 3 ส่วนค่าแตกต่างมากที่สุดระหว่างค่ากลางกับ Sigma ให้มีค่าเท่ากับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลอะคูสติกพารามิเตอร์ โดยที่กำหนดให้ปริมาณ Power Value เท่ากับ 0.8 เพื่อพิจารณาหาขนาดของสิ่งตัวอย่างที่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์

Power and Sample Size

One-way ANOVA

Sigma = 7.918 Alpha = 0.05 Number of Levels = 3

	Sample	Target	Actual	Maximum
SS Means	Size	Power	Power	Difference
31.3474	21	0.8000	0.8148	7.918

รูปที่ 4.20 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์ (ASL) ที่มีความสัมพันธ์กับความดัน ขนาดท่อและขนาดรูรั่วจำลอง

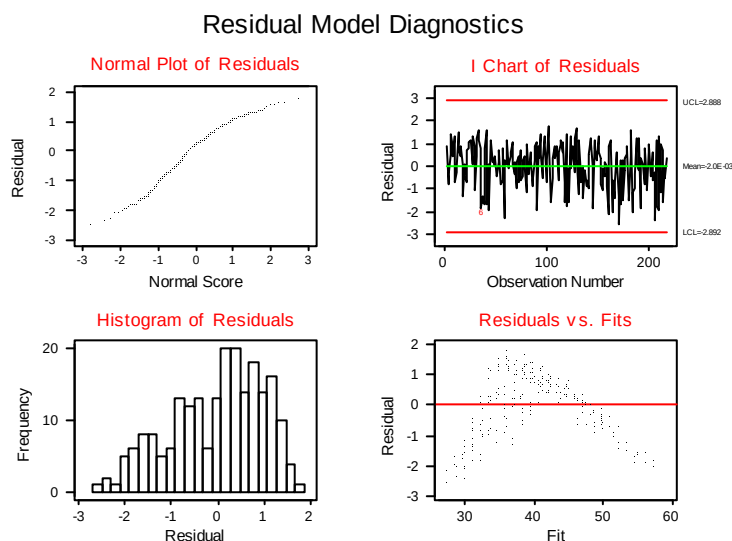
ผลการแทนค่าพบว่าได้ขนาดสิ่งตัวอย่างของอะคูสติกพารามิเตอร์ทั้งสองอย่างละ 21 ค่า เนื่องจากการหาขนาดของสิ่งตัวอย่างจาก One-way ANOVA ในงานวิจัยนี้ให้ความดันเป็นปัจจัยหลักในการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง ดังนั้นจะต้องทำการเก็บข้อมูลของปัจจัยความดันระดับละ 21 ค่า แต่ยังมีสถานะปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นในแต่ละสภาวะการทดลองจะต้องทำการเก็บข้อมูลจำนวน ดังนี้

$$N = 21 / (4 \times 3) = 1.75 \text{ ค่า ซึ่งคือ 2 ค่า}$$

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์มีความสัมพันธ์กับความดัน ขนาดท่อและขนาดรูรั่วจำลอง ซึ่งเกิดจากการเก็บซ้ำ 2 ค่า ในสภาวะปัจจัยต่างๆ สามารถนำมาใช้แทนเป็นข้อมูลจริงได้

4.2.2.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Model Adequacy Checking)

ขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลที่ได้ออกแบบการเก็บไว้ด้วยหลักของ Design of Experiment ว่าข้อมูลจะเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติที่มีค่าความแปรปรวนคงที่หรือไม่ โดยเข้าฟังก์ชัน Stat > Regression > Residual Plot จากกราฟระหว่างเศษเหลือกับลำดับในการทดลอง (I-Chart of Residuals) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างอิสระ (Independent) แสดงว่าข้อมูลได้มาอย่างสุ่ม และเมื่อพิจารณาแผนภาพฮิสโตแกรม (Histogram of Residuals) ซึ่งใช้พิจารณาเมื่อข้อมูลมีมากกว่า 30 ค่า พบว่ามีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และมาจากการทดลองที่มีการออกแบบมาดี จากกราฟระหว่างเศษเหลือกับค่า Fit (Residuals vs Fits) จะเห็นว่าการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ สรุปว่าข้อมูลมีความผันแปรคงที่ (Variance stability)



รูปที่ 4.21 ตรวจสอบความถูกต้องสำหรับข้อมูล ASL

หลังจากที่วิเคราะห์ข้อมูลว่าเหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์ต่อหรือไม่แล้ว ต่อไปเป็นการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองซึ่งเกี่ยวข้องการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ โดยวิเคราะห์จากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นสำคัญ และวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อดูว่าปัจจัยใดที่ส่งผลกระทบต่อค่าตอบสนอง โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > DOE > Analyze Factorial design

4.2.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการออกแบบการทดลอง

หลังจากที่วิเคราะห์หาคุณภาพและความถูกต้องของข้อมูลแล้ว จึงทำการพิจารณาว่าการทดลองได้ออกแบบมาดีหรือไม่ โดยทำการวิเคราะห์จากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากการทดลองให้ได้มาซึ่งตัวแปรตอบสนองคือ ASL สามารถพิจารณาได้จาก

$$R^2 = (1 - SS_E / SS_{total}) \times 100 = (1 - 68.23 / 13480.72) \times 100 = 99.49 \%$$

ซึ่ง R^2 มีค่ามากหมายความว่า การทดลองได้ออกแบบมาเป็นอย่างดี

4.2.2.3 ผลการวิเคราะห์ Interaction ระหว่าง 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง

General Linear Model: ASL versus pressure, pipe size, leak size

Factor	Type	Levels	Values
pressure	fixed	9	5 10 15 20 30 40 50 60 80
pipe siz	fixed	3	1 2 3
leak siz	fixed	4	0.3 0.5 0.8 1.0

Analysis of Variance for ASL, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
pressure	8	9978.04	9978.04	1247.26	1974.39	0.000
pipe siz	2	248.18	248.18	124.09	196.43	0.000
leak siz	3	2349.98	2349.98	783.33	1240.00	0.000
pressure*pipe siz	16	30.76	30.76	1.92	3.04	0.000
pressure*leak siz	24	762.59	762.59	31.77	50.30	0.000
pipe siz*leak siz	6	11.74	11.74	1.96	3.10	0.008
pressure*pipe siz*leak siz	48	31.20	31.20	0.65	1.03	0.441
Error	108	68.23	68.23	0.63		
Total	215	13480.72				

รูปที่ 4.22 ผลของ Interaction ระหว่าง 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อ ASL

นอกจากจะวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแล้วยังต้องวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อดูว่าปัจจัยต่างๆ ส่งผลกระทบบ่อยค่าตอบสนองอย่างไร โดยการวิเคราะห์ตาราง ANOVA จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเราพิจารณาที่ค่า P_Value ของความสัมพันธ์ระหว่างกัน (Interaction) ที่อันดับสูงที่สุดก่อน กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยน ความดัน ขนาดท่อและขนาดรูรั่วพร้อมกันค่าตอบสนองจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยพบว่าค่า P_Value มีค่ามากแสดงว่าตัวสถิติทดสอบ F มีค่าน้อยมาก จึงแสดงว่าค่า MS มีค่าน้อยอย่าง

ไม่มีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อเปลี่ยนปัจจัยที่ศึกษาพร้อม ๆ กันทั้ง 3 ปัจจัยจะทำให้ค่าตัวแปรตอบสนอง ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า Interaction ของ ความดันในระบบ ขนาดท่อและ ขนาดครุว์ ไม่มีผลต่อสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ร่วมกัน เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างกันของทั้ง 3 ปัจจัย ไม่มีผลร่วมกันแล้ว จากนั้นทำการยุบไปรวมกับค่าความผิดพลาด (Error) ได้ผลดังนี้แล้ววิเคราะห์ Interaction ของ 2 ปัจจัย

4.2.2.4 ผลการวิเคราะห์ Interaction ระหว่าง 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง

เมื่อทำการวิเคราะห์ใหม่จะเห็นว่าที่ Interaction ของ 2 ปัจจัย ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยขนาดครุว์และขนาดท่อ มีค่า P_Value มาก จึงทำให้ค่าสถิติ F มีค่าต่ำ ทำให้ค่า MS มีค่าน้อย แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ขนาดครุว์และขนาดท่อมีความสัมพันธ์ระหว่างกันร่วมกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งก็คือขนาดครุว์และขนาดท่อไม่มีผลต่อสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ส่วน Interaction ของ 2 ปัจจัยอื่นๆ มีดังนี้ ขนาดครุว์และขนาดท่อมีความสัมพันธ์ร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนความดันและขนาดครุว์ที่ใช้ก็มีความสัมพันธ์ร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีค่า P_Value ต่ำมาก ทำให้ค่าสถิติ F และ MS มีค่ามาก แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกันของขนาดครุว์และขนาดท่อมีผลร่วมกันต่อสัญญาณอะคูสติก และความสัมพันธ์ระหว่างกันของความดัน และขนาดครุว์มีผลร่วมกันต่อสัญญาณอะคูสติก จากนั้นทำการตีความผลเนื่องจากปัจจัยหลัก คือ ความดัน ขนาดท่อและขนาดครุว์ จะเห็นว่าปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย มีค่า P_Value ต่ำมาก ทำให้ค่าสถิติ F และ MS มีค่ามาก แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความดันมีผลต่อสัญญาณอะคูสติก ขนาดท่อมีผลต่อสัญญาณอะคูสติกและขนาดครุว์มีผลต่อสัญญาณอะคูสติก

General Linear Model: ASL versus pressure, pipe size, leak size

Factor	Type	Levels	Values
pressure	fixed	9	5 10 15 20 30 40 50 60 80
pipe siz	fixed	3	1 2 3
leak siz	fixed	4	0.3 0.5 0.8 1.0

Analysis of Variance for ASL, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
pressure	8	9978.04	9978.04	1247.26	1956.93	0.000
pipe siz	2	248.18	248.18	124.09	194.69	0.000
leak siz	3	2349.98	2349.98	783.33	1229.03	0.000
pressure*pipe siz	16	30.76	30.76	1.92	3.02	0.000
pressure*leak siz	24	762.59	762.59	31.77	49.85	0.000
pipe siz*leak siz	6	11.74	11.74	1.96	3.07	0.007
Error	156	99.43	99.43	0.64		
Total	215	13480.72				

