



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การตรวจวัดห้อง ADR Recording
Acoustic measurement of ADR Recording room

นายปรัชญ์ เศวตรัตนเสถียร

นายภคพล ชิตสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมดนตรีและสื่อประสม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การตรวจวัดห้อง ADR Recording

Acoustic measurement of ADR Recording room

นายปรัชญ์ เศวรัตน์เสถียร

นายภคพล ชิตสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมดนตรีและสื่อประสม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การตรวจวัดห้อง ADR Recording

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายปรัชญ์ เศวตรรัตนเสถียร และนายภคพล ชิตสกุล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิชา วิศวกรรมดนตรี และสื่อประสม

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ นายพลสิทธิ์ ทินกร ณ อยุธยา

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายไตรเทพ วงศ์ไพบูลย์

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท กันตนา ซาวด์ สตูดิโอ จำกัด

บทคัดย่อ

โครงการสหกิจศึกษานี้เป็นการตรวจวัดห้อง ADR (Automated Dialog Replacement) Recording หรือห้องบันทึกเสียงพูด โดยโครงการสหกิจนี้จะเป็นการตรวจวัดทางอะคูสติกเพื่อหาจุดที่จะเป็นปัญหาของห้อง ADR Recording ที่จะทำให้เสียงที่บันทึกนั้นมีความผิดพลาด ไม่เป็นธรรมชาติของเสียงมนุษย์ ซึ่งจะเป็นผลเสียให้กับเสียงในโรงภาพยนตร์ โดยห้องบันทึกเสียง ณ บริษัท ได้ถูกออกแบบไว้และมีการแก้ไขในบางส่วนแล้ว แต่ก็ยังมีปัจจัยที่ไม่พึงประสงค์เกิดขึ้นมาในเสียงที่ถูกบันทึก โดยทางบริษัทได้ให้ทำการตรวจวัดทั้งหมด 3 ห้อง คือ ห้อง ADR 1, ADR 2 และ ADR 4 โดยโครงการสหกิจศึกษานี้จะให้ความสำคัญกับการตรวจวัดห้อง ADR 1 มากที่สุด เพราะเป็นห้องที่บริษัทมีการใช้งานมากที่สุด ดังนั้นแล้วทางผู้จัดทำจึงได้ทำการตรวจวัดเพื่อหาจุดที่คาดว่าจะจะเป็นปัญหาของห้อง เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงปัญหาของห้องและเสนอแนวทางการแก้ไขให้กับบริษัทกันตนา ซาวด์ สตูดิโอจำกัด เพื่อนำไปพิจารณาทำการแก้ไขห้อง ADR Recording ให้ดียิ่งขึ้น

Co-operative Title: Acoustic measurement of ADR Recording room

Student Intern Name: Mister Pruch Sawetratanastien and Mister Pakaphol Chitsakul

Faculty: Engineering

Department: Music Engineering and multimedia

Advisor Name: Mister Phonlasit Thinnakorn na ayuthaya

Mentor Name: Mister Traithep Wongpaiboon

Company : Kantana Sound Studio Co.,Ltd.

ABSTRACT

The cooperative education is about acoustic measurements of ADR (Automated Dialog Replacement) Recording room or voice-over recording room. The purpose of this cooperative education is to find the problem spots in the ADR Recording room that will cause imperfection to the recorded sound and make the human sound feel unnatural that will cause the sound in the movie theater terribly. The ADR Recording room in the company had been designed and had already been modified some problem spots in the room but unwanted sound still occurred in the recorded sound. The company manager wanted us to measure 3 rooms that are ADR 1, ADR 2 and ADR 4 but our first priority was ADR 1 because it is the most using room for recording human sound in the company, so we had to find problems of the ADR Recording rooms by using acoustic measurement. After we informed and propose guidelines to solves the problems to the Kantana Sound Studio manager for considering how they will enhance the room.

กิตติกรรมประกาศ

การที่พวกข้าพเจ้าได้มาปฏิบัติงานสหกิจศึกษา ณ บริษัท กันตนา ซาวด์ สตูดิโอ จำกัด ตั้งแต่ วันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ.2561 ถึงวันที่ พฤศจิกายน พ.ศ.2561 ส่งผลให้พวกข้าพเจ้าได้รับความรู้และ ประสบการณ์การทำงานต่างๆที่มีค่ามากมาย สำหรับรายงานวิชาสหกิจศึกษาระดับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยดี จากความร่วมมือและสนับสนุนจากหลายฝ่าย

ขอขอบคุณ คุณไตรเทพ วงศ์ไพบูลย์ ซึ่งเป็น กรรมการผู้จัดการ บริษัท กันตนา ซาวด์ สตูดิโอ จำกัด ที่ได้อนุมัติให้พวกข้าพเจ้าได้เข้าปฏิบัติงานในโครงการสหกิจที่บริษัท และได้ให้คำปรึกษาตลอด การปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณบุคลากรท่านอื่นๆภายในบริษัทที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน และจัดทำรายงาน

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์พลสิทธิ์ ทินกร ณ อยุธยา ที่ได้คำปรึกษา แนะนำตลอด การปฏิบัติงาน และให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ดำเนินงาน

พวกข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลเป็นที่ ปรึกษา ในการทำรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแล และให้ความเข้าใจเกี่ยวกับชีวิต ของการทำงานจริง พวกข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ปรัชญ์ เศวตรัตนเสถียร และ ภคพล ชิตสกุล

ผู้จัดทำรายงาน

10 พฤศจิกายน 2561

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|------|
| บทคัดย่อ..... | i |
| ABSTRACT | ii |
| กิตติกรรมประกาศ..... | iii |
| สารบัญ..... | iv |
| สารบัญ(ต่อ)..... | v |
| สารบัญตาราง..... | vi |
| สารบัญรูป | vii |
| สารบัญรูป (ต่อ)..... | viii |
| สารบัญรูป (ต่อ)..... | ix |
| บทที่ 1 | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน | 1 |
| 1.4 วิธีการดำเนินงาน..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 | 3 |
| 2.1 เสียงคืออะไร..... | 3 |
| 2.1.1 ปรากฏการณ์ของเสียง | 4 |
| 2.1.2 ความเร็วเสียง..... | 10 |
| 2.1.3 ความสามารถในการได้ยินเสียงของมนุษย์ | 11 |
| 2.1.4 การดูดกลืนเสียง (Sound Absorption) | 12 |
| 2.1.5 การสั่นพ้องของเสียง (Sound Resonance) | 14 |
| 2.2 ผลการตอบสนองต่อความถี่ (Frequency response) | 14 |
| 2.3 ผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์ (Impulse response)..... | 15 |
| 2.4 ค่ามาตรฐานทางอะคูสติก..... | 16 |
| 2.4.1 RT60 (Reverberation Time)..... | 16 |
| 2.4.2 STI (Speech Transmission Index) | 17 |
| 2.4.3 SPL (Sound Pressure Level) | 18 |

สารบัญ (ต่อ)

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 2.5 | รูมโหมด (Room mode)..... | 18 |
| 2.6 | การทำ ADR (Automate dialog replacement)..... | 19 |
| 2.6.1 | เทคนิคการทำ ADR..... | 20 |
| บทที่ 3 | | 22 |
| 3.1 | รวบรวมข้อมูลปัญหาของห้อง ADR Recording 1..... | 22 |
| 3.2 | ศึกษาลักษณะของห้อง ADR Recording..... | 23 |
| 3.3 | ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางอะคูสติก..... | 24 |
| 3.4 | คำนวณ Room mode..... | 24 |
| 3.5 | ศึกษาโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง..... | 27 |
| 3.6 | เตรียมอุปกรณ์..... | 28 |
| 3.7 | ตรวจสอบอะคูสติกของห้อง ADR Recording 1..... | 35 |
| 3.7.1 | การตรวจวัดแบบแบ่งตำแหน่ง 9 จุด..... | 35 |
| 3.7.2 | การตรวจวัดแบบอ้างอิงตามตำแหน่งการใช้งานจริง..... | 36 |
| 3.8 | ตรวจสอบอะคูสติกของห้อง ADR Recording 2 และ 4..... | 38 |
| บทที่ 4 | | 40 |
| 4.1 | ผลการตรวจวัดแบบแบ่ง 9 จุด ภายในห้อง ADR recording 1..... | 40 |
| 4.2 | ผลการตรวจรูปแบบวัดตามสถานการณ์จริง..... | 46 |
| 4.2.1 | ห้อง ADR recording 1..... | 46 |
| 4.2.2 | ห้อง ADR recording 2..... | 50 |
| 4.3.2 | ห้อง ADR recording 4..... | 57 |
| บทที่ 5 | | 59 |
| 5.1 | เปรียบเทียบผลการตรวจวัดแบบอ้างอิงตามตำแหน่งการใช้งานจริงระหว่างห้อง..... | 59 |
| 5.2 | สรุปการตรวจวัดห้องห้อง ADR recording 1 2 และ 4..... | 63 |
| 5.2.1 | ห้อง ADR recording 1..... | 63 |
| 5.2.2 | ห้อง ADR recording 2..... | 63 |
| 5.2.3 | ห้อง ADR recording 4..... | 63 |
| 5.3 | สรุปผลการดำเนินงาน..... | 63 |
| 5.4 | กรณีศึกษา..... | 63 |
| บรรณานุกรม | | 65 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการตรวจวัด 9 จุดของชุดที่ 1..... | 42 |
| ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการตรวจวัด 9 จุดของชุดที่ 2..... | 43 |
| ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการตรวจวัด 9 จุดของชุดที่ 3..... | 44 |
| ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการตรวจวัด 9 จุดของชุดที่ 4..... | 45 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 รูปจำลองปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุภาคของอากาศ ที่เกิดจากการแผ่ของคลื่นเสียงในอากาศ... | 3 |
| รูปที่ 2.2 รูปจำลองสรุปการเคลื่อนที่ของอนุภาค..... | 4 |
| รูปที่ 2.3 รูปจำลองทฤษฎีของไฮเกนส์..... | 5 |
| รูปที่ 2.4 รูปจำลองการเกิดการซ้อนทับของคลื่น..... | 5 |
| รูปที่ 2.5 รูปจำลองการสะท้อนของคลื่น..... | 7 |
| รูปที่ 2.6 รูปจำลองปรากฏการณ์การหักเหของคลื่น..... | 8 |
| รูปที่ 2.7 รูปจำลองการเกิดการแทรกสอดของคลื่น..... | 9 |
| รูปที่ 2.8 รูปตัวอย่างการเกิดบีตส์..... | 9 |
| รูปที่ 2.9 รูปตัวอย่างปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน..... | 10 |
| รูปที่ 2.10 รูปจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ของเสียงแบบ Direct sound และ Indirect sound..... | 11 |
| รูปที่ 2.11 กราฟ Equal loudness curve..... | 12 |
| รูปที่ 2.12 รูปจำลองการดูดซับเสียง..... | 13 |
| รูปที่ 2.13 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง..... | 13 |
| รูปที่ 2.14 รูปตัวอย่างกราฟผลตอบสนองต่อความถี่..... | 14 |
| รูปที่ 2.15 รูปแสดงตัวอย่างกราฟผลตอบสนองต่ออิมพัลส์..... | 15 |
| รูปที่ 2.16 รูปตัวอย่าง Energy time curve..... | 15 |
| รูปที่ 2.17 รูปตัวอย่างการเกิด Spike ขึ้นบน Energy time curve..... | 16 |
| รูปที่ 2.18 ตารางค่ามาตรฐาน RT60 ของห้องแบบต่างๆ..... | 16 |
| รูปที่ 2.19 รูปแสดงค่ามาตรฐาน RT60..... | 17 |
| รูปที่ 2.20 กราฟแสดงค่ามาตรฐาน STI..... | 17 |
| รูปที่ 2.21 ตารางแสดงค่ามาตรฐาน STI..... | 18 |
| รูปที่ 2.22 รูปแสดงรูปแบบของ Room mode..... | 18 |
| รูปที่ 2.23 ภาพตัวอย่างการบันทึกเสียง ADR..... | 20 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังห้อง ADR 1 (Side view)..... | 22 |
| รูปที่ 3.2 แผนผังห้อง ADR 1 (Top view)..... | 23 |
| รูปที่ 3.3 ภายในห้อง ADR 1..... | 23 |
| รูปที่ 3.4 ห้อง ADR Recording ณ บริษัท Fox Studios..... | 24 |
| รูปที่ 3.5 รูปแสดงตำแหน่งลูกคลื่นที่อาจเกิดปัญหา Room mode ของห้อง ADR 1..... | 26 |
| รูปที่ 3.6 รูปแสดงไอคอนโปรแกรม Room EQ Wizard..... | 27 |
| รูปที่ 3.7 รูปแสดง Interface ของโปรแกรม Room EQ Wizard..... | 27 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.8 รูปไอคอนโปรแกรม Pro Tools..... | 28 |
| รูปที่ 3.9 รูป Interface ของโปรแกรม Pro Tools..... | 28 |
| รูปที่ 3.10 รูปคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Asus GL552WW..... | 28 |
| รูปที่ 3.11 รูป Interface Steinberg UR22..... | 29 |
| รูปที่ 3.12 คุณสมบัติทางเทคนิคของ Interface Steinberg UR22..... | 29 |
| รูปที่ 3.13 รูป SPL Meter Tecman TM384..... | 29 |
| รูปที่ 3.14 รูปแสดงคุณสมบัติทางเทคนิคของ SPL Meter Tecman TM834..... | 30 |
| รูปที่ 3.15 ลำโพง YAMAHA DXR15..... | 31 |
| รูปที่ 3.16 คุณสมบัติทางเทคนิคของลำโพง YAMAHA รุ่น DXR15..... | 31 |
| รูปที่ 3.17 ไมโครโฟน dbx RTA-M..... | 32 |
| รูปที่ 3.18 กราฟ Frequency response ของไมโครโฟน dbx RTA-M..... | 32 |
| รูปที่ 3.19 รูปสาย XLR..... | 32 |
| รูปที่ 3.20 รูปสาย TRS..... | 33 |
| รูปที่ 3.21 รูปขาตั้งไมโครโฟน Understand Music MS108BK..... | 33 |
| รูปที่ 3.22 รูปเลเซอร์วัดระยะ Fluke 424D..... | 34 |
| รูปที่ 3.23 รูปผังกำหนดจุดการทดลองภายในห้อง..... | 34 |
| รูปที่ 3.24 รูปการทดลองภายในห้อง ADR 1..... | 35 |
| รูปที่ 3.25 รูปการทดลองแบบอ้างอิงตำแหน่งตามตามสถานการณ์จริง..... | 36 |
| รูปที่ 3.26 รูปการทดลองแบบอ้างอิงตำแหน่งตามตามสถานการณ์จริง..... | 37 |
| รูปที่ 3.27 รูปการตรวจวัดห้อง ADR 2..... | 38 |
| รูปที่ 3.28 ภาพการตรวจวัดห้อง ADR 4..... | 38 |
| รูปที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูล Frequency Response จากข้อมูลชุดที่ 1 ตำแหน่งที่ 7..... | 40 |
| รูปที่ 4.2 ตัวอย่างข้อมูล RT60 จากข้อมูลชุดที่ 1 ตำแหน่งที่ 7..... | 40 |
| รูปที่ 4.3 Energy Time Curve จากข้อมูลชุดที่ 1 ตำแหน่งที่ 7..... | 41 |
| รูปที่ 4.4 Energy Time Curve จากข้อมูลชุดที่ 3 ตำแหน่งที่ 4..... | 45 |
| รูปที่ 4.5 Energy Time Curve จากข้อมูลชุดที่ 3 ตำแหน่งที่ 5..... | 46 |
| รูปที่ 4.6 ห้อง ADR recording 1..... | 46 |
| รูปที่ 4.7 Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 1..... | 47 |
| รูปที่ 4.8 RT60 จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 1..... | 47 |
| รูปที่ 4.9 Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 1..... | 47 |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 4.10 | พื้นที่ที่อาจเป็นจุดตกกระทบสะท้อนของเสียงภายในห้อง ADR recording 1..... | 49 |
| รูปที่ 4.11 | (ก), (ข), (ค) และ (ง) รูปภายในห้อง ADR2..... | 51 |
| รูปที่ 4.12 | Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 2..... | 52 |
| รูปที่ 4.13 | RT60 จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 2..... | 52 |
| รูปที่ 4.14 | Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 2..... | 53 |
| รูปที่ 4.15 | (ก) ,(ข) ,(ค) ,(ง) และ (จ) พื้นที่ที่อาจเป็นจุดสะท้อนของเสียงภายในห้อง ADR 2..... | 56 |
| รูปที่ 4.16 | ห้อง ADR 4..... | 57 |
| รูปที่ 4.17 | Frequency Response จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 4..... | 57 |
| รูปที่ 4.18 | RT60 จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 4..... | 58 |
| รูปที่ 4.19 | Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 4..... | 58 |
| รูปที่ 5.1 | ผลการตอบสนองต่อความถี่ จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงห้อง ADR 1..... | 59 |
| รูปที่ 5.2 | ผลการตอบสนองต่อความถี่ จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงห้อง ADR 2..... | 59 |
| รูปที่ 5.3 | ผลการตอบสนองต่อความถี่ จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงห้อง ADR 4..... | 60 |
| รูปที่ 5.4 | Energy Time Curve จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงของห้อง ADR 1..... | 60 |
| รูปที่ 5.5 | Energy Time Curve จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงของห้อง ADR 2..... | 61 |
| รูปที่ 5.6 | Energy Time Curve จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงของห้อง ADR 4..... | 61 |
| รูปที่ 5.7 | Reverberation Time จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริง ห้อง ADR 1..... | 62 |
| รูปที่ 5.8 | Reverberation Time จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริง ห้อง ADR 2..... | 62 |
| รูปที่ 5.9 | Reverberation Time จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริง ห้อง ADR 4..... | 62 |

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเบื้องต้นของการดำเนินโครงการ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการปฏิบัติงานด้านการบันทึกเสียง หนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดคือคุณลักษณะทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบและควบคุมสภาวะทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียงให้มีคุณลักษณะเป็นไปตามทฤษฎีการออกแบบจากวัตถุประสงค์การใช้งานแล้ว แต่ในบางครั้งก็อาจเกิดปัญหาขึ้นจากตัวแปรต่างๆที่เกิดมาจากรูปแบบของการใช้งาน โดยทั่วไปปัญหาที่เกิดขึ้นจะถูกพบโดยผู้ใช้งานหลังจากการได้ยิน ไม่ใช่จากการตรวจวัดอย่างเป็นระบบทำให้ไม่มีข้อมูลที่รองรับกับปัญหาที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้ทำการแก้ไขปัญหาได้ยาก ทางผู้จัดทำจึงได้เสนอที่จะทำการตรวจวัดคุณลักษณะทางอะคูสติกของห้องให้กับทางบริษัทและหากพบปัญหาก็คจะเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาให้กับทางบริษัทสำหรับการแก้ไขในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อทำการตรวจวัดมาตรฐานทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง

1.2.2 เพื่อทำการเก็บข้อมูลคุณลักษณะทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อประโยชน์ในการใช้งานห้อง

1.2.3 เพื่อทำการตรวจหาปัญหาทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง และเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาให้กับทางบริษัท

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1.3.1 ทำการตรวจวัดมาตรฐานและเก็บข้อมูลทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง 3 ห้อง ให้กับบริษัท

1.3.2 ทำการตรวจหาปัญหาทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง และเสนอแนวทางการแก้ไข หากพบว่าพบปัญหา

1.3.3 ทำการตรวจวัดคุณลักษณะทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ตำแหน่งภายในห้องที่เหมาะสมแก่การใช้งานบันทึกเสียงรูปแบบต่างๆ

1.3.4 ศึกษาวิธีการทำงานในการบันทึกเสียง

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาหลักการและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางอะคูสติก

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีการตรวจวัดมาตรฐานทางอะคูสติก

1.4.3 ศึกษาการใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดทางอะคูสติก

1.4.3.1 โปรแกรม Room EQ Wizard

1.4.4 ทำการเก็บข้อมูลทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง

1.4.5 ทำการวิเคราะห์ข้อมูล หาปัญหาทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง

1.4.6 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง หาความเหมาะสมและวิธีการจัดวางตำแหน่งการบันทึกเสียง

1.4.7 ศึกษาหลักการการแก้ไขปัญหาทางอะคูสติก

1.4.8 นำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาทางอะคูสติกของห้อง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำความรู้ที่ได้ศึกษามาดำเนินงานโครงการได้อย่างประสบผลสำเร็จด้านการตรวจวัดทางอะคูสติกเพื่อสามารถนำไปใช้ในการแก้ไขห้องแบบต่างๆที่ประสบปัญหาทางด้านเสียงที่ไม่พึงประสงค์ และได้ศึกษาเรียนรู้เทคนิควิธีการในการบันทึกเสียงเพิ่มเติมเพื่อเป็นประโยชน์ในการประกอบอาชีพต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

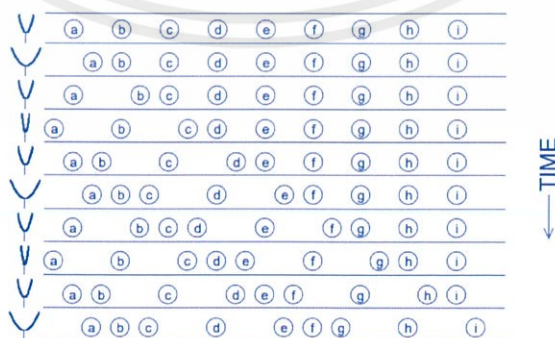
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องและนำมาอ้างอิงประยุกต์ใช้ในการดำเนินงาน

2.1 เสียงคืออะไร

เสียงเป็นคลื่นชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ ซึ่งการสั่นสะเทือนของวัตถุจะส่งผลรบกวนไปยังโมเลกุลของตัวกลางที่อยู่โดยรอบ ทำให้ตัวกลางเกิดการสั่นสะเทือนกลายเป็นคลื่นเสียงที่แผ่กระจายไปในตัวกลางนั้นๆ ทิศทางการสั่นสะเทือนของโมเลกุลตัวกลางจะขนานกับทิศทางการแผ่ของเสียง อันเป็นสมบัติของคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) เป็นเหตุผลที่เสียงต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ซึ่งตัวกลางจะเป็นสสารที่ที่มีความยืดหยุ่นและจะเป็นสสารที่อยู่ในสถานะใดก็ได้

การสั่นสะเทือนของวัตถุเกือบทุกชนิดล้วนแต่ให้กำเนิดเสียง トラบเท่าที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนอยู่ในช่วงการตอบสนองต่อความถี่ของผู้รับเสียง และมีตัวกลางที่มีโมเลกุลยืดหยุ่นสามารถส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปได้ ตัวกลางที่ยืดหยุ่นในที่นี้หมายถึง ตัวกลางที่สามารถคืนตัวสู่รูปร่างเดิมได้หลังถูกกระทำด้วยแรงใดๆ ตัวอย่างของวัตถุที่แสดงรูปแบบการคืนตัวในรูปแบบนี้ได้ชัดเจนที่สุดก็คือสปริง อากาศถือเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของเสียงที่เป็นพื้นฐานที่สุด การจะทำความเข้าใจเรื่องการส่งผ่านเสียงผ่านตัวกลางอากาศได้ง่ายที่สุดคือการจำลองว่าอากาศคือการรวมกลุ่มของอนุภาคที่แต่ละอนุภาคถูกเชื่อมเอาไว้ด้วยกันโดยสปริง ซึ่งสปริงที่กล่าวมานี้จะเป็นตัวแสดงถึงแรงคืนตัวที่จะอธิบายความยืดหยุ่นของตัวกลางอากาศ การสั่นสะเทือนของวัตถุจะรบกวนอนุภาคของอากาศ (Particle density) ทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งความหนาแน่นของอนุภาคอากาศนั้นจะเกี่ยวข้องกับ ความดันอากาศ (Air pressure) กล่าวคือการสั่นสะเทือนของวัตถุใดๆจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันอากาศโดยรอบวัตถุที่สั่นสะเทือน

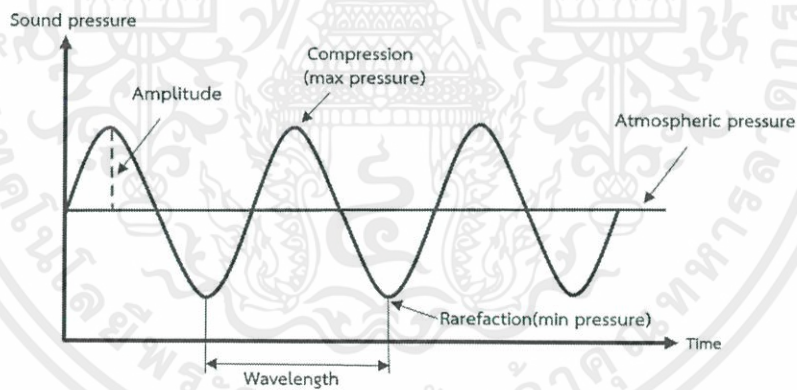


รูปที่ 2.1 รูปจำลองปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุภาคของอากาศ ที่เกิดจากการแผ่ของคลื่นเสียงในอากาศ