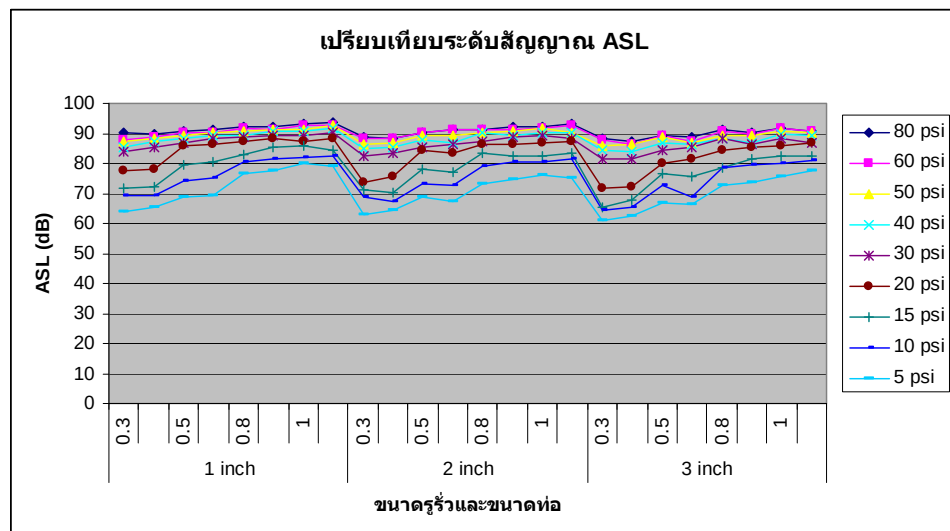
รูปที่ 4.23 ผลของ Interaction ระหว่าง 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อ ASL

4.2.2.5 ผลการความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์กับ ความดันในระบบ ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์คุณภาพและความถูกต้องของข้อมูล วิเคราะห์ความถูกต้องในการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์การทดลองและวิเคราะห์ ANOVA เพื่อศึกษาว่าปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่ ความดันในระบบ ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลองส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างไรแล้ว สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ที่เก็บได้จากการออกแบบการทดลองที่ถูกต้องกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ เป็นดังนี้

เมื่อกำหนดให้ขนาดของท่อซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งให้มีค่าคงที่โดยปรับเปลี่ยนขนาดรูรั่วพบว่าอะคูสติกพารามิเตอร์มีลักษณะเพิ่มขึ้นตามขนาดรูรั่วที่ใหญ่ขึ้น และที่ขนาดท่อเดียวกันเมื่อความดันเพิ่มขึ้นพบว่า

อะคูสติกพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นเช่นกัน และที่ขนาดรูรั่วเท่ากันพบว่าอะคูสติกพารามิเตอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดท่อใหญ่ขึ้นทุกค่าความดันที่ตรวจวัดสรุปว่าอะคูสติกพารามิเตอร์ทั้งสอง คือ ASL มีความสัมพันธ์กันกับความดันและขนาดรูรั่วของท่อแบบแปรผันตามกัน แต่แปรผกผันกับขนาดของท่อที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ASL กับขนาดรูรั่วและขนาดของท่อที่ความดันต่างๆ

หลังจากได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ แล้ว จากนั้นทำการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์กับความดันในระบบ ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลองโดยใช้การ

วิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยเข้าโปรแกรม Minitab ที่ฟังก์ชัน Stat > Regression > Regression... โดยผลการวิเคราะห์การถดถอยเป็นดังนี้

Regression Analysis: ASL versus pressure, pipe size, leak size

The regression equation is

$$\text{ASL} = 26.2 + 0.253 \text{ pressure} - 1.31 \text{ pipe size} + 11.9 \text{ leak size}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	26.244	1.022	25.69	0.000
pressure	0.25334	0.01114	22.75	0.000
pipe siz	-1.3126	0.3238	-4.05	0.000
leak siz	11.9054	0.9818	12.13	0.000

S = 3.885 R-Sq = 76.3% R-Sq(adj) = 75.9%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	10280.4	3426.8	227.00	0.000
Residual Error	212	3200.3	15.1		
Lack of Fit	104	3132.1	30.1	47.67	0.000
Pure Error	108	68.2	0.6		
Total	215	13480.7			

Source	DF	Seq SS
pressure	1	7812.7
pipe siz	1	248.1
leak siz	1	2219.6

Unusual Observations

Obs	pressure	ASL	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
57	5.0	19.476	28.457	0.544	-8.981	-2.33R
159	5.0	18.979	27.144	0.633	-8.166	-2.13R
163	5.0	21.774	29.769	0.633	-7.996	-2.09R
170	5.0	17.413	27.144	0.633	-9.731	-2.54R
183	15.0	21.873	29.677	0.583	-7.804	-2.03R
205	5.0	20.579	29.769	0.633	-9.190	-2.40R

R denotes an observation with a large standardized residual

รูปที่ 4.25 สมการถดถอยสำหรับตัวแปร ASL ความดันในระบบ ขนาดของท่อ และขนาดรูรั่วจำลอง

ผลการวิเคราะห์การถดถอยสอดคล้องกับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ กล่าวคือ ปัจจัยความดันและขนาดรูรั่วแปรผันตามกับตัวแปรตอบสนองคืออะคูสติคพารามิเตอร์ โดยจากสมการถดถอยพบว่าเครื่องหมายของความดันและขนาดรูรั่วเป็นบวก ในขณะที่ปัจจัยขนาดของท่อแปรผกผันกับอะคูสติคพารามิเตอร์ โดยจากสมการถดถอยพบว่าเครื่องหมายของขนาดเป็นลบ ดังสมการที่ 4.1

$$\text{ASL} = 26.2 + 0.253 \text{ pressure} - 1.31 \text{ pipe size} + 11.9 \text{ leak size}$$

(4.1)

4.2.3 ผลการหาขนาดตัวอย่างของอะคูสติคพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับ ความดันในท่อ ขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการทดลองต้องการความสัมพันธ์ที่เกิดจากความดันขนาดท่อและอัตราการรั่วของท่อเป็นสำคัญซึ่งผลของข้อ 4.2.2 ทำให้เราทราบความสัมพันธ์ที่เราสามารถกำหนดค่าปัจจัยของการทดลองให้มีขนาดคงที่ได้คือขนาดของท่อ ขนาดของรูรั่วและขนาดของความดัน ดังนั้นในหัวข้อนี้ เราจำเป็นต้องได้ค่าปัจจัยที่เรากำหนดค่าได้แน่นอนคือขนาดท่อ ขนาดความดันในท่อ และอัตราการรั่ว มาสร้างความสัมพันธ์แต่เนื่องจากอัตราการรั่วเป็นค่าปัจจัยที่เราไม่สามารถกำหนดให้มีค่าคงที่ตามที่เรต้องการให้เป็นได้เนื่องจากอุปกรณ์การทดลองที่ไม่สามารถปรับขนาดรูรั่วได้ตามที่ต้องการให้เป็น จึงต้องนำผลการหาอัตราการรั่วที่ได้จากการคำนวณจากสูตร $Q = V \times \frac{(\Delta P / P_1)}{\Delta T}$ ซึ่งมีผลทำให้เกิดอัตราการรั่วเท่าไรและสัมพันธ์กับขนาดท่อ ขนาดความดันอย่างไรซึ่งผลการทดลองเป็นไปในลักษณะที่ความดัน 1 ค่าและรูรั่วจำลอง 1 ค่าจะให้ผลอัตราการรั่วที่ใกล้เคียงกันในท่อทั้ง 3 ขนาดซึ่งผลในตารางได้จากค่าเฉลี่ยของอัตราการรั่วที่คำนวณได้ในแต่ละขนาดรูรั่วของท่อทั้ง 3 ขนาด

ตารางที่ 4.8 อัตราการรั่วของท่อทั้ง 3 ขนาดเทียบกับความดันและขนาดรูรั่วต่างๆ

ความดัน (psi)	อัตราการรั่ว (ml/sec)											
	0.3 mm			0.5 mm			0.8 mm			1 mm		
	1 in	2 in	3 in	1 in	2 in	3 in	1 in	2 in	3 in	1 in	2 in	3 in
5	15			35			40			45		
20	18			46			52			65		
50	27			64			66			89		
80	29			94			97			122		

อัตราการรั่วที่วัดได้ของท่อทั้ง 3 ขนาดขึ้นกับขนาดรูรั่วว่ามีขนาดใหญ่เล็กแค่ไหนแต่จากการทดลองพบว่ารูรั่วขนาดเดียวกันจะให้ค่าอัตราการรั่วในช่วงใกล้เคียงกันดังนั้นจึงถือว่าสามารถนำมาเป็นตัวแทนในการหาความสัมพันธ์ของอัตราการรั่ว ขนาดท่อและขนาดความดันในระบบและโดยมีเงื่อนไขว่าที่ขนาดรูรั่วเดียวกันและความดันค่าหนึ่งให้ผลอัตราการรั่วค่าเดียว

เนื่องจากข้อมูลอะคูสติคพารามิเตอร์ที่ต้องการจะเก็บในหัวข้อนี้ ต้องการหาความสัมพันธ์ตามหลักการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งขั้นตอนเหมือนหัวข้อ 4.3.2 คือต้องหาสิ่งตัวอย่าง โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design เพื่อออกแบบการ

เก็บข้อมูลเบื้องต้น โดยกำหนดค่าของปัจจัย (Factor) เท่ากับ 2 อันเนื่องจากปัจจัยความดันเราไม่สามารถกำหนดเป็นปัจจัยเพื่อให้สอดคล้องกับอัตราการรั่วได้ทุกค่าทำให้เหลือปัจจัยได้แก่ ขนาดของท่อ และอัตราการรั่วของท่อ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง คือ อะคูสติกพารามิเตอร์ นอกจากนี้ยังต้องกำหนดว่าแต่ละปัจจัยมีกี่ระดับและประกอบไปด้วยค่าอะไรบ้าง โดยกำหนดดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ขนาดท่อที่ 1, 2 และ 3 นิ้ว

ปัจจัยที่ 2 อัตราการรั่วของท่อ ที่ 15, 35, 40, 45, 18, 46, 52, 65, 27, 64, 66, 89, 29, 94, 97
และ 122 มิลลิลิตรต่อวินาที

นอกจากนี้ยังต้องกำหนดด้วยว่าจะเก็บผลการทดลองซ้ำกี่ค่า ในที่นี้กำหนดให้การทำซ้ำ (Replicates) มีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งผลการแทนค่าต่างๆเป็นดังนี้

Multilevel Factorial Design			
Factors:	2	Replicates:	2
Base runs:	48	Total runs:	96
Base blocks:	1	Total blocks:	1
Number of levels: 3, 16			

รูปที่ 4.26 จำนวนการเก็บผลการทดลอง

จากโปรแกรมพบว่าจะต้องเก็บผลการทดลองโดยการทำซ้ำ 2 ครั้ง ที่เงื่อนไขต่างๆ จำนวน 96 ค่า ซึ่งการออกแบบการเก็บผลการทดลองเพื่อที่จะนำไปพิจารณาถึงขนาดสิ่งตัวอย่างที่เหมาะสม เป็นดังตารางที่ 4.9 โดยอะคูสติกพารามิเตอร์ที่แทนค่าในตารางดังกล่าวเกิดจากการนำอะคูสติกพารามิเตอร์ที่เป็นสัญญาณรบกวนลบออกจากอะคูสติกพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากสัญญาณอะคูสติกที่วัดได้จากปัจจัยต่างๆ

ตารางที่ 4.9 ตารางการเก็บข้อมูลเพื่อหาถึงตัวอย่างของอะคูติคพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับ
ขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว

RunOrder	Pipe size (inch)	Leak rate (ml/sec)	ASL (dB)
1	3	52	38.7
2	1	89	45.9
3	3	27	40.5
4	1	122	48.2
5	1	65	44.2
6	3	97	45.5
7	1	45	34.3
8	2	27	41.4
9	2	45	29.7
10	2	122	46.7
11	1	27	41.8
12	2	89	44.9
13	3	65	41.4
14	2	66	44.7
15	2	29	43.0
16	1	45	32.9
17	2	94	45.6
18	2	40	27.7
19	1	40	29.6
20	2	29	42.9
21	2	45	30.5
22	1	27	42.9
23	1	97	46.7
24	2	65	41.2
25	1	46	40.8

RunOrder	Pipe size (inch)	Leak rate (ml/sec)	ASL (dB)
26	2	97	46.9
27	1	18	32.6
28	2	52	40.6
29	1	35	23.1
30	1	15	20.0
31	2	64	43.8
32	3	89	45.3
33	3	29	42.5
34	3	35	21.3
35	1	66	45.1
36	3	52	40.0
37	1	18	32.0
38	3	94	43.8
39	3	35	20.8
40	2	94	44.9
41	2	66	45.2
42	3	40	27.2
43	1	66	45.5
44	1	15	19.0
45	1	94	45.2
46	2	27	40.7
47	3	29	42.0
48	3	46	35.9
49	3	40	27.9
50	1	65	42.4
51	3	15	15.4
52	2	46	38.7

RunOrder	Pipe size (inch)	Leak rate (ml/sec)	ASL (dB)
53	3	64	43.3
54	3	94	43.0
55	2	65	41.6
56	1	89	47.0
57	3	97	44.6
58	3	89	44.6
59	2	89	45.6
60	1	40	32.1
61	3	18	26.0
62	1	122	47.5
63	3	45	31.0
64	2	40	29.2
65	3	65	40.1
66	1	29	44.6
67	1	35	24.3
68	1	52	41.7
69	2	18	29.9
70	3	15	16.9
71	3	66	43.7
72	1	97	46.6
73	2	35	23.1
74	3	64	41.3
75	2	122	47.6
76	2	52	40.8
77	2	35	21.7
78	3	122	45.4
79	3	18	26.6

RunOrder	Pipe size (inch)	Leak rate (ml/sec)	ASL (dB)
80	3	46	34.7
81	1	94	45.7
82	2	46	37.7
83	2	15	17.4
84	3	45	29.9
85	3	122	46.1
86	2	18	28.2
87	2	15	18.7
88	1	64	44.8
89	3	27	40.6
90	1	52	43.0
91	1	46	40.1
92	2	64	43.7
93	3	66	43.6
94	1	64	43.9
95	2	97	45.8
96	1	29	44.0

หลังจากออกแบบและเก็บผลการทดลองเบื้องต้นแล้ว ได้นำข้อมูลของอะคูสติกพารามิเตอร์ไปวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Basic Statistics > Display Descriptive Statistics ซึ่งผลของการวิเคราะห์เป็นดังนี้

Descriptive Statistics: ASL

Variable	N	Mean	Median	TrMean	StDev	SE Mean
ASL	96	37.937	41.532	38.568	8.919	0.910
Variable	Minimum	Maximum	Q1	Q3		
ASL	15.412	48.224	30.658	44.837		

รูปที่ 4.27 การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์ (ASL) ที่มีความสัมพันธ์กับ ขนาดท่อและอัตราความเร็ว

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับ ขนาดท่อและอัตราความเร็ว ต้องการนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ไปใช้งานต่อ โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > Power and Sample size > One-way ANOVA โดยกำหนดค่าของปัจจัย (Factor) เท่ากับ 2 ส่วนค่าแตกต่างมากที่สุดระหว่างค่ากลางกับ Sigma ให้มีค่าเท่ากับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลอะคูสติกพารามิเตอร์ โดยที่กำหนดให้ปริมาณ Power Value เท่ากับ 0.8 เพื่อพิจารณาหาขนาดของสิ่งตัวอย่างที่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์

Power and Sample Size

One-way ANOVA

Sigma = 0.8 Alpha = 0.05 Number of Levels = 2

SS Means	Sample Size	Target Power	Actual Power	Maximum Difference
39.7743	2	0.8000	0.9978	8.919

รูปที่ 4.28 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างของข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์ (ASL) ที่มีความสัมพันธ์กับ ขนาดท่อและอัตราความเร็ว

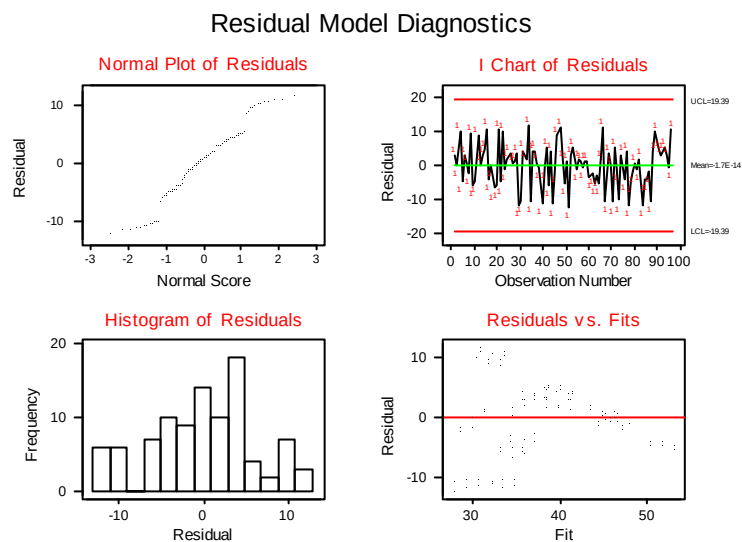
ผลการแทนค่าพบว่าได้ขนาดสิ่งตัวอย่างของอะคูสติกพารามิเตอร์ทั้งสองอย่างละ 2 ค่า เนื่องจากการหาขนาดของสิ่งตัวอย่างจาก One-way ANOVA ในงานวิจัยนี้ให้ความดันเป็นปัจจัยหลักในการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง ดังนั้นจะต้องทำการเก็บข้อมูลของปัจจัยความดันระดับละ 2 ค่า แต่ยังมีสถานะปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นในแต่ละสถานะการทดลองจะต้องทำการเก็บข้อมูลจำนวน ดังนี้

$$N = 2 / (1 \times 1) = 2 \text{ ค่า}$$

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ข้อมูลเบื้องต้นของอะคูสติกพารามิเตอร์มีความสัมพันธ์กับขนาดท่อและอัตราการรั่ว ซึ่งเกิดจากการเก็บซ้ำ 2 ค่า ในสภาวะปัจจัยต่างๆ สามารถนำมาใช้แทนเป็นข้อมูลจริงได้

4.2.3.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Model Adequacy Checking)

ขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลที่ได้ออกแบบการเก็บไว้ด้วยหลักของ Design of Experiment ว่าข้อมูลจะเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติที่มีค่าความแปรปรวนคงที่หรือไม่ โดยเข้าฟังก์ชัน Stat > Regression > Residual Plot จากกราฟระหว่างเศษเหลือกับลำดับในการทดลอง (I-Chart of Residuals) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างอิสระ (Independent) แสดงว่าข้อมูลได้มาอย่างสุ่ม และเมื่อเมื่อพิจารณาแผนภาพฮิสโตแกรม (Histogram of Residuals) ซึ่งใช้พิจารณาเมื่อข้อมูลมีมากกว่า 30 ค่า พบว่ามีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และมาจากการทดลองที่มีการออกแบบมาดี จากกราฟระหว่างเศษเหลือกับค่า Fit (Residuals vs Fits) จะเห็นว่าการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ สรุปว่าข้อมูลมีความผันแปรคงที่ (Variance stability)



รูปที่ 4.29 ตรวจสอบความถูกต้องสำหรับข้อมูล ASL

หลังจากที่วิเคราะห์ข้อมูลว่าเหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์ต่อหรือไม่แล้ว ต่อไปเป็นการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองซึ่งเกี่ยวข้องการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ โดยวิเคราะห์จากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นสำคัญ (R^2) เป็นสำคัญ และวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อดูว่าปัจจัยใดที่ส่งผลกระทบต่อค่าตอบสนอง โดยเข้าไปที่ฟังก์ชัน Stat > DOE > Analyze Factorial design

4.2.3.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการออกแบบการทดลอง

หลังจากที่วิเคราะห์หาคุณภาพและความถูกต้องของข้อมูลแล้ว จึงทำการพิจารณาว่าการทดลองได้ออกแบบมาดีหรือไม่ โดยจะทำการวิเคราะห์จากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากการทดลองให้ได้มาซึ่งตัวแปรตอบสนองคือ ASL สามารถพิจารณาได้จาก

$$R^2 = (1 - SS_E / SS_{total}) \times 100 = (1 - 25.37 / 7556.27) \times 100 = 99.66 \%$$

ซึ่ง R^2 มีค่ามากหมายความว่า การทดลองได้ออกแบบมาเป็นอย่างดี

4.2.3.2.1 ผลการวิเคราะห์ Interaction ระหว่าง 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง

General Linear Model: ASL versus pipe size, leak rate																
Factor	Type	Levels	Values													
pipe siz	fixed	3	1	2	3											
leak rat	fixed	16	15	18	27	29	35	40	45	46	52	64	65	66	89	94
			97	122												
Analysis of Variance for ASL, using Adjusted SS for Tests																
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P										
pipe siz	2	120.89	120.89	60.44	114.35	0.000										
leak rat	15	7377.12	7377.12	491.81	930.41	0.000										
pipe siz*leak rat	30	32.89	32.89	1.10	2.07	0.012										
Error	48	25.37	25.37	0.53												
Total	95	7556.27														

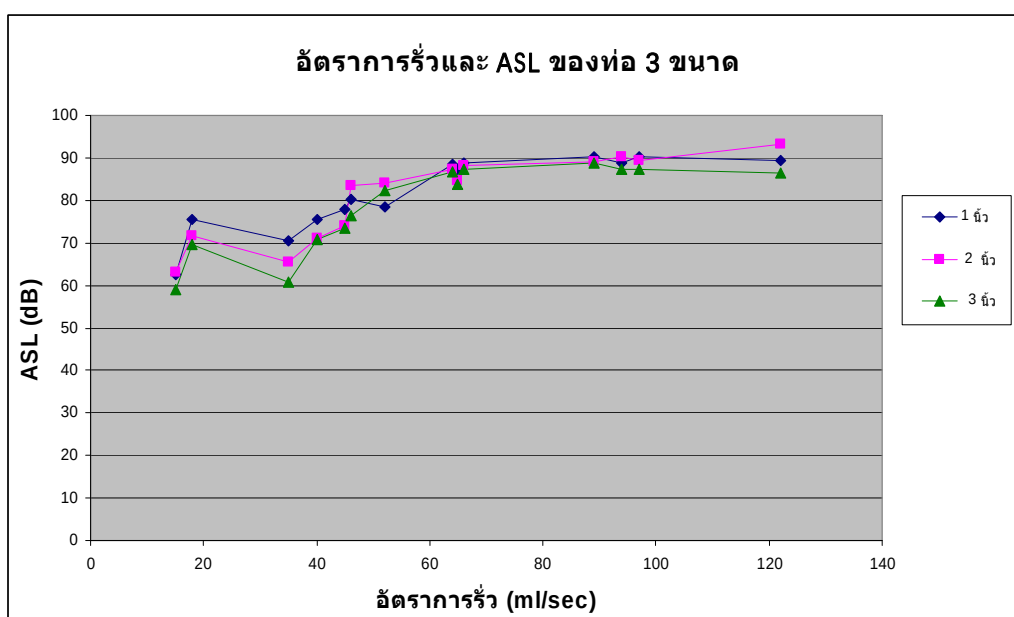
รูปที่ 4.30 ผลของ Interaction ระหว่าง 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อ ASL

นอกจากจะวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแล้วยังต้องวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อดูว่าปัจจัยต่างๆ ส่งผลกระทบบ่อยค่าตอบสนองอย่างไร โดยการวิเคราะห์ตาราง ANOVA จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเราพิจารณาที่ค่า P_Value ของความสัมพันธ์ระหว่างกัน (Interaction) ที่อันดับสูงที่สุดก่อน กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดท่อและอัตราการรั่วพร้อมกันค่าตอบสนองจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยพบว่าค่า P_Value มีค่ามากแสดงว่าตัวสถิติทดสอบ F มีค่าน้อยมาก จึงแสดงว่าค่า MS มีค่าน้อยอย่างไม่มีความสำคัญ กล่าวคือเมื่อเปลี่ยนปัจจัยที่ศึกษาพร้อม ๆ กันทั้ง 2 ปัจจัยจะทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า Interaction ของ ขนาดท่อและอัตราการรั่ว ไม่มีผลต่อสัญญาณอะคูสติกมิชชั่นร่วมกัน เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างกันของทั้ง 2 ปัจจัยไม่มีผลร่วมกันแล้ว

จากนั้นทำการตีความผลเนื่องจากปัจจัยหลัก คือ อัตราเร็ว และขนาดท่อ จะเห็นว่าปัจจัยหลักทั้ง 2 ปัจจัย มีค่า P_Value ต่ำมาก ทำให้ค่าสถิติ F และ MS มีค่ามาก แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราเร็วมีผลต่อสัญญาณอะคูสติก และขนาดท่อมีผลต่อสัญญาณอะคูสติก

4.2.3.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์กับขนาดของท่อ และ อัตราการรั่ว

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์คุณภาพและความถูกต้องของข้อมูล วิเคราะห์ความถูกต้องในการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์การทดลองและวิเคราะห์ ANOVA เพื่อศึกษาว่าปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่ อัตราเร็วของท่อ และขนาดของท่อ ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างไร แล้ว สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ที่เก็บได้จากการออกแบบการทดลองที่ถูกต้องกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ เป็นดังนี้



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ASL กับอัตราการรั่วของท่อ 3 ขนาด

จากกราฟพบว่าอะคูสติกพารามิเตอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการรั่วที่เพิ่มขึ้นและท่อที่มีขนาดเล็กจะให้ค่าอัตราการรั่วและอะคูสติกพารามิเตอร์มากกว่าท่อขนาดใหญ่ นั่นคือความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ กับอัตราการรั่วแปรผันตามกัน แต่แปรผกผันกับขนาดของท่อ

หลังจากได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ แล้ว จากนั้นทำการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์กับอัตราการรั่วภายในท่อและขนาดของท่อ โดยใช้การวิเคราะห์การ

ถดถอย (Regression Analysis) โดยเข้าโปรแกรม Minitab ที่ฟังก์ชัน Stat > Regression > Regression... โดยผลการวิเคราะห์การถดถอยเป็นดังนี้

Regression Analysis: ASL versus pipe size, leak rate

The regression equation is

ASL = 28.9 - 1.37 pipe size + 0.209 leak rate

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	28.863	2.074	13.92	0.000	
pipe siz	-1.3730	0.7824	-1.75	0.083	1.0
leak rat	0.20921	0.02126	9.84	0.000	1.0

S = 6.259

R-Sq = 51.8%

R-Sq(adj) = 50.7%

PRESS = 3887.51

R-Sq(pred) = 48.55%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	3912.7	1956.3	49.93	0.000
Residual Error	93	3643.6	39.2		
Lack of Fit	45	3618.2	80.4	152.11	0.000
Pure Error	48	25.4	0.5		
Total	95	7556.3			

Source	DF	Seq SS
pipe siz	1	120.6
leak rat	1	3792.0

Unusual Observations

Obs	pipe siz	ASL	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
51	3.00	15.412	27.882	1.341	-12.470	-2.04R

R denotes an observation with a large standardized residual

Durbin-Watson statistic = 2.18

Lack of fit test

Possible curvature in variable leak rat (P-Value = 0.013)

Overall lack of fit test is significant at P = 0.013

รูปที่ 4.32 สมการถดถอยสำหรับตัวแปร ASL ขนาดของท่อ และอัตราการรั่ว

ผลการวิเคราะห์การถดถอยสอดคล้องกับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ กล่าวคือ ปัจจัยอัตรารั่วแปรผันตามกับตัวแปรตอบสนองคืออะคูสติคพารามิเตอร์ โดยจากสมการถดถอยพบว่า เครื่องหมายของอัตรารั่วเป็นบวก ในขณะที่ปัจจัยขนาดของท่อแปรผกผันกับอะคูสติคพารามิเตอร์ โดยจากสมการถดถอยพบว่าเครื่องหมายของขนาดเป็นลบ ดังสมการที่ 4.2

$$\text{ASL} = 28.9 - 1.37 \text{ pipe size} + 0.209 \text{ leak rate}$$

(4.2)

เนื่องจากในการทดลองไม่สามารถควบคุมสัญญาณอะคูสติกซึ่งถูกแทนด้วยอะคูสติกพารามิเตอร์ได้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมหรือกำหนดปัจจัยอื่นแทน โดยการให้อะคูสติกพารามิเตอร์ที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนองที่ไม่ทราบค่า ซึ่งจะพบว่าสมการที่ 4.3 เทอมของอะคูสติกพารามิเตอร์ คือ ASL ที่เกิดจากการถดถอยจะอยู่ด้านซ้ายสุด แต่ในงานจริงต้องการรู้อัตราเร็วของท่อซึ่งไม่ทราบค่าโดยการวัดจากวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ ดังนั้นจึงต้องทำการย้ายข้างสมการดังนี้

$$\text{Leak rate} = 4.785 \text{ ASL} + 6.555 \text{ pipe size} - 138.278 \quad (4.3)$$

จากสมการข้างต้นนี้พบว่า ไม่มีพจน์ของปัจจัยที่มี Interaction ของ 2 ปัจจัย คืออัตราเร็วและขนาดท่อ ซึ่งได้ถูกพิสูจน์ในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้วว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เพราะหาเพื่อลดความยุ่งยากในการย้ายข้างสมการประกอบกับค่าความผิดพลาดของสมการที่มีพจน์ของปัจจัยที่มี Interaction กัน ใกล้เคียงกับสมการที่ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยที่มี Interaction กล่าวคือ Interaction ระหว่างปัจจัยส่งผลน้อยมากต่อค่าความผิดพลาด ดังนั้นจึงตัดพจน์ของปัจจัยที่มี Interaction ของ 2 ปัจจัยทิ้งได้ และค่าความผิดพลาดของอัตราเร็วที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 กับอัตราเร็วจริงที่วัดได้จาก Chamber ที่สภาวะต่างๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 4.10 ความผิดพลาดของสมการทำนายอัตราเร็วของท่อเมื่อใช้อะคูสติกพารามิเตอร์ ASL

อัตราเร็วจริงที่วัดได้ (ml/sec)	อัตราเร็วที่ได้จากการคำนวณ (ml/sec)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
15	40.47	39.47
35	16.38	15.38
40	14.78	63.06
45	32.45	27.89
18	24.49	36.04
46	60.03	30.51
52	72.99	40.37
65	74.03	13.89
64	84.11	31.42
66	90.86	37.66
89	93.57	5.14
94	87.52	6.90

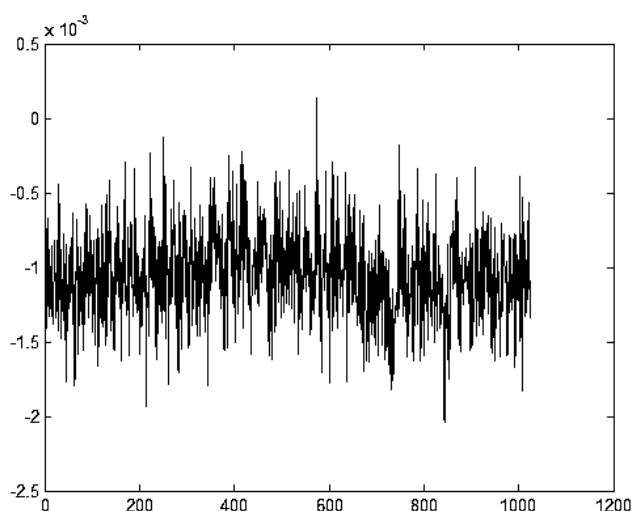
อัตราการวัดที่วัดได้ (ml/sec)	อัตราการที่ได้จากการคำนวณ (ml/sec)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
97	91.39	5.78
122	102.76	15.77

จากตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นการแสดงความผิดพลาดที่ได้จากสมการทำนายอัตราการรั่วของท่อ เมื่อใช้อะคูสติกพารามิเตอร์ ASL พบว่าค่าความผิดพลาดค่อนข้างสูงที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากธรรมชาติการรั่วของท่อประกอบกับการติดหัวรับสัญญาณและตำแหน่งของการติดตั้งหัวรับสัญญาณ กล่าวคือ สัญญาณรั่วของท่อเป็นแบบต่อเนื่องซึ่งลักษณะของสัญญาณแบบสุ่ม ทำให้ค่าแอมพลิจูดของแต่ละจุดที่เก็บมีค่าไม่แน่นอน เมื่อนำมาเฉลี่ยแล้วพบว่าที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกันจะให้ค่าระดับสัญญาณเฉลี่ยต่างกันพอสมควร ส่วนติดหัวรับสัญญาณและตำแหน่งของการติดตั้งหัวรับสัญญาณก็มีผลให้ขนาดของสัญญาณและความถี่ที่หัวรับสัญญาณเก็บได้เปลี่ยนไป

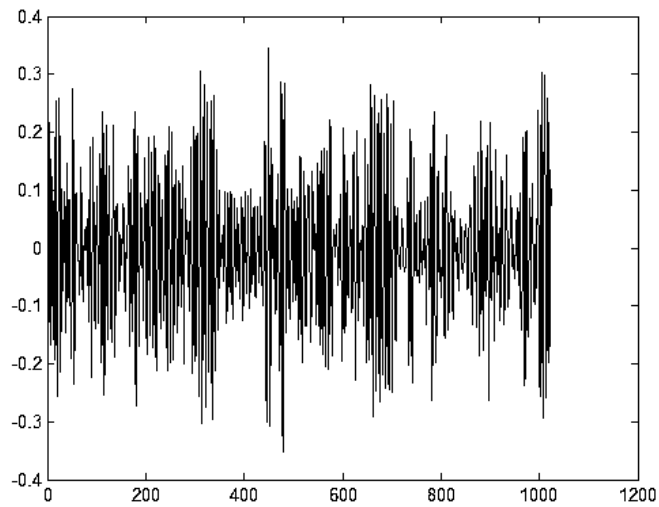
4.3 ผลการทดลองหาตำแหน่งการเกิดการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นแบบต่อเนื่อง(Continuous) โดยการใช้หลักการสหสัมพันธ์สวนทาง (Cross Correlation)

4.3.1. ผลการออกแบบการทดลองการหาตำแหน่งการรั่วด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์

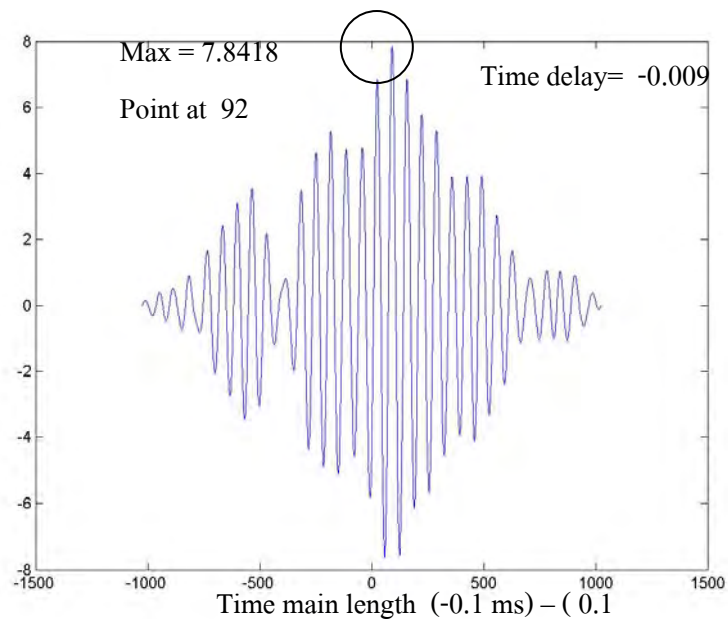
ลักษณะที่ได้จากการตรวจวัดสัญญาณการรั่วของหัวตรวจจับสัญญาณสองหัวโดยบันทึกในโดเมนเวลา
เป็นดังนี้



รูปที่ 4.33 สัญญาณคลื่นอะคูสติกในโดเมนเวลาของหัวตรวจจับที่ 1

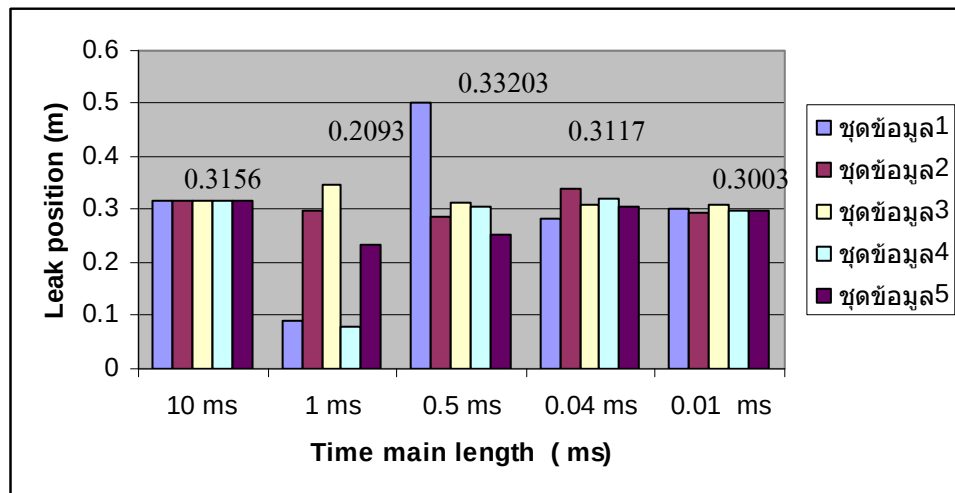


รูปที่ 4.34 สัญญาณคลื่นอะคูสติกในโดเมนเวลาของหัวตรวจจับ ที่ 2



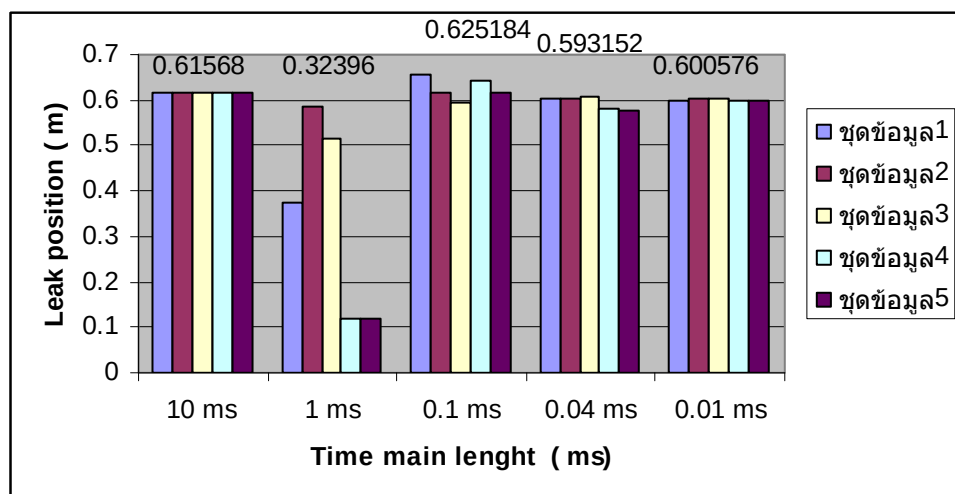
รูปที่ 4.35 ผลการ Cross correlation ของทั้งสองสัญญาณ

ผลจากการ correlation ของสองสัญญาณใดๆจากการตรวจวัดแต่ละครั้งทำให้ทราบค่าสูงสุดของสัญญาณคือค่า Max และตำแหน่งของค่าสูงสุดนี้เป็นจุดที่เป็นค่าอ้างอิงกับแกนศูนย์ซึ่งคือค่าความแตกต่างของเวลา(time delay) ที่คลื่นจะวิ่งไปถึงหัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองฝั่งจากการทดลอง ผลการตั้งค่า Time main length จากข้อมูลทดสอบ 5 ค่าที่ระยะการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณห่างจากรูรั้วจำลองเท่ากันที่ระยะ 0.3 เซนติเมตรให้ค่าเฉลี่ยของระยะที่ตรวจวัดได้จากจุดรั้ว

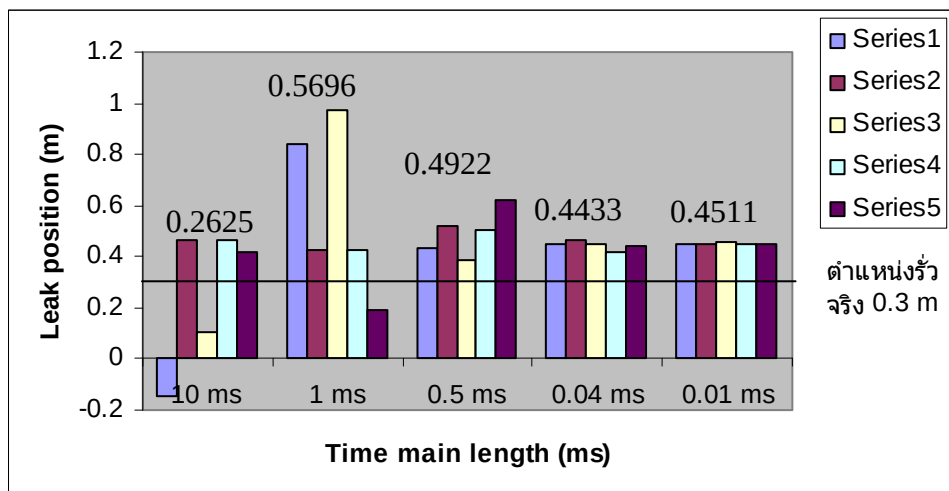


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ของการติดตั้ง sensor ที่ระยะ 0.3 เมตรจากรูรั่ว ทั้ง 2 หัว

ผลการตั้งค่า Time main length จากข้อมูลทดสอบ 5 ค่าที่ระยะการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณห่างจากรูรั่วจำลองเท่ากันที่ระยะ 0.6 เซนติเมตรให้ค่าเฉลี่ยของระยะที่ตรวจวัดได้จากจุดรั่ว



รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ของการติดตั้ง sensor ที่ระยะ 0.3 เมตรจากรูรั่ว ทั้ง 2 หัว



รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ของการติดตั้ง sensor ระยะ $L1=0.3$ m และ $L2=0.6$ m

เมื่อทำการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ระยะห่างจากรูรั่วเท่ากันที่ระยะหัวละ 0.3 และ 0.6 เมตร สัญญาณเมื่อทำการ correlation กันแล้วนำไปแทนค่าหาระยะการรั่วจากสูตรจะให้ค่าใกล้เคียงทุกย่าน การตั้งค่า Time main length โดยเฉพาะที่ Time main length ค่าที่ 0.01 ms ให้ค่าเฉลี่ยตำแหน่งการรั่วที่ใกล้เคียงที่สุดและที่ 0.04 ms ให้ค่าเฉลี่ยตำแหน่งการรั่วใกล้เคียงมากอันดับที่ 2 ส่วนที่ Time main length 1 ms ได้ค่าตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนมากที่สุดซึ่งแนวโน้มของสัญญาณที่วัดได้จากการติดตั้ง หัวตรวจจับสัญญาณของทั้ง 2 ระยะให้ผลที่สอดคล้องกัน

เมื่อทำการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ระยะห่างจากรูรั่วต่างกันโดยใช้หัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 เป็นหัวอ้างอิงติดตั้งที่ระยะ 0.3 เมตร ส่วนหัวตรวจจับสัญญาณ 2 ติดตั้งที่ระยะห่างจากรูรั่ว 0.6 เมตร เมื่อวัดสัญญาณที่ทำการ correlation กันแล้วนำไปแทนค่าหาระยะการรั่วจากสูตรจะให้ค่าคลาดเคลื่อนไปมากพอสมควร ทุกย่านการตั้งค่า Time main length ซึ่งผลที่ได้ที่ Time main length 0.04 ms ได้ค่าตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ที่ Time main length 1 ms ได้ค่าตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนมากที่สุด

เมื่อทำการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ระยะห่างจากรูรั่วต่างกันโดยใช้หัวตรวจจับสัญญาณที่ 1 เป็นหัวอ้างอิงติดตั้งที่ระยะ 0.6 เมตร ส่วนหัวตรวจจับสัญญาณที่ 2 ติดตั้งที่ระยะห่างจากรูรั่ว 1.5 เมตรเมื่อวัดสัญญาณเมื่อทำการ correlation กันแล้วนำไปแทนค่าหาระยะการรั่วจากสูตรจะให้ค่าคลาดเคลื่อนไปมากพอสมควร ทุกย่านการตั้งค่า Time main length ซึ่งผลที่ได้ที่ Time main length 1 ms ได้ค่าตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ที่ Time main length 10 ms ได้ค่าตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนมากที่สุด