ที่มา : <https://homepages.wmich.edu/~hillenbr/206/ac.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อมีวัตถุสั่นสะท้อนถูกนำมาไว้ในอาณาบริเวณ ความดันอากาศจะถูกรบกวนเป็นปฏิกิริยา ลูกโซ่คล้ายคลึงกับในรูปที่ 2.1 เมื่อวัตถุสั่นจะส่งผลให้อนุภาคโดยรอบเกิดการเคลื่อนที่ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาอนุภาคbจะเกิดแรงผลักให้อนุภาคbเคลื่อนที่ตามไปในทิศทางเดียวกัน และอนุภาคbก็จะเคลื่อนที่เข้าหาอนุภาคข้างเคียง ทำการผลักอนุภาคโดยรอบออกไปเป็นทอดๆ ปรากฏการณ์ที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าประชิดกันนี้ถูกเรียกว่า Compression ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะส่งผลให้ความดันอากาศมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยจากค่าความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) จากที่ได้ทำการยกตัวอย่างอธิบายเอาไว้ว่าอนุภาคที่แต่ละอนุภาคถูกเชื่อมเอาไว้ด้วยกันโดยสปริง ในทำนองเดียวกันกับการคืนตัวของสปริง เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ประชิดเข้าหากันแล้ว เมื่อถึงจุดหนึ่งก็จะเกิดแรงคืนตัวดึงอนุภาคให้กลับคืนสู่จุดตั้งต้น จากค่าพลังงานที่สะสมเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าประชิดกัน ส่งผลให้แรงดึงจะดึงอนุภาคให้ออกไปเกินกว่าจุดตั้งต้น ปรากฏการณ์การคืนตัวนี้เรียกว่า Rarefaction และปรากฏการณ์นี้จะส่งผลให้ความดันอากาศมีค่าลดลงเล็กน้อยจากค่าความดันบรรยากาศ ปรากฏการณ์การบีบอัดและคืนตัวของอนุภาคนี้จะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆจนกว่าวัตถุสั่นสะท้อนจะหยุดสั่นหรือกล่าวได้ว่าหยุดปล่อยพลังงานออกมารบกวนอนุภาคในตัวกลาง ซึ่งถ้าหากว่าหยุดแล้วการเคลื่อนที่ของอนุภาคก็จะค่อยๆหยุดลงตามค่าพลังงานที่สูญเสียไปจากการเคลื่อนที่ และการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถนำมาอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปจำลองสรุปการเคลื่อนที่ของอนุภาค

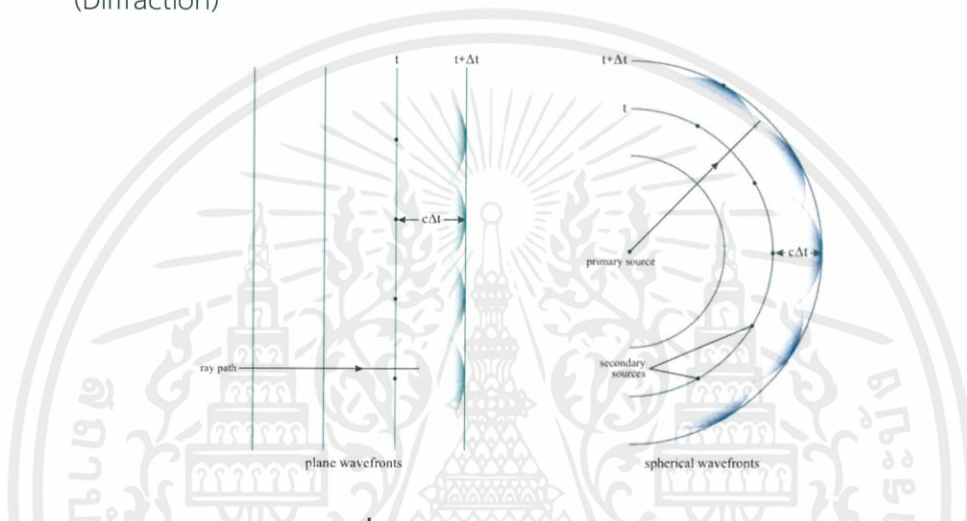
ระยะห่างที่อนุภาคเคลื่อนออกจากจุดตั้งต้นคือแอมพลิจูด (Amplitude) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าพลังงานที่กระทำต่ออนุภาค หรือก็คือค่าพลังงานของคลื่นเสียงนั่นเอง

2.1.1 ปรากฏการณ์ของเสียง

เสียงจัดเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง ทำให้เสียงมีคุณสมบัติพื้นฐานของคลื่นอันได้แก่ ทฤษฎีของไฮเกนส์ การซ้อนทับ และกฎกำลังสองผกผัน

2.1.1.1 ทฤษฎีของไฮเกนส์ (Huygens's principle)

ทฤษฎีนี้ได้กล่าวเอาไว้ว่า ณ ตำแหน่งใดๆของคลื่นสามารถประพฤติตัวเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นโค้งใหม่ (หรือคลื่นทรงกลมหากมองในรูปแบบ 3 มิติ) ที่ถูกเรียกว่า *Huygens's wavelets* และรูปแบบคลื่นที่เกิดขึ้นในเวลาต่อมาจะเกิดจากการการรวมตัวกันของคลื่นโค้งเหล่านี้ ซึ่งทฤษฎีของไฮเกนส์เป็นทฤษฎีที่ช่วยอธิบายเรื่องการแผ่ของคลื่น และปรากฏการณ์การสะท้อน (Reflection), การหักเห (Refraction) และการเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction)

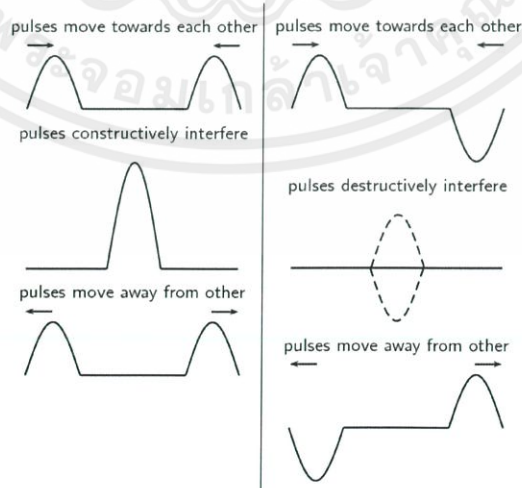


รูปที่ 2.3 รูปจำลองทฤษฎีของไฮเกนส์

ที่มา : <https://dosits.org/science/advanced-topics/how-does-sound-move-wave-propagation-and-huygens-principle/>

2.1.1.2 การซ้อนทับ (Superposition)

ทฤษฎีการซ้อนทับของคลื่นกล่าวเอาไว้ว่า คลื่นที่เกิดขึ้นในตัวกลางเดียวกัน และในเวลาเดียวกันจะไม่ส่งผลต่อการคงอยู่ซึ่งกันและกัน



รูปที่ 2.4 รูปจำลองการเกิดการซ้อนทับของคลื่น

ที่มา : <https://www.siyavula.com/read/science/grade-10/transverse-pulses/07-transverse-pulses-03>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ดังรูปที่ 2.4 เมื่อคลื่น 2 คลื่นเคลื่อนที่เข้าหากันจะไม่ส่งผลให้คลื่นทั้ง 2 ถูก
 ครอบงำโดยกันและกัน คุณลักษณะของรูปทั้ง 2 จะยังคงเดิมและคลื่นทั้ง 2 ก็ยังคงเคลื่อนที่
 ต่อไปในทิศทางเดิม แต่ ณ จุดที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าซ้อนทับกันอาจส่งผลให้เกิดการเกือหนุน
 ทางเฟส (In phase) หรือการหักล้างทางเฟสขึ้น (Out of phase) ซึ่งการซ้อนทับ
 (Superposition) ของคลื่นเป็นที่มาของปรากฏการณ์การแทรกสอด (interference) ของ
 คลื่น

2.1.1.3 กฎกำลังสองผกผัน (Invert square law)

กฎกำลังสองผกผันเป็นกฎทางฟิสิกส์ที่อธิบายถึงการลดลงของปริมาณหรือ
 ความเข้ม ของค่าทางฟิสิกส์ใดๆจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับค่ารากของระยะทางที่ห่างจาก
 แหล่งกำเนิดค่านั้นๆ กล่าวโดยสรุปได้โดยใช้สมการ

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(D_2)^2}{(D_1)^2}$$

I_1 คือ ความเข้มที่ตำแหน่งตั้งต้น

I_2 คือ ความเข้มที่ตำแหน่งใหม่

D_1 คือ ระยะห่างจากตำแหน่งตั้งต้น

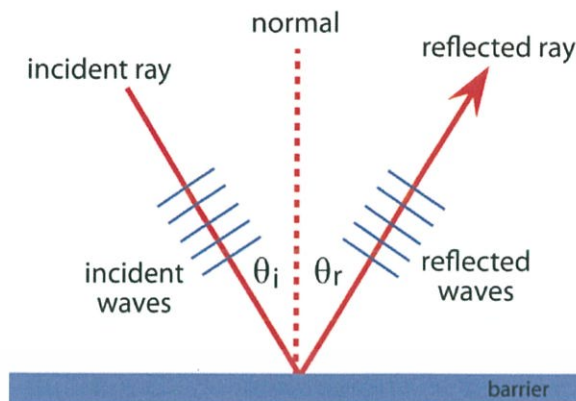
D_2 คือ ระยะห่างที่ตำแหน่งใหม่

ถ้าหากว่าเป็นในกรณีของคลื่นเสียงได้มีการสรุปเอาไว้ว่าระยะห่างที่เพิ่มขึ้น
 เป็น 2 เท่า จะทำให้ค่าความดังของเสียงลดลง 6 เดซิเบล (dB)

จากคุณสมบัติต่างๆของคลื่นดังที่กล่าวมาทำให้เสียงมีการเกิดปรากฏการณ์
 ต่างๆที่มีผลในเชิงอะคูสติกอันได้แก่ การสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) การ
 แทรกสอด (Diffraction) และการเลี้ยวเบน (Interference)

2.1.1.4 การสะท้อน (Reflection)

การสะท้อนของคลื่นเกิดจากการที่คลื่นเดินทางไปตามกระทบกับสิ่งกีดขวาง
 แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางในการเคลื่อนที่ ในการศึกษาเชิงฟิสิกส์ได้มีการเรียกคลื่นที่
 เกินทางมาตกระทบกับตัวกลางเอาไว้ว่า คลื่นตกกระทบ (Incident wave) และเรียกคลื่นที่
 สะท้อนออกจากจุดตกกระทบว่า คลื่นสะท้อน (Reflection wave)



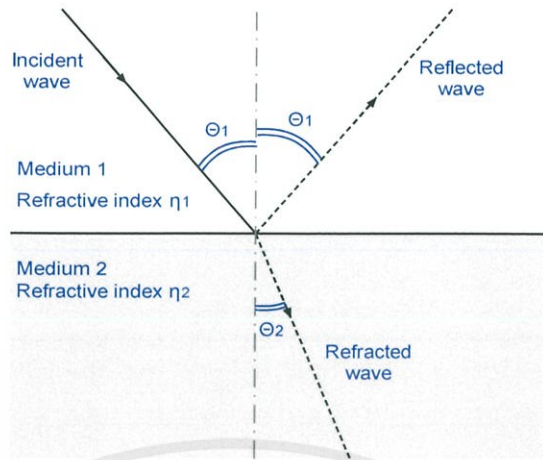
รูปที่ 2.5 รูปจำลองการสะท้อนของคลื่น

ที่มา : <https://www.ck12.org/physics/reflection-of-mechanical-waves/lesson/Reflection-of-Mechanical-Waves-PHYS/>

กฎทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญของปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่นคือ มุมตกกระทบของคลื่นตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อนของคลื่นสะท้อน โดยมุมทั้ง 2 นี้จะเกิดขึ้นเป็นกึ่งกลางจะขึ้นอยู่กับเส้นจำลองที่เรียกว่า เส้นปกติ (Normal) ซึ่งเป็นเส้นที่ลากขึ้นตั้งฉากกับพื้นผิว ณ ตำแหน่งที่คลื่นตกกระทบ ดังที่เห็นในรูปที่ 2.5 การสะท้อนคลื่นเป็นที่มาของการเกิดเสียงก้องสะท้อนหรือที่เรียกกันว่าเอโค (Echo) ก็เป็นผลที่เกิดจากการสะท้อนของคลื่น คลื่นเสียงเดินทางออกจากแหล่งกำเนิดไปตกกระทบกับวัตถุหรือพื้นผิวที่มีหน้าตัดกว้างพอที่จะรองรับการสะท้อนของเสียง ทำให้คลื่นเสียงสะท้อนกลับมาหาผู้ฟังกลายเป็นเสียงก้องสะท้อนที่ถือเป็นปัญหาทางอะคูสติกที่สำคัญรูปแบบหนึ่งที่สามารถทำการแก้ไขได้โดยการใช้วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับเสียงต่อตั้งไว้ในบริเวณที่เป็นจุดตกกระทบของคลื่นเสียงให้วัสดุช่วยดูดซับพลังงานของเสียงให้ลดทอนลง ลดการสะท้อนเป็นการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นซึ่งโดยทั่วไปแล้วเสียงแต่ละย่านความถี่จะมีความสามารถในการสะท้อนที่แตกต่างกัน เสียงความถี่สูงจะมีความสามารถในการสะท้อนที่สูงกว่าเสียงความถี่ต่ำ ทำให้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นก็ต้องใช้วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับเสียงที่แตกต่างกันไปตามย่านความถี่ที่เป็นปัญหา

2.1.1.2 การหักเห (Refraction)

เมื่อคลื่นเดินทางมาตกกระทบบนพื้นผิวใดๆที่ขึ้นอยู่กับระหว่างตัวกลาง 2 ตัวกลาง คลื่นส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ออกจากตัวกลางที่ 2 ดังที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์การหักเหของคลื่น และจะมีคลื่นส่วนหนึ่งเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางใหม่ ซึ่งการที่คลื่นเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางใหม่นี้ถูกเรียกว่าปรากฏการณ์การหักเห (Reflection) ของคลื่น



รูปที่ 2.6 รูปจำลองปรากฏการณ์การหักเหของคลื่น

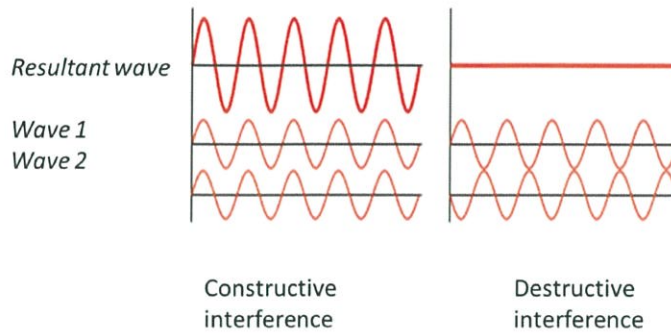
ที่มา : <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/propagation-overview/radio-em-wave-refraction.php>

คลื่นที่เกิดการหักเหจะมีความเร็วและความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติของตัวกลางที่เปลี่ยนไป และไม่จำเป็นที่ตัวกลางจะต้องเปลี่ยนไปจากตัวกลางหนึ่งเป็นอีกตัวกลางเสมอไป ตัวกลางเดียวกันแต่คุณสมบัติภายในตัวกลางอาจเปลี่ยนไปก็ส่งผลให้เกิดการหักเหของคลื่นได้ ยกตัวอย่างเช่น คลื่นเสียงเดินทางผ่านเนื้อผิวน้ำ ถึงแม้ว่าคลื่นเสียงจะไม่ได้เคลื่อนที่เปลี่ยนตัวกลางลงไปก็ผิวน้ำโดยตรง แต่อุณหภูมิอากาศเหนือผิวน้ำนั้นจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศที่อยู่สูงขึ้นไป โดยคุณสมบัติแล้วคลื่นเสียงจะสามารถเคลื่อนที่ไปในอากาศที่มีอุณหภูมิสูงได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า ด้วยเหตุนี้ทำให้น้ำคลื่นบริเวณเหนือผิวน้ำเคลื่อนที่ไปได้ช้าลงกว่าหน้าคลื่นที่อยู่สูงขึ้นไป ทำให้น้ำคลื่นเสียงเกิดการเบี่ยงทิศทางลงสู่ผิวน้ำ

2.1.1.3 การแทรกสอด (Interference)

การแทรกสอดเป็นปรากฏการณ์ของคลื่นตั้งแต่ 2 คลื่นเป็นต้นไป เดินทางเข้าหากันในตัวกลางเดียวกัน รูปแบบการแทรกสอดของคลื่นสามารถเป็นไปได้ 2 รูปแบบ คือการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive interference) และการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive interference)

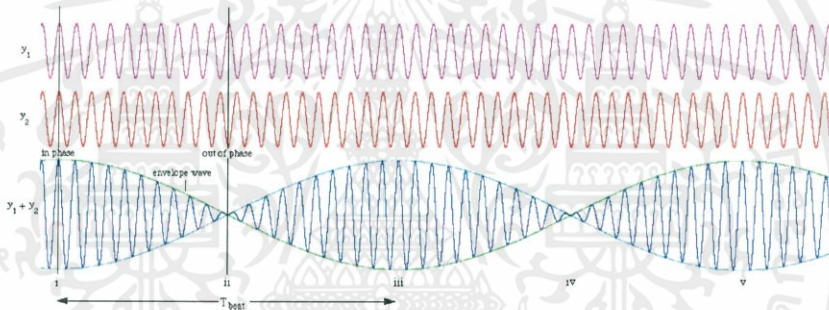
ในกรณีการแทรกสอดแบบเสริม จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นที่เดินทางเข้าหากันมีคุณสมบัติเกือบขนานทางเฟส (In phase) ซึ่งกันและกัน ส่งผลให้แอมพลิจูด (Amplitude) ของคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการแทรกสอดกันมีค่าสูงขึ้น และในกรณีการแทรกสอดแบบหักล้าง จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นที่เดินทางเข้าหากันมีคุณสมบัติหักล้างทางเฟส (Out of phase) ซึ่งกันและกัน ส่งผลให้แอมพลิจูดของคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการแทรกสอดมีค่าลดลง



รูปที่ 2.7 รูปจำลองการเกิดการแทรกสอดของคลื่น

ที่มา : http://data.allenai.org/tqa/wave_interference_L_1068/

ในทางปฏิบัติเมื่อคลื่นเสียงเกิดการแทรกสอด จะเกิดการแทรกสอดของคลื่นเสียงที่มีความถี่ไม่เท่ากัน และในกรณีที่คลื่นเสียงมีความถี่ต่างกันเพียงเล็กน้อยจะเรียกปรากฏการณ์ที่เรียกว่า บีตส์ (Beat)



รูปที่ 2.8 รูปตัวอย่างการเกิดบีตส์

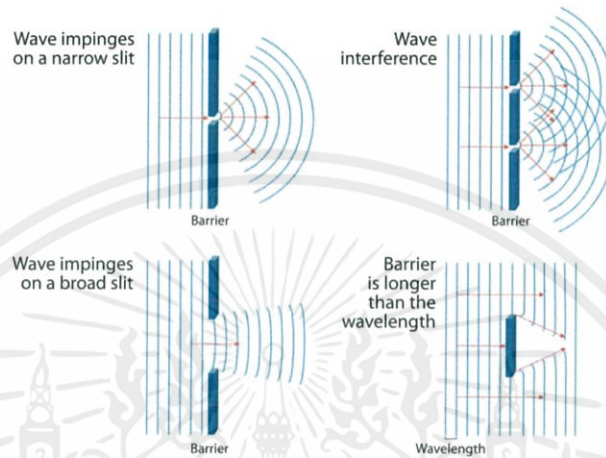
ที่มา : <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/beats.htm>

ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8 คลื่นเสียงทั้ง 2 มีความถี่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย หากพิจารณาคลื่นความถี่เสียงทั้ง 2 โดยการฟังแยกกัน ก็จะไม่รู้สึกถึงความแตกต่างของคลื่นเสียงทั้ง 2 เลย แต่เมื่อทำการเล่นคลื่นเสียงทั้ง 2 พร้อมกัน ณ ตำแหน่งที่คลื่นเสียงทั้ง 2 เกิดการแทรกสอดแบบหนุน ค่าแอมพลิจูดของคลื่นก็จะสูงขึ้น ความดังของเสียงเพิ่มขึ้น และ ณ ตำแหน่งที่คลื่นเสียงทั้ง 2 เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ค่าแอมพลิจูดของคลื่นก็จะลดลง ความดังของเสียงลดลง ความถี่ของการเพิ่ม ลด ความดังของเสียงในรูปแบบนี้ถูกเรียกว่า ความถี่บีตส์ (Beat frequency) และความถี่บีตส์จะมีค่าเท่ากับความต่างของค่าความถี่ที่เล่นพร้อมกัน

2.1.1.4 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

ปรากฏการณ์ที่คลื่นเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ภายในตัวกลางเดิมเมื่อคลื่นตกกระทบกับสิ่งกีดขวางที่มีขนาดเล็ก และปรากฏการณ์ที่คลื่นแผ่กระจายตัวออกจากช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง ปรากฏการณ์เหล่านี้เรียกว่าการเลี้ยวเบน หากยกตัวอย่างในทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปฏิบัติของคลื่นเสียง ตัวอย่างเช่นการที่ได้ยินเสียงดังออกมาจากห้องที่เปิดประตูทิ้งเอาไว้ หรือการที่ได้ยินเสียงดังมาจากบริเวณมุมตึกทั้งที่ยังมองไม่เห็นแหล่งกำเนิดเสียง เป็นต้น ซึ่งเสียงความถี่ต่ำจะมีความสามารถในการเลี้ยวเบนมากกว่าเสียงความถี่สูงเพราะช่วงความยาวคลื่นที่ยาว



รูปที่ 2.9 รูปตัวอย่างปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน

ที่มา : https://www.crossfithartford.com/dummies_diagram_of_wave_diffraction.php

2.1.2 ความเร็วเสียง

เสียงมีความเร็วโดยประมาณอยู่ที่ 343 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วของเสียงจะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวกลาง และอุณหภูมิของตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งถ้าตัวกลางเป็นแก๊สก็สามารถคำนวณหาความเร็วของเสียงได้จากสมการ

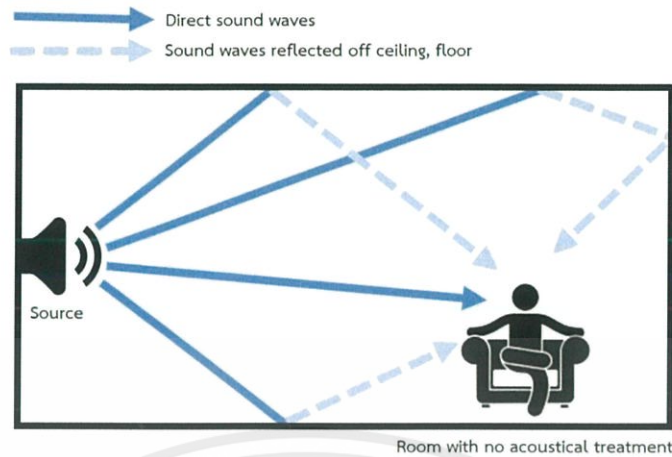
$$a = \sqrt{\gamma \times R \times T}$$

γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ความเร็วเสียงเป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่งกับงานด้านอะคูสติก โดยธรรมชาติของเสียง เมื่อเสียงเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด คลื่นเสียงจะกระจายตัวเดินทางผ่านอากาศไปสู่จุดรับเสียงใน 2 ลักษณะ คือ คลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ไปสู่จุดรับเสียงโดยตรงหรือที่เรียกว่า Direct sound และคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่กระจายออกจากแหล่งกำเนิด สัมผัสกับวัตถุในอาณาบริเวณ เช่น ผนัง พื้น เพดาน เครื่องเรือน แล้วจึงสะท้อนกลับเข้าหาจุดรับเสียง หรือที่เรียกว่า Indirect sound



รูปที่ 2.10 รูปจำลองการรูปแบบการเคลื่อนที่ของเสียงแบบ Direct sound และ Indirect sound

Indirect sound เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ของเสียงที่เป็นปัญหาทางอะคูสติก วิธีการแก้ไขโดยเบื้องต้นคือการติดตั้งดูดซับเสียงที่จุดตกกระทบของ Indirect sound เพื่อทำการลดทอนพลังงานของคลื่นเสียงให้ลดลง ซึ่งการหาตำแหน่งจุดตกกระทบของ Indirect sound นั้นสามารถทำการคำนวณอย่างง่ายได้โดยการอาศัยสมการกฎการเคลื่อนที่

$$s = v \times t$$

v คือ อัตราเร็ว

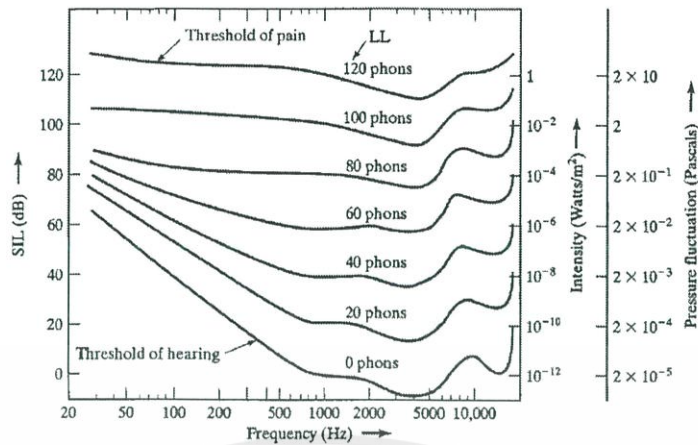
s คือ ระยะทาง

t คือ เวลา

จุดตกกระทบของ Indirect sound จะประพุดเป็นแหล่งกำเนิดเสียงใหม่ เมื่อทำการตรวจวัดความต่างของเวลาที่ Direct sound และ Indirect sound เดินทางมาถึงจุดรับเสียง ก็จะสามารถคำนวณระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงและจุดรับเสียงได้ วิธีการนี้เป็นวิธีการโดยง่ายในการจัดการกับ Indirect sound