พบว่า แนวโน้มของสัญญาณที่วัดได้จากการติดตั้ง หัวตรวจจับสัญญาณ ของทั้ง 2 ระยะให้ผลที่สอดคล้องกันในแง่ค่าตำแหน่งที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันที่การตั้ง Time main length ต่ำๆตั้งแต่ 0.1 ms ลงไป ค่า sound velocity ที่ใช้ป้อนคือค่า 3200 m/s ซึ่งมีผลต่อการคำนวณหาตำแหน่งการร่วมาก ค่าจริงแต่ละครั้งการวัดจะมีค่าต่างจาก 3200 m/s แต่ไม่มากเท่ากับ time delay ที่มีค่าต่ำจนเกือบเท่ากับ ศูนย์จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบค่า Time main length ที่เหมาะสมคือที่ 0.04 ms ซึ่งจะนำไปใช้กับการทดลองหาตำแหน่งต่อไป

4.3.2 ผลการทดลองหาตำแหน่งการร่วด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชัน

4.3.2.1 เมื่อกำหนดระยะห่างจากรอยร่วเท่ากัน และกำหนด time main length = 0.4 ms

การหาตำแหน่ง เมื่อกำหนดตำแหน่งการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ระยะ $L_1=L_2=0.3$ เมตร

ครั้งที่	sound velocity m/s	ผลคำนวณ cross correlation			
		max	point diff	time diff (msec)	distance from source (m)
1	3200	7.7442	246	0.0096	0.2846
2	3200	5.7584	-641	-0.025	0.3400
3	3200	10.796	-132	-0.0052	0.3083
4	3200	16.959	-318	-0.0124	0.3198
5	3200	14.7479	-94	-0.0037	0.3059
เฉลี่ย					0.3117

การหาตำแหน่ง เมื่อกำหนดตำแหน่งการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ระยะ $L_1=L_2=0.6$ เมตร

ครั้งที่	sound velocity m/s	ผลคำนวณ cross correlation			
		max	point diff	time diff (msec)	distance from source (m)
1	3200	14.1677	-30	-0.0012	0.6019
2	3200	4.8293	-39	-0.0015	0.6024
3	3200	7.8029	-87	-0.0034	0.6054
4	3200	9.3067	303	0.0118	0.5811
5	3200	6.7217	402	0.0157	0.5749
เฉลี่ย					0.5931

4.3.2.2 เมื่อกำหนดระยะห่างจากรอยร้าวต่างกัน และกำหนด time main length = 0.4 ms

การหาตำแหน่งเมื่อกำหนดตำแหน่งการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ระยะ $L1 = 0.3$ และ $L2 = 0.6$ เมตร

ครั้งที่	sound velocity m/s	ผลคำนวณ cross correlation			
		max	point diff	time diff (msec)	distance from source (m)
1	3200	8.0051	47	0.0018	0.4471
2	3200	13.3846	-177	-0.0069	0.461
3	3200	11.2137	11.2137	0.0005	0.4492
4	3200	10.9035	476	0.0186	0.4202
5	3200	19.0863	172	0.0067	0.4393
เฉลี่ย					0.4434

การหาตำแหน่ง เมื่อกำหนดตำแหน่งการติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ระยะ $L1 = 0.6$ และ $L2 = 1.5$ เมตร

ครั้งที่	sound velocity m/s	ผลคำนวณ cross correlation			
		max	point diff	time diff (msec)	distance from source (m)
1	3200	4.9555	221	0.2158	0.7047
2	3200	3.8022	214	0.209	0.7156
3	3200	4.0291	-71	-0.0693	1.1609
4	3200	4.0291	-71	-0.0693	1.1609
5	3200	6.5498	233	0.2275	0.686
เฉลี่ย					0.8856

4.3.3 การวิเคราะห์ความแม่นยำระหว่างค่าที่ได้จากการหาตำแหน่งการรั่วด้วยวิธี AE กับ ตำแหน่งที่ทำการจำลองการรั่วจริง

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนจากการหาตำแหน่งด้วยวิธี AE

ตำแหน่งติดตั้งจริง		ตำแหน่งเฉลี่ยจากการคำนวณ	%ความคลาดเคลื่อน
L1 (m)	L2 (m)		
0.3	0.3	0.3117	3.9
0.6	0.6	0.5931	1.1
0.3	0.6	0.4434	47.8
0.6	1.5	0.8856	47.6

ตารางที่ 4.11 แสดงเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนจากการหาตำแหน่งด้วยวิธี AE ของตำแหน่งอ้างอิงที่ระยะ L1 ซึ่งการติดตั้งเมื่อระยะห่างของตรวจจับสัญญาณทั้งสองห่างจากรอยรั่วเท่ากันจะมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 1 ถึง 4 % ซึ่งความผิดพลาดจะน้อยกว่าเมื่อติดตั้งหัวตรวจจับสัญญาณที่ระยะห่างจากรอยรั่วต่างกันโดยการทดลองนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 47 % ซึ่งจากผลการวิจัยจะแสดงให้เห็นว่าการหาตำแหน่งด้วยวิธี AE จะให้ผลความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ โดยการหาตำแหน่งด้วยวิธี AE นี้ จะมีความแม่นยำเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของเสียงที่ป้อนให้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ การตั้งค่า Time main length ในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมซึ่งค่านี้เปรียบเหมือนจำนวนจุดที่เราจับสัญญาณในหน่วยเวลานั้นๆซึ่งหากต่ำก็ให้จุดของสัญญาณที่นำมา cross correlation กันน้อยตามไปด้วยแต่จากที่ผ่านมามีค่า Time main length ต่ำให้ผลการตรวจวัดได้ดีกว่าค่าสูงซึ่งอาจจะยังไม่ครอบคลุมทุกช่วงการตรวจสอบ นอกจากนี้การติดตั้งหัวตรวจสอบก็นับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่ง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความแม่นยำ ดังนั้นหลังจากการติดตั้งหัวตรวจสอบ และก่อนทำการทดลองทุกครั้งจึงจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบความสมบูรณ์ของการติดตั้ง ทุกหัวตรวจสอบให้มีความสามารถในการรับสัญญาณอะคูสติกที่สูง และใกล้เคียงกันทุกหัวตรวจสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการหักใส่ดินสอที่เงื่อนไขคงที่ และเปรียบเทียบสัญญาณแอมพลิจูดของ AE ให้มีความแตกต่างกันในแต่ละหัวตรวจสอบไม่เกิน ± 4 เดซิเบล

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทสุดท้ายของงานวิจัยจะกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราเร็วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ปัญหาที่พบในการตรวจสอบการรั่วของท่อในอุตสาหกรรมจะต้องทำการหยุดระบบแล้วทำการตรวจสอบ ซึ่งการหยุดระบบในแต่ละครั้งจะสูญเสียกำลังการผลิตจำนวนมาก ส่งผลให้เสียรายได้จำนวนมาก นอกจากนี้วิธีการตรวจสอบการรั่วหรือความเสื่อมสภาพของท่อที่ใช้กันอยู่เป็นวิธีที่ต้องใช้เวลาในการเตรียมการและการตรวจสอบมาก อีกทั้งยังต้องใช้คนจำนวนมากทำให้เกิดความยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นควรมีวิธีการที่สะดวกรวดเร็วในการตรวจสอบทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณรวมถึงหาตำแหน่งของการรั่วและควรจะเป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบได้โดยไม่ต้องทำการหยุดระบบ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นข้อดีของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการรั่วของท่อโดยมุ่งเน้นที่การวัดเชิงปริมาณคือวัดอัตราเร็วของท่อและหาตำแหน่งการรั่วนั่นเอง ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยคือศึกษาว่าวิธีอะคูสติกอิมพัลส์สามารถตรวจจับสัญญาณที่สัมพันธ์กับการรั่วได้และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่ออัตราเร็วได้ ซึ่งให้ความสำคัญกับหลักการวัดและประมวลผลเพื่อทำนายอัตราเร็วโดยมิได้เน้นที่จะสร้างเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่นำไปใช้งานได้จริงในโรงงานโดยไม่ต้องทำการหยุดระบบ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

- วิธีอะคูสติกอิมพัลส์สามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจวัดการรั่วของท่อได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งการวัดเชิงคุณภาพสามารถบอกได้ว่าท่อรั่วหรือไม่โดยสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้ในโดเมนเวลาเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีค่าความถี่ในการรั่วอยู่ระหว่าง 100-200 kHz โดยไม่ขึ้นกับรูรั่วหรืออัตราเร็ว ส่วนในเชิงปริมาณก็สามารถบอกได้ว่าท่อรั่วด้วยอัตราเร็วเท่าไร โดยอัตราเร็วที่น้อยที่สุดที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ คือ 13 ml/sec

- หลังจากที่ได้ทำการออกแบบเก็บผลการทดลองเพื่อวัดตัวแปรตอบสนอง คือ อะคูสติกพารามิเตอร์แล้วทำการวิเคราะห์คุณภาพและความถูกต้องของข้อมูล วิเคราะห์ความถูกต้องในการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์การทดลองและวิเคราะห์ ANOVA เพื่อศึกษาว่าปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่ อัตราเร็วของท่อ ขนาดของท่อ และความดันในระบบ ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างไรแล้ว จากการศึกษาพบว่า

ASL มีความสัมพันธ์กับอัตราการรั่วของท่อในลักษณะแปรผันตามกันคือ อะคูสติคพารามิเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการรั่วของท่อมากขึ้น นอกจากนี้อะคูสติคพารามิเตอร์ทั้งสองยังมีความสัมพันธ์กับความดันของระบบด้านขาเข้าของรูรั่วด้วยโดยแปรผันตามกันกล่าวคือ เมื่อความดันสูงขึ้นอะคูสติคพารามิเตอร์ทั้งสองก็มีค่ามากขึ้น แต่มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับขนาดของท่อ คือเมื่อที่สภาวะเดียวกันท่อขนาดเล็กจะให้สัญญาณรั่วที่มีค่าอะคูสติคพารามิเตอร์สูงกว่าท่อขนาดใหญ่ และขนาดรูรั่วก็มีผลในลักษณะแปรผันตามกันคือรูรั่วมีขนาดใหญ่จะให้สัญญาณรั่วสูงกว่ารูรั่วขนาดเล็ก จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ได้สองลักษณะคือระหว่างความดันในระบบ ขนาดของท่อและขนาดของรูรั่วกับอะคูสติคพารามิเตอร์ซึ่งจะได้ในรูปแบบสมการถดถอยแนวโน้มของสัญญาณการรั่ว นอกจากนี้คือความสัมพันธ์ของอัตราการรั่วและขนาดของท่อกับ อะคูสติคพารามิเตอร์ จะได้ในรูปแบบของสมการทำนายอัตราการรั่วได้ โดยการใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการคำนวณ ผลของสมการถดถอยในงานวิจัยนี้จะได้สมการที่ใช้อะคูสติคพารามิเตอร์ ASL ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ซึ่งในการนำไปใช้งาน ถ้าต้องการหาอัตราการรั่วเพียงอย่างเดียวด้วยหัวรับสัญญาณ R15 ก็สามารถนำสมการ $Leak\ rate = 4.785\ ASL + 6.555\ pipe\ size - 138.278$ ในการทำนายอัตราการรั่วได้

- ตำแหน่งการรั่วที่คำนวณได้จากการวัดด้วยวิธีอะคูสติคมิชชันโดยใช้หลักการสหสัมพันธ์สวนทางมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างอาจเนื่องมาจากการกำหนดค่าที่ใช้กับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมตลอดจนค่าความเร็วเสียงที่วิ่งในตัวกลางชนิดต่างๆแต่ผลการทดลองนี้มีการเปรียบเทียบผลของค่าดังกล่าวก่อนนำมาใช้ทดลองจริงจึงทำให้ผลการหาตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 1.1-47.8 %

สรุปงานวิจัย คือ วิธีอะคูสติคมิชชันมีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้กับการตรวจวัดอัตราการรั่วของท่อในทุกอุตสาหกรรม กล่าวคือ สามารถวิเคราะห์ได้ถึงการรั่วของท่อว่าเกิดการรั่วขึ้นหรือไม่ซึ่งเป็นการวัดเชิงคุณภาพและสามารถบอกถึงอัตราการรั่วได้ซึ่งเป็นการวัดเชิงปริมาณและยังสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดการรั่วได้อีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากท่อเป็นส่วนประกอบในหลายๆอุตสาหกรรมซึ่งมีชนิดของท่อที่แตกต่างกันออกไปซึ่งการทดลองนี้เป็นเพียงแนวทางที่สามารถจะดำเนินการทดลองกับท่อชนิดอื่นๆที่สามารถจะมีความสอดคล้องกับชนิดของท่อที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นๆได้ดังนั้นควรมีการทดลองกับท่อที่หลากหลายชนิดรวมถึงตัวกลางที่เป็นของไหลในท่อก็ควรจะพิจารณาในการศึกษาวิจัยต่อไปด้วย

- การทดลองไม่สามารถจะปรับอัตราการรั่วให้มีค่าตามที่ต้องการได้จึงทำได้จากการนำค่าเฉลี่ยจากที่วัดได้ของรูรั่วแต่ละขนาดและขนาดท่อเดียวกันมาเป็นค่าตัวแทนการรั่วนั้นๆแต่ในความเป็นจริงอัตราการรั่วของท่อแต่ละขนาดที่ความดันเดียวกันย่อมมีค่าที่แตกต่างกันเนื่องจากความหนาของท่อที่แตกต่างกันดังนั้นหากสามารถสร้างเครื่องมือหรือศึกษาหลักการที่สามารถปรับอัตราการรั่วของท่อให้คงที่ได้ตามที่กำหนดก็จะสามารถนำผลที่ได้มาสร้างสมการหาความสัมพันธ์ได้แม่นยำว่าการทดลองนี้
- งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องงบประมาณ ดังนั้นขนาดของท่อที่ใช้ในการทดลองจึงมีไม่มากซึ่งในโรงงานมีการใช้ท่อหลายชนิดและมีขนาดต่างๆมากมาย นอกจากนี้ความดันในระบบที่ทดลองค่อนข้างต่ำกว่าในการใช้งานจริงมากเนื่องจากงบประมาณที่จำกัดทำให้ไม่สามารถหาแหล่งกำเนิดแรงดันที่สูงได้อีกทั้งยังเป็นอันตรายหากจะทดลองในห้องทดลองที่ความดันสูง ดังนั้นเพื่อสามารถให้ผลการทดลองมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ควรจะหางบประมาณในการวิจัยให้มากกว่านี้
- งานวิจัยนี้เป็นการเน้นที่หลักการวัดและวิเคราะห์ผลการวัดอัตราการรั่วของท่อด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์เพื่อพิสูจน์ว่าสามารถนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้ได้จริง ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปควรจะพัฒนานำหลักการวัดนี้ไปประยุกต์สร้างเครื่องมือเพื่อนำไปใช้งานได้จริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Reinaldo, A.Silva, Claudio, M.Buiatti, Sandra L.Cruz. and Joao A.F.R.Pereira.,”Pressure Wave Behaviour and Leak Detection In Pipelines” accepted for publication in **Computers chem..Engng Vol.20**,1996.pp s491-s496.
2. Miller, R.K., Pollock, A.A., Watts, D.J., Carlyle, J.M., ,A.N. and Yezzi, J.J.,”A Reference Standard for the Development of Acoustic Emission Leak Detection Techniques, ”accepted for publication in **NDT&E International** on May 17,1998.pp 1-8.
3. Miller, R.K., Pollock, A.A., Finkel, P.,Watts, D.J., Carlyle, J.M., Tafuri, A.N.and Yezzi, J.J.,”The Development of Acoustic Emission for Leak Detection and Location in Liquid-Filled,Buried Pipelines,” **Acoustic Emission :Standard and Technology Update,ASTM STP 1353,S.J.Vahaviolos,Ed.,American Society for Testing and Materials,Weat Conshohocken,PA,1999.pp 67-78.**
4. Tadej Kosel ,Igor Grabec and Peter Muzic.,” Location of acoustic emission sources generated by air flow ” accepted for publication in **Ultrasonics** vol 38,2000.pp 824-826.
5. Shifeng Liu.,Luming Li.,Jian Cui,Tie Li., “Acoustic Emission Detection of Underground Pipeline Leakage”,**15th CNDT**,<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn050/idn050.htm>
6. ตระการ ก้าวศิริกรรม , 2544, **วิศวกรรมระบบท่ออุตสาหกรรม**, บริษัท เอ็มแอนอีจำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 5.
7. ณัฐพงศ์ วิงวร และคณะ,2540, **การตรวจสอบการรั่วของท่อโดยการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นอะคูสติก**, ปรินูญานิพนธ์ปรินูญวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 142 หน้า

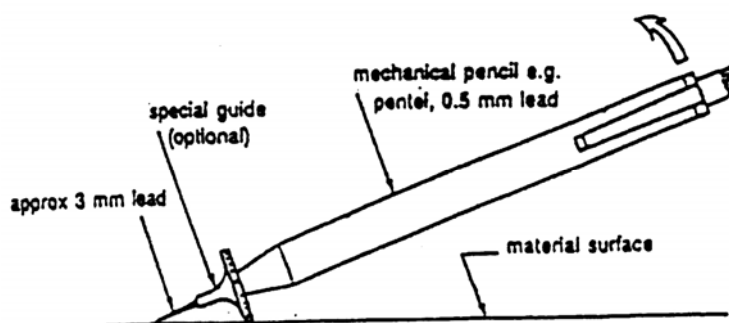
8. ชูเกียรติ ชัยลักษณ์กุล และคณะ, 2545, **การปรับปรุงและปรับตั้งพารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติกแม่พิมพ์กล่องเครื่องมือโดยการออกแบบการทดลอง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 23-29.
9. เกลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร, 2545, **การตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชัน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยาทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 4-21.
10. วาทีต แก้วแว่น้อย, 2547, **การวัดอัตราการรั่วของวาล์วด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชัน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยาทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 12-26, 29-38.
11. Pollock, A.A. and Hsu, S.Y.S., 1982, "Leak Detection Using Acoustic Emission", **Journal of Acoustic Emission**, Vol. 1, No. 4, pp. 237-243.
12. J.A. Baron, S.P. Ying, **Nondestructive Testing Handbook, Volume 5. Acoustic Emission Testing**, American Society for Nondestructive Testing, pp. 136-154.
13. สมรัฐ เกิดสุวรรณ, **ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ Acoustic Emission ในทางวิศวกรรม**, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
14. Jensen, R.A. and Agnone, A.M., 1996, "A New Method to Leak Test Piping Joints", **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Vol. 118, pp. 604-609.

ภาคผนวก ก
การสอบเทียบหัวรับสัญญาณ

การสอบเทียบหัวรับสัญญาณ

การตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ชันจะต้องมีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของการติดตั้งหัวรับสัญญาณเสียก่อนเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบ ซึ่งวิธีการทดสอบมีดังนี้ใช้ดินสอดกราไฟท์แบบ 2H ขนาดของไส้ดินสอ 0.5 มิลลิเมตร โดยให้ไส้ดินสอยื่นออกมาจากปลายดินสอประมาณ 2–3 มิลลิเมตร

1. นำปลายไส้ดินสอ สัมผัสกับชิ้นงานที่ตรวจสอบ ตรงตำแหน่งห่างจากหัวตรวจสอบประมาณ 1-2 นิ้ว โดยให้แท่งดินสอทำมุม 30 องศากับผิวของชิ้นงาน ดังรูป ข.1
2. หักไส้ดินสอพร้อมกับบันทึกค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติกที่เกิดจากการหักไส้ดินสอ
3. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 1 ถึง 3 จนครบ 3 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งให้ทำการหักไส้ดินสอที่ตำแหน่งห่างจากหัวตรวจสอบเป็นระยะทางเท่าๆ กัน แล้วหาค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติกที่ได้ทั้ง 3 ครั้ง
4. ในกรณีที่ติดตั้งหัวตรวจสอบเพียงหัวเดียว ถ้าผลของการหักไส้ดินสอมีค่าแอมพลิจูดต่ำกว่า 60 เดซิเบล แสดงว่าการติดตั้งหัวตรวจสอบไม่สมบูรณ์ ให้ทำการติดตั้งใหม่
5. ในการติดตั้งหัวตรวจสอบหลายหัว ถ้าผลของการหักไส้ดินสอของแต่ละหัวตรวจสอบมีค่าต่างกันเกินกว่า ± 4 เดซิเบล แสดงว่าการติดตั้งหัวตรวจสอบไม่สมบูรณ์ ให้ทำการติดตั้งหัวตรวจสอบ



รูปที่ ก.1 การทดสอบโดยวิธีหักไส้ดินสอ

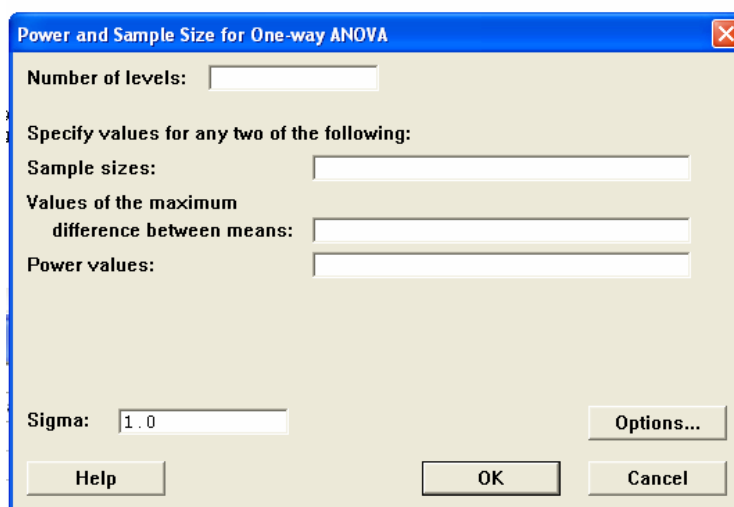
ภาคผนวก ข
การใช้โปรแกรม Minitab

การใช้โปรแกรม Minitab

ในงานวิจัยนี้เราได้ใช้โปรแกรม Minitab Release 13 ในการทดลองและได้ใช้คำสั่งต่างๆ ดังนี้