2.1.3 ความสามารถในการได้ยินเสียงของมนุษย์

หูของมนุษย์เป็นหนึ่งในอวัยวะที่ละเอียดอ่อนที่สุดในร่างกาย เป็นอวัยวะที่ตอบสนองต่อทั้งแอมพลิจูด (Amplitude) และความถี่ (Frequency) ของคลื่นกลซึ่งในที่นี้คือคลื่นเสียง โดยปกติแล้วหูมนุษย์จะตอบสนองต่อช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 20,000 เฮิรตซ์ ซึ่งความสามารถในการตอบสนองต่อช่วงความถี่ของมนุษย์จะเสื่อมลงตามอายุ หรือได้รับความเสียหายจากการรับฟังเสียงที่มีความดังสูงเกินไปหูมนุษย์จะมีความสามารถในการตอบสนองต่อแต่ละช่วงความถี่ไม่เท่ากัน ซึ่งได้มีการอธิบายการตอบสนองต่อแต่ละช่วงความถี่ของมนุษย์โดยใช้กราฟลูกเรียกว่า Equal loudness curves ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟ Equal loudness curve

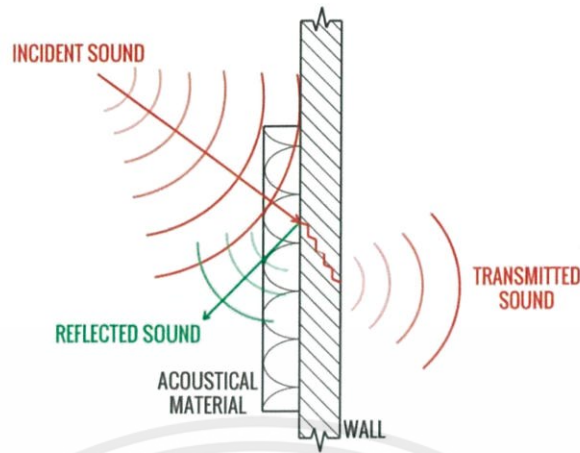
ที่มา : Richard E. Berg and David G. Stork , Physic Of Sound หน้า 152

เส้นกราฟ Threshold of hearing นั้นเป็นเส้นกราฟที่แสดงถึงค่าแอมพลิจูดต่ำที่สุดที่มนุษย์จะได้ยินเสียงในช่วงความถี่ต่างๆ และเส้นกราฟ Threshold of pain เป็นเส้นกราฟที่แสดงถึงค่าแอมพลิจูดของแต่ละช่วงความถี่ที่สูงพอที่จะสร้างความเสียหายให้แก่หูของมนุษย์

นอกจากนี้ยังมีการตอบสนองอื่นๆที่เป็นรายละเอียดปลีกย่อยของมนุษย์อย่างแรกคือ มนุษย์จะสามารถรับรู้ถึงเสียงได้ก็ต่อเมื่อเสียงนั้นคงอยู่เป็นเวลามากกว่า มนุษย์จะตอบสนองต่อเสียงที่แตกต่างกัน 2 เสียง โดยรับรู้ว่าเป็นเสียง 2 เสียงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่คาบเหมือนกันและแตกต่างกันได้ ก็ต่อเมื่อเสียงทั้ง 2 เสียงเกิดขึ้นในระยะเวลาที่ห่างกันตั้งแต่ 25 มิลลิวินาที (ms) ขึ้นไป

2.1.4 การดูดกลืนเสียง (Sound Absorption)

เมื่อคลื่นเสียงเดินทางไปที่ตกกระทบ ณ พื้นผิวใดๆ ค่าพลังงานของเสียงบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกับพื้นผิวนั้น และค่าพลังงานบางส่วนจะถูกส่งผ่านเข้าไปในพื้นผิวนั้น การส่งผ่านพลังงานของคลื่นเสียงเข้าไปในพื้นผิวของวัตถุใดๆที่เสียงตกกระทบนี้เรียกว่า การดูดกลืนเสียง (Sound Absorption) ปรากฏการณ์นี้ถือเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญเป็นอย่างมากในการแก้ไขปัญหาทางอะคูสติก หนึ่งในปัญหาทางอะคูสติกที่สำคัญที่สุดคือปัญหาเรื่องการสะท้อนกลับไปกลับมา (Reverberation) ซึ่งการจะแก้ไขปัญหาทางอะคูสติกปัญหานี้จะต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับเสียงได้ดี ปูลงบนพื้นผิวของอาณาบริเวณที่จะทำการแก้ไขปัญหา เพื่อให้วัสดุดูดซับพลังงานของเสียงลดการเกิดการสะท้อนของเสียง



รูปที่ 2.12 รูปจำลองการดูดซับเสียง

ที่มา : <http://www.technature.ca/acoustics-101/sound-absorption/>

วัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดกลืนเสียงไม่เท่ากัน ซึ่งหากต้องการที่จะดูความสามารถในการดูดซับเสียงของวัสดุแต่ละชนิด สามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง (Absorption Coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นค่าตัวเลขในช่วง 0-1 ที่จะบอกความสามารถในการดูดซับเสียงของวัสดุต่างๆ ตัวอย่างเช่น หากวัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์อยู่ที่ 0.55 ก็หมายถึงวัสดุนั้นๆ จะสามารถดูดซับพลังงานของเสียงที่มาตกกระทบบนพื้นผิวของวัสดุได้ 55% ส่วนค่าพลังงานที่เหลือจะถูกสะท้อนออกไป

วัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียงในงานด้านอะคูสติกจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียงไม่ต่ำกว่า 0.3 โดยทั่วไปวัสดุที่มีความสามารถในการดูดกลืนเสียงได้ดีจะเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่น (Density) น้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีรูพรุน (Porous Material) และนอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียงของวัสดุแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ด้วย กล่าวคือวัสดุชนิดหนึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่แตกต่างกันไปในแต่ละช่วงความถี่ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.13

Massive constructions and hard surfaces

| Material | Octave band frequency in Hz | | | | | | |
|--|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| Walls, hard surfaces average (brick walls, plaster, hard floors, etc.) | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.05 |
| Walls, rendered brickwork | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 |
| Rough concrete | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.07 |
| Smooth unpainted concrete | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.05 |
| Rough lime wash | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
| Smooth brickwork with flush pointing, painted | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Smooth brickwork, 10 mm deep pointing, pit sand mortar | 0.08 | 0.09 | 0.12 | 0.16 | 0.22 | 0.24 | 0.24 |
| Brick wall, stuccoed with a rough finish | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.07 |
| Ceramic tiles with a smooth surface | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Limestone walls | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| Reverberation chamber walls | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.04 |
| Concrete floor | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Marble floor | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

ที่มา : https://cds.cern.ch/record/1251519/files/978-3-540-48830-9_BookBackMatter.pdf

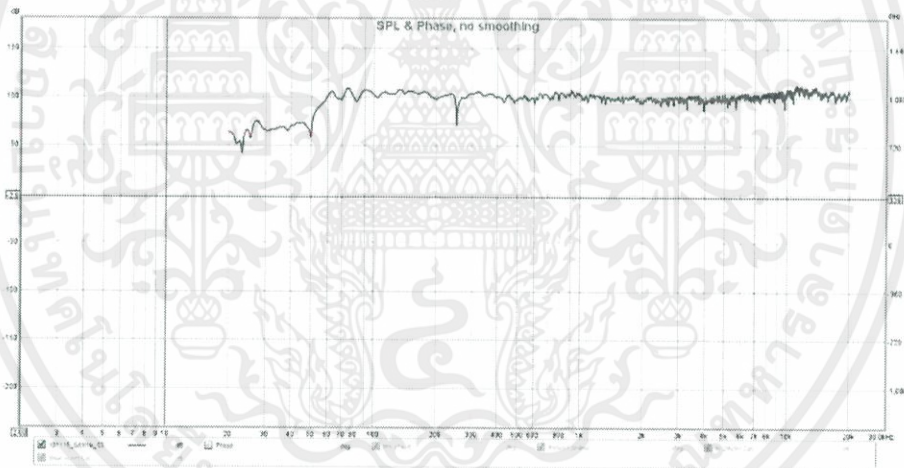
2.1.5 การสั่นพ้องของเสียง (Sound Resonance)

หากมองในระบบเชิงกลการสั่นพ้อง (Resonance) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อส่งแรงกระทำเข้าไปยังระบบใดๆด้วยความถี่ที่ใกล้เคียงหรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของระบบนั้นๆ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะส่งผลให้ระบบเกิดการสั่นด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) ที่สูงขึ้น

เมื่อมองในรูปแบบของเสียง การสั่นพ้องของเสียง (Sound Resonance) เกิดจากการที่เสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ทำให้อนุภาคของตัวกลางเกิดการสั่นด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของเสียง และถ้าความถี่ของเสียงมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติของอนุภาคของตัวกลาง ซึ่งส่งผลให้ความดังหรือแอมพลิจูดของเสียงมีค่าสูงขึ้น

2.2 ผลการตอบสนองต่อความถี่ (Frequency response)

ผลการตอบสนองต่อความถี่ หรือ Frequency response คือ ผลการตอบสนองของระบบ (System) ใดๆ เมื่อมีการป้อน (Input) สัญญาณความถี่เข้าไปในระบบ การแสดงผลการตอบสนองนี้มักจะแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟ ที่แกน X จะแสดงถึงค่าความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ (Hertz) และแกน Y จะแสดงถึงแอมพลิจูดของสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆซึ่งจะแสดงในหน่วยเดซิเบล (dB)



รูปที่ 2.14 รูปตัวอย่างกราฟผลตอบสนองต่อความถี่

ในระบบแต่ละรูปแบบจะมีผลการตอบสนองต่อความถี่ต่างๆที่แตกต่างกัน สามารถตรวจสอบว่าระบบนั้นๆมีการตอบสนองต่อความถี่ใดๆได้มากหรือน้อยโดยพิจารณาจากค่าแอมพลิจูดของความถี่หาแอมพลิจูดมีค่ามากก็หมายถึงระบบมีการตอบสนองได้ดี และหากแอมพลิจูดน้อยก็หมายความว่าระบบตอบสนองได้ไม่ค่อยดี

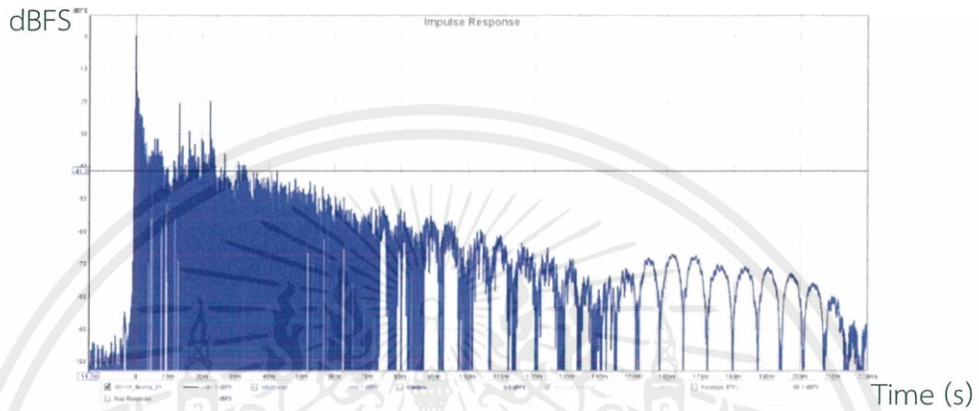
ในทางอะคูสติกผลการตอบสนองต่อความถี่เป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา ระบบในทางอะคูสติกก็คือ 'ห้อง' และสัญญาณความถี่ที่ป้อนเข้าระบบ (input) ก็คือ 'เสียง' ผลการตอบสนองต่อความถี่ในทางอะคูสติกเป็นผลที่เกิดจากคุณลักษณะต่างๆของห้องใดๆที่ทำการตรวจสอบ ห้องแต่ละห้องจะให้ผลการตอบสนองที่ต่างกัน โดยผลที่ต่างกันได้สามารถเกิดจากตัวแปรหลายอย่าง คือ ขนาดของห้อง รูปร่างของห้อง วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์ (Impulse response)

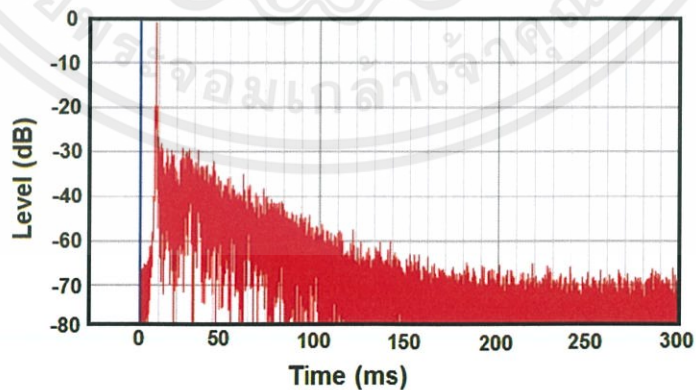
ผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์หรือ Impulse response คือผลการตอบสนองของระบบ (System) ใดๆ เมื่อมีการป้อน (Input) สัญญาณในลักษณะสัญญาณพัลส์ใดๆเข้าไปในระบบ การแสดงผลการตอบสนองนี้ มักจะแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟ ที่แกน X จะแสดงถึงหน่วยเวลาในหน่วยตามที่กำหนด และแกน Y จะแสดงถึงแอมพลิจูดของสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆซึ่งจะแสดงในหน่วยเดซิเบล (dB)



รูปที่ 2.15 รูปแสดงตัวอย่างกราฟผลตอบสนองต่ออิมพัลส์

ผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์นั้นมีความเกี่ยวข้องกับผลการตอบสนองต่อความถี่ (Frequency response) ผลการตอบสนองต่อความถี่คือการแสดงผลการตอบสนองของระบบในโดเมนความถี่ และผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์คือการแสดงผลการตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา ผลการตอบสนองทั้ง 2 รูปแบบนี้สามารถแปลงกลับไปกลับมาได้โดยใช้ การแปลงฟูเรีย (Fourier transform)

ในทางอะคูสติกผลการตอบสนองต่ออิมพัลส์สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดปัญหาบางประการได้โดยการนำกรอบของผลการตอบสนองมาใช้ ซึ่งถูกเรียกว่า Energy time curve



รูปที่ 2.16 รูปตัวอย่าง Energy time curve

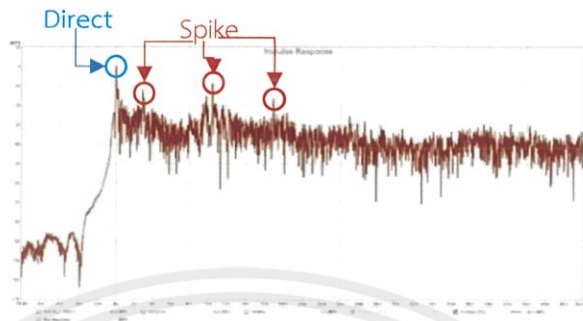
ที่มา : <http://lossenderosstudio.com/glossary.php?index=e>

Energy time curve คือกราฟที่แสดงถึงแอมพลิจูดของสัญญาณเมื่อเทียบกับเวลา สามารถ

ใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจวัดปัญหาเรื่องการสะท้อนของเสียงได้ โดยที่เวลา ณ จุดศูนย์ แอมพลิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ของสัญญาณจะสูงที่สุด แสดงถึง direct sound ที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดเสียงตรงเข้าสู่จุดรับเสียงโดยตรง ในทางทฤษฎีแล้วเมื่อเวลาผ่านไปแอมพลิจูดของสัญญาณจะค่อยๆลดลงตามเวลา แต่หากว่าเกิดการสะท้อนของเสียงขึ้นสะท้อนเสียงกลับเข้าสู่จุดรับเสียง ทำให้เกิด Spike ขึ้นใน Energy time curve



รูปที่ 2.17 รูปตัวอย่างการเกิด Spike ขึ้นบน Energy time curve

เมื่อนำเวลาของการเกิด Spike มาวิเคราะห์โดยอ้างอิงสมการอัตราเร็วเข้ากับความเร็วเสียง จะทำให้สามารถคาดการณ์หาจุดตกกระทบการสะท้อนของเสียงได้ เป็นข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาทางอะคูสติกต่อไป

2.4 ค่ามาตรฐานทางอะคูสติก

2.4.1 RT60 (Reverberation Time)

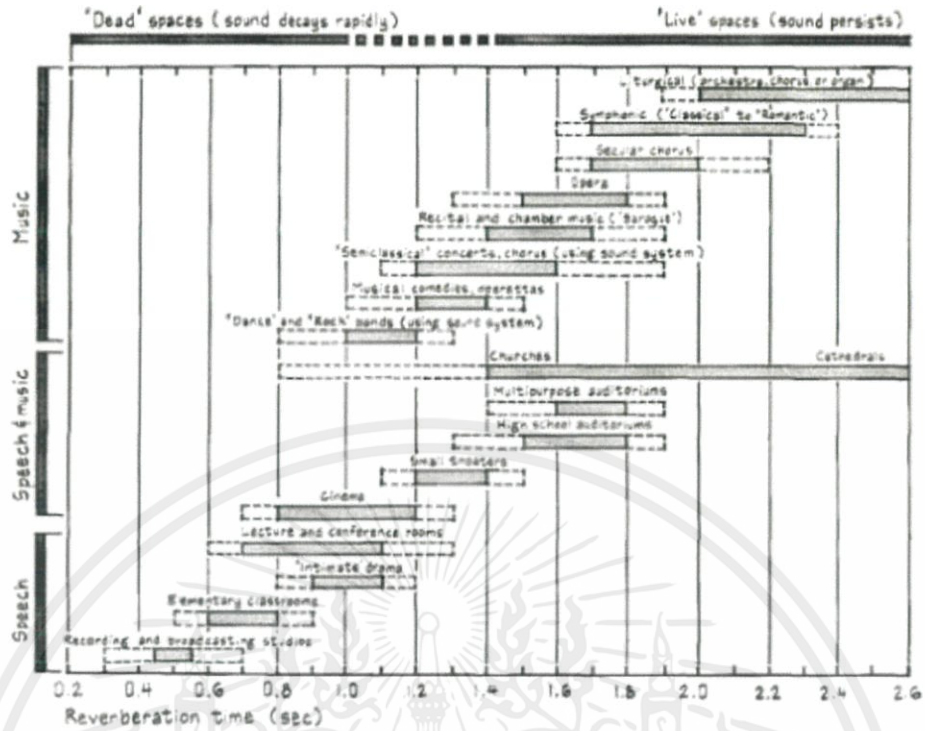
ระยะเวลาความก้องสะท้อน (Reverberation Time) นั้นคือเวลาที่เสียงก้องสะท้อนกลับไปกลับมาจนความดังค่อยๆลดลงจนกลืนไปกับ Noise Floor ส่วนค่า RT60 นั้นคือระยะเวลาเวลาที่ Reverberation Time ลดระดับความดังไป 60 dB เมื่อต้นกำเนิดเสียงหยุดแล้ว โดยอัตราที่เสียงจะลดลงไปนั้นจะขึ้นอยู่กับทั้งขนาดของห้อง การดูดซับเสียงของวัสดุภายในห้อง และความถี่เสียง หน่วยของ RT60 นั้นจะเป็นวินาที

ค่า RT60 นั้นต้องมีระดับที่พอดี ถ้าน้อยไปจะทำให้เสียงแห้ง ไม่มีชีวิตชีวา แต่ถ้ามากไปอาจจะทำให้พูดคุยไม่รู้เรื่อง

| Environment | RT60 (s) | Volume (m ³) |
|------------------------------|------------|--------------------------|
| Open air | very short | - |
| Average sitting room | 0.5 | 12 - 20 |
| Drama studio - dead end | 0.15 - 0.2 | - |
| Pop music studio | 0.3 | - |
| Radio talks studio | 0.3 - 0.5 | 30 - 200 |
| Radio general purpose studio | 0.6 - 0.85 | 250 - 800 |
| Television studio | 0.6 - 1.2 | 3,000 - 15,000 |
| Drama studio - live end | 1.2 - 1.5 | - |
| Music studio | 0.8 - 1.6 | 700 - 8,000 |
| Theatre | 1.0 | - |
| Concert hall | 1.5 - 2.0 | - |

รูปที่ 2.18 ตารางค่ามาตรฐาน RT60 ของห้องแบบต่างๆ

ที่มา : <http://www.acoustect.com/acoustics-design.html>



รูปที่ 2.19 รูปแสดงค่ามาตรฐาน RT60

ที่มา : <http://www.acoustect.com/acoustics-design.html>

โดย RT60 นั้นมีสมการการคำนวณคือ

$$RT = 0.161 \frac{V}{S\alpha}$$

V คือ ปริมาตรของห้อง (ความกว้าง x ความยาว x ความสูง) (m^3)

S คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุ (Sabins)

2.4.2 STI (Speech Transmission Index)

ดัชนีการส่งผ่านเสียงพูด เป็นการวัดคุณภาพการได้ยินเสียงพูดที่มีความชัดเจนและเข้าใจความหมายได้มากเท่าใด ค่า STI นั้นมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดย 1 นั้นเป็นค่าสูงสุดและเป็นค่าในอุดมคติ



รูปที่ 2.20 แสดงค่ามาตรฐาน STI

ที่มา : <http://www.sengpielaudio.com/calculator-ALcons-STI.htm>

| Intelligibility rating | Sentence score % | Meaningful PB-word ¹ score % | CVC _{EQB} -nonsense word score % | STI |
|------------------------|------------------|---|---|-------------|
| Excellent | 100 | > 98 | > 81 | > 0,75 |
| Good | 100 | 93 – 98 | 70 – 81 | 0,60 - 0,75 |
| Fair | 100 | 80 – 93 | 53 – 70 | 0,45 - 0,60 |
| Poor | 70 – 100 | 60 – 80 | 31 – 53 | 0,30 - 0,45 |
| Bad | < 70 | < 60 | < 31 | < 0,30 |

รูปที่ 2.21 แสดงค่ามาตรฐาน STI

ที่มา : <https://www.embeddedacoustics.com/index.php/speech-transmission-index>

2.4.3 SPL (Sound Pressure Level)

ค่าที่ใช้วัดระดับความดังของเสียง โดยมีหน่วยเป็น decibels (dB) โดยมีสมการการคำนวณคือ

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

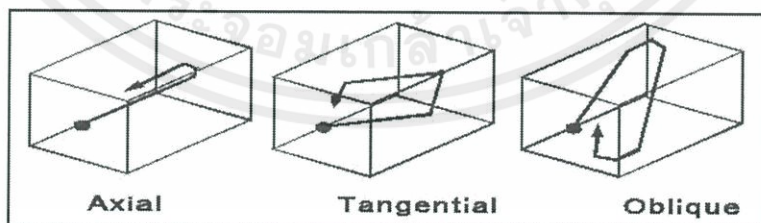
SPL คือ ระดับความดังของเสียง

P คือ ความดันเสียง [N/m^2]

P_0 คือ ความดันเสียงที่มนุษย์เริ่มได้ยิน [$0.00002 N/m^2$]

2.5 รัมโหมด (Room mode)

คือ ชุดของเสียงสะท้อนที่เกิดขึ้นภายในห้อง เมื่อห้องนั้นมีการใช้แหล่งกำเนิดเสียง เช่น ลำโพง และเสียงเกิดการสะท้อนกับพื้นที่ผิวส่วนต่างๆของห้อง โดย mode ของห้องจะแบ่งได้เป็น 3 mode คือ axial, tangential, และ oblique



รูปที่ 2.22 รูปแสดงรูปแบบของRoom mode

ที่มา : <https://www.gikacoustics.com/what-are-room-modes/>

โดยความถี่เสียงที่จะมีผลกระทบนั้นขึ้นอยู่กับความยาว กว้าง และสูงของห้อง ซึ่ง Axial จะมีผลมากที่สุด และมีโอกาสเกิดมากที่สุด Tangential และ Oblique มีผลน้อยกว่า แต่ก็มีโอกาสเกิดเช่นกัน

Room mode มีผลกับ frequency response ทั้งแบบสูงขึ้น (boost) และต่ำลง (cut) เมื่อคลื่น 2 คลื่นเกิดการชนกันแบบ in phase ที่ความถี่เดียวกัน จะเกิดการรวมกันหรือ boost frequency response ทำให้มนุษย์ได้ยินเสียงในความถี่นั้นดังขึ้น แต่ถ้าคลื่น 2 คลื่นชนกันแบบ out of phase ที่ความถี่เดียวกันจะเกิดการหักล้างกันหรือ cut frequency response ซึ่งจะทำให้มนุษย์ได้ยินเสียงความถี่นั้นเบาลง

การแก้ปัญหาเรื่อง mode นั้นสามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งวัสดุดูดซับเสียงเพื่อลดการสะท้อนของเสียงไม่ให้เกิดการรวมกันหรือหักล้างกัน

โดย Room mode นั้นมีสมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$f = \left(\frac{c}{2}\right) \sqrt{\left[\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2\right]}$$

f คือ ความถี่เสียง

c คือ ความเร็วเสียง คือ 343 m/s

L คือ ความยาวของห้อง

W คือ ความกว้างของห้อง

H คือ ความสูงของห้อง

p, q, r คือ mode ของห้อง

หรือ

$$f_n = \frac{nc}{2L}$$

f คือ ความถี่ที่เกิด Room mode

n คือ อันดับของ Room mode

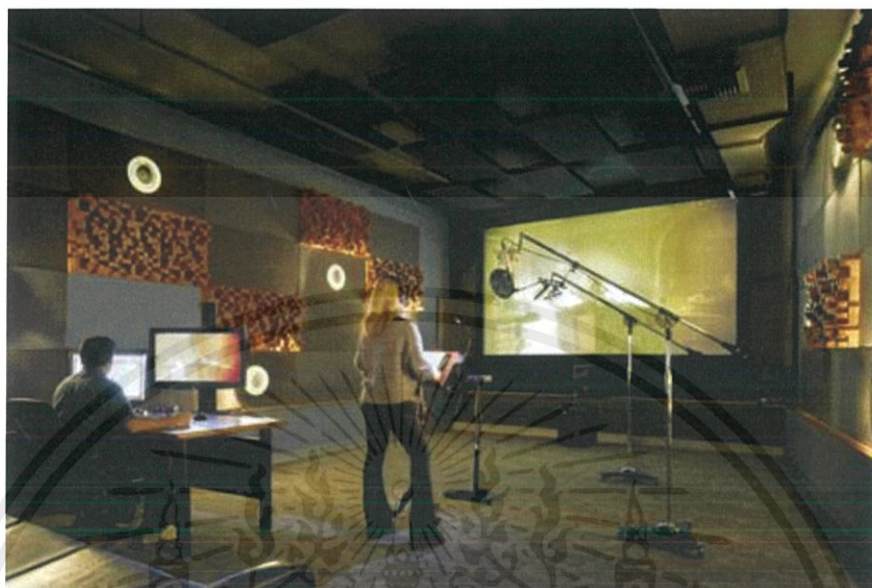
c คือ ความเร็วเสียง คือ 343 m/s

L คือ ระยะห่างระหว่างผนังที่ขนานกัน (ความกว้าง/ความยาว/ความสูง ของห้อง)

2.6 การทำ ADR (Automate dialog replacement)

การทำ ADR คือการบันทึกเสียงพากย์ของตัวละครในภาพยนตร์ โดยทำการบันทึกเสียงพื้นที่ที่ควบคุมสภาวะทางอะคูสติกเอาไว้ การทำ ADR เป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญในการทำเสียงให้แก่ภาพยนตร์ หรือที่เรียกกันว่า Audio post production โดยทั่วไปแล้วเสียงพูดของตัวละครที่บันทึกมาในขั้นตอนการถ่ายทำภาพยนตร์นั้น จะไม่สามารถนำมาใช้ในขั้นตอนการทำ post production ได้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางเสียงของพื้นที่ถ่ายทำไม่ได้มีการควบคุม ซึ่งอาจส่งผลให้เสียงพูดของตัวละครฟังไม่ชัด หรือมีเสียงรบกวนแทรกมากับเสียงที่บันทึกมามากเกินไป ภาพยนตร์ฮอลลีวูดเกือบทุก

เรื่องได้ทำ ADR เสียงพูดของตัวละครในภาพยนตร์ โดยในภาพยนตร์แต่ละเรื่องจะมีการทำ ADR ตั้งแต่ 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของเสียงพูดในภาพยนตร์ทั้งหมด



ภาพที่ 2.23 ภาพตัวอย่างการบันทึกเสียง ADR

ที่มา : <https://www.premiumbeat.com/blog/adr-automated-dialogue-replacement-tips-and-tricks/>
จุดมุ่งหมายหลักของการทำ ADR ก็เพื่อบันทึกเสียงพากย์ออกมาให้สะอาดที่สุด เพื่อที่หลังจากนี้ ในขั้นตอนการตัดแต่งเสียงจะสามารถนำเสียงที่บันทึกมาไปตัดแต่งให้เข้ากับเสียงอื่นๆ ที่ถูกทำขึ้นใหม่ในขั้นตอนการทำ post production ได้โดยง่าย

2.6.1 เทคนิคการทำ ADR

โดยทั่วไปแล้วจะมี 2 วิธี คือ การทำ Visual looping และการทำ Audio looping

2.6.1.1 Visual looping

การทำ Visual looping เป็นวิธีการทำ ADR ที่จะให้นักแสดงฟังเสียงที่ถูกบันทึกมาจากขั้นตอนการถ่ายทำเป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้นักแสดงเข้าถึงอารมณ์การแสดงที่เคยแสดงเอาไว้เมื่อตอนถ่ายทำ ก่อนที่จะเริ่มทำการบันทึกเสียง เมื่อทำการบันทึกเสียงเสียงที่ถูกบันทึกไว้จากการถ่ายทำจะถูกปิด นักแสดงจะดูเพียงภาพเพื่อทำการพากย์ให้เสียงตรงกับกรขยับของปากในภาพเท่านั้นเท่านั้น และสิ่งที่นักแสดงจะได้ยินผ่านทางหูฟังก็จะมีเพียงเสียงพากย์ที่ทำการพากย์อยู่ในขณะนั้นเท่านั้น

2.6.1.2 Audio looping

การทำ Audio looping เป็นวิธีการทำ ADR ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีแรก แต่สามารถทำได้ยากกว่า ต้องใช้ความชำนาญมากกว่า และมักจะต้องใช้เวลาในการทำงานมากกว่า

วิธีการจะเป็นไปในรูปแบบเดียวกับวิธี Visual looping เพียงแต่เสียงที่ทำการบันทึกมาจากการถ่ายทำจะถูกเปิดให้นักแสดงฟังไปด้วยในขณะที่ทำการพากษ์

วิศวกรเสียงที่เป็นผู้ทำการบันทึกเสียง ADR ที่มีชื่อเสียงหลายคนมักจะใช้ 2 วิธีนี้ผสมกันเมื่อทำการบันทึกเสียง และนอกจากนี้วิศวกรแต่ละคนยังมีเทคนิคแยกย่อยเฉพาะตัวของแต่ละคนที่ใช้ในการบันทึกเสียงอีกด้วย



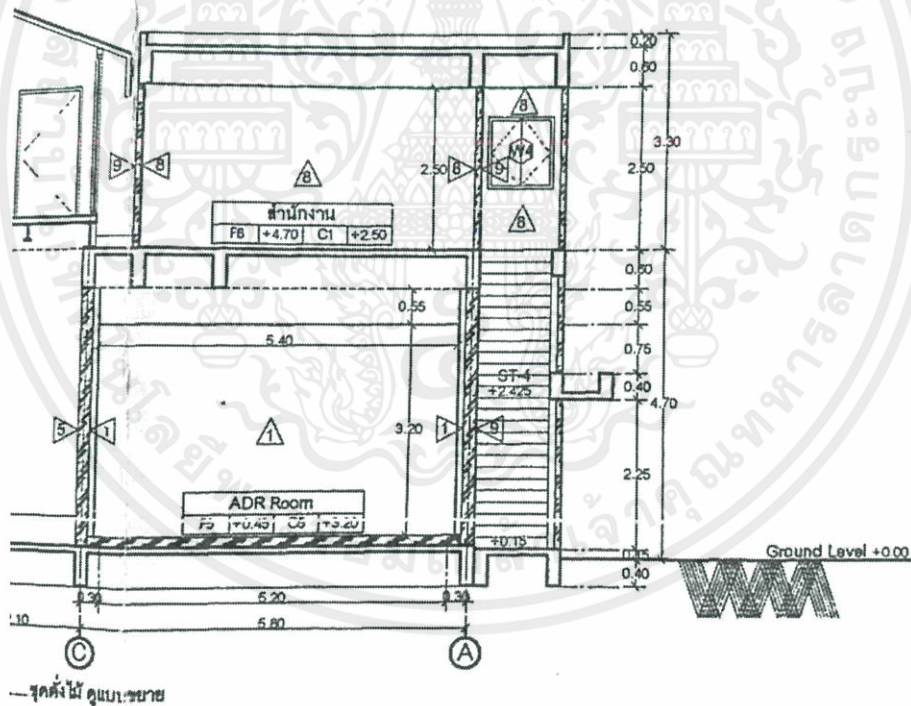
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

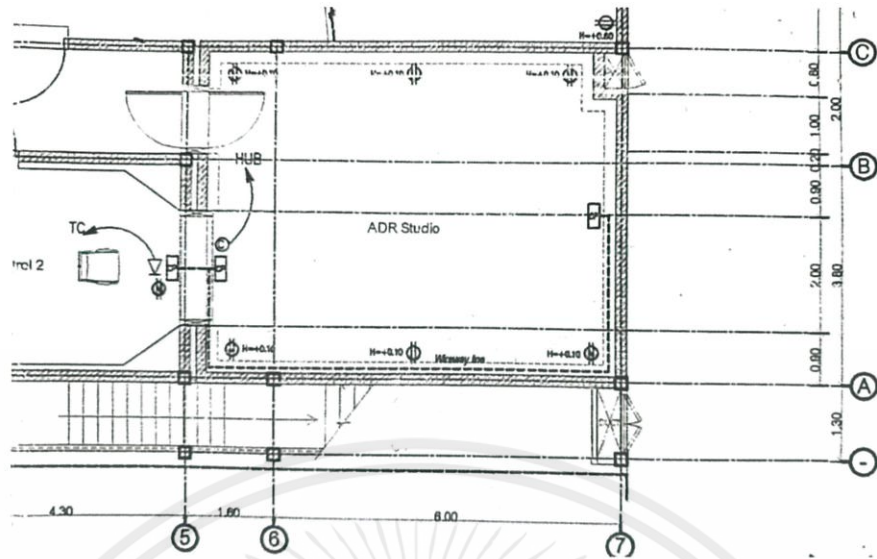
ในบทนี้รายละเอียด ขั้นตอนการดำเนินงาน ณ บริษัท กันตนา ซาวด์ สตูดิโอ

3.1 รวบรวมข้อมูลปัญหาของห้อง ADR Recording 1

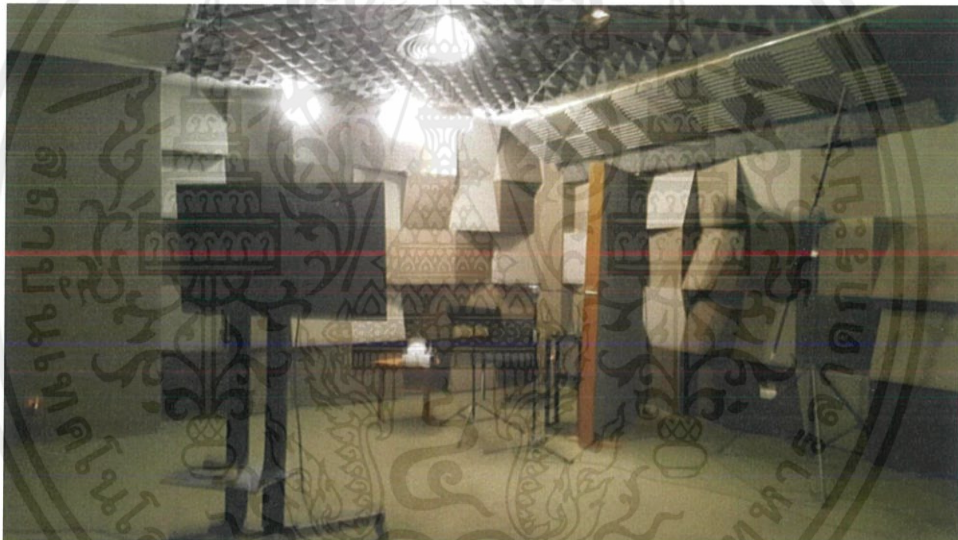
ห้อง ณ ปัจจุบันเป็นห้องที่ได้ทำการเสริมวัสดุทางอะคูสติกเอาไว้แล้วเพื่อใช้ในงานด้านการบินที่เสียง แต่เมื่อทำการบันทึกเสียงที่ตำแหน่งที่แตกต่างกันภายในห้อง เสียงที่ทำการบันทึกได้จะมีความแตกต่างกัน ณ ปัจจุบันเจ้าหน้าที่ภายในบริษัทได้ใช้วิธีการบันทึกเสียงที่ตำแหน่งต่างๆภายในห้อง แล้วทดลองฟังเพื่อตรวจสอบว่าตำแหน่งใดที่เหมาะสมแก่การบินที่เสียงมากที่สุด และ ณ จุดที่เลือกใช้ก็มีปัญหาทางอะคูสติกให้เห็นอยู่ ทางบริษัทจึงได้ทำการแก้ไขในระดับหนึ่งโดยการตั้ง Acoustic board ไว้ด้านข้างจุดที่นักพากย์ใช้บันทึกเสียง, ติดตั้ง Absorber และ Bass trap ไว้มุมเพดานด้านหลังของนักพากย์ ติด Absorber บนผ้าเพดาน แต่หลังจากการแก้ไขก็ยังคงมีปัญหาอยู่ประปราย ซึ่งทางบริษัทต้องการให้วินิจฉัยปัญหาของห้องและเสนอแนวทางการแก้ไข เบื้องต้นจึงได้ทำการขอแผนผังแบบห้องจากเจ้าหน้าที่ไว้



รูปที่ 3.1 แผนผังห้อง ADR 1 (Side view)



รูปที่ 3.2 แผนผังห้อง ADR 1 (Top view)



รูปที่ 3.3 ภายในห้อง ADR 1

3.2 ศึกษาลักษณะของห้อง ADR Recording

ADR (Automated Dialogue Replacement) นั้นหมายถึงการพากย์เสียงสนทนาทับตัวละครในภาพยนตร์ ซึ่งจะมีทั้งการที่นักแสดงคนเดิมที่แสดงในภาพยนตร์มาพากย์เสียงทับเสียงเดิมของตัวเองเพื่อให้เสียงพูดมีความชัดเจนมากขึ้น หรือเพื่อเปลี่ยนบทสนทนาเดิม และอีกแบบคือการพากย์เสียงสำหรับภาษาที่สอง ซึ่งคนพากย์จะเป็นคนละคนกับนักแสดงเดิม

ลักษณะของห้อง ADR Recording ต้องไม่ dead หรือ air จนเกินไป ต้องมีความพอดี มีความเป็นธรรมชาติของเสียงพูดสูง ไม่เกิดการ delay ของเสียง



รูปที่ 3.4 ห้อง ADR Recording ณ บริษัท Fox Studios

ที่มา : https://foxstudios-cms.foxfilm.com/post_production_sound_services/adr.html

3.3 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางอะคูสติก

ในการออกแบบระบบอะคูสติกต้องคำนึงถึงคุณภาพของเสียงเป็นหลัก ซึ่งในทางอะคูสติกจะมีค่ามาตรฐานต่างๆที่ต้องศึกษา ได้แก่ NC (Noise Criteria), RT60 (Reverberation time 60), SPL (Sound pressure level), ETC (Energy time curve), Room mode นอกจากนี้ก็ต้องศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับเสียงและการได้ยินของมนุษย์

3.4 คำนวณ Room mode

ก่อนที่จะทำการตรวจวัดอะคูสติกของห้อง ควรคำนวณ Room mode ของห้องก่อน ซึ่งเป็น การตรวจสอบปัญหาเบื้องต้น โดย Room mode นั้นเป็น Standing wave ชนิดหนึ่ง ที่ทำให้เกิด ปัญหาเกี่ยวกับเสียงในย่านความถี่ต่ำซึ่งเกิดการสะท้อนไปมาภายในห้องสี่เหลี่ยมที่ด้านขนานกัน ซึ่งจะทำให้มีบางจุดเสียงเกิดการหักล้างหรือเสริมกันได้ ทำให้ผู้ฟังจะได้ยินว่าในบางจุดเสียงต่ำจะเบาไปบ้าง หรือเสียงต่ำมีมากในบริเวณมุมห้อง

โดย Room mode นั้นมีสมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$f_n = \frac{nC}{2L}$$

f_n คือ ความถี่ที่เกิด Room mode

n คือ อันดับของ Room mode

C คือ ความเร็วเสียง คือ 343 m/s

L คือ ระยะห่างระหว่างผนังที่ขนานกัน (ความกว้าง/ความยาว/ความสูง ของห้อง)

เมื่อคำนวณแล้วจะได้ค่าออกมาดังนี้

3.4.1 ด้านยาว 5 เมตร

$$1^{\text{st}} \text{ mode ; } f_{100} = 34.3 \text{ Hz}$$

$$2^{\text{nd}} \text{ mode ; } f_{200} = 68.6 \text{ Hz}$$

$$3^{\text{rd}} \text{ mode ; } f_{300} = 102.9 \text{ Hz}$$

$$4^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{400} = 137.2 \text{ Hz}$$

$$5^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{500} = 171.5 \text{ Hz}$$

$$6^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{600} = 205.8 \text{ Hz}$$

3.4.2 ด้านกว้าง 6.30 เมตร

$$1^{\text{st}} \text{ mode ; } f_{010} = 27.22 \text{ Hz}$$

$$2^{\text{nd}} \text{ mode ; } f_{020} = 54.44 \text{ Hz}$$

$$3^{\text{rd}} \text{ mode ; } f_{030} = 81.67 \text{ Hz}$$

$$4^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{040} = 108.89 \text{ Hz}$$

$$5^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{050} = 136.11 \text{ Hz}$$

$$6^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{060} = 163.33 \text{ Hz}$$

3.4.3 ด้านสูง 3.20 เมตร

$$1^{\text{st}} \text{ mode ; } f_{001} = 53.59 \text{ Hz}$$

$$2^{\text{nd}} \text{ mode ; } f_{002} = 107.19 \text{ Hz}$$

$$3^{\text{rd}} \text{ mode ; } f_{003} = 160.78 \text{ Hz}$$

$$4^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{004} = 214.37 \text{ Hz}$$

$$5^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{005} = 267.97 \text{ Hz}$$

$$6^{\text{th}} \text{ mode ; } f_{006} = 321.56 \text{ Hz}$$

จะเห็นได้ว่ามีความถี่ที่มีความใกล้เคียงกัน 4 คู่ คือ

$$54.44 \text{ Hz และ } 53.59 \text{ Hz}$$

$$108.89 \text{ Hz และ } 107.19 \text{ Hz}$$

$$137.2 \text{ Hz และ } 136.11 \text{ Hz}$$

$$163.33 \text{ Hz และ } 160.78 \text{ Hz}$$

เมื่อหาค่าเฉลี่ยออกมาจะได้เป็น

$$54.015 \text{ Hz , } 108.04 \text{ Hz , } 136.655 \text{ Hz , } 162.055 \text{ Hz}$$

ปัดค่าให้เป็นเลขจำนวนเต็มจะได้เป็น

$$54 \text{ Hz , } 108 \text{ Hz , } 137 \text{ Hz , } 162 \text{ Hz}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาความยาวคลื่น จากสมการ

$$v = f\lambda$$

v คือ ความเร็วเสียง คือ 343 m/s

f คือ ความถี่ (Hz)

λ คือ ความยาวคลื่น

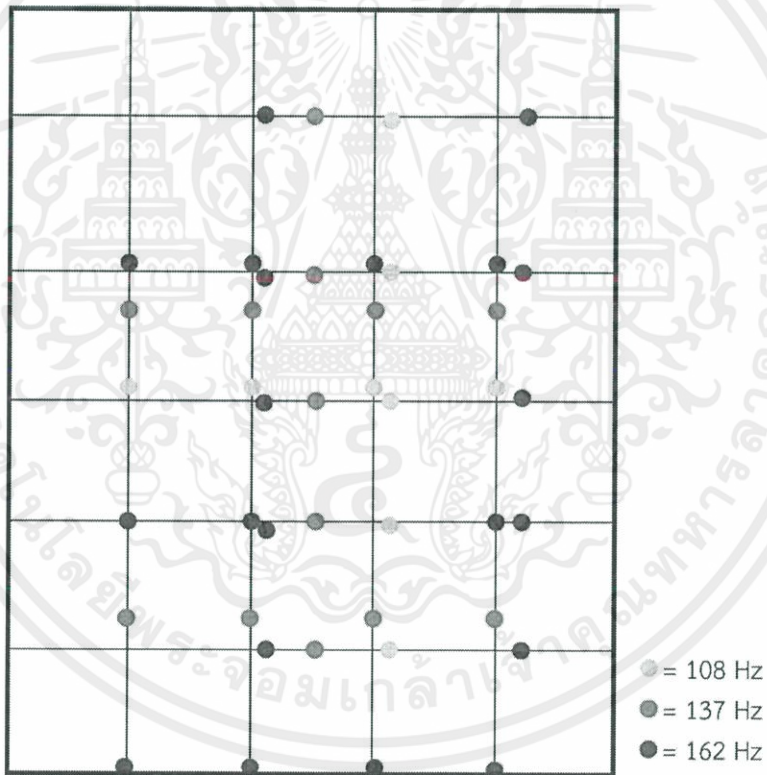
54 Hz ; $\lambda = 6.35$ m

108 Hz ; $\lambda = 3.18$ m

137 Hz ; $\lambda = 2.5$ m

162 Hz ; $\lambda = 2.11$ m

เมื่อนำมาพล็อตรูปห้องจะเป็นดังภาพ ซึ่งจะเห็นว่ามียางจุดที่ความถี่เกิดการชนกันซึ่งจะทำให้เกิดปัญหา



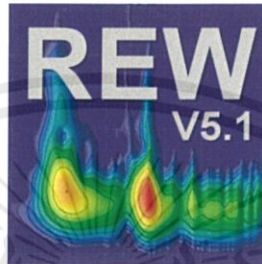
รูปที่ 3.5 รูปแสดงตำแหน่งลูกคลื่นที่อาจเกิดปัญหา Room mode ของห้อง ADR 1

ซึ่งความถี่ที่จะเกิด Room mode นั้นต่ำกว่าเสียงของมนุษย์ จึงไม่นับว่าเป็นปัญหาภายในห้องนี้

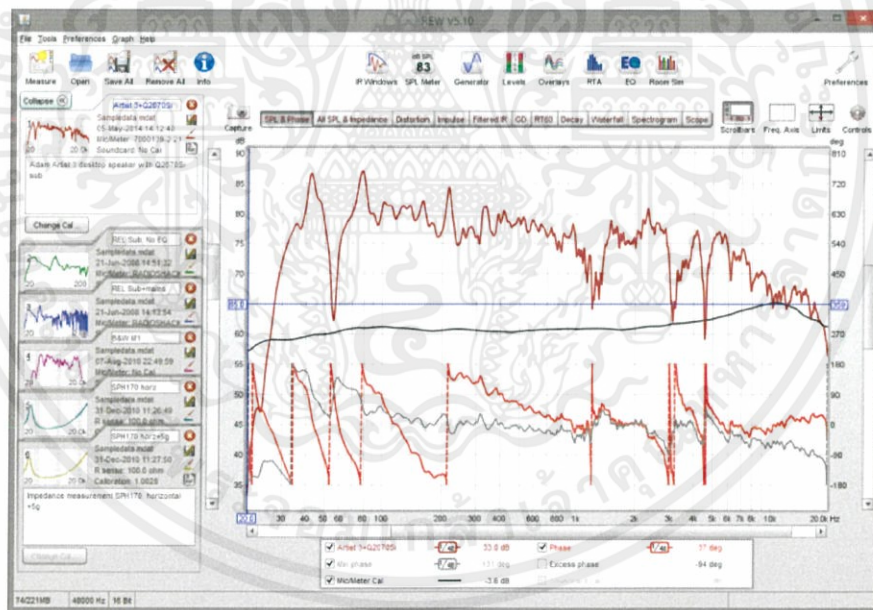
3.5 ศึกษาโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง

3.5.1 โปรแกรม Room EQ Wizard

โปรแกรมนี้สามารถปล่อยสัญญาณเสียงแล้วบันทึกเสียงกลับมาในตัวโปรแกรมเพื่อตรวจวัดลักษณะทางอะคูสติกของห้อง ชุดข้อมูลที่ได้จะออกมาในรูปแบบกราฟ ซึ่งค่าที่สามารถวิเคราะห์ได้ เช่น Sound Pressure Level และ Reverberation Time 60



รูปที่ 3.6 รูปแสดงไอคอนโปรแกรม Room EQ Wizard



รูปที่ 3.7 รูปแสดง Interface ของโปรแกรม Room EQ Wizard

ที่มา : <https://www.roomeqwizard.com/features.html>

3.5.2 โปรแกรม Pro Tools

เป็นโปรแกรม DAW (Digital Audio Workstation) ซึ่งสามารถตัดต่อเสียงได้หลากหลายและสามารถสังเคราะห์ความถี่เสียงและอัดเสียงได้



รูปที่ 3.8 รูปไอคอนโปรแกรม Pro Tools

ที่มา : <https://www.deviantart.com/x-x-l/art/Avid-Pro-Tools-Icon-Replacement-OS-X-Yosemite-473968515>



รูปที่ 3.9 รูป Interface ของโปรแกรม Pro Tools

ที่มา : <https://www.avid.com/pro-tools-first>

3.6 เตรียมอุปกรณ์

3.6.1 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Asus GL552VW ที่ทำการติดตั้งโปรแกรม โปรแกรม Room EQ Wizard – ใช้สำหรับสร้างสัญญาณเสียงเพื่อใช้ตรวจวัดห้อง



รูปที่ 3.10 รูปคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Asus GL552VW


ที่มา : <https://www.asus.com/us/ROG-Republic-Of-Gamers/ROG-GL552VW/>

3.6.2 Interface Steinberg UR22 – เป็นอุปกรณ์เพื่อใช้เชื่อมต่อระหว่างลำโพง ไมโครโฟน และคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.11 รูป Interface Steinberg UR22

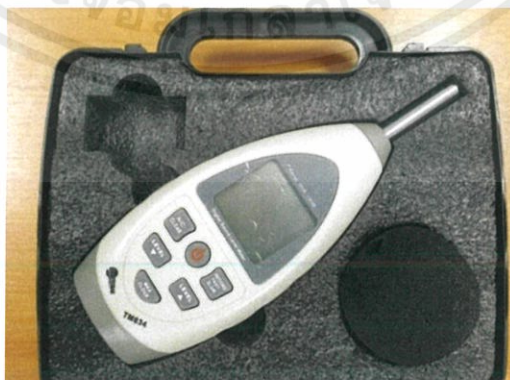
ที่มา : https://www.thomann.de/gb/steinberg_ur22_mk2.htm

| | |
|---|--|
| MIC INPUT 1/2 (Balanced) | |
| Maximum Input Level | ±0 dBu |
| Input Impedance | 4 kΩ |
| GAIN Range | +10 dB to +54 dB |
| LINE INPUT 1/2 (Balanced) | |
| Maximum Input Level | +24 dBu |
| Input Impedance | 20 kΩ |
| GAIN Range | -14 dB to +30 dB |
| HI-Z INPUT 2 (Unbalanced) | |
| Maximum Input Level | +5.8 dBV |
| Input Impedance | 1 MΩ |
| GAIN Range | +0.8 dB to +44.8 dB |
| LINE OUTPUT 1/L 2/R (Impedance balanced) | |
| Maximum Output Level | +10dBu |
| Output Impedance | 150 Ω |
| PHONES | |
| Maximum Output Level | 6 mW+6 mW, 40 Ω |
| USB | |
| Specification | USB2.0, 24 bit, 44.1 kHz/48 kHz/88.2 kHz/96 kHz/176.4 kHz/192 kHz |
| XLR INPUT | |
| Polarity |  Pin 1: Ground Pin 2: Hot (+) Pin 3: Cold (-) |

รูปที่ 3.12 คุณสมบัติทางเทคนิคของ Interface Steinberg UR22

ที่มา : https://www.steinberg.net/en/products/audio_interfaces/ur_series/specs_downloads.html

3.6.3 SPL Meter Tecman TM384 – ใช้วัด Sound Pressure Level ภายในห้อง และเพื่อใช้ในการปรับอุปกรณ์



รูปที่ 3.13 รูป SPL Meter Tecman TM384

SPECIFICATIONS:

PACKING INFORMATION

Basic Parameters

Model TM824 **TM834**

30 ~ 130dBA 30 ~ 130dBA

Measuring Range

35 ~ 130dBC 35 ~ 130dBC

Accuracy $\pm 1.5\text{dB}$ $\pm 1.5\text{dB}$

Frequency Range 31.5HZ ~ 8.5KHZ 31.5HZ ~ 8.5KHZ

Linearity Range 50dB 50dB

AC/DC Output \checkmark \checkmark

Digi&Resolution 5 Digit & 0.1dB 5 Digit & 0.1dB

Time Weighting Fast/Slow Fast/Slow

Microphone 1/2 Inch Electret Condenser Microphone

Special Function

Frequency Weighting A & C A & C

Level Selection \checkmark \checkmark

Fast:2times/sec Fast:2 times/sec

Sampling Frequency . . .

Slow:1 time/sec Slow:1 time/sec

USB Interface — \checkmark

Real-Time Online — \checkmark

Max Hold Function \checkmark \checkmark

Store — 43690 Stock

Real-Time Recording — \checkmark

Calendar — \checkmark

Power AA4 battery (Alkaline or DC Adapter)

LCD Size 48.3mmX30mm

Product Color White+Green(**TM834** White+Grey)

รูปที่ 3.14 รูปแสดงคุณสมบัติทางเทคนิคของ SPL Meter Tecman TM834

ที่มา : https://www.steinberg.net/en/products/audio_interfaces/ur_series/specs_downloads.html

3.6.4 ลำโพง YAMAHA DXR15 – ใช้สำหรับปล่อยสัญญาณเสียง



รูปที่ 3.15 ลำโพง YAMAHA DXR15

ที่มา : <https://usa.yamaha.com/products/proaudio/speakers/dxr/index.html>

| General specifications | | DXR15 |
|------------------------------------|-------|--|
| Speaker type | | 15" 2-way Bi-amp powered speaker, Bass-reflex type |
| Frequency range | -10dB | 49Hz - 20kHz |
| Nominal coverage | H | 90° |
| | V | 60° |
| Components | LF | Diameter 15" cone, Voice Coil 2.5", Magnet Ferrite |
| | HF | Diaphragm 1.4", Type 1" Throat compression driver, Magnet Ferrite |
| Crossover | | FIR-X tuning™ (linear phase FIR filter) |
| Output power | | Dynamic: 1100W (LF: 950W HF: 150W) / Continuous: 700W (LF: 600W HF: 100W) |
| Maximum output level (1m, on axis) | | 133dB SPL |
| I/O connectors | | INPUT: XLR 3-31 x1, INPUT2: Phone x2, INPUT3: RCA PIN x2, THRU: XLR3-32 x1 (Parallel with INPUT 1), LINK OUT: XLR x1 |
| Processors | | D-CONTOUR, FOH/MAIN, MONITOR, OFF |
| Power requirements | | 100V - 240V, 50Hz/60Hz |
| Power consumption | | 110W |
| Flying and mounting hardware | | Top: x2, Rear: x1 (Fits for M10 x 18mm eyebolts) |
| Pole socket | | 35mm with 2-way features (0 or 7 degrees) |
| Dimensions | W | 445mm (17 4/8") |
| | H | 700mm (27 4/8") |
| | D | 380mm (15") |
| Net weight | | 22.5kg (49.6lbs) |
| Accessories | | UB-DXR15 (U-barcket) |
| Others | | Material: ABS (Matte Finish, Black) |

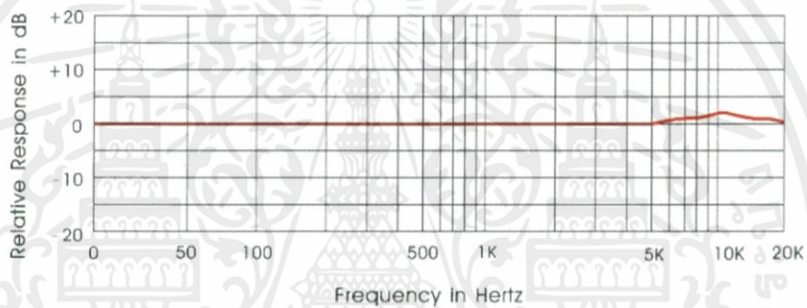
รูปที่ 3.16 รูปแสดงคุณสมบัติทางเทคนิคของลำโพง YAMAHA รุ่น DXR15

ที่มา : <http://www.yamahaproaudio.com/global/en/products/speakers/dxr/specifications.jsp>

3.6.5 ไมโครโฟน dbx RTA-M (Real Time Analyzer) – ใช้สำหรับรับสัญญาณเสียง



รูปที่ 3.17 ไมโครโฟน dbx RTA-M



รูปที่ 3.18 กราฟ Frequency response ของไมโครโฟน dbx RTA-M

ที่มา : <https://dbxpro.com/en-US/products/rta-m>

3.6.6 สาย XLR - ใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างไมโครโฟน dbx RTA-M กับ Interface Steinberg UR22



รูปที่ 3.19 รูปสาย XLR

ที่มา : <https://www.amazon.com/CBI-Cables-Female-Microphone-Cable/dp/B000VJJQUU>

3.6.7 สาย TRS – ใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างลำโพง YAMAHA DXR15 กับ Interface Steinberg UR22



รูปที่ 3.20 รูปสายTRS

ที่มา : <http://whirlwindusa.com/catalog/pre-wired-cables/trs-stereo/trs-cables>

3.6.8 ขาตั้งไมโครโฟน Understand Music MS108BK



รูปที่ 3.21 รูปขาตั้งไมโครโฟน Understand Music MS108BK

ที่มา : <https://www.lelong.com.my/understand-music-ms108bk-mic-stand-floor-adjustable-boom-stand-starspicer-l1663421-2007-01-Sale-l.htm>

3.6.9 เลเซอร์วัดระยะ Fluke 424D



รูปที่ 3.22 รูปเลเซอร์วัดระยะ Fluke 424D

ที่มา : <https://www.fluke.com/th-th/product/building-infrastructure/laser-distance-meters/fluke-424d>

| | 414D | 415D | 424D |
|--|---|--|--|
| การวัดระยะทาง | | | |
| เกกเซ็งวัดด้วยองการวัดทั่วไป[1] | ± 2.0 มม. [3] | ± 1.0 มม. [3] | |
| เกกเซ็งวัดด้วยองการวัดสูงจุด[2] | ± 3.0 มม. [3] | ± 2.0 มม. [3] | |
| ช่วงที่วัดได้เป็รแบบ Laser QZM28 | 50 ม. / 155 ฟุต | 80 ม. / 250 ฟุต | 100 ม. / 330 ฟุต |
| ช่วงทั่วไป[1] | 40 ม. / 130 ฟุต | 80 ม. / 250 ฟุต | 80 ม. / 250 ฟุต |
| ช่วงในสภาวะที่ไม่ดีส่วนมาก[4] | 35 ม. / 115 ฟุต | 60 ม. / 195 ฟุต | 60 ม. / 195 ฟุต |
| หน้บเลเซอร์ที่แสดง | 1 มม. / 1/16 นิ้ว | 6 /30 / 60 มม. (10 / 50 / 100 ม.) | 6 /30 / 60 มม. (10 / 50 / 100 ม.) |
| จุดเลเซอร์ที่ระยะทาง | 6 /30 / 60 มม. (10 / 50 / 100 ม.) | 6 /30 / 60 มม. (10 / 50 / 100 ม.) | |
| การวัดมุม | | | |
| เกกเซ็งความคลาดเคลื่อนขององการวัดกับส่วนองเลเซอร์[5] | ไม่มี | ไม่มี | ± 0.2° |
| เกกเซ็งความคลาดเคลื่อนขององการวัดกับส่วนองเครื่อง[6] | ไม่มี | ไม่มี | ± 0.2° |
| ช่วง | ไม่มี | ไม่มี | 360° |
| ทั่วไป | | | |
| ระดับเลเซอร์ | 2 | | |
| ประเภทเลเซอร์ | 635 นกค. <1 mW | | |
| ระดับการป้องกัน | IP40 | IP 54 | |
| เปลือยเซ็งวัดในน้ | หลังจาก 90 วินาที | | |
| เปลือยเซ็งวัดในน้ | หลังจาก 180 วินาที | | |
| อายุการใช้งานแบตเตอรี่ (2 x AAA) 1.6 V NEDA 24A/IEC LR03 | วัดได้สูงสุด 3,000 ครั้ง | วัดได้สูงสุด 5,000 ครั้ง | |
| ขนาด (สูง x กว้าง x หนา) | ยาว 116 มม. กว้าง 53 มม. ลึก 33 มม. | ยาว 127 มม. กว้าง 56 มม. ลึก 33 มม. | ยาว 127 มม. กว้าง 56 มม. ลึก 33 มม. |
| น้ำหนัก (รวมแบตเตอรี่) | 113 ก. | 153 ก. | 158 ก. |
| ช่วงอุณหภูมิ: การจัดเก็บ | -25 °C ถึง +70 °C (-13 °F ถึง +158 °F) | -25 °C ถึง +70 °C (-13 °F ถึง +158 °F) | |
| ช่วงอุณหภูมิ: การวัด | 0 °C ถึง +40 °C (32 °F ถึง +104 °F) | -10 °C ถึง +50 °C (14 °F ถึง +122 °F) | |
| รวมการชดเชย | ไม่มี | ไม่มี | การชดเชยอุณหภูมิ |
| ระดับความสูง สูงสุด | 3000 ม. | 3000 ม. | 3000 ม. |
| ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด | 85% ที่ 20 °F ถึง 120°F (-7 °C ถึง 50 °C) | 85% ที่ 20 °F ถึง 120°F (-7 °C ถึง 50 °C) | 85% ที่ 20 °F ถึง 120°F (-7 °C ถึง 50 °C) |
| ความปลอดภัย | หมายเหตุมาตรฐาน IEC 61010-1:2001 EN60825-1:2007 (Class II) | | |
| EMC | EN 55022:2010 EN 61000-4-3:2010 EN 61000-4-8:2010 | | |

รูปที่ 3.23 รูปแสดงคุณสมบัติทางเทคนิคของ Fluke 424D

ที่มา : <https://www.fluke.com/th-th/product/building-infrastructure/laser-distance-meters/fluke-424d>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ตรวจสอบอะคูสติกของห้อง ADR Recording 1

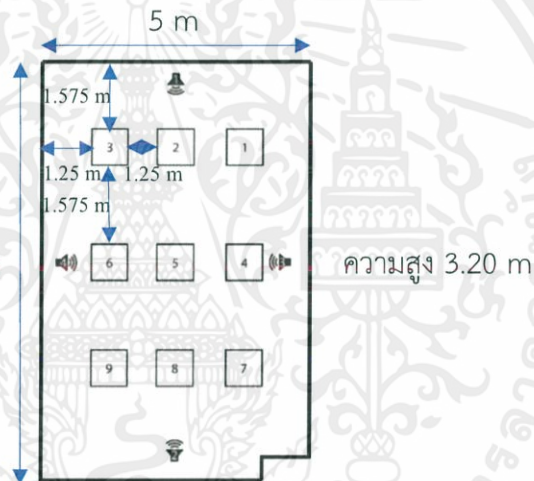
การตรวจวัดห้อง ADR recording 1 ได้ทำการตรวจวัดใน 2 รูปแบบ คือ การตรวจวัดแบบแบ่งตำแหน่ง 9 จุด และการตรวจวัดแบบอ้างอิงตามตำแหน่งการใช้งานจริง

3.7.1 การตรวจวัดแบบแบ่งตำแหน่ง 9 จุด

3.7.1.1 ชั้นเตรียมการ

นำอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ทั้งหมดภายในห้องออกไปด้านนอก เพื่อให้ผลการวัดได้มาจากคุณลักษณะทางอะคูสติกของห้องเพียงอย่างเดียว ควบคุมสถานะให้ไม่มีตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อผลการทดลองมาเกี่ยวข้อง

จากนั้นได้กำหนดรูปแบบการตรวจวัด โดยแบ่งเป็น 4 ชุด โดยแต่ละชุดจะกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของลำโพงไว้ที่ผนังแต่ละฝั่งของห้อง ซึ่งแต่ละชุดการตรวจวัดจะทำการวัดทั้งหมด 9 จุด จุดละ 5 ครั้ง รวมแล้วทำการวัดทั้งหมด 180 ครั้ง



รูปที่ 3.24 รูปผังกำหนดจุดการทดลองภายในห้อง

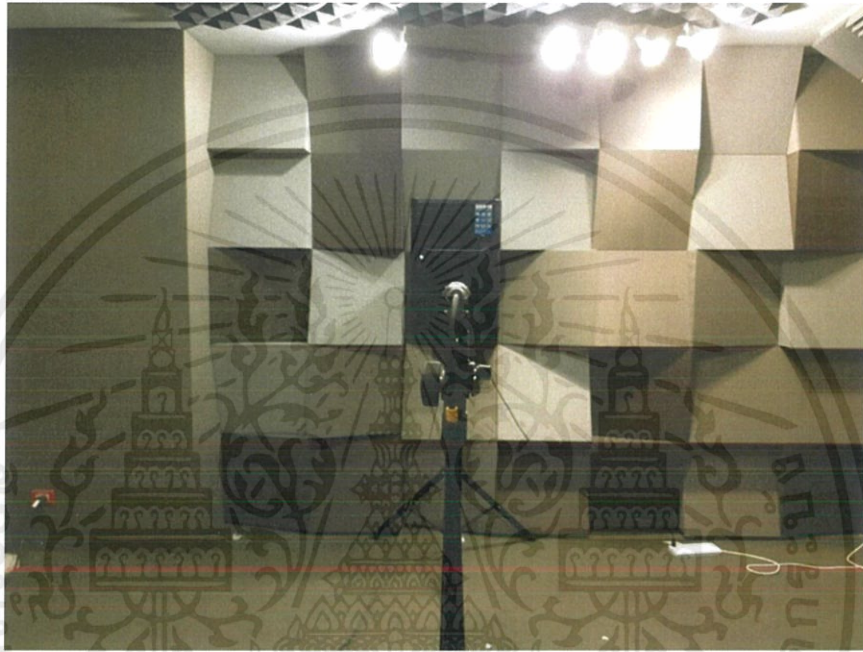
3.7.1.2 การตรวจวัด

3.7.2.1.1 ปรับค่าอุปกรณ์

ทำการปรับค่า (Calibrate) อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด ปรับค่ากำลังขยาย (Gain) ของไมโครโฟนตามค่า Noise floor ของห้อง โดยใช้ฟังก์ชัน Sound pressure level (SPL) meter ของโปรแกรม Room EQ Wizard เป็นตัววัด แล้วอ้างอิงค่าที่ได้กับค่า SPL ที่ทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัด SPL แยก ปรับค่ากำลังขยายของไมโครโฟนให้ค่า SPL ที่แสดงทั้งในโปรแกรมและเครื่องมือวัดเท่ากัน ส่วนลำโพงทำการยิงสัญญาณ Pink Noise แล้วนำ SPL meter ตรวจวัดระดับเสียง ณ ระยะห่างจากดอกลำโพง 1 เมตร ให้ค่าระดับเสียงเท่ากับ 100 dB

3.7.2.1.2 ทำการตรวจวัด

ทำการตรวจวัดโดยใช้ฟังก์ชันการตรวจวัดของโปรแกรม Room EQ Wizard ปล่อยสัญญาณ Sine Sweep ไล่ความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิรซ์ ถึง 20000 เฮิรซ์ ในรูปแบบ Logarithm scale เก็บข้อมูลในรูปของกราฟ และนำกราฟผลตอบสนองต่อความถี่ (Frequency response) ,Energy time Curve และ RT60 ไปวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.25 รูปการทดลองภายในห้อง ADR 1

3.7.1.3 วิเคราะห์ผล

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์ปัญหาทางอะคูสติกที่เกิดขึ้น และหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการบันทึกเสียงที่สุด

3.7.2 การตรวจวัดแบบอ้างอิงตามตำแหน่งการใช้งานจริง

3.7.2.1 ชั้นเตรียมการ

ทำการตั้งลำโพงตรงตำแหน่งที่อ้างอิงจากการใช้งานจริง ณ ปัจจุบันในการบันทึกเสียง ตั้งไมโครโฟนที่ด้านหน้าของลำโพงโดยเว้นระยะห่างจากหน้าลำโพง 1 เมตร และไม่มีกรณนำอุปกรณ์ใดๆที่ติดตั้งเอาไว้ออกจากห้อง

3.7.2.2 การตรวจวัด

3.7.2.1.1 ปรับค่าอุปกรณ์

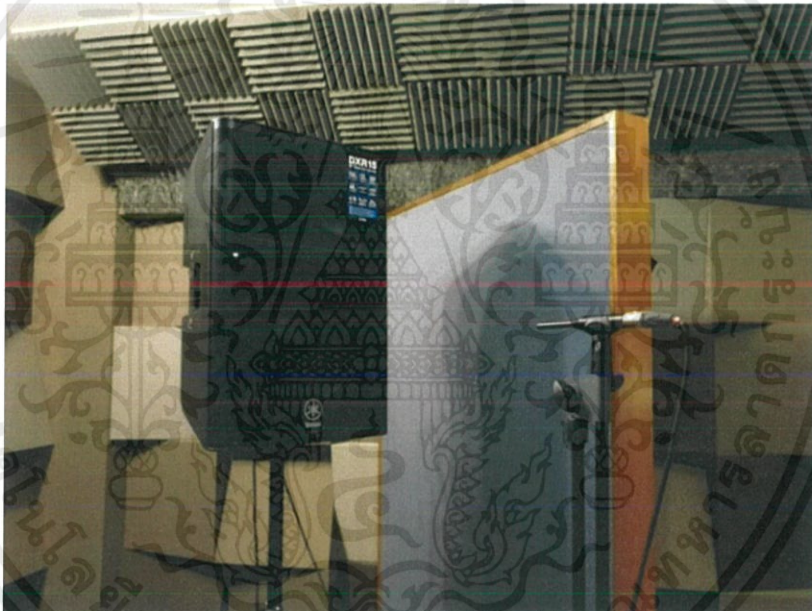
ทำการปรับค่า (Calibration) อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด ปรับค่ากำลังขยาย (Gain) ของไมโครโฟนตามค่า Noise floor ของห้อง โดยใช้ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Sound pressure level (SPL) meter ของโปรแกรม Room EQ Wizard เป็นตัววัด แล้วอ้างอิงค่าที่ได้กับค่า SPL ที่ทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัด SPL แยก ปรับค่ากำลังขยายของไมโครโฟนให้ค่า SPL ที่แสดงทั้งในโปรแกรมและเครื่องมือวัดเท่ากัน ส่วนลำโพงทำการยิงสัญญาณ Pink Noise แล้วนำ SPL meter ตรวจสอบวัดระดับเสียง ณ ระยะห่างจากดอกลำโพง 1 เมตร ให้ค่าระดับเสียงมีค่า 100 dB

3.7.2.1.2 ทำการตรวจวัด

ทำการตรวจวัดโดยใช้ฟังก์ชันการตรวจวัดของโปรแกรม Room EQ Wizard ปล่อยสัญญาณ Sine Sweep ไล่ความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิรซ์ ถึง 20000 เฮิรซ์ ในรูปแบบ Logarithm scale เก็บข้อมูลในรูปของกราฟ และนำกราฟผลตอบสนองต่อความถี่ (Frequency response) ,Energy time Curve และ RT60 ไปวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.26 รูปการทดลองแบบอ้างอิงตำแหน่งตามตามสถานการณ์จริง



รูปที่ 3.27 รูปการทดลองแบบอ้างอิงตำแหน่งตามตามสถานการณ์จริง

3.7.1.3 วิเคราะห์ผล

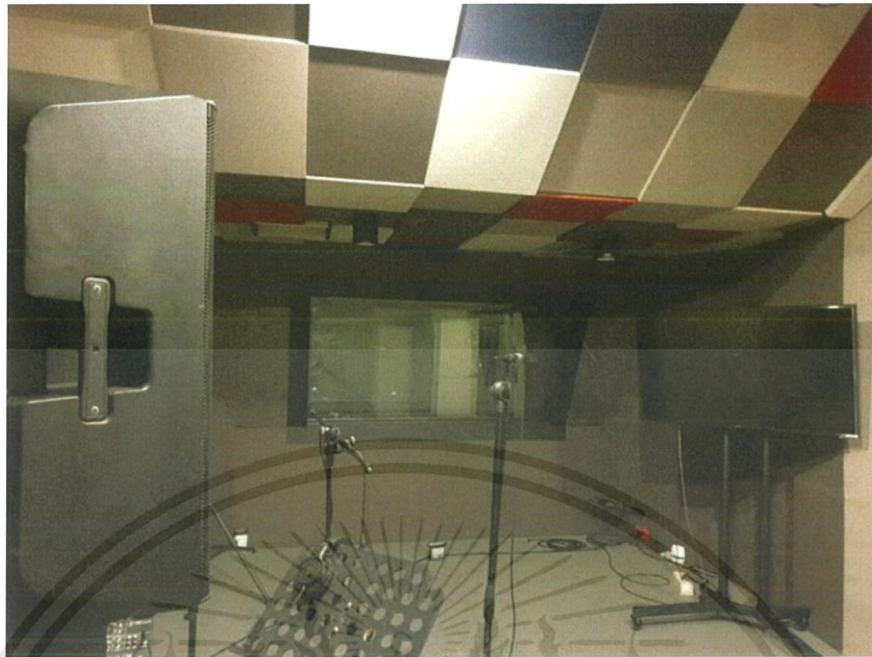
นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์ปัญหาทางอะคูสติกที่เกิดขึ้น

3.8 ตรวจสอบอะคูสติกของห้อง ADR Recording 2 และ 4

การตรวจวัดห้อง ADR recording 2 และ 4 จะเป็นไปในทำนองเดียวกับ การตรวจวัดแบบอ้างอิงตำแหน่งการใช้งานของห้อง ADR recording 1 เมื่อทำการตรวจวัดแล้วจึงนำข้อมูลการตรวจวัดในรูปแบบเดียวกันจากทั้ง 3 ห้องมาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 3.28 รูปการตรวจวัดห้อง ADR 2



รูปที่ 3.29 ภาพการตรวจวัดห้อง ADR 4

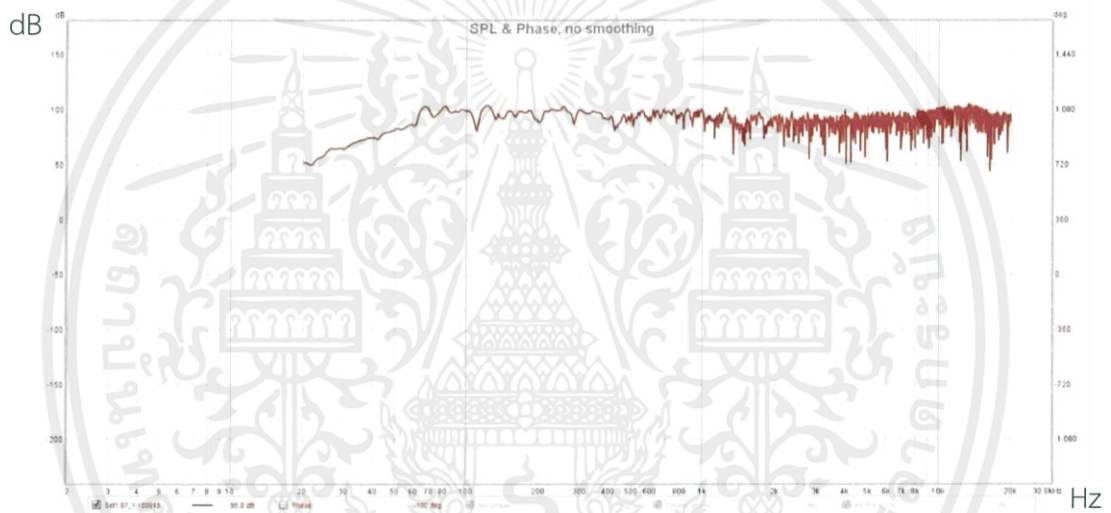


บทที่ 4 ผลการวิจัย

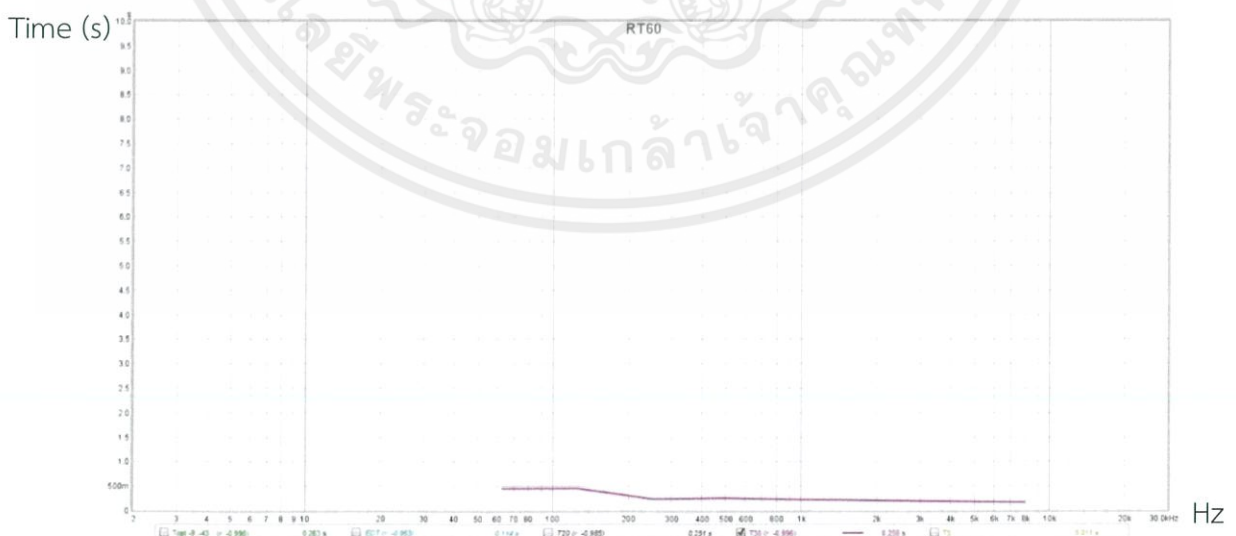
ในบทนี้จะเป็นการรายงานผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการตรวจวัดแบบแบ่ง 9 จุด ภายในห้อง ADR recording 1

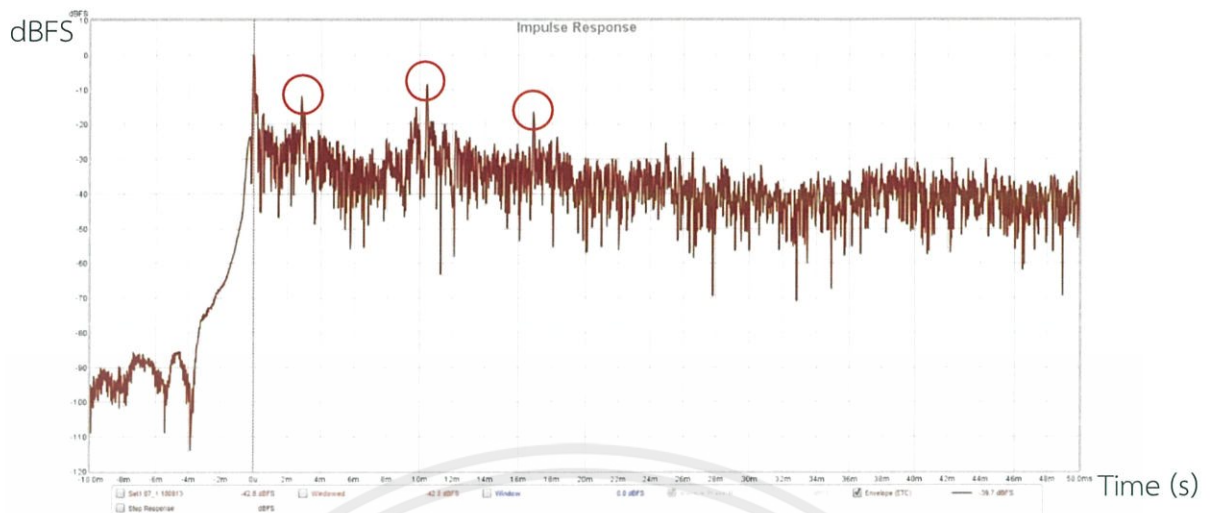
เมื่อนำข้อมูลผลการตอบสนองความถี่ Energy time curve และ RT60 มาพิจารณา พบว่าข้อมูลของผลการตอบสนองความถี่ และ RT60 ไม่แสดงออกถึงปัญหาใดๆที่แสดงผลอย่างชัดเจน ผลการตอบสนองความถี่อยู่ในระดับที่ค่อนข้างเรียบ (Flat) ไม่มีช่วงความถี่ที่ตอบสนองได้ดีหรือแยจจนเกินไป และผลค่า RT60 นั้นอยู่ในเวลาที่น้อยกว่า 0.5 วินาที ซึ่งถือว่าตรงตามมาตรฐานของ Reverberation Time สำหรับห้องสตูดิโอ แต่เมื่อพิจารณาโดยใช้ Energy time curve ปัญหาหลักของห้อง ADR recording 1 เกิดจากเสียงสะท้อน Early reflection



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูล Frequency Response จากข้อมูลชุดที่ 1 ตำแหน่งที่ 7



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างข้อมูล RT60 จากข้อมูลชุดที่ 1 ตำแหน่งที่ 7



รูปที่ 4.3 Energy Time Curve จากข้อมูลชุดที่ 1 ตำแหน่งที่ 7

จากตัวอย่างข้อมูลในรูปที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นถึงการเกิด Spike ขึ้น ในช่วงระดับแอมพลิจูด และช่วงเวลาที่สามารถนำมาพิจารณาเป็นการเกิด Early reflection จึงได้ทำการสรุปว่าปัญหาทางอะคูสติกของห้อง ADR recording 1 ว่าเกิดปัญหาจากเสียงสะท้อน Early reflection

ในแต่ละจุดที่ทำการตรวจวัดให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ทำให้ทราบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการวางไมโครโฟนบันทึกเสียง และลำโพงแหล่งกำเนิดเสียง ตำแหน่งที่จะเกิดการสะท้อนของเสียงก็จะเปลี่ยนที่ไปด้วย ต่อจากนี้จะเป็นข้อมูลทั้งหมดที่ตรวจวัดจากทั้ง 9 จุด และทำการคำนวณหาระยะทางที่จะเกิดการสะท้อนของเสียงแล้ว

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการตรวจวัด 9 จุดของชุดที่ 1

| set 1 | ข้อมูล | | |
|--------|-----------|--------------|---------------------------------------|
| จุดที่ | เวลา (ms) | ความดัง (dB) | ระยะทางที่จะเกิดการสะท้อนของเสียง (m) |
| 1 | 7.47 | -13.35 | 2.56 |
| | 27.56 | -12.78 | 9.45 |
| | 29.49 | -14.46 | 10.11 |
| | 39.23 | -5.75 | 13.45 |
| 2 | N/A | N/A | N/A |
| 3 | 39.37 | -14.7 | 13.5 |
| 4 | 11.834 | -23.27 | 4.05 |
| | 19.4 | -17.95 | 6.65 |
| | 30.359 | -24.39 | 10.41 |
| 5 | 10.535 | -24.93 | 3.61 |
| | 19.859 | -23.9 | 6.8 |
| | 38.35 | -29.08 | 13.15 |
| 6 | N/A | N/A | N/A |
| 7 | 2.89 | -12.1 | 0.99 |
| | 10.49 | -8.8 | 3.59 |
| | 16.94 | -16.7 | 5.81 |
| 8 | 9.968 | -13.8 | 3.41 |
| | 10.223 | -14.7 | 3.5 |
| | 10.92 | -16.1 | 3.74 |
| | 21.8593 | -27.35 | 7.49 |
| | 28.85 | -25.69 | 9.89 |
| | 38.89 | -30.9 | 13.33 |
| 9 | 2.91 | -15.4 | 0.99 |
| | 4.2 | -17.65 | 1.44 |
| | 9.85 | -18.21 | 3.37 |
| | 12.39 | -19.7 | 4.24 |
| | 31.99 | -28.67 | 10.97 |
| | 38.99 | -29.69 | 13.37 |

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการตรวจวัด 9 จุดของชุดที่ 2

| set 2 | ข้อมูล | | |
|--------|-----------|--------------|---------------------------------------|
| จุดที่ | เวลา (ms) | ความดัง (dB) | ระยะทางที่จะเกิดการสะท้อนของเสียง (m) |
| 1 | 10.44 | -11.96 | 3.58 |
| | 11.73 | -15.576 | 4.02 |
| | 12.823 | -18.974 | 4.39 |
| | 13.604 | -22.67 | 4.66 |
| | 14.38 | -24.85 | 4.93 |
| | 17.1 | -20.66 | 5.86 |
| | 17.82 | -24.35 | 6.11 |
| | 36.907 | -27.08 | 12.65 |
| | 39.48 | -28 | 13.54 |
| 2 | 7.42 | -18.5 | 2.54 |
| | 11.01 | -13.02 | 3.77 |
| | 14.37 | -23 | 4.92 |
| 3 | 11.046 | -10.09 | 3.78 |
| 4 | 5.224 | -18.5 | 1.79 |
| | 19.74 | -22.2 | 6.77 |
| 5 | 10.535 | -24.93 | 3.61 |
| | 19.859 | -23.9 | 6.8 |
| | 38.35 | -29.08 | 13.1 |
| 6 | 19.79 | -15.1 | 6.78 |
| | 37.723 | -21.8 | 12.93 |
| 7 | 30.43 | -18.1 | 10.43 |
| 8 | N/A | N/A | N/A |
| 9 | 4.478 | -16.3 | 1.53 |
| | 7.488 | -16.5 | 2.56 |
| | 8.217 | -17.8 | 2.81 |
| | 27.938 | -15.8 | 9.58 |
| | 37.291 | -9.9 | 12.79 |

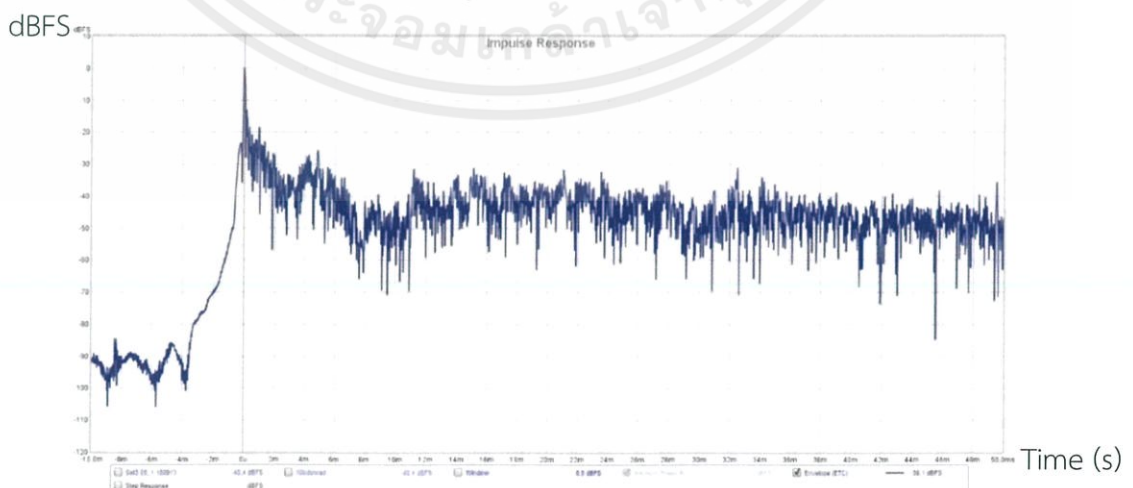
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการตรวจวัด 9 จุดของชุดที่ 3

| set 3 | ข้อมูล | | |
|--------|-----------|--------------|---------------------------------------|
| จุดที่ | เวลา (ms) | ความดัง (dB) | ระยะทางที่จะเกิดการสะท้อนของเสียง (m) |
| 1 | 11.66 | -17.37 | 3.99 |
| | 14.07 | -21.36 | 4.82 |
| | 20.46 | -18.8 | 7.01 |
| | 25.58 | -14.39 | 8.77 |
| | 32.456 | -18.96 | 11.13 |
| 2 | 8.38 | -22.9 | 2.87 |
| | 9.69 | -22.8 | 3.32 |
| | 14.92 | -14.1 | 5.11 |
| 3 | 3.382 | -18.48 | 1.15 |
| | 8.06 | -14.54 | 2.76 |
| | 8.87 | -16.24 | 3.04 |
| 4 | N/A | N/A | N/A |
| 5 | N/A | N/A | N/A |
| 6 | N/A | N/A | N/A |
| 7 | 30.36 | -7 | 10.41 |
| 8 | 14.97 | -7.7 | 5.13 |
| 9 | 8.52 | -8.3 | 2.92 |
| | 30.36 | -19.6 | 10.41 |
| | 31.9 | -15.4 | 10.94 |

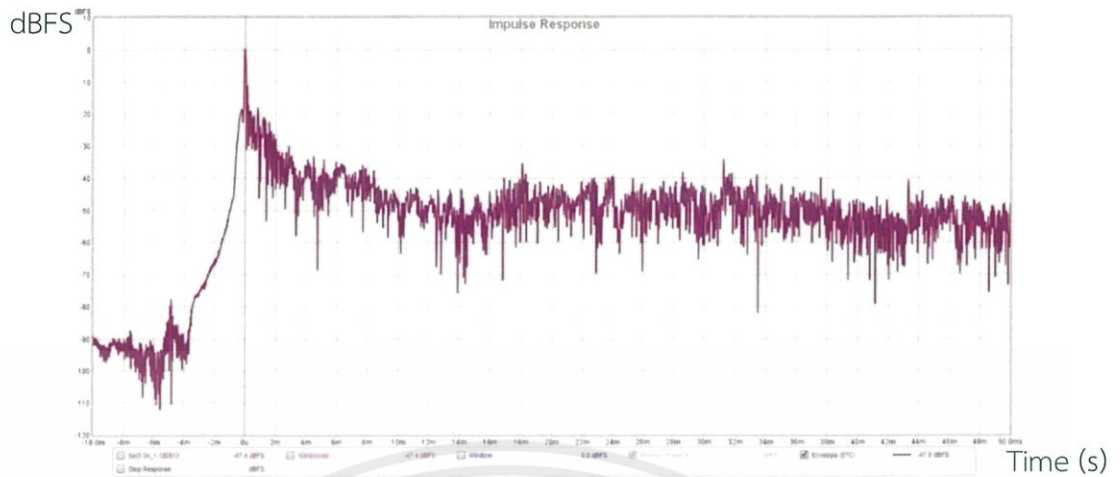
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการตรวจวัด 9 จุดของชุดที่ 4

| set4 | ข้อมูล | | |
|--------|-----------|--------------|---------------------------------------|
| จุดที่ | เวลา (ms) | ความดัง (dB) | ระยะทางที่จะเกิดการสะท้อนของเสียง (m) |
| 1 | 8.855 | -11.6 | 3.03 |
| | 30.32 | -15.8 | 10.39 |
| 2 | 29.893 | -13.5 | 10.25 |
| 3 | 21.601 | -7.1 | 7.4 |
| | 24.084 | -10.6 | 8.25 |
| | 28.721 | -9.9 | 9.85 |
| 4 | 8.422 | -15.3 | 2.88 |
| 5 | 15.258 | -19.7 | 5.23 |
| | 16.197 | -23.5 | 5.55 |
| 6 | N/A | N/A | N/A |
| 7 | 8.03 | -10.7 | 2.75 |
| | 30.195 | -23.9 | 10.35 |
| 8 | 14.621 | -11.8 | 5.01 |
| 9 | 3.198 | -15.6 | 1.09 |
| | 20.727 | -9.9 | 7.1 |

เมื่อพิจารณาข้อมูล Energy time curve ทั้งหมด ทำให้พบว่ามีข้อมูลจากการตรวจวัด 2 ตำแหน่ง ที่ให้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจ คือข้อมูลชุดที่ 3 ตำแหน่งการตรวจวัดที่ 4 และ ข้อมูลชุดที่ 3 ตำแหน่งการตรวจวัดที่ 5 ข้อมูลทั้ง 2 กราฟนี้แสดงผลให้เห็นว่า ไม่มีการเกิด Spike ที่เป็นที่เด่นชัดจึงไม่นำมาพิจารณาการเกิดปัญหาเสียงสะท้อน จึงได้ทำการสรุปว่าทั้ง 2 ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมแก่การบันทึกเสียงที่สุด และกล่าวโดยสรุปว่า บริเวณกึ่งกลางของห้องเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมกับการบันทึกเสียงที่สุด ในกรณีที่ผู้พากย์เสียงหันหน้าไปทางด้านซ้ายของห้อง



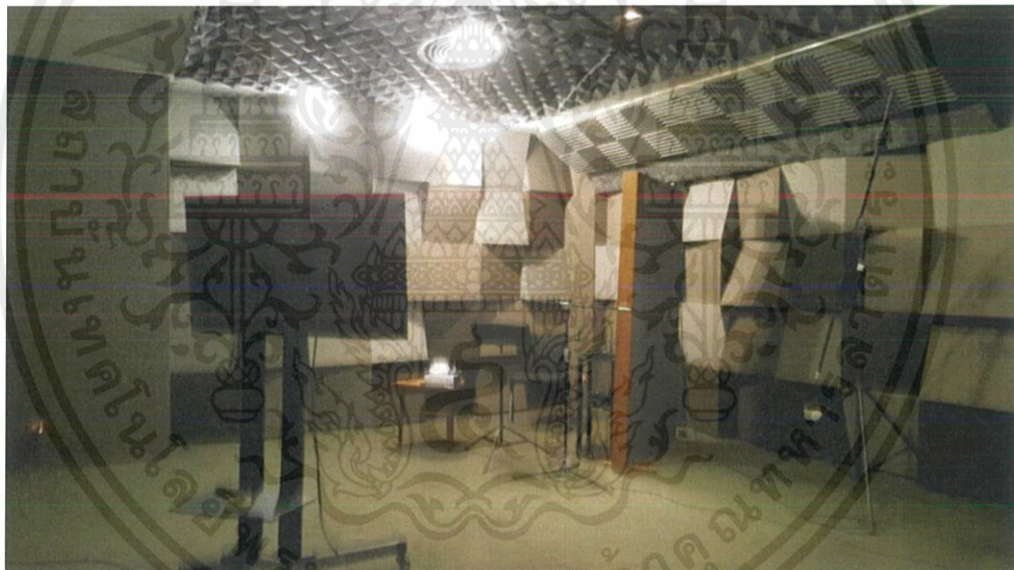
รูปที่ 4.4 Energy Time Curve จากข้อมูลชุดที่ 3 ตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 4.5 Energy Time Curve จากข้อมูลชุดที่ 3 ตำแหน่งที่ 5

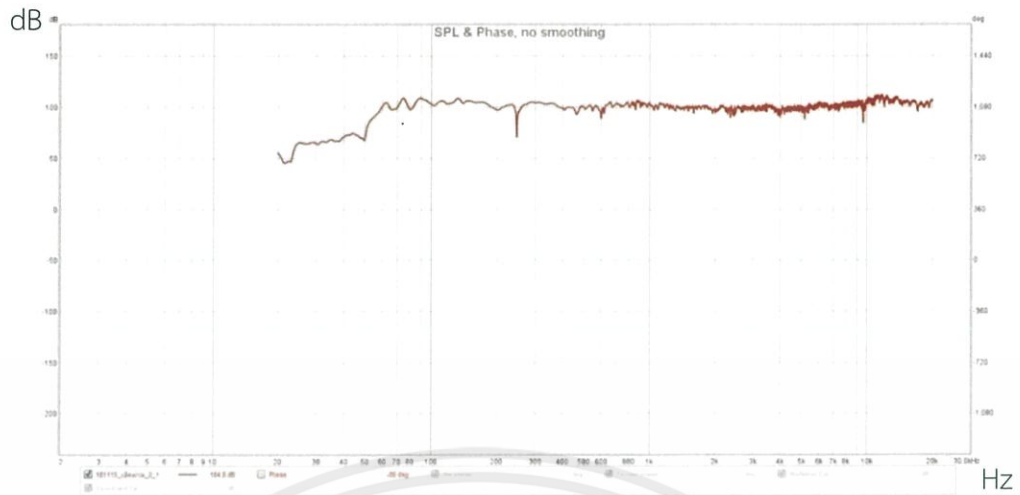
4.2 ผลการตรวจรูปแบบวัดตามสถานการณ์จริง

4.2.1 ห้อง ADR recording 1



รูปที่ 4.6 ห้อง ADR recording 1

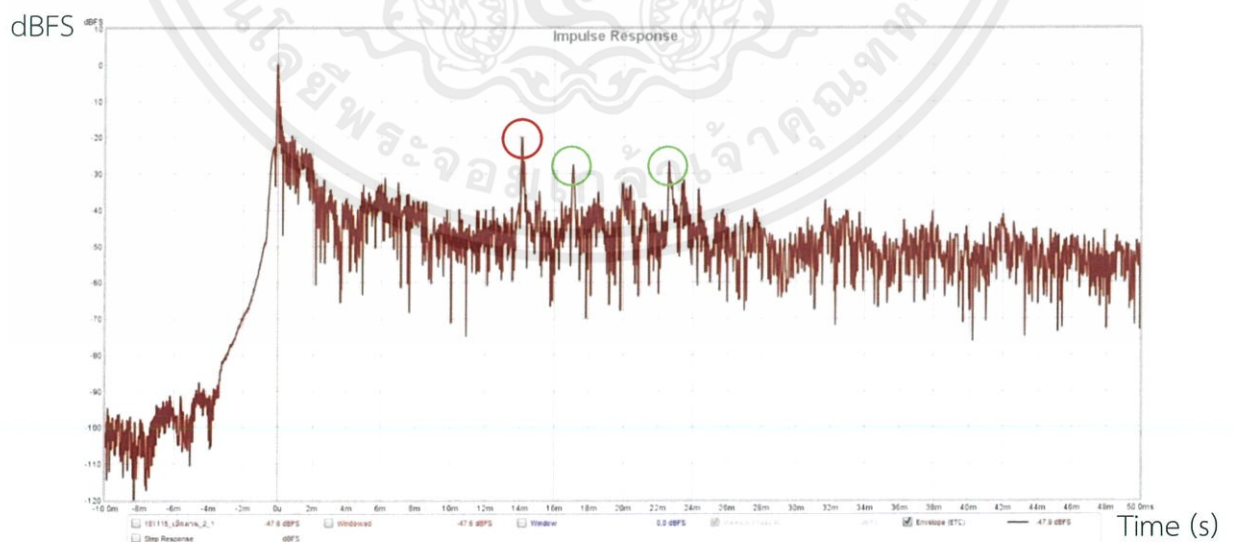
ผลการตรวจวัดเป็นไปในทำนองเดียวกันกับผลจากการตรวจวัดรูปแบบแบ่งตำแหน่ง 9 จุดคือ เมื่อพิจารณาจาก ผลการตอบสนองต่อความถี่ และ RT60 ไม่พบปัญหาที่ชัดเจนใดๆ แต่ในส่วนของ Energy time curve พบว่ามีการเกิด Spike ขึ้น



รูปที่ 4.7 Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 1



รูปที่ 4.8 RT60 จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 1



รูปที่ 4.9 Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 1

การตรวจวัดรูปแบบนี้เป็นการตรวจวัดโดยระบุตำแหน่ง จุดติดตั้งลำโพงแหล่งกำเนิด

เสียง และจุดวางไมโครโฟนบันทึกเสียงเอาไว้โดยไม่มีกรเคลื่อนย้ายตำแหน่งเหมือนกับการเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งคลื่นวิทยุสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตรวจวัดแบบแบ่ง 9 จุด ไม่มีตัวแปรเรื่องตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงและจุดรับเสียงที่แตกต่างกันในการตรวจวัดแต่ละครั้งเข้ามาเป็นตัวแปรที่ต้องพิจารณา จึงทำให้สามารถคำนวณคาดการณ์หาตำแหน่งที่เป็นจุดตกกระทบการสะท้อนได้

จากข้อมูลในรูปที่ 4.9 จะพอว่ามีการเกิด Spike ขึ้น 3 ตำแหน่ง จึงทำการคำนวณคาดการณ์จุดตกกระทบโดยใช้สมการอัตราเร็ว $v = \frac{s}{t}$ อ้างอิงเวลา (t) จากตำแหน่งเวลาที่เกิด Spike

$$v = \frac{s}{t}$$

v คือ ความเร็วเสียง คือ 343 ms

s คือ ระยะทาง (m)

t คือ เวลา (s)

Spike ที่ 1 เกิด ณ เวลา 14.14 ms

โดย เวลา ณ Spike แรกคือ 14.14 ms

เมื่อแทนค่าลงในสมการแล้วจะได้เป็น

$$343 = \frac{s}{14.14 \times 10^{-3}}$$

s = 4.85 m

Spike ที่ 2 เกิด ณ เวลา 16.36 ms

โดย เวลา ณ Spike แรกคือ 14.14 ms

เมื่อแทนค่าลงในสมการแล้วจะได้เป็น

$$343 = \frac{s}{16.36 \times 10^{-3}}$$

s = 5.61 m

Spike ที่ 3 เกิด ณ เวลา 22.49 ms

โดย เวลา ณ Spike แรกคือ 14.14 ms

เมื่อแทนค่าลงในสมการแล้วจะได้เป็น

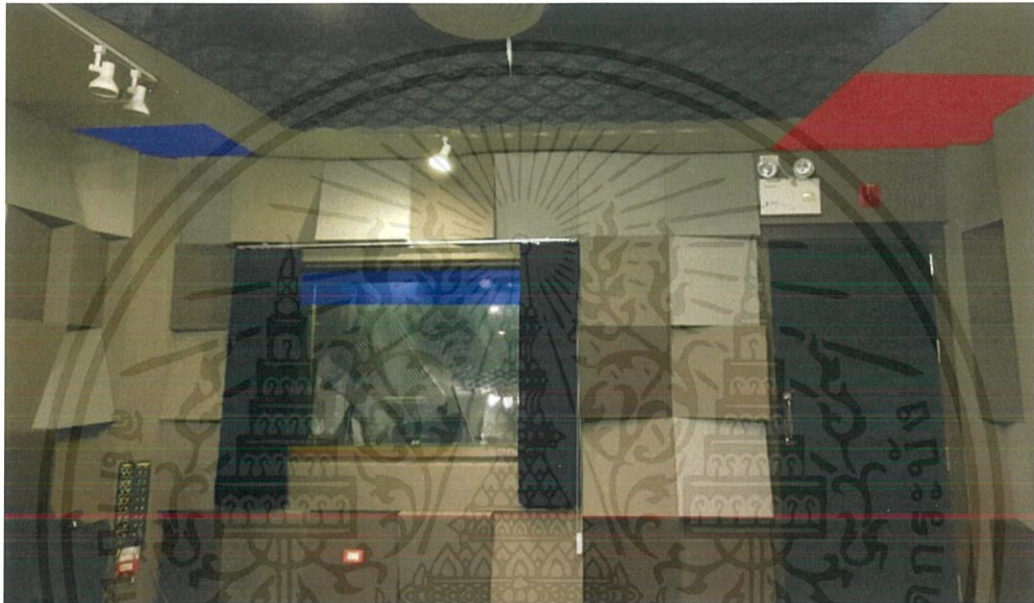
$$343 = \frac{s}{22.49 \times 10^{-3}}$$

s = 7.71 m

เมื่อทำการคำนวณคาดการณ์หาระยะห่างจากจุดตกกระทบการสะท้อนถึงไมโครโฟนรับเสียงแล้วพบว่า ผลการคำนวณระยะห่างโดยใช้ข้อมูลเวลาการเกิด Spike ที่ 2 และ 3 ระยะที่ได้อยู่เกิดจากขนาดของห้อง จากการประเมินคาดว่า Spike ที่ 2 และ 3 เป็นผลที่เกิดจากการสะท้อนของเสียงในรูปแบบ Secondary Reflection หรือ Third Reflection ซึ่งอาจเกิดจากอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งเอาไว้

ภายในห้อง ทำการสะท้อนเสียงไปมา ย้อนกลับเข้ามาที่ไม่โครโฟน สามารถคำนวณหาจุดตกกระทบสะท้อนได้ยากมากและถือว่าเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัด จึงไม่นำข้อมูลของ Spike ที่ 2 และ 3 มาพิจารณาคาดการณ์หาจุดตกกระทบการสะท้อน

Spike แรกเกิดขึ้น ณ เวลา 14.14 ms ระดับความดังลดลงไปจาก Direct Sound - 20.2 dBFS คำนวณคาดการณ์ระยะห่างจากจุดตกกระทบการสะท้อนถึงไมโครโฟนรับเสียงได้ 4.85 เมตร หลังจากการใช้อุปกรณ์เลเซอร์วัดระยะทาง (Range finder) ทำการตรวจวัดระยะแล้วสรุปคาดการณ์จุดตกกระทบการสะท้อนได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 พื้นที่ที่อาจเป็นจุดตกกระทบสะท้อนของเสียงภายในห้อง ADR recording 1

พื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นจุดตกกระทบการสะท้อนของเสียงมีอยู่ 3 จุด พื้นที่สีแดงในรูปที่ 4.10 เป็นพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้สูงที่จะเป็นจุดตกกระทบการสะท้อนของเสียง และพื้นที่สีน้ำเงิน พื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการสะท้อนของเสียง

พื้นที่สีแดงนั้นมีความเป็นไปได้สูงเพราะเป็นพื้นที่ที่อยู่ตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดเสียง หากเปรียบเทียบกับการใช้งานจริงก็เปรียบเสมือนกับผู้พากย์เสียง ส่วนพื้นที่สีน้ำเงินมีความเป็นไปได้เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่อยู่หลัง Acoustic Board ซึ่งตั้งอยู่ระหว่างผู้พากย์เสียง และพื้นที่บริเวณกระจกซึ่งตัวกระจกนั้นเป็นกระจกเอียงขึ้นซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสะท้อนเสียงกลับมายังไมโครโฟน

4.2.2 ห้อง ADR recording 2



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

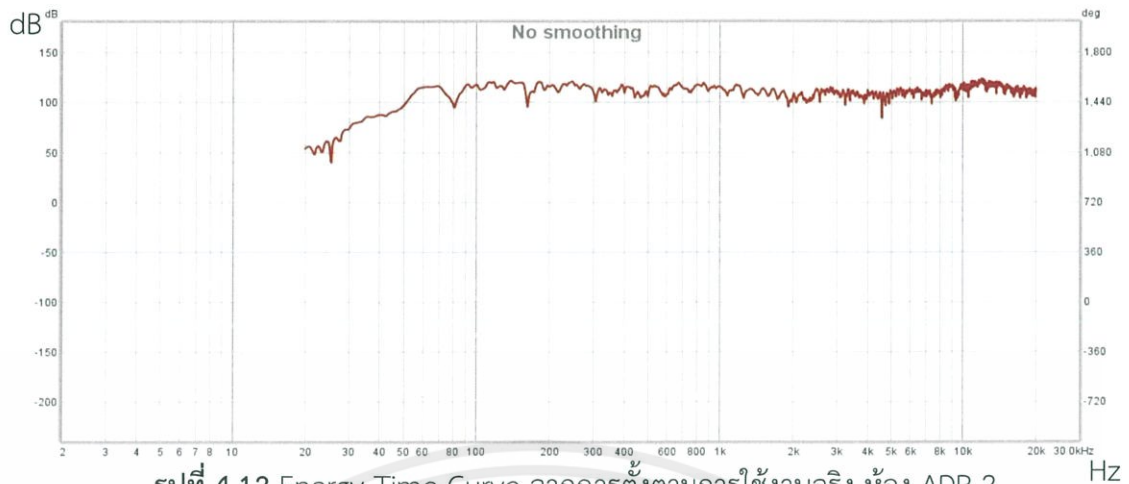


(ค)



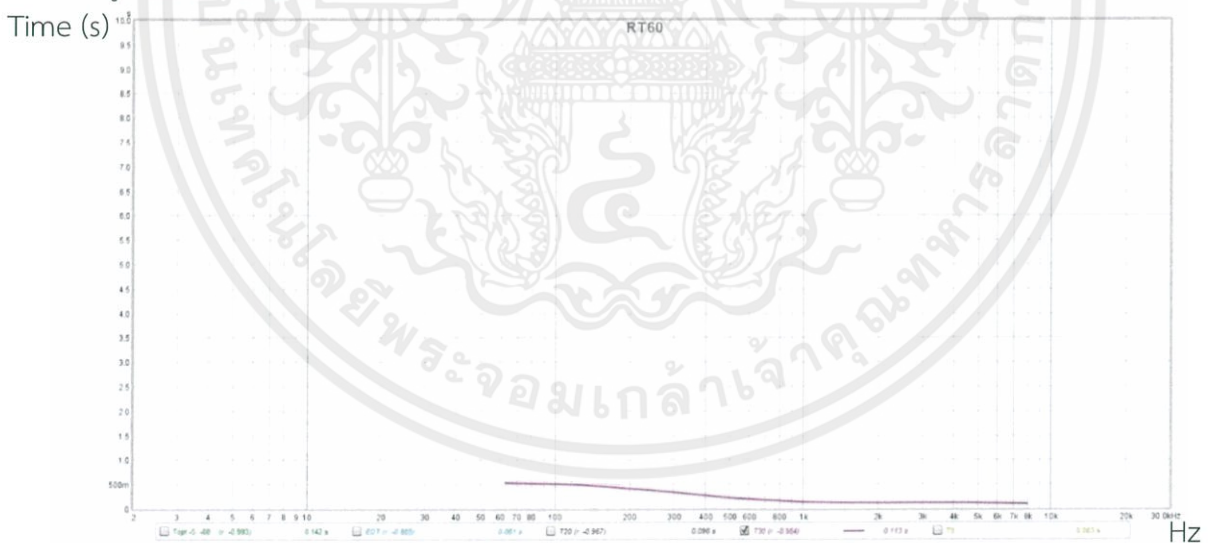
(ง)

รูปที่ 4.11 (ก), (ข), (ค) และ (ง) รูปภายในห้อง ADR 2



รูปที่ 4.12 Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 2

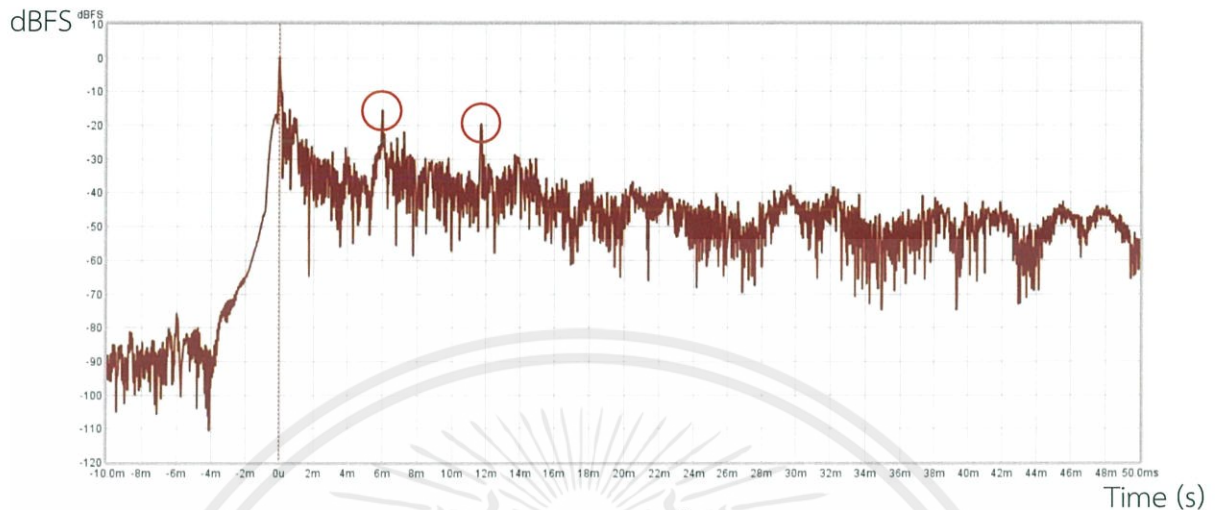
ผลการตรวจวัดในส่วนของการตอบสนองต่อความถี่ของห้อง ADR recording 2 นั้น จะเห็นได้ว่าห้องมีผลตอบสนองต่อช่วงความถี่กลางต่ำที่ช่วงความถี่ 100 เฮิรซ์ ถึง 300 เฮิรซ์ ค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้เกิดคุณลักษณะของเสียงที่ไม่เป็นธรรมชาติในการบันทึกเสียง จะทำให้มีความถี่กลางต่ำอยู่มากในเนื้อเสียงที่ทำการบันทึกภายในห้อง ซึ่งจะเป็นปัญหาที่ค่อนข้างส่งผลในงานการบันทึกเสียง จากการสังเกตรูปร่างของห้อง ฟ้าเพดานของห้องที่ค่อนข้างต่ำ อาจทำให้ห้อง ADR recording 2 มีปัญหาในเรื่องของ Room mode ซึ่งสอดคล้องกับผลตอบสนองต่อความถี่ที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่กลางต่ำ



รูปที่ 4.13 RT60 จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 2

ค่า Reverberation Time ที่ได้จากการตรวจวัดอยู่ในเวลาน้อยกว่า 0.5 วินาที ซึ่งถือว่าตรงตามมาตรฐานของ Reverberation Time สำหรับห้องสตูดิโอ แต่จะสังเกตได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำค่า Reverberation time จะมีค่าที่สูงขึ้นกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดห้อง ADR

recording 1 ในรูปที่ 4.8 สอดคล้องกับค่าผลตอบสนองต่อความถี่ของห้อง ADR recording 2 ที่แสดงผลตอบสนองต่อช่วงความถี่กลางต่ำค่อนข้างดี



รูปที่ 4.14 Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 2

จากข้อมูลในรูปที่ 4.9 จะพอม่ามีการเกิด Spike ขึ้น 2 ตำแหน่ง จึงทำการคำนวณ คาคการณ์จุดตกกระทบโดยใช้สมการอัตราเร็ว $v = \frac{s}{t}$ อ้างอิงเวลา (t) จะตำแหน่งเวลาที่เกิด Spike

Spike แรกเกิดขึ้น ณ เวลา 6 ms ระดับความดังลดลงไปจาก Direct Sound -15.6 dBFS

$$v = \frac{s}{t}$$

v คือ ความเร็วเสียง คือ 343 m/s

s คือ ระยะทาง (m)

t คือ เวลา (s)

โดย เวลา ณ Spike แรกคือ 6 ms

เมื่อแทนค่าลงในสมการแล้วจะได้เป็น

$$343 = \frac{s}{6 \times 10^{-3}}$$

$$s = 2.058 \text{ m}$$

Spike ที่สอง ณ เวลา 11.716 ms ระดับความดังลดลงไปจาก Direct Sound -19.3 dBFS

เมื่อแทนค่าลงในสมการแล้วจะได้เป็น

$$343 = \frac{s}{11.716 \times 10^{-3}}$$

$$s = 4.0186 \text{ m}$$

เมื่อทำการคำนวณคาดการณ์จุดตกกระทบการสะท้อนแล้วก็พบว่าSpikeที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ตำแหน่งเวลา อยู่ในระยะที่ครอบคลุมภายในห้องทั้งตำแหน่ง จึงได้ใช้อุปกรณ์เลเซอร์วัดระยะทาง (Range finder) ทำการตรวจวัดระยะแล้วสรุปคาดการณ์จุดตกกระทบการสะท้อนได้ดังรูปที่ 4.14



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

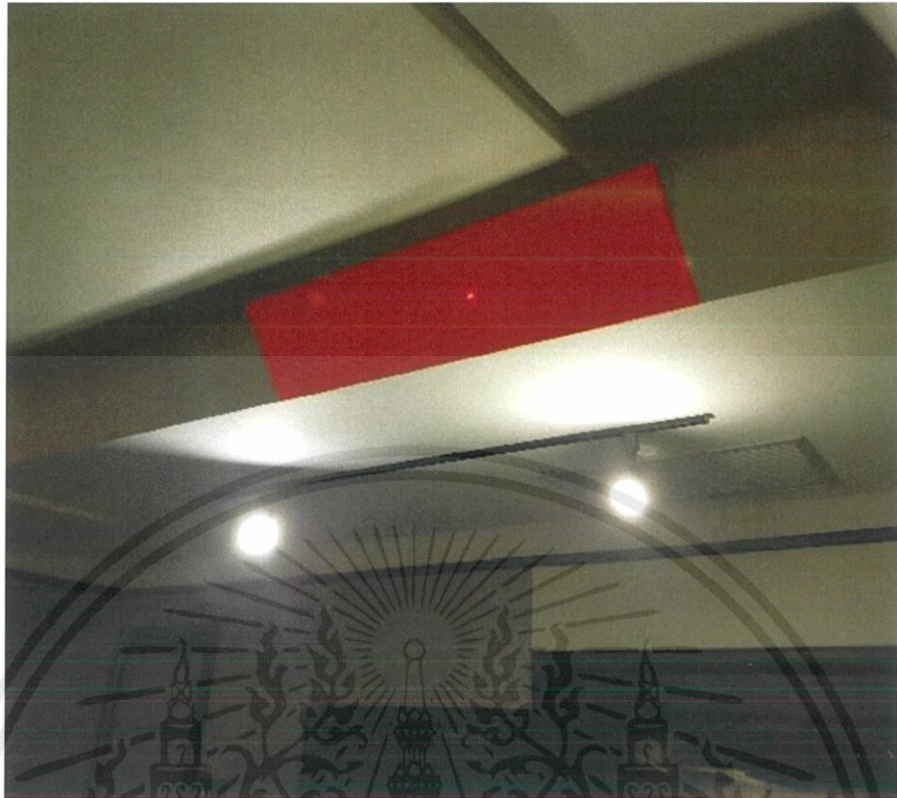


(ค)



(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 4.15 (ก), (ข), (ค), (ง) และ (จ) พื้นที่ที่อาจเป็นจุดสะท้อนของเสียงภายในห้อง ADR 2

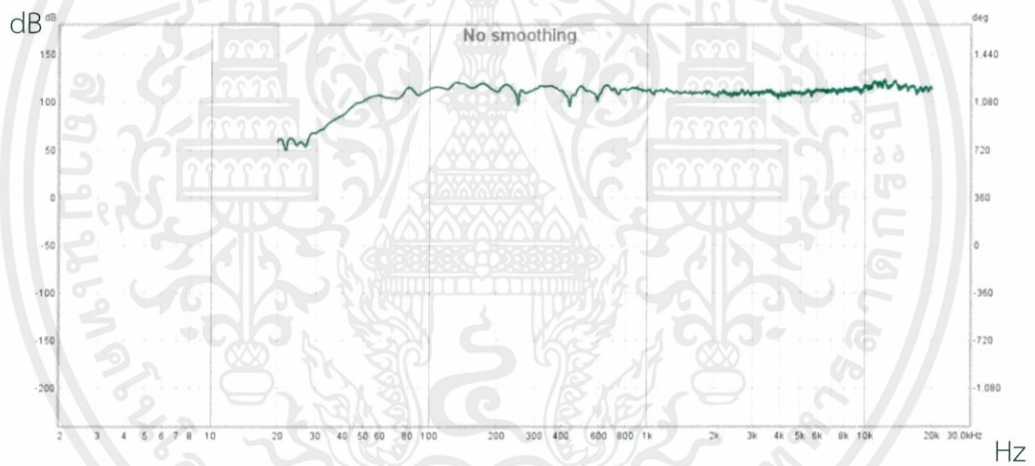
พื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นจุดตกกระทบการสะท้อนของเสียงมีอยู่หลายจุด พื้นที่สีแดงในรูปที่ 4.15 เป็นพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้สูงที่จะเป็นจุดตกกระทบการสะท้อนของเสียง และพื้นที่สีน้ำเงิน พื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการสะท้อนของเสียง

พื้นที่สีแดงนั้นมีความเป็นไปได้สูงเพราะเป็นส่วนแนวยกขึ้นของฝ้าเพดานที่เอียงทำมุมเข้าหาแหล่งกำเนิดเสียงทั้ง 2 ด้าน ซึ่งหากเปรียบเทียบกับการใช้งานจริงก็คือผู้พากย์เสียง น้ำเงิน นั้นเป็นพื้นที่อื่น ๆ ที่มีความเป็นไปได้ต่ำเพราะเป็นพื้นที่ที่อยู่ด้านหลังผู้พากย์เสียง

4.3.2 ห้อง ADR recording 4

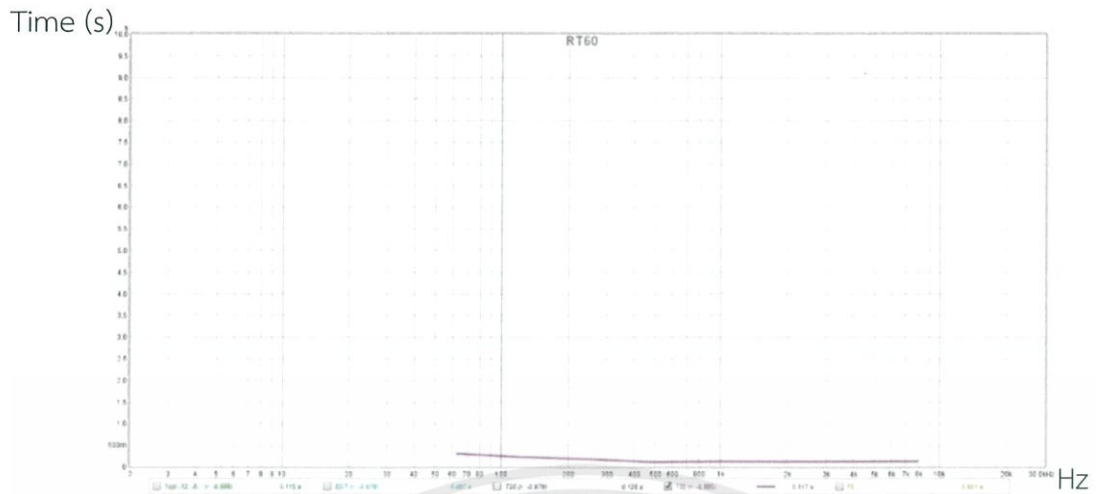


รูปที่ 4.16 ห้อง ADR 4

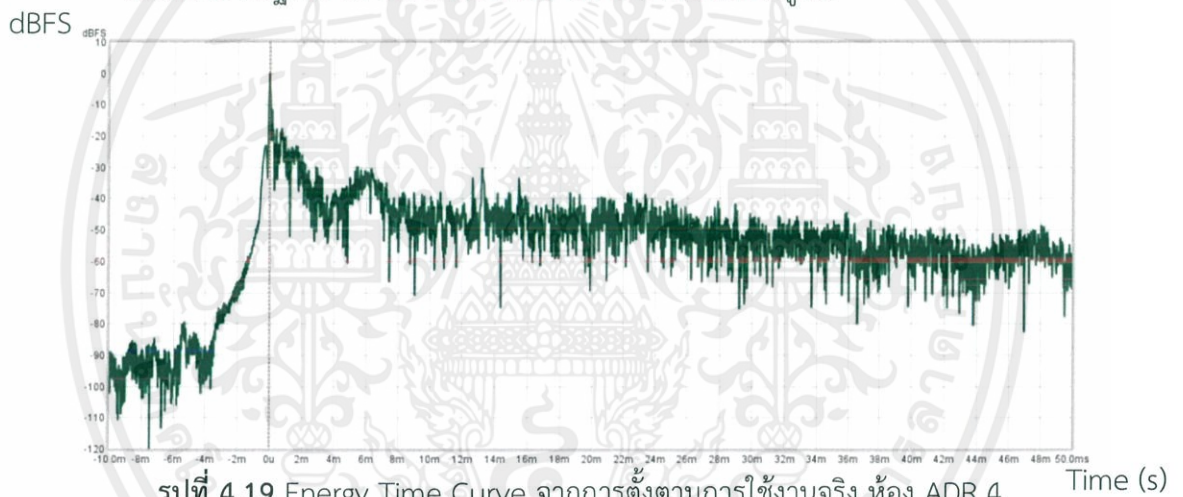


รูปที่ 4.17 Frequency Response จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 4

ผลการตรวจวัดผลการตอบสนองต่อความถี่ของห้อง ADR Recording 4 ก่อนข้างเรียบ (Flat) ไม่มีย่านความถี่ใดที่มีการตอบสนองที่สูงหรือต่ำจนเกินไป



รูปที่ 4.18 RT60 จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 4
 ผลการตรวจวัดค่า Reverberation Time อยู่ในเวลาที่น้อยกว่า 0.5 วินาที ซึ่งถือว่าตรงตามมาตรฐานของ Reverberation Time สำหรับห้องสตูดิโอ



รูปที่ 4.19 Energy Time Curve จากการตั้งตามการใช้งานจริง ห้อง ADR 4
 ผลการตรวจวัด Energy Time Curve ของห้อง ADR 4 นั้นไม่มี Spike ที่ปรากฏแน่ชัดในช่วงความดังที่ต้องนำมาพิจารณา กล่าวคือไม่มีปัญหาด้านเสียงสะท้อนเกิดขึ้นภายในห้อง

บทที่ 5

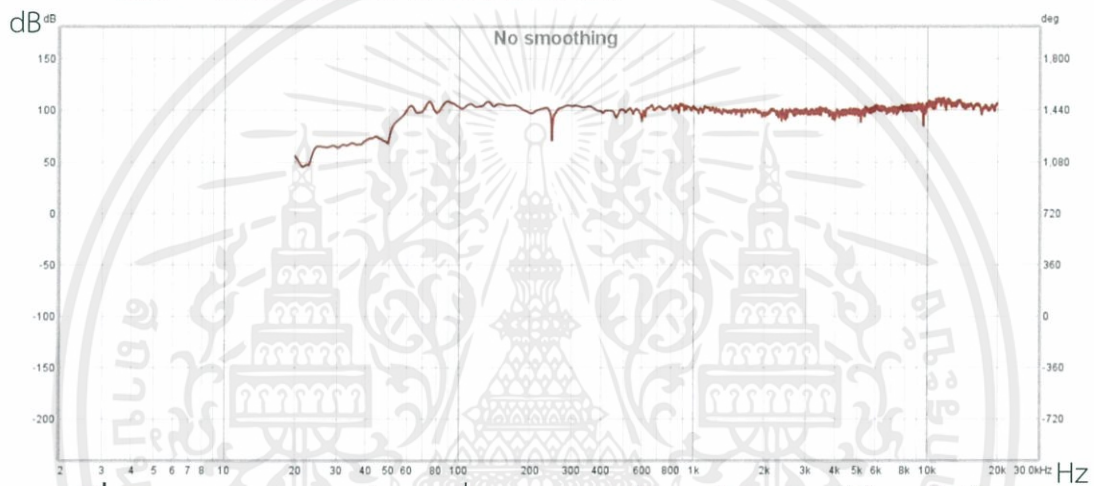
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการดำเนินงาน

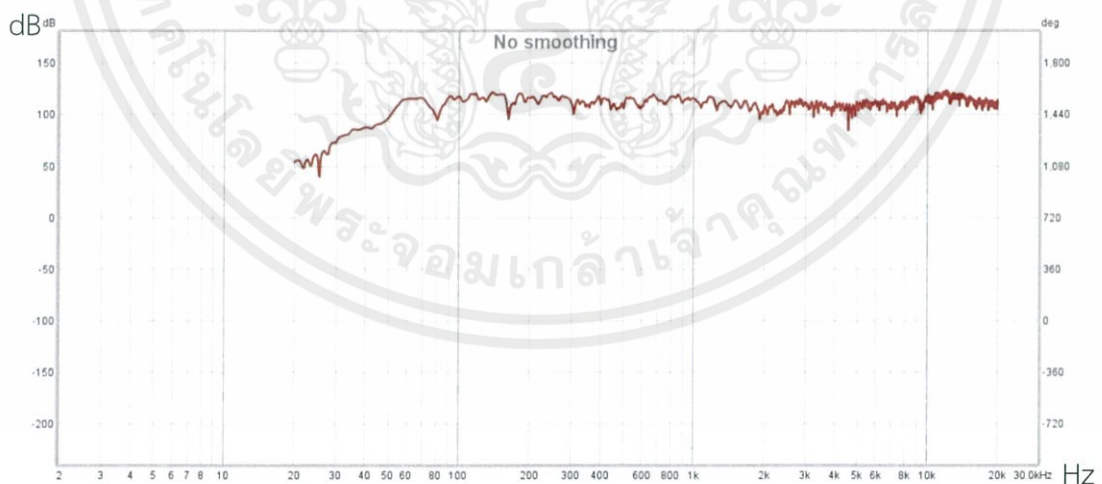
5.1 เปรียบเทียบผลการตรวจวัดแบบอ้างอิงตามตำแหน่งการใช้งานจริงระหว่างห้อง

เปรียบเทียบ ผลการตอบสนองต่อความถี่, Energy Time Curve และ Reverberation Time ระหว่างห้อง ADR 1, ADR 2 และ ADR 4 เพื่อเปรียบเทียบว่าห้องใดที่มีเหมาะสมแก่การบันทึกเสียงมากที่สุด และห้องใดที่มีปัญหาทางอะคูสติกมากที่สุด โดยเปรียบเทียบโดยใช้ผลการตรวจวัดแบบอ้างอิงตามตำแหน่งการใช้งานจริง

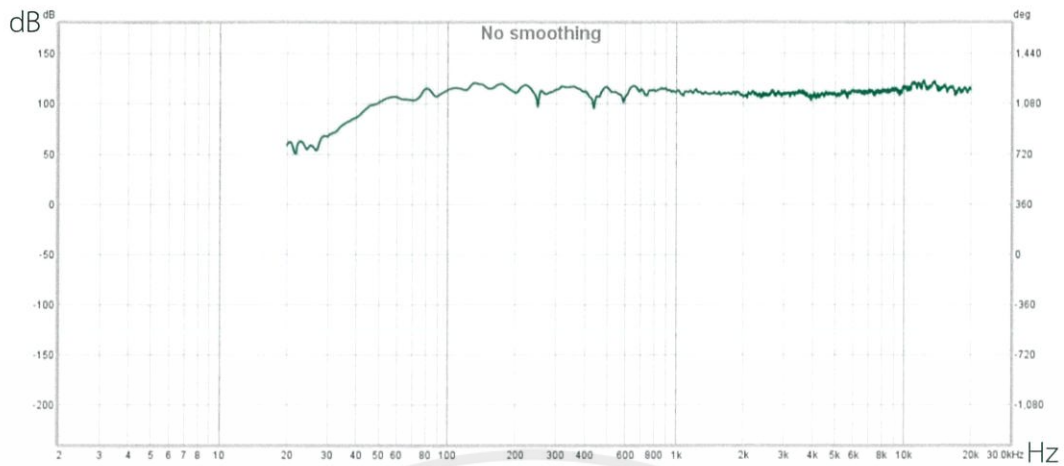
5.1.1 เปรียบเทียบผลการตอบสนองความถี่



รูปที่ 5.1 ผลการตอบสนองต่อความถี่ จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงห้อง ADR 1



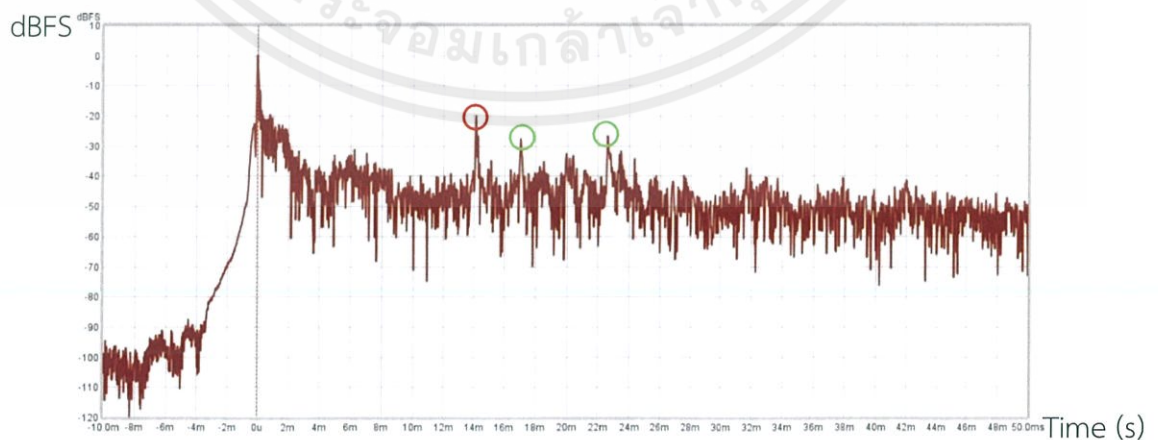
รูปที่ 5.2 ผลการตอบสนองต่อความถี่ จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงห้อง ADR 2



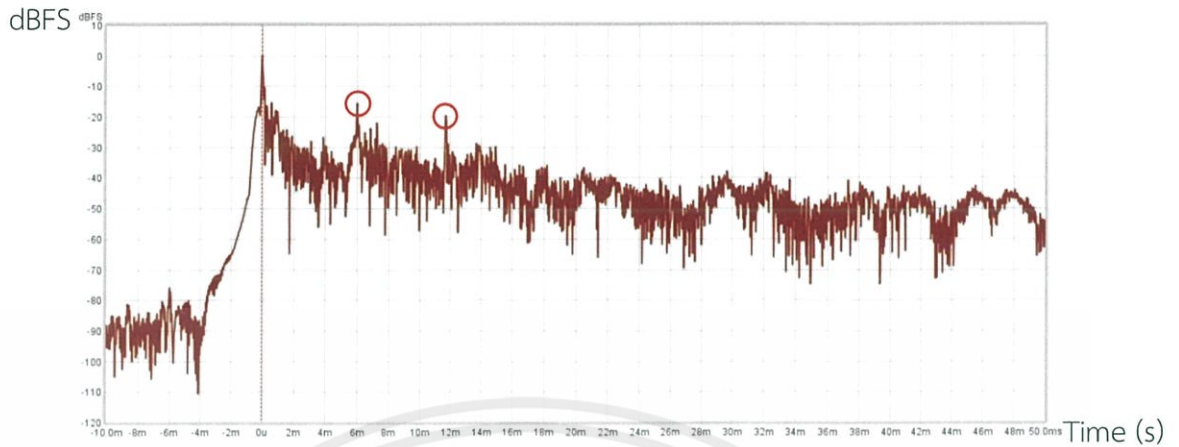
รูปที่ 5.3 ผลการตอบสนองต่อความถี่ จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงห้อง ADR 4

จากการเปรียบเทียบ ผลการตอบสนองต่อความถี่ ของทั้ง 3 ห้องทำให้ทราบว่า ห้อง ADR recording 1 และ 4 เมื่อพิจารณาจากผลในภาพรวมนั้นมีผลการตอบสนองต่อความถี่ที่ค่อนข้างเรียบ (Flat) มีความเหมาะสมแก่การบันทึกเสียง แต่เมื่อพิจารณาในเชิงลึกจะพบว่าห้อง ADR recording 1 มีผลการตอบสนองต่อความถี่ประมาณ 250 เฮิรซ์ ที่ลดลง (Cut) อย่างเห็นได้ชัด แต่จากวัตถุประสงค์การใช้งานของห้องที่เป็นห้องบันทึกเสียงมนุษย์ เมื่อพิจารณาจากช่วงความถี่เสียงพูดของมนุษย์แล้ว และการที่ผลการตอบสนองต่อความถี่เป็นไปในรูปแบบที่ลดลง (Cut) ไม่ใช่สูงขึ้น (Boost) จึงสามารถประเมินได้ว่าผลการตอบสนองต่อช่วงความถี่ที่ลดลงนี้ไม่ใช่ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานห้องแต่อย่างใด แต่ในส่วนของห้อง ADR recording 2 นั้น มีผลการตอบสนองต่อช่วงความถี่ในย่านกลางต่ำที่ช่วง 100 เฮิรซ์ ถึง 300 เฮิรซ์ที่ค่อนข้างสูง และด้วยการตอบสนองที่ค่อนข้างดี (Boost) เป็นช่วงความถี่ จึงมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อกรบันทึกเสียงมนุษย์ ทำให้เสียงมนุษย์ฟังดูไม่เป็นธรรมชาติ จึงพิจารณาว่าห้อง ADR recording 2 มีความเหมาะสมต่อการใช้งานการบันทึกเสียงด้อยกว่าห้อง ADR recording 2 และ 4

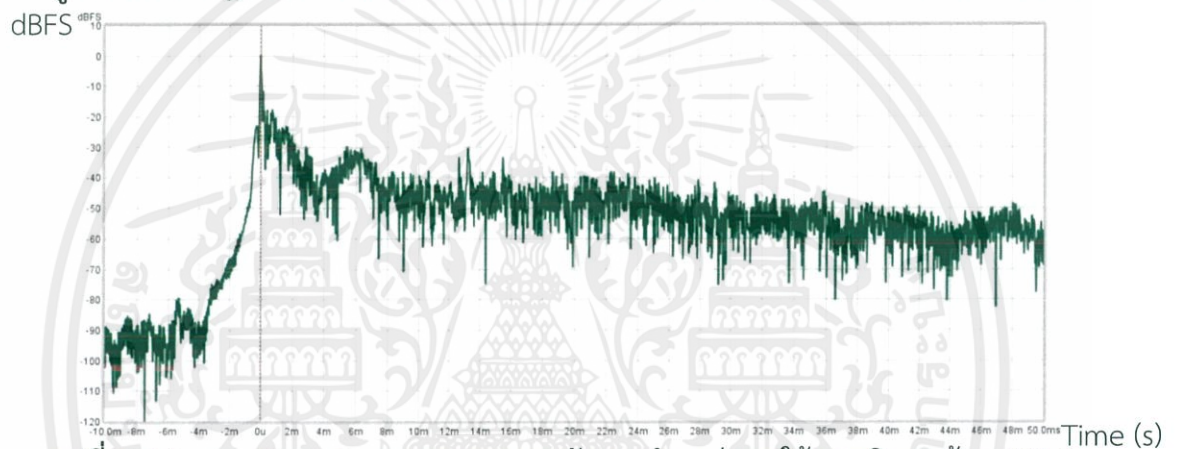
5.1.2 เปรียบเทียบ Energy Time Curve



รูปที่ 5.4 Energy Time Curve จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงของห้อง ADR 1



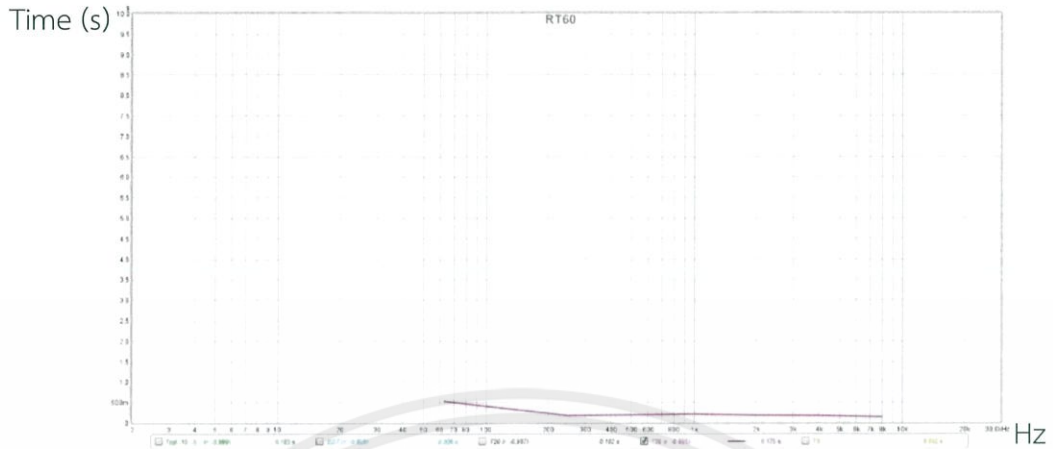
รูปที่ 5.5 Energy Time Curve จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงของห้อง ADR 2



รูปที่ 5.6 Energy Time Curve จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการใช้งานจริงของห้อง ADR 4

จากการพิจารณาเปรียบเทียบการเกิด Spike Energy Time Curve ของทั้ง 3 ห้อง ทำให้ทราบว่าห้อง ADR recording 1 และ 2 นั้น เกิดปัญหาในเรื่องการสะท้อนของเสียง ห้อง ADR recording 1 นั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบโดยพิจารณาแค่การเกิด Spike ที่เกิดจากผลของการสะท้อน Early Reflection ที่เกิดขึ้นจากอะคูสติกของโครงสร้างห้องนั้นจะมีเพียงจุดเวลาเดียว แต่หากพิจารณาผลทั้งหมดจะเกิด Spike ที่เป็นผลจากการสะท้อนของ Early reflection ทั้งหมด 3 Spike โดย Spike ที่ 2 และ 3 ได้ประเมินว่าเกิดจากอุปกรณ์อื่นๆที่ทำการติดตั้งเอาไว้ในห้อง ไม่ได้เกิดจากคุณลักษณะโครงสร้างอะคูสติกของห้อง และในส่วนของห้อง ADR recording 2 กราฟ Energy time curve ได้แสดงให้เห็นถึงการเกิด Spike ขึ้น 2 จุด ซึ่งได้ทำการประเมินว่าเกิดขึ้นจากการสะท้อนของ Early reflection ทั้ง 2 จุด และสุดท้ายในส่วนของห้อง ADR 4 นั้น จากกราฟ Energy time curve ไม่แสดงให้เห็นถึง Spike ในช่วงเวลา และระดับแอมพลิจูดที่นำมาพิจารณาเป็นการเกิด Early reflection แต่อย่างไร จึงได้ทำการสรุปว่าห้อง ADR recording 4 มีความเหมาะสมแก่การใช้งาน บันทึกเสียงที่สุดเมื่อพิจารณาโดยใช้ปัญหาของเสียงสะท้อนเป็นประเด็นหัวข้อที่ใช้ในการพิจารณา

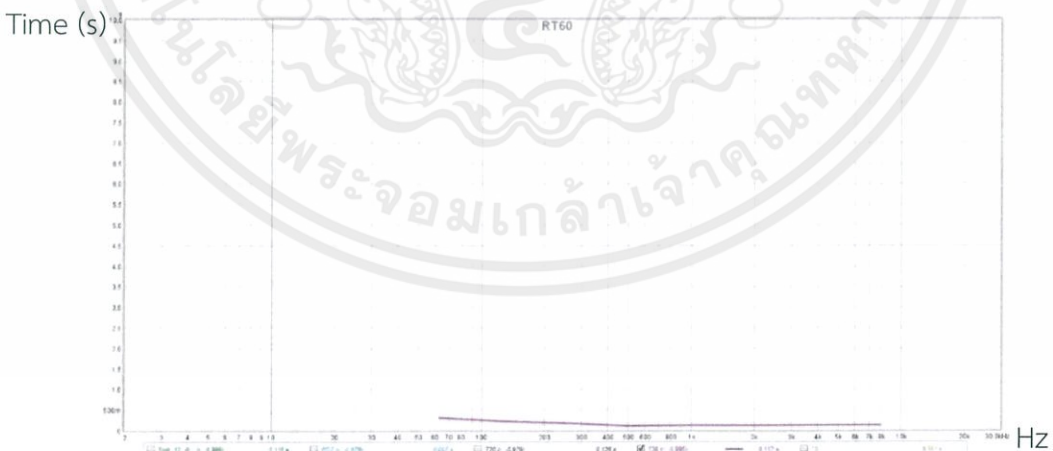
5.1.3 เปรียบเทียบ Reverberation Time



รูปที่ 5.7 Reverberation Time จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการการใช้งานจริง ห้อง ADR 1



รูปที่ 5.8 Reverberation Time จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการการใช้งานจริง ห้อง ADR 2



รูปที่ 5.9 Reverberation Time จากการตรวจวัดตามตำแหน่งการการใช้งานจริง ห้อง ADR 4

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ Reverberation Time ของทั้ง 3 ห้องนั้นทำให้ทราบว่า ทั้ง 3 ห้องไม่มีปัญหาด้าน Reverberation Time เพราะมีค่า Reverberation time ที่น้อยกว่า 0.5 วินาทีซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานทางอะคูสติกของห้องบันทึกเสียง

5.2 สรุปการตรวจวัดห้องห้อง ADR recording 1 2 และ 4

5.2.1 ห้อง ADR recording 1

ผลการตอบสนองต่อช่วงความถี่ของห้อง ADR recording 1 อยู่ในระดับที่ค่อนข้างเรียบ (Flat) ไม่แสดงถึงปัญหาที่เด่นชัดแต่อย่างใด และจากการตรวจวัดและพิจารณา คาดว่าจุดที่เหมาะสมแก่การบันทึกเสียงที่สุดคือบริเวณกึ่งกลางของห้อง แล้วเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งการบันทึกเสียงในปัจจุบันคาดว่าปัญหาในเรื่องของเสียงสะท้อนนั้น จุดตกกระแทกการสะท้อนของเสียงจะอยู่ที่ บริเวณฝ้าเพดานด้านตรงข้ามของผู้พากย์เสียงซึ่งควรทำการปรับปรุงเสริมวัสดุดูดซับเสียงในบริเวณนั้น

5.2.2 ห้อง ADR recording 2

ห้อง ADR recording 2 เมื่อพิจารณาจากผลการตอบสนองต่อความถี่ของห้อง พบว่ามีการตอบสนองที่ค่อนข้างสูง (Boost) ในช่วงความถี่กลางต่ำ ซึ่งที่มาของปัญหาอาจเกิดจากโครงสร้างของห้องที่มีฝ้าเพดานที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดปัญหาเรื่อง Room mode ส่งผลกระทบต่อผลการตอบสนองต่อความถี่ของห้อง และห้อง ADR recording 2 เมื่อพิจารณาเรื่องของเสียงสะท้อน มีจุดที่อาจเป็นจุดตกกระแทกการสะท้อนอยู่หลายจุด

5.2.3 ห้อง ADR recording 4

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการตรวจวัดทั้งหมด Energy Time Curve ของห้อง ADR 4 นั้นไม่แสดงให้เห็นถึง Spike ในช่วงเวลาและระดับแอมพลิจูดที่นำมาพิจารณาเป็นการเกิดปัญหาเรื่องเสียงสะท้อนแต่อย่างใด ผลการตอบสนองต่อความถี่ของห้องที่ค่อนข้างเรียบ (Flat) ไม่มีย่านความถี่ใดที่ตอบสนองได้สูงหรือต่ำจนเกินไป ซึ่งทำการสรุปได้ว่าห้อง ADR recording 4 เป็นห้องที่มีความเหมาะสมในการบันทึกเสียงมากที่สุด

5.3 สรุปผลการดำเนินงาน

ได้ทำการตรวจวัดเก็บข้อมูลทางอะคูสติกของห้องห้อง ADR recording 1 วินิจฉัยปัญหา หาตำแหน่งบริเวณที่เป็นไปได้ว่าเป็นจุดตกกระแทกการสะท้อนของเสียงที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ Early Reflection และหาตำแหน่งที่เหมาะสมแก่การบันทึกเสียงมากที่สุด จากนั้นส่งมอบข้อมูลให้กับบริษัท

ได้ทำการตรวจวัดเก็บข้อมูลทางอะคูสติกของห้องห้อง ADR recording 2 และ ADR recording 4 โดยใช้วิธีการวัดแบบอ้างอิงตำแหน่งการใช้งานในการบันทึกเสียงจริง เปรียบเทียบผลการตรวจกับผลที่ได้จากห้อง ADR recording 1 และส่งมอบข้อมูลให้กับบริษัท

5.4 กรณีศึกษา

ถึงแม้ว่าห้องที่ถูกทำการแก้ไขปัญหาทางอะคูสติกจนอยู่ในระดับที่เหมาะสมตามทฤษฎีแล้ว ในการใช้งานจริงก็อาจจะยังคงมีปัญหาอยู่ โดยในทางทฤษฎีหากได้ทำการเสริมวัสดุทางอะคูสติก

งบนพื้นผิวตั้งแต่ 60 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวเป็นต้นไป จะไม่ทำการพิจารณาความผิดพลาดทางอะคูสติคใดๆแล้ว

วิธีการตรวจวัดปัญหาทางอะคูสติคในเรื่องของการเกิดการสะท้อน วิธีการตรวจวัดที่ดีที่สุดคือการทำจำลองโดยใช้โปรแกรม Simulation แต่ด้วยความซับซ้อนของโครงสร้างห้องที่ได้ทำการปรับปรุงทางอะคูสติคเอาไว้แล้ว อาจทำให้สามารถทำ Simulation ได้ค่อนข้างยาก



บรรณานุกรม

- [1] ชลนภัส พฤษภา และวิรินธร ครองไตรรัตน์. 2561. “โครงการออกแบบระบบอะคูสติคภายในพร้อมติดตั้งระบบโสตทัศนูปกรณ์เพื่อสร้างคุณภาพเสียงที่ดี.” รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์ สาขาวิชา ดนตรีและสื่อประสม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ทรงพล แจ่มแจ่ม. “ความเร็วเสียงในอากาศ.” [Online].
Available: <https://www.liveforsound.com/ความเร็วเสียงในอากาศ>. 2018.
- [3] Richard E. Berg and David G. Stork. 2005. *The Physic Of Sound*. Third Edition. San Francisco. Pearson Education Inc.
- [4] Robert A. Dobie and Susan Van Hemel. 2004. *Hearing Loss Determining Eligibility for Social Security Benefits*. Washington (DC). National Academies Press (US)
- [5] BYJU'S. “Introduction To The Concept Of Beats.” [Online].
Available: <https://byjus.com/physics/beats/>. 2018.
- [6] MATT HIBBARD. “ADR: Automated Dialogue Replacement Tips and Tricks.” [Online]. Available: <https://www.premiumbeat.com/blog/adr-automated-dialogue-replacement-tips-and-tricks/>. 2018
- [7] Nancy Hall. “Speed of Sound.” [Online].
Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/sound.html>. 2018.
- [8] Nyal Mellor. “Early Reflections 101.” [Online].
Available: <http://www.acousticfrontiers.com/early-reflections-101/>. 2018.
- [9] Nyal Mellor. “ROOM MODES 101.” [Online].
Available: <http://www.acousticfrontiers.com/room-modes-101/>. 2018.
- [10] OpenStaxCollege. “Huygens’s Principle: Diffraction.” [Online].
Available: <https://opentextbc.ca/physicstestbook2/chapter/huygenss-principle-diffraction/#import-auto-id1169737080363>. 2018.
- [11] PAROC. “Sound absorption.” [Online].
Available: <https://www.paroc.co.uk/knowhow/sound/sound-absorption/>. 2018.
- [12] Saint-Gobain Ecophon. “Sound absorption.” [Online].
Available: <https://www.ecophon.com/en/acoustic-solutions/acoustic-knowledge-bank/Basic-Acoustics/Sound-absorption/>. 2018.
- [13] The Allen Institute for Artificial Intelligence. “Wave Interference.” [Online].
Available: http://data.allenai.org/tqa/wave_interference_L_1068/. 2018.

- [14] The Physics Classroom. “Interference of Waves.” [Online].
Available: <https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-3/Interference-of-Waves>. 2018.
- [15] The Physics Classroom. “Reflection, Refraction, and Diffraction.” [Online].
Available: <https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-3/Reflection,-Refraction,-and-Diffraction>. 2018.
- [16] University of Rhode Island and Inner Space Center. “How does sound move? Wave Propagation and Huygens’ Principle.” [Online].
Available: <https://dosits.org/science/advanced-topics/how-does-sound-move-wave-propagation-and-huygens-principle/>. 2018
- [17] UNSW Australia. . “Interference beats and Tartini tones.” [Online].
Available: <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/beats.htm>. 2018.
- [18] “The Physic of Sound.” [Online].
Available: <https://homepages.wmich.edu/~hillenbr/206/ac.pdf>. 2018