ข.1 การหาขนาดสิ่งตัวอย่างในการทดลอง

Power and Sample size > One – way ANOVA



Number of Level : (ให้ใส่ค่า level ของปัจจัยหลัก)

Sample size : (ใส่ค่าจำนวนการทดลองที่ต้องการ หรือไม่ได้ใส่ก็ได้)

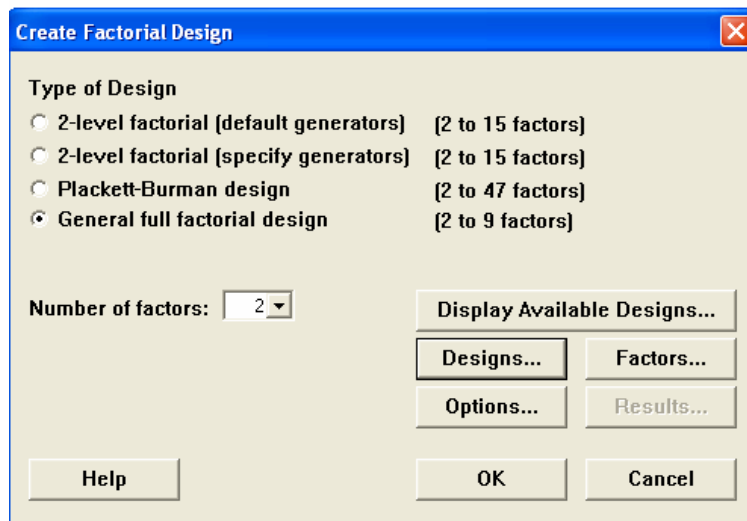
Maximum Difference of Between means : (ใส่ค่าความแตกต่างที่มากที่สุดของค่าเฉลี่ยแต่ละทรีตเมนต์)

Sigma : (ใส่ค่า Sigma ที่ได้จากการทดลองข้อมูลบางส่วน)

ข.2 การออกแบบตารางบันทึกผลการทดลอง

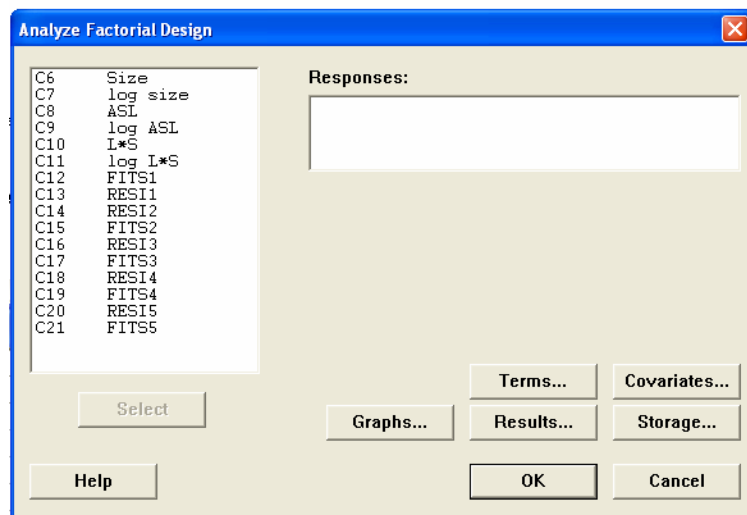
Stat > DOE > Create Factorial Design เลือก General Full Factorial Design

- เลือกจำนวนของปัจจัยที่ทำการศึกษา (Number of Factors)
- เลือก Design เพื่อกำหนดระดับ (Level) ของแต่ละปัจจัย
- เลือก Factors เพื่อระบุค่าของปัจจัยที่ระดับต่าง
- เลือก Option เพื่อกำหนดให้ตารางการทดลองเป็นแบบสุ่มและเก็บตารางลงใน Worksheet
- เลือก OK



ข.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

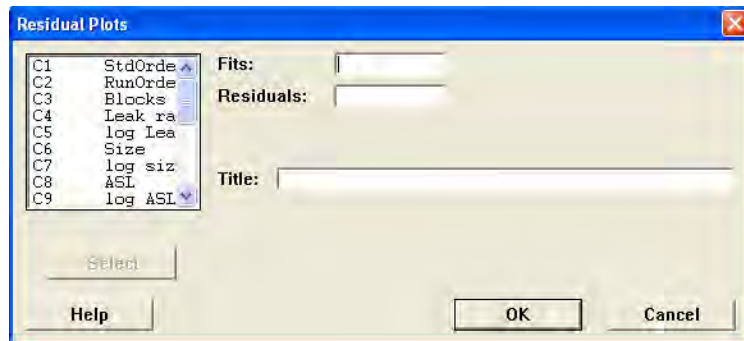
Stat > DOE > Analyze Factorial Design



- ใส่ค่า Response โดยเลือกค่าจากคอลัมน์ทางซ้ายมือ
- เลือก Terms เพื่อเลือก Terms ที่จะทำการศึกษา
- เลือก Storage เพื่อเก็บค่า Residual และ Fitted Value
- เลือก OK

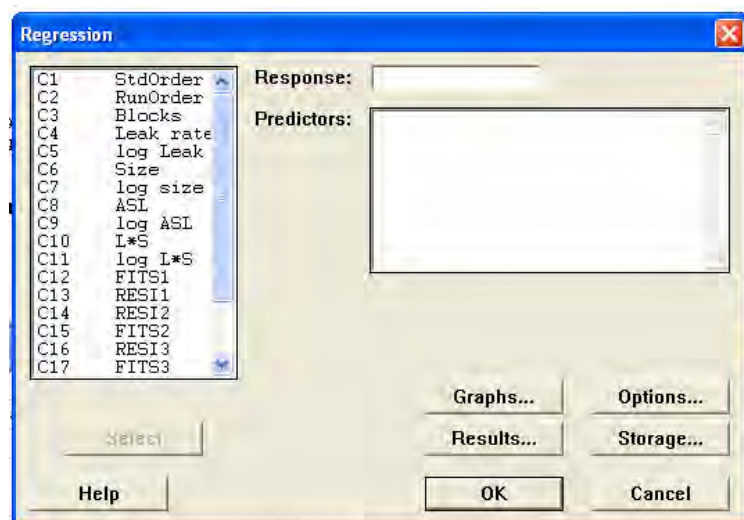
ข.4 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Model Adequacy Checking)

Stat > DOE > Regression > Residual Plot



ข.5 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

Stat > Regression > Regression...



- ใส่ค่า Response โดยเลือกค่าจากคอลัมน์ทางซ้ายมือ
- ใส่ Factor ลงไปในช่อง โดยเลือกค่าจากคอลัมน์ทางซ้ายมือ
- เลือก Option และเข้าไปเลือก Lack of Fit เพื่อกำหนดให้แสดงค่า Lack of Fit
- เลือก Storage เพื่อเก็บค่า Residual และ Fitted Value
- เลือก OK

ภาคผนวก ค

เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีอะคูสติกอิมมิตซ์ชันวัดการรั่ว

ตารางที่ ค.1 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีอะคูสติกอิมพัลส์ตรวจวัดการรั่ว

	Paper (1)	Paper (2)	Paper (3)	Paper (4)	Paper (5)	Paper (6)
Objective	ศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณ AE และหาตำแหน่งโดยเทคนิค two different location	พัฒนาขั้นตอนการตรวจวัดอัตราการรั่วขนาดเล็ก 0.1 ml/s ของสัญญาณ AE จากของไหล two phase และหาตำแหน่งโดยเทคนิค tuned linear location	ตรวจสอบการรั่วของท่อฝังดินและหาตำแหน่งด้วยหลักการ attenuation และ waveform analysis	ตรวจสอบการรั่วของท่อน้ำและหาตำแหน่งด้วย cross correlation technique	ศึกษาลักษณะของ Pressure wave ของการรั่วของท่อ	หาการรั่วของท่อน้ำมันและท่อก๊าซโดยใช้ของไหล two phase และหาตำแหน่งด้วยหลักการ attenuation
Specimen	2 inch Sch 40 Pipe	4 inch Sch 40 Pipe	Underground pipeline	Water pipeline	¾ “ PVC Pipeline	pipelines
Experimental setup	ใช้ AE Sensor คือ PAC Model PLS-1 resonant 15kHz วัดสัญญาณผ่าน two-channel PAC MISTRAS system	ใช้ AE Sensor คือ PAC Model PLS-1 resonant 15kHz วัดสัญญาณผ่าน two-channel PAC MISTRAS system	Pipeline 100 m ต่อกับ pump สร้างแรงดันมีน้ำและอากาศไหลในท่อ ใช้ sensor 15 kHz	ใช้ accelerometer และ hydrophones	ใช้ 4 pressure transducers ต่อกับ PC computer with 12 bits A/D and D/A converter	ใช้ Broadband AE transducers up to 1 MHz ต่อกับ PC และเครื่อง Spectrum Analyzer
AE parameter and signal analysis	Frequency domain, Time domain, AE Energy	AE RMS, Time domain	Frequency domain, Time domain, AE Amplitude FFT, wavelet and fractal analysis	Time domain	Pressure wave	AE Energy
AE equipment	two-channel PAC MISTRAS system	two-channel PAC MISTRAS system	WAE 200	Acquisition and signal analysis instrument -	-	Spectrum Analyzer

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายวัชรพันธ์ แสงห้าว
วัน เดือน ปีเกิด	27 พฤษภาคม 2518
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน พ.ศ. 2536
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2540
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549
ประวัติการทำงาน	วิศวกร ระดับ 4-6 การทางพิเศษแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2541-2548 วิศวกรอาวุโส ระดับ 5 ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) พ.ศ.2548 - ปัจจุบัน

21 เม.ย. 2550

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่...15.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....2550.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)...นายวัชรพันธ์...แสงห้าว.....รหัสประจำตัว.....45411520.....

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☒ โท ☐ เอก

หลักสูตร.....วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.....สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่อง.....

คณะ.....วิศวกรรมศาสตร์.....อยู่บ้านเลขที่.....6.....ซอย.....7.....ถนน...จุฬารัตน์.....

ตำบล/แขวงตลาด.....อำเภอเมือง.....จังหวัด.....มหาสารคาม.....รหัสไปรษณีย์...44000.....

ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี...รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์.....

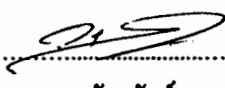
ตำแหน่ง.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์...เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง.....การวิจัยอะคูสติคมิชชั่นสำหรับทดสอบการรั่วของท่อ..... ซึ่งอยู่ในความ
ควบคุมของ.....รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดจนอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์
พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่า
วิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

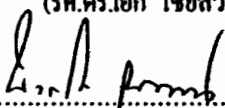
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือ เผยแพร่ต่อ
สาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่ง พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์
พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำมิได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ..........ผู้โอนลิขสิทธิ์

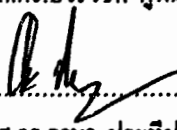
(นายวัชรพันธ์ แสงห้าว)

ลงชื่อ..........ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ..........พยาน

(รศ.ดร.บวร โชค ผู้พัฒน์)

ลงชื่อ..........พยาน

(รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน)