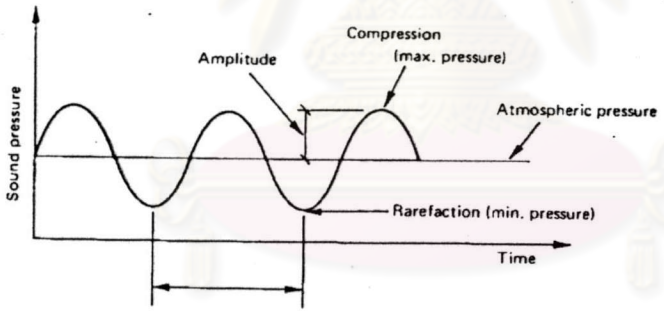
บทที่2

ทฤษฎีและแนวความคิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

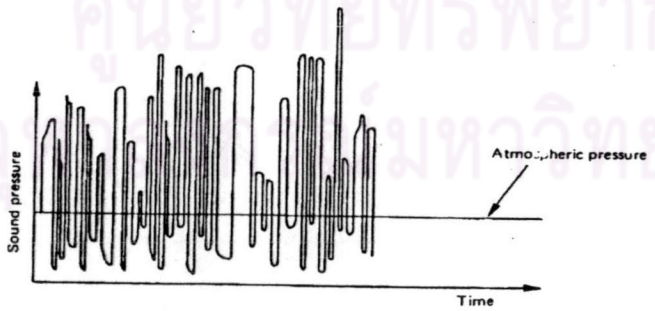
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเสียง

2.1.1 การรับรู้ความถี่ของเสียง

ความถี่นี้คือสิ่งที่มนุษย์รับรู้ เป็นความสูงหรือต่ำของเสียงนั่นเอง โดยเสียงที่มีความถี่สูงกว่ามนุษย์ก็จะรับรู้ว่าเสียงสูงกว่าเช่นกัน เสียงที่เป็น Pure Tone นั้นหมายถึงเสียงที่ความถี่เดียวคงที่ เราจะรับรู้ความสูงหรือต่ำได้ชัดเจน เช่นเสียงที่เกิดจากส้อมเสียง เป็นต้น ส่วนเสียงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินั้นจะมีลักษณะเป็น "Complex Sound" คือเป็นการประกอบกันของเสียงย่อยๆที่มีความถี่และ Amplitude แตกต่างกันมารวมเข้ากันเป็นเสียงที่เราได้ยิน การรวมกันนี้ทำให้เกิดรูปแบบได้มากมายมหาศาล ทำให้เกิดลักษณะเฉพาะของเสียงที่คนเรารับรู้และจำได้ เช่น เสียงพูดของแต่ละคน เสียงเครื่องดนตรี เสียงเครื่องจักรทำงาน เป็นต้น



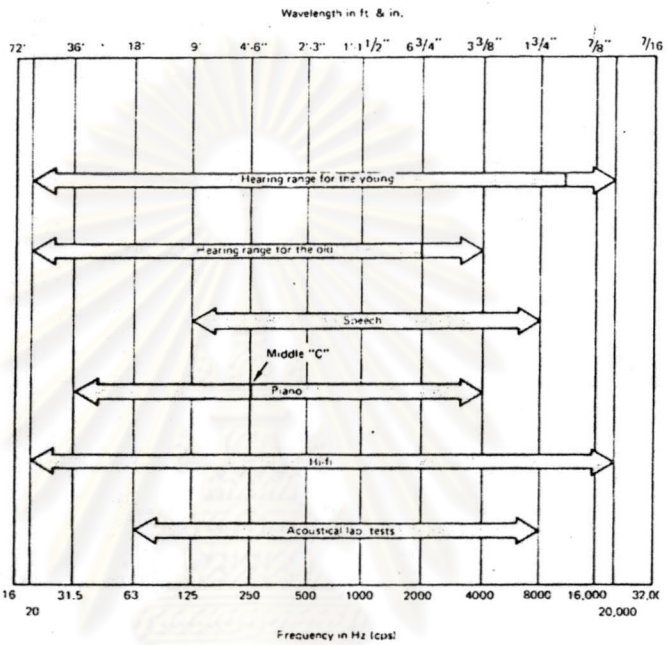
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะคลื่นเสียงที่เกิดจากส้อมเสียง (Pure Tone)



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะคลื่นเสียงที่เกิดจากเสียงในธรรมชาติ (Complex Sound)

โดยปกติแล้วมนุษย์ที่ยังมีประสิทธิภาพในการฟังสมบูรณ์จะได้ยินเสียงที่อยู่ระหว่าง 20–20,000 Hz. ความสามารถนี้จะลดลงตามอายุหรือเมื่อมีการรับเสียงที่มากเกินพอดี ส่วนเสียงพูดของคนนั้นจะให้เสียงในช่วงความถี่ตั้งแต่ 125 – 8,000 Hz อาจแตกต่างกันไปตามเพศและรูปร่างของแต่ละคน

ในการแบ่งช่วงความถี่ของเสียงโดยทั่วไปนั้นเรามักจำแนกออกเป็น 8 ช่วง หรือที่เรียกว่าการแบ่งแบบ Eight octave frequency bands โดยจะใช้ค่ากลางของแต่ละช่วงเพิ่มขึ้นที่ละเท่าตัว คือการแบ่งแบบ 63 , 125 , 250 , 500 , 1000 , 2,000 , 4,000 และ 8,000 Hz โดยความถี่จะเพิ่มเป็น 2 เท่า ซึ่งอาจเปรียบเทียบได้กับโน้ตบนคีย์ของเปียโนตัวโน้ตเดียวกันที่ห่างกัน 1 ช่วงถัดไปนั้น จะมีความถี่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าตัว เราจะได้ยินเสียงที่มีความถี่ต่างกัน 1 เท่านี้เสมือนตัวโน้ตเดียวกันที่อยู่ห่างกันคนละช่วงเสมอ



รูปที่ 2.3 ช่วงความถี่และความยาวคลื่นที่มนุษย์รับรู้ได้

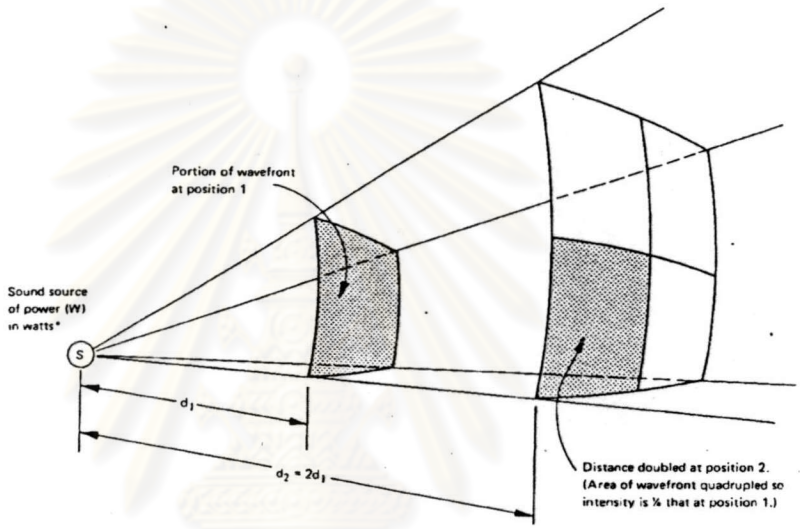
2.1.2 การเคลื่อนที่และความเร็วของเสียง

ความเร็วของเสียงนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความยืดหยุ่นของตัวกลาง ในอากาศที่อุณหภูมิปกตินั้น เสียงจะมีความเร็วอยู่ที่ 1130 ฟุตต่อวินาที หรือ ประมาณ 345 เมตรต่อวินาที (1 เมตร = 3.28 ฟุต) เมื่อพิจารณาทิศทาง การเคลื่อนที่ของอากาศนั้น แม้ในท่อส่งลมปรับอากาศที่มีความเร็วสูงถึง 33 ฟุตต่อวินาทียังเทียบได้ถึง 3 %ของความเร็วเสียง ดังนั้น ทิศทางการไหลของอากาศจึงเรียกได้ว่าไม่มีผลต่อความเร็วเสียงเลย เช่นไม่ว่าผู้สังเกตจะอยู่เหนือลมหรือใต้ลม หากระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเท่ากัน เราจะได้เสียงพร้อมกันเสมอ ในส่วนของอุณหภูมิอากาศก็จะมีผลต่อเรื่องความเร็วของเสียงเช่นกัน ความเร็วที่ถูกต้องของเสียงนั้นสามารถหาได้จากสูตร

$$\text{Speed (cm/s)} = 331.4 + \text{Sq.root}\,(1 + (\text{temperature } ^{\circ}\text{C} / 273))$$

2.1.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของเสียง

หากมีแหล่งกำเนิดพลังงานเสียงหนึ่งวางไว้ในที่โล่ง (Free Field) เสียงจะมีการกระจายออกไปทุกทิศทางรอบแหล่งกำเนิดนั้น ลักษณะเป็นเหมือนทรงกลมที่ขยายตัวออกไปเรื่อยๆ จากภาพเราจะสังเกตเห็นว่า พลังงานเสียงที่ตกลงบนผิวทรงกลมที่มีระยะห่างจากจุดกำเนิด เท่ากับ d_1 (ตำแหน่งที่ 1) จะกระจายออกไปครอบคลุมพื้นที่เป็น 4 เท่าเมื่อเคลื่อนออกไปที่ระยะ d_2 (ตำแหน่งที่ 2) = $2d_1$ หรือระยะมากกว่าเดิม 1 เท่าตัวนั่นเอง



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของเสียงตามระยะทาง

หน่วยที่ใช้บอกปริมาณของพลังงานที่ตกลงในหนึ่งหน่วยพื้นที่นั้น เรียกว่า "ความเข้มของเสียง" (Sound Intensity , I) ซึ่งสมารถคำนวณหาได้จากสูตร

$$\text{Intensity} = \frac{\text{Sound Power}}{\text{Total spherical area}}$$

$$\boxed{I = \frac{W}{4\pi d^2}}$$

โดย W = พลังงานเสียง (Watt)

D = ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด / (cm^2)

I = ความเข้มของเสียง (Watt / cm^2)

ที่ตำแหน่งที่ 1 $W = I_1 4\P d_1^2$ $\quad I_1 4\P d_1^2 = I_1 4\P d_2^2$

ที่ตำแหน่งที่ 1 $W = I_1 4\P d_1^2$ $\quad \therefore I_1/I_2 = (d_1/d_2)^2$

เราเรียกกฎการเปลี่ยนแปลงพลังงานนี้ว่า "Inverse Square Law"

2.1.4 หน่วยวัดความดังของเสียง

ถ้าหากใช้ Intensity เป็นหน่วยวัดความดังของเสียงแล้ว จะพบว่าคนเราสามารถได้ยินเสียงอยู่ในช่วงความเข้มเสียงตั้งแต่ 1 ถึงสิบล้านล้าน (10,000,000,000,000) หากเปรียบเทียบให้เห็นภาพแล้ว หูของคนเราก็เหมือนตาชั่งเครื่องเดียวที่ชั่งได้ตั้งแต่น้ำหนักของเส้นผมไปจนถึงน้ำหนักของตึกระฟ้าสูง 30 ชั้น ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นระบบวัดความดังของเสียงนี้ โดยใช้ Logarithms มาใช้ช่วย เป็นการเปลี่ยนหน่วยจากความเข้มของเสียง (Intensity) มาสู่ระดับความดังของเสียงที่สอดคล้องกับการรับรู้จริงของมนุษย์ (Intensity Level , IL) ซึ่งมีหน่วยเป็น " bel" โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มเสียง (I) กับระดับความดังของเสียง (IL) เป็นดังนี้

$$IL = \log I/Io \text{ (in bels)} \quad \text{หรือ} \quad \boxed{IL = 10 \log I / Io \text{ (in decibels หรือ dB.)}}$$

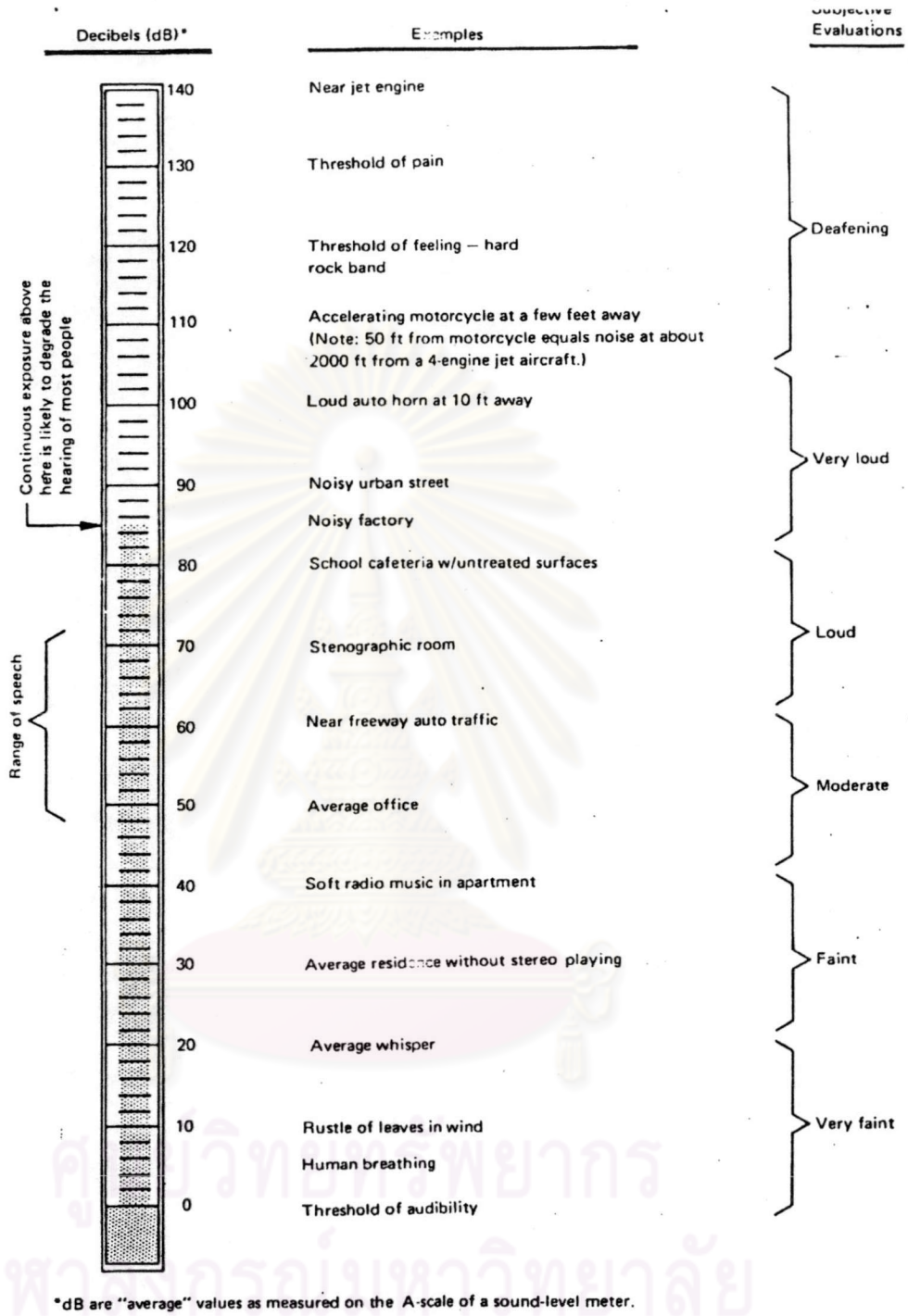
เมื่อ I = ความเข้มของเสียง (Watt / cm^2)

Io = 10^{-16} Watt / cm^2 (คือค่าความเข้มของเสียงต่ำสุดที่คนเราสามารถได้ยินนั่นเอง)

เนื่องจากระดับความดังของเสียงมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิด ดังนั้น เมื่อเราต้องการระบุระดับความดังของแหล่งกำเนิดใดๆ เราจึงต้องมีการบอกระยะห่างที่ใช้วัดควบคู่ไปด้วยเสมอ ระดับความดังสูงสุดที่มนุษย์สามารถรับได้ (Threshold of pain) คือที่ระดับ 130 dB. ทั้งนี้ระดับความดังของเสียงที่ได้จากการวัดอาจมากกว่า 130 dB ก็ได้ เพียงแต่มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้เท่านั้น ส่วนระดับความดังต่ำสุดที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ (Threshold of audibility) ก็คือที่ระดับ 0 dB. โดยที่ระดับความดัง 0 dB. นี้ไม่ได้หมายถึงการที่เสียงมีพลังงานเป็น 0 แต่อย่างใด พลังงานยังคงมีเหลืออยู่เพียงแต่มนุษย์ไม่สามารถจะรับรู้ได้เท่านั้น

แหล่งกำเนิดเสียงต่างๆในชีวิตประจำวันจะมีระดับความดังที่แตกต่างกันโดยสังเขปดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ระดับความดังจากแหล่งกำเนิดเสียงต่างๆ ในชีวิตประจำวัน

2.1.5 การเปลี่ยนแปลงระดับความดังของเสียง

ในการเปลี่ยนระดับความดังนั้น ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดจะมีผลโดยตรง จากความสัมพันธ์ระหว่าง IL และ I เราจะพบว่า ใน Free Field ค่า IL จะลดลง 6 dB เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น 1 เท่าตัว การเปลี่ยนแปลงระดับความดัง ที่มนุษย์สามารถรับรู้ความแตกต่างได้นั้น อาจแตกต่างกับบ้างเล็กน้อยตามแต่ความสามารถในการได้ยิน แต่โดยเฉลี่ยแล้ว ความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง 3 dB เป็นความดังที่คนสามารถรับรู้ได้ ความต่างกัน 5 dB จะเริ่มสังเกตเห็นชัดเจน ความต่างกัน 10 dB จะรับรู้ว่าดังขึ้นเป็น2 เท่า (หรือเบาลงครึ่งหนึ่ง) ส่วนความแตกต่างที่ระดับ 18 dB ขึ้นไปจำให้ร่างกายเกิดการตอบสนองในลักษณะต่างๆโดยอัตโนมัติได้ การเปลี่ยนระดับความดังของเสียงนี้คำนวณได้จากสูตร

$$NR = 10 \log I_1/I_2$$

โดย NR คือความแตกต่างของระดับความดัง (dB)

I_1 และ I_2 เป็นความเข้มของเสียงที่ต่างกัน

พบว่าหากทำการเพิ่ม ความเข้มเสียงของแหล่งกำเนิดขึ้นเป็น 2 เท่า หรือเพิ่มแหล่งกำเนิดขึ้นอีก 1 แหล่ง ระดับความดังนั้นจะไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แต่จะเพิ่มขึ้น น้อยมากเพียงไม่กี่ dB ทั้งนี้เพราะผลของการคำนวณตามสูตร Logarithms นั่นเอง ตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดเสียงหนึ่งมีระดับความดัง ณ ตำแหน่งผู้สังเกตอยู่ที่ 60 dB หากเพิ่มแหล่งกำเนิดเสียงนั้นเป็น 16 แหล่ง จะพบว่าระดับความดังของเสียงจะเท่ากับ 79 dB เท่านั้น เราจะพบอีกว่าต้องใช้แหล่งกำเนิดเสียงนี้ถึง 10 ล้านแหล่งจึงจะทำให้เกิดระดับความดังที่ 130 dB (คือระดับสูงสุดที่ก่อให้เกิดความเจ็บปวดแก่การรับฟัง)

การรวมระดับความดังนอกจากทำโดยการแทนสูตร Logarithms คำนวณย้อนกลับแล้ว กล่าวคือ

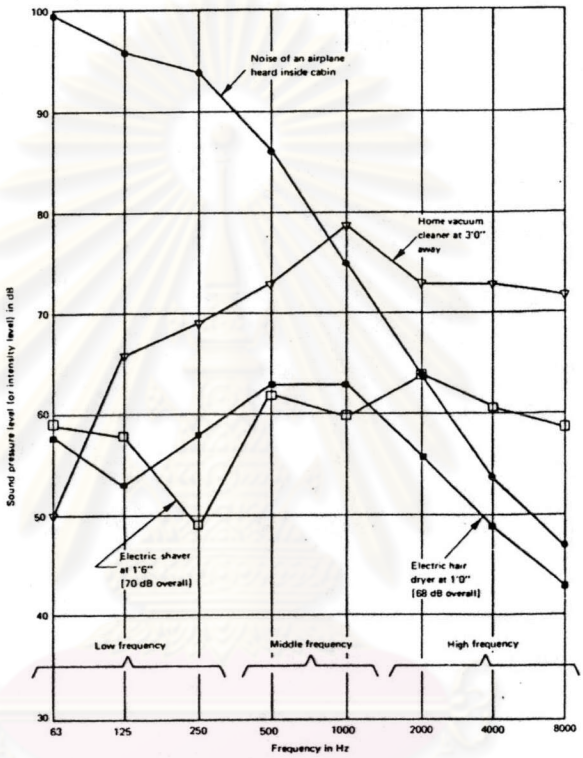
$$IL \text{ รวม (dB)} = 10 \log (10^{3L1/10} + 10^{3L2/10} + 10^{3Ln/10})$$

การรวมระดับความดังนอกจากจะทำโดยการแทนสูตรดังกล่าวแล้ว ยังสามารถใช้วิธีการประมาณได้ด้วย โดยมีหลักในการคำนวณคือ

ความแตกต่างของระดับความดัง ระหว่าง 2 แหล่งกำเนิด	จำนวน dB ที่บวกเพิ่มให้แก่ แหล่งกำเนิดที่มีระดับความดังสูงกว่า
0-1 dB	+ 3dB
2-3 dB	+ 2dB
4-8 dB	+ 1dB
9 dB ขึ้นไป	+ 0dB

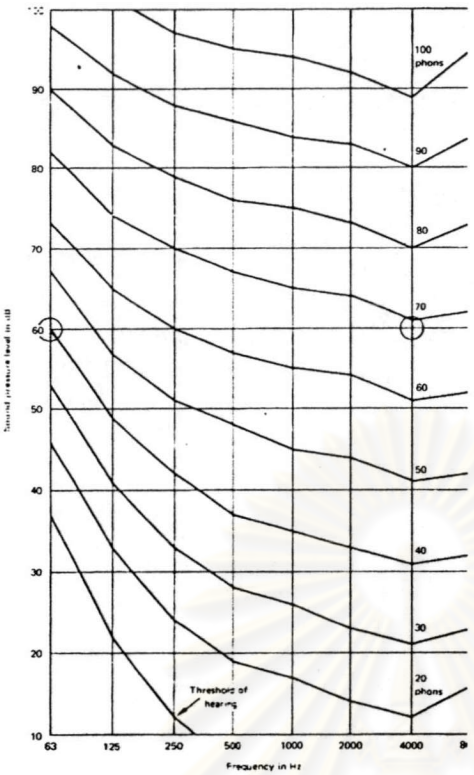
2.1.6 ระดับความดังกับช่วงความถี่

เสียงที่มีลักษณะเป็น Complex Sound นอกจากจะมีความครอบคลุมในช่วงความถี่มากมายแล้ว ก็ยังมีความแตกต่างในระดับความดังของแต่ละช่วงความถี่อีกด้วย ตัวอย่างเช่น เสียงของรถบรรทุกในช่วงความถี่น่าจะมีระดับความดังมากกว่าช่วงความถี่สูง เป็นต้น ตารางที่ใช้แสดงค่าระดับความดังที่ช่วงความถี่ต่างๆของแหล่งกำเนิดแต่ละประเภท เรียกว่า Sound Spectra



รูปที่ 2.6 แสดงระดับความดังในแต่ละช่วงความถี่ของแหล่งกำเนิดประเภทต่างๆ

ดังนั้นเมื่อเราระบุระดับความดังของเสียงที่วัดได้จะมีการระบุว่าทำการวัด ณ ความถี่ใดเสมอ อย่างไรก็ดีในการรับรู้ของมนุษย์นั้น ระดับเสียงที่ในช่วงความถี่ที่ต่างกันแม้จะมีระดับความดังในหน่วยของ dB ที่เท่ากัน อาจมีความดังที่มนุษย์รับรู้แตกต่างกันไป การทดลองเปรียบเทียบวัดการรับ ความดังที่ช่วงความถี่ต่างๆของมนุษย์ ได้ผลสรุปออกมาดังตารางที่เรียกว่า Equal Loudness Curves หรือแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความดัง



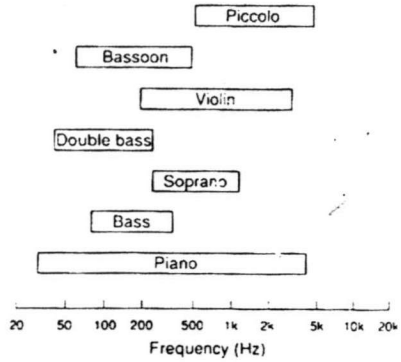
รูปที่ 2.7 แสดงตารางแผนภูมิค่าความดัง (Equal Loudness Curve)

ความรู้สึกความรับรู้ความดังในสมองมนุษย์นี้เรียกว่า Phon ช่วงความถี่ซึ่งต่อกันจะมีระดับความดังของเสียงไม่เท่ากันที่จะทำให้ได้ค่า Phon ที่เท่ากัน เช่นคนจะรับรู้ว่า ที่ช่วง 4,000 Hz 60 dB จะมีความดังเท่ากับ 65 Hz ที่ 83 Hz ที่ 83 dB คือ 70 Phon เป็นต้น

2.1.7 ธรรมชาติของเสียงดนตรีและเสียงของมนุษย์

ทั้งเสียงของมนุษย์และเสียงของเครื่องดนตรีนั้นมีช่วงความถี่ที่เรียกได้ว่าครอบคลุมทุกช่วงความถี่ในการได้ยินของมนุษย์ ความถี่ในช่วงตั้งแต่ 10,000 Hz ขึ้นไป จะไม่มีผลสำคัญต่อการรับรู้มากนัก เสียงจากการพูดจะมีความถี่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 Hz ขึ้นไป

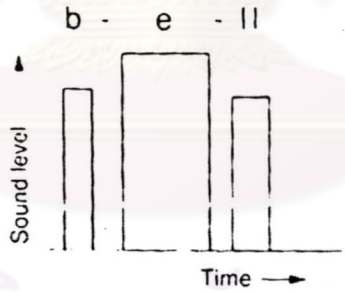
เครื่องดนตรีส่วนใหญ่นั้นให้เสียงที่เกิดจากการสั่นพ้อง (Resonance) ทำให้ใช้พลังงานเพียงน้อยนิดในการสร้างเสียงเหล่านั้นขึ้น หลักการของการสั่นพ้องนั้นเกิดจากความถี่ธรรมชาติของวัตถุตามความยาวของสายหรือท่อเป็นต้น เสียงจากเครื่องดนตรีนั้นไม่มีความยาวของพยางค์ตายตัว ส่วนของการพูดนั้นมีจำนวนพยางค์ประมาณ 5 พยางค์ต่อวินาที



รูปที่ 2.8 แสดงช่วงความถี่ของเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ

แหล่งกำเนิดเสียงนั้นยังมีลักษณะเฉพาะที่เกิดจากปริมาณพลังงานอีกด้วย การสร้างเสียงนั้นมักเป็นกระบวนการ ที่มีประสิทธิภาพต่ำมาก ลำโพงนั้นใช้พลังงานได้เพียงแค่ 2 % ของพลังงานที่ป้อนไปทั้งหมดเพื่อมาเปลี่ยนเป็นพลังงานเสียง V (1,000 Watt ได้เสียงแค่ 20 Watt) เสียงดนตรีออเคสตร้าที่ดังที่สุดยังให้พลังงานเพียงแค่ 2.5 Watt เท่านั้น ส่วนเสียงพูดของมนุษย์นั้นอยู่แค่เพียง 25 μW เท่านั้น สำหรับดนตรีออเคสตร้านั้นเสียงในระดับ fortissimo ผู้ฟังควรจะได้ยินที่ความดังประมาณ 60 dB เพื่อให้เกิดอารมณ์ของเพลงที่เหมาะสม

ทั้งการพูดและเสียงดนตรีสามารถแปลงออกมาเป็นรูปแผ่นภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระดับความดังของเสียงได้ ดังภาพ



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระดับความดังของเสียง

แผนภูมินี้สามารถนำมาใช้ในเรื่องการวิเคราะห์การซ้อนทับกันของเสียง ความชัดเจนของเสียงอันเกิดจากความก้องภายในห้องต่อไป

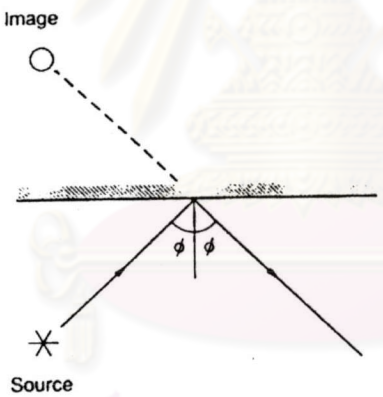
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.8 พฤติกรรมของเสียงเมื่อตกกระทบวัตถุ

เมื่อเสียงเดินทางมากระทบกับตัวกลางนั้นจะเกิดพฤติกรรมต่างๆกันไปตามลักษณะ , ขนาดของตัวกลาง รวมทั้งความถี่และความยาวคลื่นของเสียงนั้นๆด้วย พฤติกรรมเหล่านั้นอาจแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ คือ

การสะท้อน (Reflection)

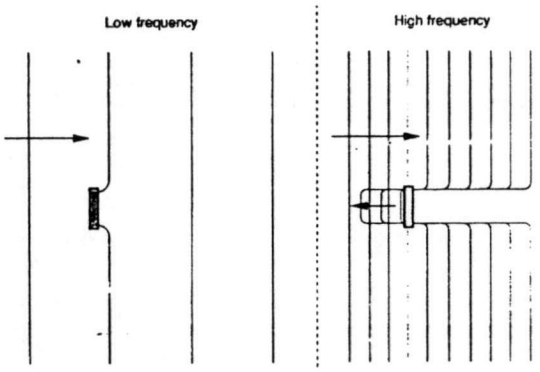
การสะท้อนของเสียงและแสงนั้นมีลักษณะคล้ายกันคือ จะมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่ทำกับระนาบตั้งฉากของผิววัตถุที่เท่ากัน ณ ตำแหน่งที่ทำการตกกระทบคล้ายกับการมีแหล่งกำเนิดเสียงที่ 2 (Image) อยู่หลังผิวสะท้อนนั้น แต่หากเปรียบเทียบแล้วในขณะที่ กระจกบานเล็กๆสามารถสะท้อนแสงให้เป็นระเบียบได้ แต่สำหรับเสียงนั้น ขนาดของพื้นผิวที่จะสะท้อนเสียงให้มีทิศทางเป็นระเบียบ (มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน) ได้นั้น จะต้องมีขนาดใหญ่กว่ามาก เนื่องจากความยาวคลื่นที่ยาวกว่าแสงมากเช่นกัน กระจกสำหรับเสียงนั้น ได้แก่ แผ่นทึบตันขนาดใหญ่ที่มีผิวเรียบเท่านั้น โดยจะต้องมีความกว้างมากกว่า 4 เท่าของความยาวคลื่น



รูปที่ 2.10 แสดงการสะท้อนของเสียง

การเลี้ยวเบน (Diffraction)

ในกรณีของคลื่นเสียงตกกระทบสิ่งกีดขวางที่กั้นอยู่ ช่วงคลื่นความถี่สูงนั้นมักจะมีการสะท้อนที่คล้ายแสง และก่อให้เกิดช่วงเงาเสียง (Shadow Zone) ขึ้นหลังวัตถุกีดขวางนั้น ซึ่งแตกต่างกันอย่างมากกับพฤติกรรมของช่วงคลื่นความถี่ต่ำ โดยเฉพาะที่มีความยาวคลื่นมากกว่าขนาดของสิ่งกีดขวางนั้น การบิดเบือนของแนวเสียงที่เรียกว่าการเลี้ยวเบนก็จะเกิดขึ้น ส่วนช่วงเสียงความถี่กลางๆนั้น จะมีพฤติกรรมที่ไม่แน่นอน โดยสรุปแล้วการเลี้ยวเบนเป็นพฤติกรรมของเสียงคลื่น ความถี่ต่ำที่มีต่อพื้นผิวตกกระทบขนาดเล็กนั่นเอง



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของเสียง

การกระจาย (diffusing)

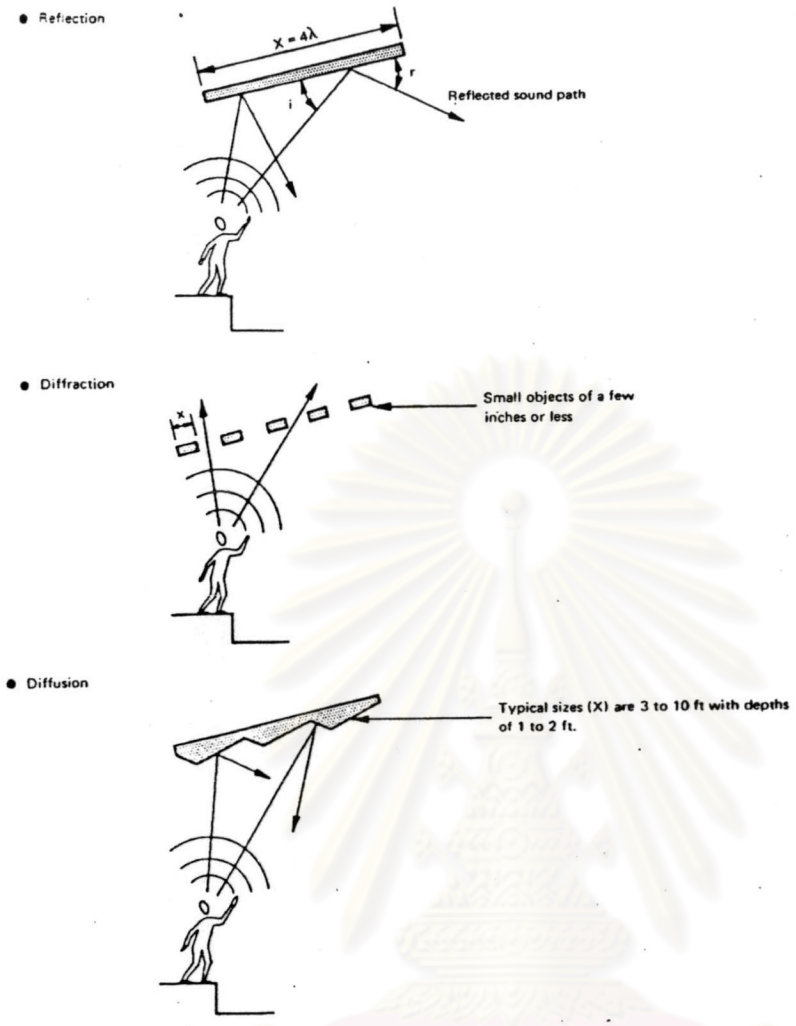
ในขณะที่ผิวหยาบของกระดาษหรือปูนทำหน้าที่กระจายแสงไปในทิศทางต่างๆ พื้นผิวที่จะช่วงกระจายเสียงจะมีขนาดความหยาบของผิว ใหญ่กว่ามาก กล่าวคือมีลักษณะเส้นรอบที่ไม่เรียบ มีความนูนลึกของพื้นผิวที่ต่างกันระหว่าง 0.3 – 0.6 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น ของช่วงที่ต้องการให้กระจายด้วย (ระยะนี้คือประมาณเท่ากับความยาวคลื่นนั่นเอง) พื้นผิวที่มีเส้นรอบที่เรียบขึ้นหรือระดับผิวไม่ต่างกันมากนัก ก็จะกระจายเฉพาะช่วงเสียงความถี่สูงเท่านั้น

การดูดกลืน (Absorption)

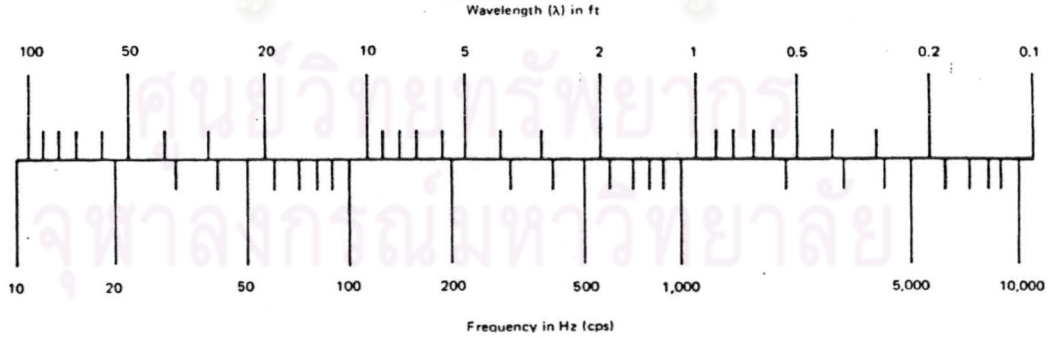
ในการสะท้อน กระจายหรือเลี้ยวเบนนั้น เป็นลักษณะการตกกระทบในแบบที่ไม่เสียพลังงาน แต่ในความเป็นจริงนั้น การตกกระทบแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนพลังงานเสียงเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นเช่น ความร้อน, การสั่นสะเทือนภายในวัตถุที่ตกกระทบนั้นๆ วัสดุแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดกลืนเสียงนี้ไม่เท่ากัน แต่โดยทั่วไปแล้ว วัสดุที่มีโพรงหรือรูพรุนเช่น ผ้า เส้นใย พรม จะมีความสามารถในการดูดซับเสียงได้มาก ช่วงคลื่นเสียงที่ดูดซับได้ก็จะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุน และความยืดหยุ่นเช่นกัน การจะดูดซับเสียงที่ความถี่ต่ำนั้นทำได้ค่อนข้างยากกว่า ขนาดของรูพรุนอาจจะใหญ่จนเป็นเหมือนช่องหน้าต่าง ภายในช่องอาจจะมีการใช้วัสดุยืดหยุ่นขึงเพื่อให้เปลี่ยนพลังงานเสียงความถี่ต่ำเหล่านี้ให้กลายเป็นการสั่นสะเทือนให้มากที่สุด

	Reflection	*Diffusion*	*Absorption*
Light	Mirror	Matt white surface	Matt black surface
Sound	Hard massive smooth surface	Massive surface with projections of 0.3–0.6 m	Thick porous material

รูปที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติการสะท้อนของเสียงและแสง



รูปที่ 2.13 ความกว้างของพื้นผิวตกกระทบที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ต่างกัน



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นเสียงและความถี่ในสภาวะปกติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.9 พฤติกรรมของเสียงในห้องปิดล้อม

ณ ตำแหน่งใดๆภายในห้องนั้น จะพบว่าผู้สังเกตจะได้รับเสียงจากแหล่งกำเนิดใน 2 ลักษณะได้แก่

เสียงที่ออกจากแหล่งกำเนิดและเดินทางมาถึงผู้สังเกตโดยตรง (Direct Sound)

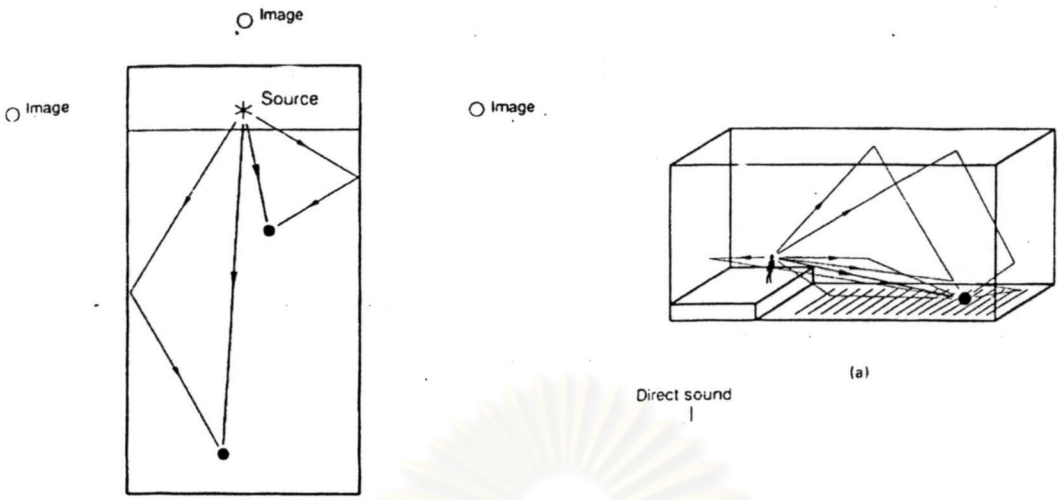
เสียงลักษณะนี้จะมีการเดินทางเป็นเส้นตรงที่ลากระหว่างแหล่งกำเนิดและผู้สังเกตโดยไม่มีสิ่งกีดขวาง หรือการสะท้อนกับวัตถุใดๆ พฤติกรรมของ Direct Sound นี้จะเหมือนกับพฤติกรรมของเสียงในที่โล่ง (Free Field) นั่นคือ จะมีความเข้มแปรผกผันกับระยะห่างจากแหล่งกำเนิดกำลังสอง หรือ ลดลง 6 dB ทุกๆระยะทางที่เพิ่มขึ้น 2 เท่านั่นเอง

Direct Sound เป็นปัจจัยหลักแรกที่ต้องคำนึงในการจัดวางตำแหน่งของผู้ฟังกับแหล่งกำเนิด เช่น ผู้ฟังทุกที่นั่งในห้องประชุมจะต้องได้ยิน Direct Sound ให้ชัดเจนที่สุดโดยไม่มีการบังจากสิ่งกีดขวาง หรือ ผู้ฟังคนอื่น ซึ่งหลักการโดยทั่วไป นั้นก็จะสอดคล้องกับการตรวจสอบแนวการมองเห็นของผู้ฟังไปในตัว

เสียงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแล้วสะท้อนกับผิววัตถุมาสู่ผู้สังเกต (Reflection)

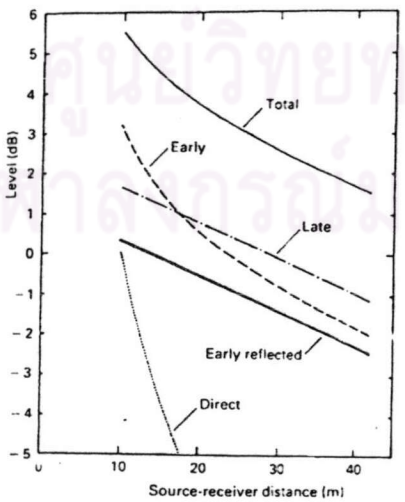
โดยปกติแล้วเสียงจะออกมาจากแหล่งกำเนิดในแทบทุกทิศทาง. หากเราอยู่กลางแจ้ง เราจะได้ยินเสียงจากแหล่งกำเนิดที่วิ่งเข้าหาเราในทิศทางที่เราสังเกตโดยตรงเท่านั้น แต่ในพื้นที่ปิดล้อม เราจะได้รับเสียงที่กระจัดกระจายออกไปในทิศทางอื่นๆด้วย ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติทางการสะท้อนของวัสดุที่ประกอบกันเป็นพื้นที่ปิดล้อมนั้น ในหอประชุมขนาดใหญ่ เราอาจได้ยินการสะท้อนมากกว่า 8,000 ครั้งในเวลาเพียง 1 วินาที การสะท้อนของเสียงนี้อาจมีผลทำให้เราได้ยินเสียงจากแหล่งกำเนิดเสมือนมีระดับความดังสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการรวมตัวกันของเสียงจากแหล่งกำเนิดโดยตรงและการสะท้อนนั่นเอง ซึ่งอาจเพิ่มระดับความดังขึ้นได้อีกถึง 3 dB (เมื่อ Direct Sound และเสียงสะท้อนจาก 1 ทิศทางมีระดับความดังเท่ากันหรือมากกว่าในกรณีที่มีเสียงสะท้อนจากหลายแหล่ง)

การสะท้อนของเสียงนั้น สามารถสะท้อนต่อกันได้จากแผ่นผิวหนึ่งไปสู่อีกแผ่นผิวหนึ่ง โดยการสะท้อนจะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆจนกว่าพลังงานจะหมดไป เนื่องจากการดูดซับ (Absorption) ของพื้นผิวสะท้อน เสียงที่สะท้อนไปมาในห้องนี้อาจมีการสะท้อนไปมาหลายครั้งก่อนจะมาถึงผู้ฟังนั้น อย่างไรก็ดี เสียงสะท้อนที่จะมีผลในการช่วยเพิ่มระดับความดังของ direct sound และควรคำนึงถึงในการออกแบบมากที่สุด คือ เสียงที่เกิดจากการสะท้อนครั้งแรก หรือ early reflections เสียงสะท้อนครั้งแรกนี้อาจเกิดจากผนัง, ฝ้าเพดาน หรือ พื้น ทั้งด้านหลังแหล่งกำเนิด ระหว่างแหล่งกำเนิดถึงผู้ฟังและด้านหลังผู้ฟัง เสียงสะท้อนนี้จะเดินทางมาถึงผู้ฟังหลังจาก direct sound ในระยะเวลาต่างๆขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นทางที่เสียงเดินทาง และเสียงที่เราได้รับจากการสะท้อนนี้จะมีระดับความดังน้อยกว่าdirect sound



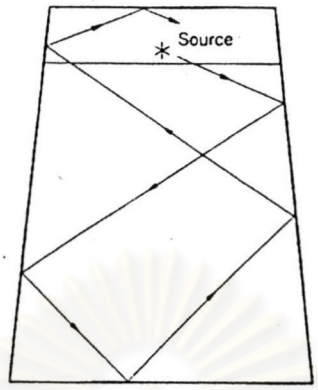
รูปที่ 2.15 แสดง Direct และ Reflect Rays

หูของคนเรานั้นสามารถรวมระดับความดังของ early reflection บางส่วนเข้ากับ direct sound ได้ ทั้งนี้ จะมากน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับความยาวของแต่ละพยางค์ที่เกิดจากแหล่งกำเนิด สำหรับการพูดนั้น early reflection ที่เกิดขึ้นในช่วง 0.05 วินาที หลังจาก direct sound นั้น สามารถนำมารวมกับระดับความดังของ direct sound ได้ ส่วนดนตรีที่มีความยาวของพยางค์มากกว่า อาจนำ early reflection ในช่วง 0.08 วินาที หลังจากdirect sound มารวมได้ การออกแบบโดยคำนึงถึง early reflection จึงมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะในหอประชุมขนาดใหญ่ จากการทดลองวัด เราพบว่า ที่จากระยะ 10 ไปถึง 40 เมตรจากเวที ระดับความดังจาก direct sound ลดลงไปถึง 12 dB แต่ระดับความดังของ early reflection ที่อยู่ในช่วง 0.08 วินาทีนั้น ลดลงไปเพียง 5 dB เท่านั้น ดังนั้น early reflection จึงมีผลต่อระดับเสียงในส่วนท้ายที่ห่างจากเวทีเป็นอย่างมาก



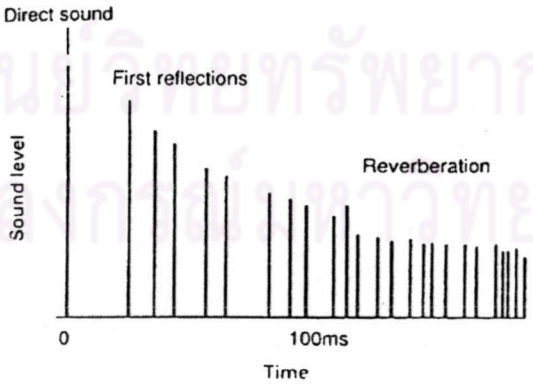
รูปที่ 2.16 แสดงการรวมพลังงานของ Direct Sound และ Reflected Sound ณ ตำแหน่งต่างๆในห้อง

หลังจากที่ผู้ฟังได้ยินเสียงจาก direct sound ตามมาด้วยกลุ่มของ early reflection แล้ว เสียงที่ไม่ได้โดนดูดซับยังคงจะสะท้อนต่อไประหว่างพื้นผิวต่างๆดังที่แสดงให้เห็นในภาพ



รูปที่ 2.17 แสดงการสะท้อนหลังจาก Early Reflection

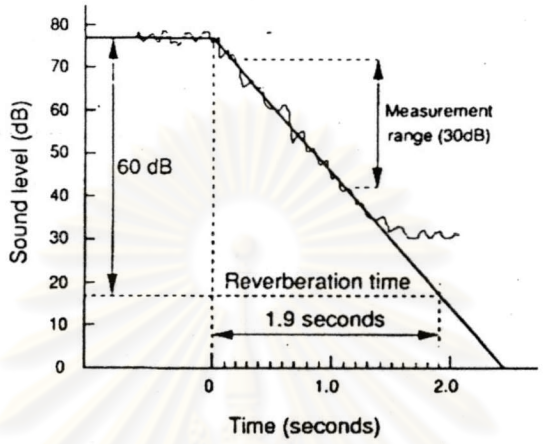
เสียงที่สะท้อนไปมานี้มีพลังงานเหลืออยู่ไม่สูงนักแต่ก็มีการวิ่งมาถึงผู้ฟัง เป็นจำนวนที่ถี่มาก และกินระยะเวลานานกว่าพลังงานเสียงทั้งหมดจะถูกดูดกลืนไป สิ่งนี้ทำให้เกิดลักษณะความก้องของเสียงภายในห้องเป็นระยะเวลาหนึ่ง แม้ว่าแหล่งกำเนิดเสียงจะหยุดส่งพลังงานออกมาแล้ว เสียงก้องนี้เรียกว่า "Reverberant sound" ซึ่งมักเกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากได้ยิน early reflection หรือคือประมาณ 0.1 วินาทีหลังจาก direct sound เป็นต้นไป (Early Reflection จะอยู่ในช่วง 0.01-0.1 วินาทีหลังจาก direct sound) ดังแสดงในแผนภาพที่เรียกว่า "Echogram"



รูปที่ 2.18 Echogram

2.1.10 Reverberation time (RT)

เมื่อเวลาผ่านไป Reverberant sound นี้จะมีการลดระดับความดังอย่างสม่ำเสมอเป็นเชิงเส้นตรง เมื่อนำมา plot ในหน่วยของ dB ระยะเวลาที่ใช้ในการลดระดับความดังลง 60 dB หลังจากแหล่งกำเนิดหยุดให้พลังงานกลับมาอยู่ที่ระดับ background noise เรียกว่า Reverberation time (RT) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในการบอกถึงคุณสมบัติในการก้องเสียงของห้อง ดังแสดงในภาพ

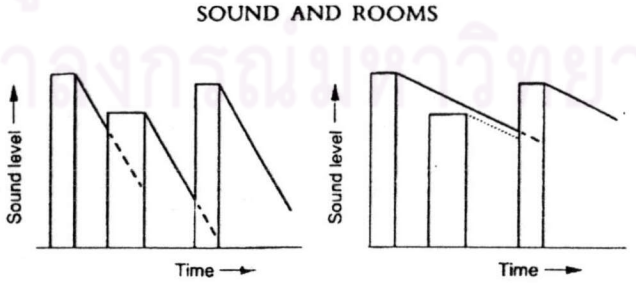


รูปที่ 2.19 แสดงการหาค่า RT จาก Echogram

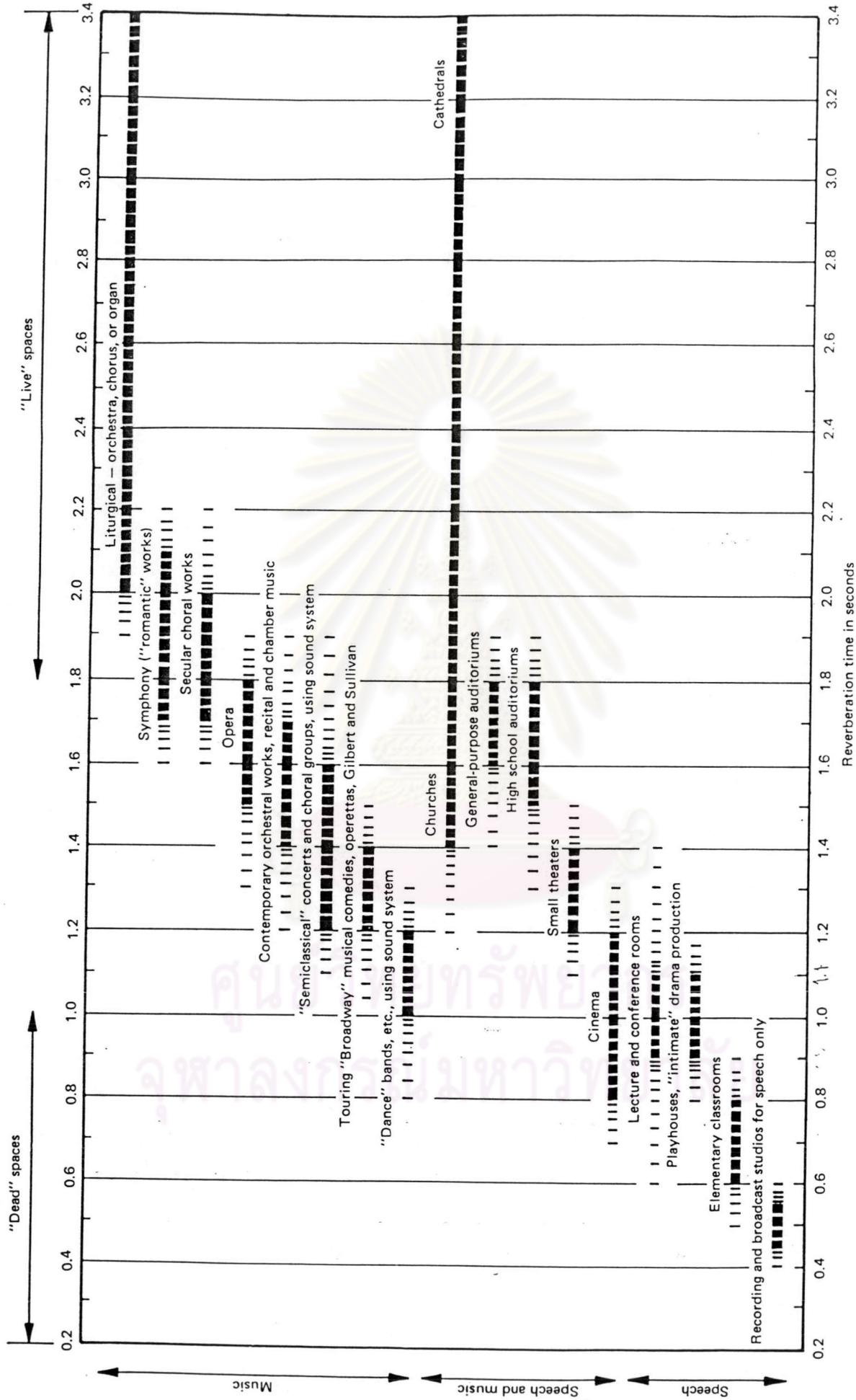
โดยการวัดระยะเวลาอาจใช้เฉพาะช่วงที่มีการลดระดับความดังลงอย่างสม่ำเสมอ แล้วเอามาคูณเทียบสัดส่วนได้

ในห้องที่มีการใช้งานต่างกัน ค่าของ Reverberation time ที่เหมาะสมก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย ค่าRT ที่มากเกินกำหนดจะทำให้เสียงก้องคลุมเครือ ไม่สามารถแยกหัวเสียงได้ ส่วนค่า RT ที่น้อยเกินกำหนดจะทำให้เสียงสั้นแห้งเหมือนฟังอยู่ในพื้นที่เปิดโล่ง ค่า RT ที่เหมาะสมทำให้เสียงชัดเจน และได้สุนทรีย์ในการรับฟัง ตัวอย่างเช่น ห้องที่เหมาะสมต่อการพูดจะมี RT ประมาณ 1 วินาที ส่วนห้องที่เหมาะสมกับวงซิมโฟนี่จะมี RT ประมาณ 2 วินาที เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.20 แสดงความชัดของเสียง ในห้องที่มีค่า RT ต่างกัน



รูปที่ 2.21 แสดงค่า Reverberation time ที่เหมาะสมต่อการใช้งานของห้องประเภทต่างๆ

ในห้องประเภทเดียวกัน ห้องขนาดใหญ่ควรมีค่า RT ใกล้ไปทางด้านต่ำ ในรูป 2.24 เป็นการแสดงค่า RT ที่ Mid-Frequency คือช่วงตั้งแต่ 500-1000 Hz.เท่านั้น ในความเป็นจริงค่า RT นี้ จะมีความต้องการมากน้อยต่างกันในแต่ละช่วงความถี่ด้วย . ที่ความถี่สูงกว่า 1000Hz. ค่า RT ที่เหมาะสมจะต่ำลงกว่าช่วง Mid-frequency เล็กน้อย สำหรับการพูดแล้ว ค่า RT ที่เหมาะสมจะค่อนข้างเท่ากันระหว่าง Mid-frequency กับ Low-frequency แต่สะหรับดนตรีนั้น ค่า RT ที่เหมาะสมของ Low-frequency จะสูงขึ้นอีกประมาณ 50% ของค่า RT ที่ Mid-frequency

ในการคำนวณค่า RT ของห้องนั้น มีวิธีคิดโดยรวม

โดยใช้สูตร

$$RT = 0.16\, V/a$$

เมื่อ V คือปริมาตรของห้องในหน่วย m^3

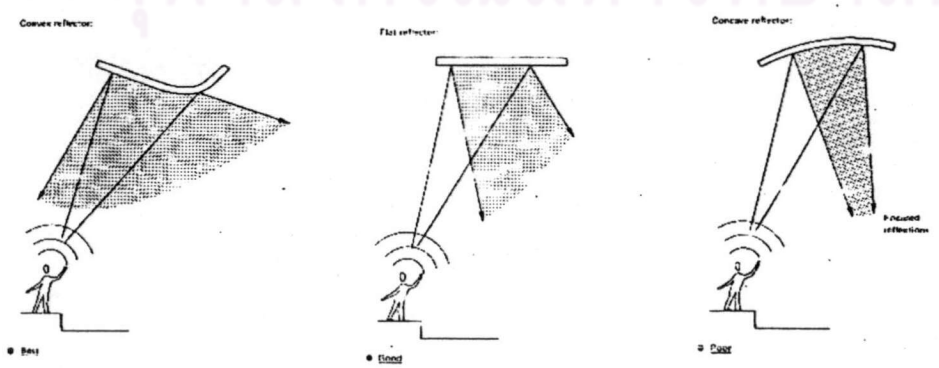
a คือ Total Room Absorption คือพื้นที่ของแต่ละวัสดุคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุนั้นๆ รวมกันจนครบทุกวัสดุ นั่นคือ

$$a = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 + \alpha_3 A_3 \ldots\ldots + \alpha_n A_n$$

วิธีนี้เป็นการตรวจสอบ RT โดยรวมของห้อง แต่หากเรารู้ Echogram ของแต่ละจุดได้เราก็จะสามารถตรวจสอบ RT จริงเฉพาะจุดนั้นได้ (โดยตรวจสอบช่วงเวลาที่ระดับเสียงลดลง 60 dB.เป็นเกณฑ์)

2.1.11 การควบคุมการสะท้อนของเสียง

ทิศทางของการสะท้อนนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวแล้ว ในการออกแบบและควบคุม Early Reflections เรายังต้องคำนึงถึงรูปร่างของพื้นผิวสะท้อนด้วย พื้นผิวสะท้อนที่มีรูปร่างโค้งนูน (Convex) จะมีทิศทางในการกระจายเสียงที่กว่าง ส่วนผิวสะท้อนที่มีรูปร่างโค้งเว้า (Concave) จะมีผลให้เกิดการรวมเสียงของการสะท้อน (Focused Reflections) ทำให้เกิดพื้นที่เล็กๆที่มีระดับความดังของเสียงมากกว่ารอบข้าง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเรามักจะหลีกเลี่ยงพื้นผิวโค้งเว้าในการออกแบบควบคุม Early Reflections

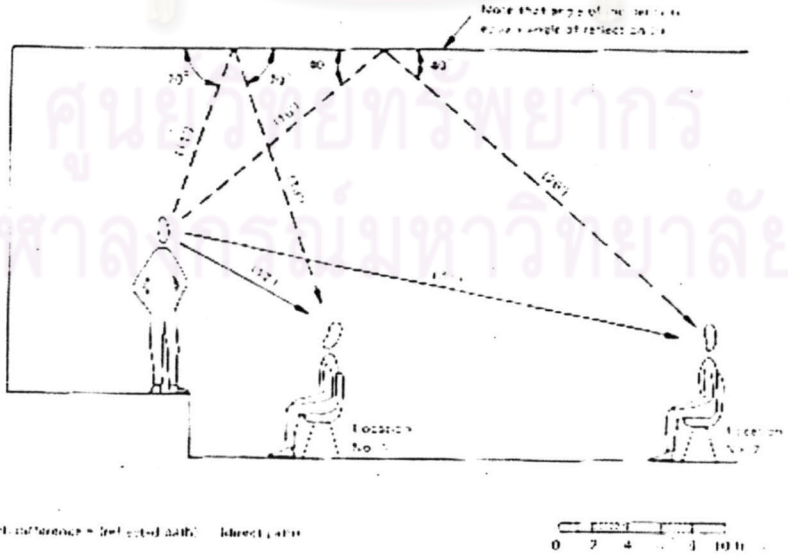


รูปที่ 2.22 การควบคุมการสะท้อนของเสียงโดยใช้ลักษณะของผิวสะท้อน

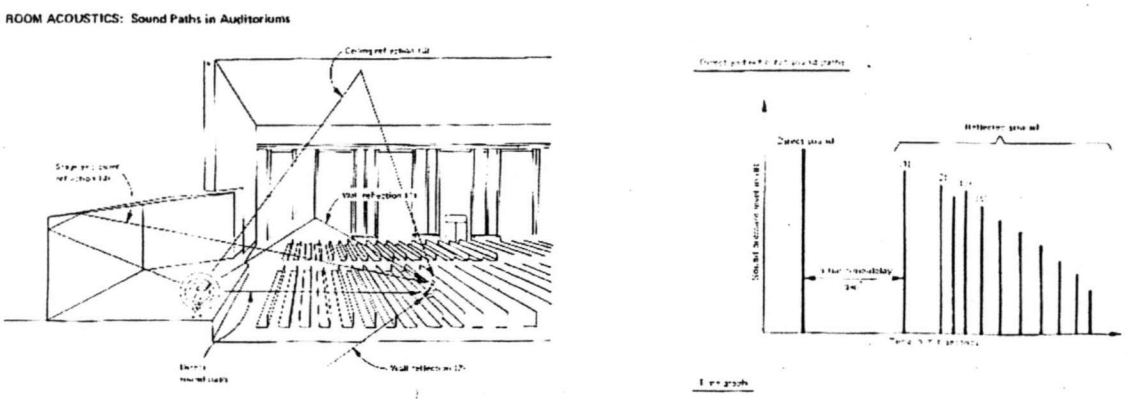
2.1.12 เสียงสะท้อนที่ก่อให้เกิดปัญหาในการรับฟัง (Echo)

ในการสะท้อนของเสียงนั้น หากมีความแตกต่างกันมากของระยะทางตรงที่เสียงวิ่งออกจากแหล่งกำเนิดสู่ผู้ฟัง (Direct Sound Distances) และระยะทางที่เสียงสะท้อนใช้ไปทั้งหมดตั้งแต่ออกจากแหล่งกำเนิดจนมาถึงผู้ฟัง (Reflected Sound Distances) จะทำให้เสียงทั้งสองนั้นมาถึงผู้ฟังในระยะเวลาที่ต่างกันมากด้วย โดยหากระยะเวลาที่มาถึงนี้ต่างกันเกิน 0.05 วินาที (50 Milliseconds) เราจะเกิดการรับรู้เสียง Direct Sound และ First Reflected Sound นี้แยกออกจากกันเป็นสองเสียง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดปัญหาในการรับฟังได้ สิ่งนี้เป็นปรากฏการณเดียวกับเมื่อเราตะโกนในที่โล่งเช่นในสนามกีฬาแล้วได้ยินเสียงตามมาภายหลังอย่างชัดเจน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "Echo"

การตรวจสอบ Echo ของ Early Reflection โดยประมาณ สามารถทำได้ไม่ยากโดยการใช้กระบวนการที่เรียกว่า "Ray Diagram" Ray Diagramคือ การตรวจสอบเส้นทางการเดินทางของเสียงจากแหล่งกำเนิดไปสู่ผู้ฟังโดยประมาณในลักษณะของ graphic 2 มิติโดยใช้เส้นตรงแทนการแสดงทิศทางของเสียง โดยใช้หลักมุมตกกระทบ = มุมสะท้อน Ray Diagram นอกจากสามารถใช้ตรวจสอบ Echo โดยคร่าวๆได้แล้วยังสามารถใช้ดูลักษณะการกระจายเสียงภายในห้องได้พอสมควรอีกด้วย ทั้งนี้มีข้อจำกัดบางอย่างที่กระบวนการนี้ไม่สามารถทำได้ ได้แก่ การสะท้อนที่ทำการวิเคราะห์ครอบคลุมทุกช่วงความถี่ของเสียง โดยเฉพาะเสียงความถี่ต่ำ เนื่องจากไม่สามารถนำปัจจัยเรื่องความกว้างของพื้นผิวที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นมาคิดเป็นการประมาณการสะท้อนของช่วงความถี่สูงเท่านั้น รวมทั้งถือเสมือนว่าวัสดุทุกชนิดมีการสะท้อนที่เป็นระเบียบ (Perfect Specula) ทั้งที่ในความเป็นจริงอาจเป็นวัสดุที่มีกระกระจายหรือดูดซับเสียงเป็นต้นอย่างไรก็ดี เราสามารถใช้ Ray Diagram มาตรวจสอบ Echo ได้โดยเทียบกับตารางมาตรฐาน ระยะเวลาระหว่าง Direct Sound และ First Reflected Sound หรือ Initial time delay gap



รูปที่ 2.23
Ray Diagram
Graphic



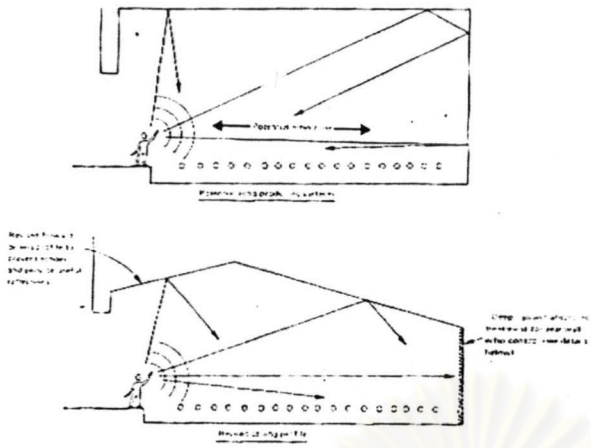
รูปที่ 2.24 ลักษณะการสะท้อนที่ทำให้เกิดช่วงห่างของ
Direct Sound และ Early Reflection

Initial time delay gap (Second)	ความเหมาะสม
ต่ำกว่า 0.025	ดีที่สุดสำหรับการพูดและดนตรี
0.025 - 0.035	ดีที่สุดสำหรับการพูด ปานกลางสำหรับดนตรี
0.035 – 0.045	ขอบเขตที่สามารถยอมรับได้
0.045 – 0.06	เกิดการรบกวน
นานกว่า 0.06	เสียงแยกจากกันเป็น 2 เสียง

หากนำระยะเวลานี้มาคูณกับระยะทางที่เสียงเดินทางได้ใน 1 วินาที (343 เมตร) จะได้ความต่างระหว่าง Direct Sound Distance กับ First Reflected Sound Distance ดังนี้

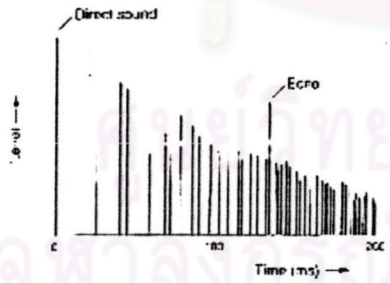
ความต่างระยะทาง	ความเหมาะสม
8.5 เมตร	ดีที่สุดสำหรับการพูดและดนตรี
8.5 – 12 เมตร	ดีที่สุดสำหรับการพูด ปานกลางสำหรับดนตรี
12-15.5 เมตร	ขอบเขตที่สามารถยอมรับได้
15.5-20.5 เมตร	เกิดการรบกวน
20.5 เมตรขึ้นไป	เสียงแยกจากกันเป็น 2 เสียง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

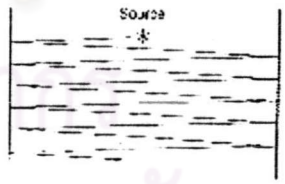


รูปที่ 2.25 แสดงการปรับรูปร่างของห้องเพื่อลดปัญหาการ Echo

บริเวณที่อาจเกิดปัญหา Echo เนื่องจาก First Reflected Sound Distance มีระยะทางมากและการแก้ไขโดยสังเขป เราจะพบว่า Echo นั้นนอกจากจะรับรู้ได้เมื่อ First Reflection Sound ห่างจาก Direct Sound มากกว่า 0.05 วินาทีแล้ว ยังอาจจะรับรู้ได้ในกรณีที่มีเสียงที่มีระดับความดังชัดเจนแยกตัวออกมาจากเส้นเฉลี่ยระดับความดังของเสียงในช่วงของการ Reverberation จนผู้ฟังรู้สึกได้ (คือดังกว่า 5 dB ขึ้นไป เมื่อเทียบกับเสียง Reverberation ปกติ) Echo ลักษณะนี้มักเกิดจากการสะท้อนจากทางด้านหลังของห้องขนาดใหญ่ นอกจากนั้นยังมีลักษณะของการ Echo ที่เรียกว่า Flutter Echo หรือการสะท้อนทับไปมาบนจุดเดิม อันเนื่องจากฉากสะท้องที่ขนานกัน และมีระยะห่างไม่มากนัก ซึ่งมักเกิดในห้องขนาดเล็ก อีกด้วย

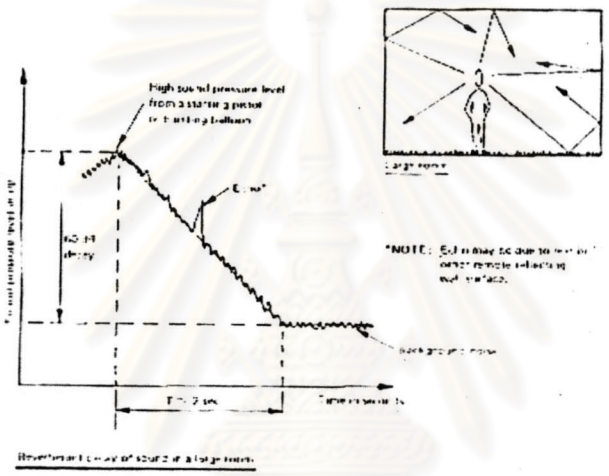


รูปที่ 2.26 แสดง Echo ในช่วง Reverberant Field ที่มักเกิดกับห้องขนาดใหญ่

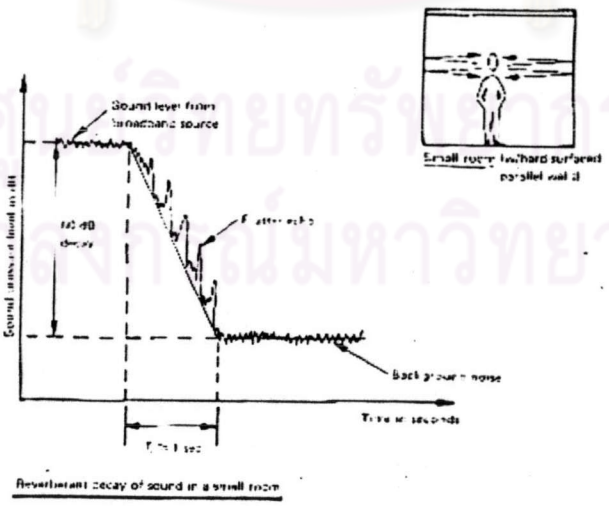


รูปที่ 2.27 Flutter Echo ที่เกิดขึ้นจากการขนานกันของระนาบ

Echo จากการสะท้อนด้านหลังภายในห้องขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการรบกวนกันเสมือนมีแหล่งกำเนิดเสียงจาก 2 ทิศทาง วิธีการแก้ไขคือ การใช้วัสดุดูดซับเสียงบริเวณท้ายของห้อง หรือบังคับเส้นทางเสียงให้ลดลงที่ท้ายห้อง เพื่อไม่ให้สะท้อนมาถึงบริเวณช่วงหน้าของห้องเป็นต้น ส่วน Flutter Echo นั้น แม้เสียงอาจจะไม่ได้ทิ้งช่วงเวลาจาก Direct Sound มากนัก แต่ก็ทำให้ระดับความดังในช่วง Reverberation มีการแกว่งขึ้นลงจนได้ยินเป็นลักษณะ "Twang" ซึ่งรบกวนการรับฟังเป็นอย่างมาก วิธีการแก้ไข คือ ทำให้แผ่นวัตถุที่สะท้อน เช่น ฝาผนังห้อง, พื้นกับเพดาน ไม่ขนานกัน เพื่อให้เสียงเปลี่ยนตำแหน่งตกกระทบไปเรื่อยๆโดยไม่ทับจุดเดิม หรือใช้วัสดุดูดซับเสียงที่ด้านใดด้านหนึ่งของผนังเป็นต้น



รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะของ Echo ที่เกิดในห้องขนาดใหญ่

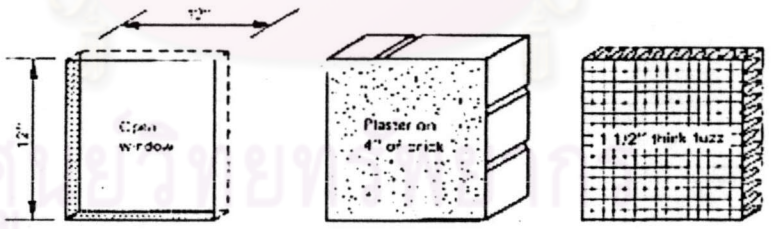


รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของ Echo ที่เกิดในห้องขนาดเล็ก

อย่างไรก็ดี ลักษณะของ Echogram ที่ตำแหน่ง ต่างๆภายในห้องเดียวกัน จะมีความแตกต่างกันอย่างมากในระยะห่างจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน .สิ่งนี้ทำให้การวิเคราะห์ในประเด็นต่างๆ เช่น ระดับความดัง, early reflection หรือ Echo ไม่สามารถที่จะประเมินเป็นค่ากลางๆของทั้งห้อง หรือรวมทุกความถี่เอาไว้ด้วยกันได้ การคำนวณข้อมูลต่างๆต้องพิจารณาแยกตามตำแหน่งและแยกช่วงความถี่ของเสียง

2.1.13 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุ (Sound Absorption of material)

การควบคุมคุณสมบัติทาง Acoustic ของห้องนั้นนอกจากจะควบคุมได้จาก ทิศทางของการสะท้อน ซึ่งเกิดจากองศาการวาง หรือขนาดของแผงสะท้อนต่างๆแล้ว อีกประเด็นหนึ่งซึ่งผู้ออกแบบสามารถใช้เป็นตัวควบคุมคุณสมบัติของเสียงภายในห้องและมีความสำคัญไม่แพ้กันนั่นก็คือ ปริมาณของการสะท้อนจากระนาบนั้นๆ ปริมาณของการสะท้อนนี้ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านการดูดซับเสียงของวัสดุที่นำมาใช้ทำพื้นผิวห้อง หรือที่เรียกว่า “Sound absorption” วัสดุใดมีคุณสมบัติในการดูดซับเสียงมากหรือน้อยนั้นสามารถตรวจสอบได้จากค่า Absorption coefficient (α) ของวัสดุ ซึ่งหมายถึงสัดส่วนของพลังงานที่ไม่สะท้อนขึ้นมาจากพื้นผิวต่อพลังงานโดยรวมที่ให้ลงไปแก่พื้นผิว ในทางทฤษฎีแล้วจะมีค่าได้ระหว่าง 0 (คือไม่มีการดูดซับเสียงเลย หรือสะท้อนเสียงทั้งหมด) จนถึง 1 (ดูดซับเสียงเอาไว้ทั้งหมด) ค่านี้ได้จากการตรวจสอบของห้องทดลองเท่านั้น



At 500 Hz for 1 sq ft of the above surface conditions:

Sound absorption	100%	2%	78%
Sabins (a)	1.0	0.02	0.78
Sound absorption coefficient α	1.0	0.02	0.78

รูปที่ 2.30 Sound Absorption ของวัสดุ

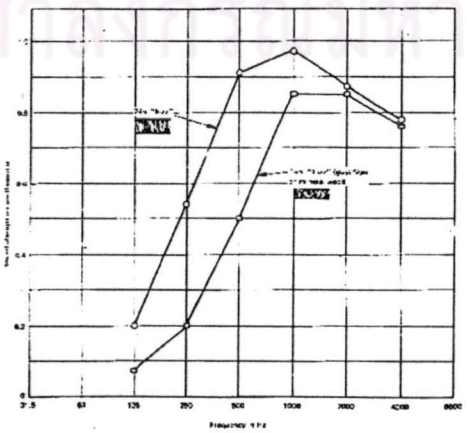
วัสดุที่มีค่า α อยู่ในช่วง 0.20 ขึ้นไปถึง 1.0 จะถือว่าเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียง หรือ Sound-absorption ส่วนวัสดุที่มีค่าตั้งแต่ 0.20 ลงมาถึง 0.0 จะเรียกว่าเป็นวัสดุสะท้อนเสียง หรือ Sound Reflecting ความแตกต่างของค่าการดูดซับนั้น หากแตกต่างกันตั้งแต่ 0.20 ขึ้นไป เราจะสังเกตปริมาณเสียงที่โดนดูดซับไปได้อย่างชัดเจน

ในความเป็นจริงแล้วเมื่อเสียงตกกระทบวัสดุแต่ละชนิดในมุมที่ต่างกันจะมีปริมาณการดูดซับที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในการทดสอบวัสดุ จึงเป็นการใช้เสียงที่กระจัดกระจายในทิศทางที่แตกต่างกันออกไป ผลที่ได้จึงใช้คำว่า "พลังงานโดยรวม" แทนที่จะใช้ค่าความเข้มของเสียง หรือ I ดังเช่นที่ใช้ในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (τ) ในการคำนวณแบบจุดต่อจุดจะมีการอนุโลมให้ใช้ค่า I แทนคำว่า "พลังงานโดยรวม" ได้ เพื่อให้สามารถทำการคำนวณได้โดย

$$\alpha \text{ จะเท่ากับ } \frac{\text{I ที่ไม่สะท้อนออกมา}}{\text{I ที่ตกกระทบลงบนวัตถุ}}$$

ดังนั้นเราสามารถหาความเข้มเสียงที่โดนดูดซับไปได้ $= \alpha \times I$ ที่ตกกระทบ (ในหน่วย watt/cm^2) เราสามารถใช้ค่า I ที่สะท้อนออกมาไปคำนวณในเรื่องระดับความดังของเสียงต่อไปได้

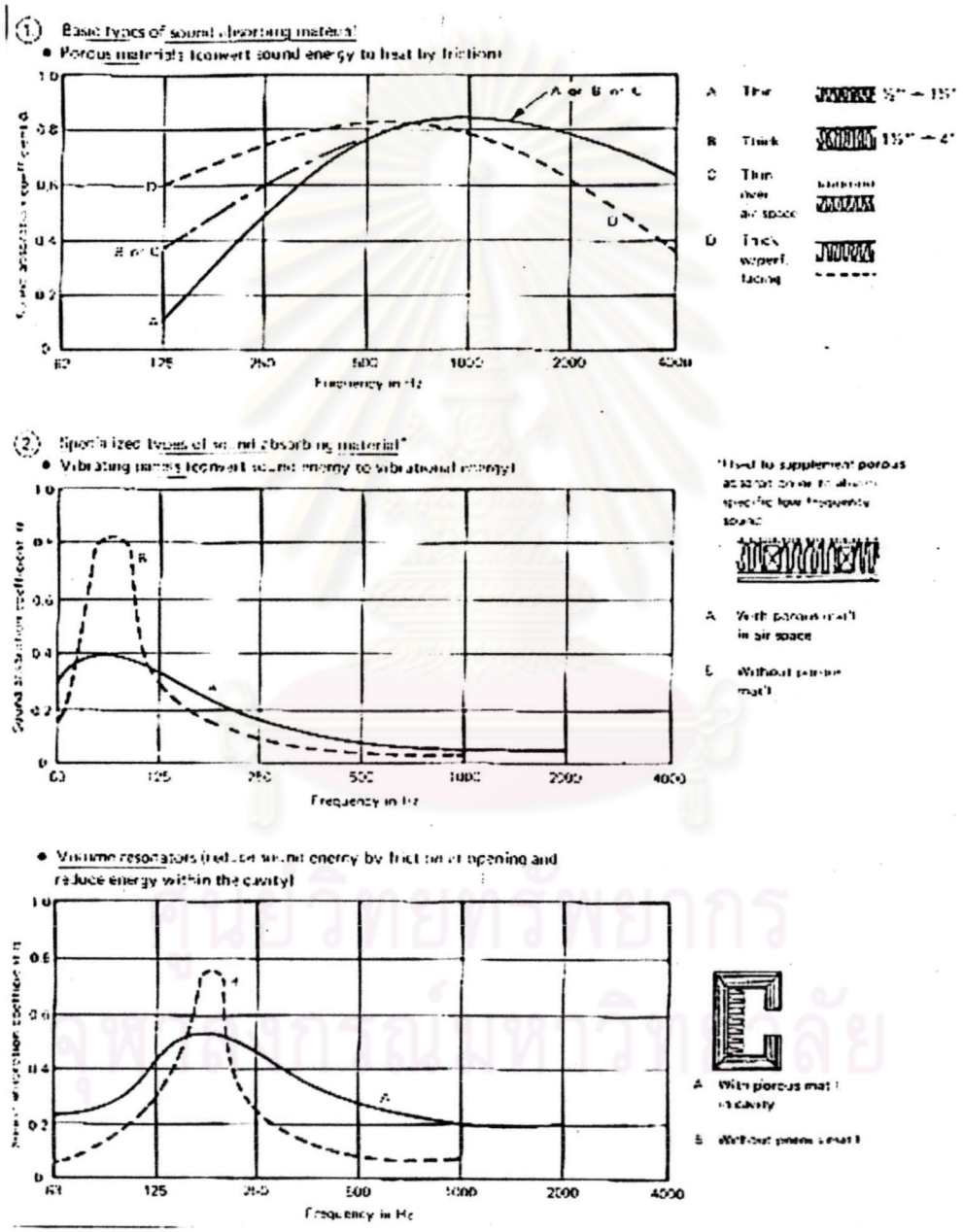
การที่วัสดุสามารถดูดซับพลังงานเสียงได้นั้นเนื่องจากความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานเสียงให้กลายเป็นพลังงานในรูปอื่น เช่น ความร้อนหรือการสั่นสะเทือนได้ (อีกส่วนหนึ่งคือการยอมให้เสียงผ่านทะลุผ่านด้วย) โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุที่มีรู มีความพรุน หรือ มีความยืดหยุ่นของเนื้อวัสดุมาก จะมีความสามารถในการแปลงพลังงานลักษณะดังกล่าวได้ดีกว่า เช่นเดียวกับเรื่องของการสะท้อน หรือ หักเห ขนาดของรูพรุนและระยะการยืดหยุ่นตัวของวัสดุ จะมีผลเป็นอย่างมากต่อช่วงความถี่ที่วัสดุนั้นจะดูดซับได้ วัสดุที่มีรูพรุนเล็กๆ มีการสั่นตัวได้น้อยจะมีคุณสมบัติในการดูดซับ High-Frequency ได้ดี ส่วนวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (อาจมีขนาดช่องรูใหญ่ในระดับหน่วยเมตร) มีการสั่นตัวได้มากจะมีคุณสมบัติในการดูดซับช่วง Low-Frequency ได้ดีกว่า ในวัสดุชนิดหนึ่งจะมีการดูดซับช่วงความถี่ต่างๆมากน้อยต่างกันไป นอกจากนั้นในเนื้อวัสดุที่มีรูพรุนชนิดเดียวกันจะมีปัจจัยที่จะส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับเสียงมากน้อยต่างกันได้แก่ Thickness, Density, Porosity, และ Fiber Orientation



รูปที่ 2.31 ความหนาของวัสดุที่มีผลต่อการดูดซับเสียงในความถี่ต่างๆ

เมื่อต้องการให้วัสดุสามารถดูดซับช่วงความถี่บางช่วงที่ลำพังตัววัสดุชนิดเดียวเองไม่สามารถทำได้ เช่นช่วงความถี่ที่ต่ำมาก จำเป็นจะต้องนำวัสดุมาประกอบกันในลักษณะต่างๆเพื่อให้วัสดุนั้นสามารถทำการดูดซับเสียงในช่วงความถี่ได้ครบถ้วน โดยหลักแล้ว การประกอบกันมักทำใน 3 รูปแบบใหญ่ๆ ได้แก่

1. การใช้วัสดุรูพรุนมาซ้อนประกอบกัน
2. การใช้ Vibrating Panels
3. การใช้ช่องเปิดและโพรง

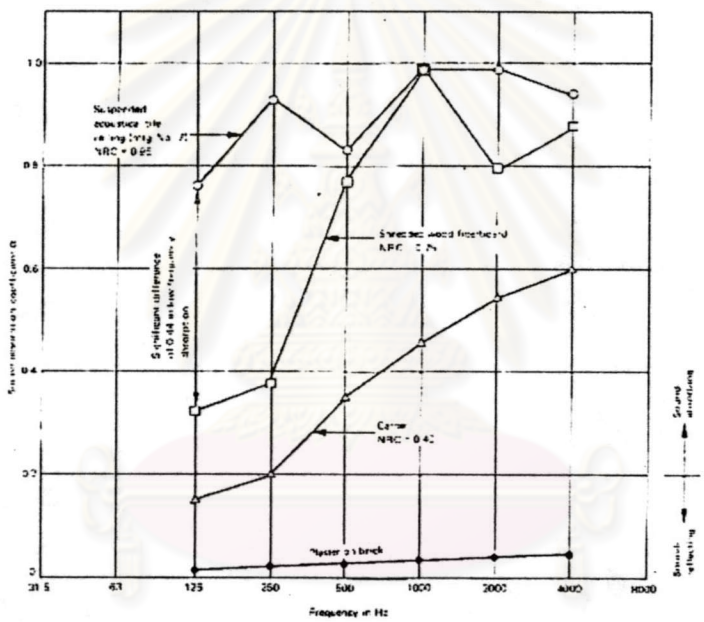


รูปที่ 2.32 การประกอบกันของวัสดุเพื่อเพิ่มค่าการดูดซับในช่วงความถี่ที่ต่างกัน

ในการนำค่า Absorption coefficient (α) มาใช้ในการคำนวณนั้น ค่อนข้างจะใช้เวลามากเนื่องจากต้องมีการคิดแยกกันในแต่ละช่วงความถี่ บางครั้งเพื่อให้สามารถทำการประเมินเบื้องต้นได้รวดเร็วขึ้น จึงมีการใช้ค่าเฉลี่ยที่เรียกว่า Noise Reduction Coefficient (NRC) แทน ค่า NRC นี้ได้จากการเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุที่ช่วงความถี่ 250, 500, 1000 และ 2000 Hz. แล้วปัดเศษของค่าให้ลงตัวที่ 0.05 ซึ่งใกล้ที่สุด

$$NRC = \frac{\alpha 250 + \alpha 500 + \alpha 1000 + \alpha 2000}{4}$$

NRC เป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติของวัสดุโดยคร่าวๆเท่านั้น วัสดุที่มีค่า NRC เท่ากันอาจมีคุณสมบัติในการดูดซับเสียงในแต่ละช่วงความถี่ต่างกันโดยสิ้นเชิงก็ได้ แต่ค่านี้ก็มีความจำเป็นต่อการนำไปใช้คำนวณบางรายการ



รูปที่ 2.33 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุ (α) ในช่วงความถี่ต่างๆ

ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุ (α) ในช่วงความถี่ต่างๆ และ NRC อาจแสดงได้ดังตารางในภาคผนวก ก.

จะพบข้อสังเกตว่าในการออกแบบ Auditorium สิ่งที่มีค่า α สูงที่สุดก็คือ การ Absorb จากเสื้อผ้าของผู้ชมผู้ชมและนักแสดงนั้นเอง โดยมีค่าการดูดซับมากถึง 90% ในช่วง Middle Frequency ดังนั้นในการออกแบบโรงละครจะพยายามหลีกเลี่ยงการเพิ่มวัสดุดูดซับเสียงให้อยู่เฉพาะในตำแหน่งที่จำเป็นและมีปริมาณน้อยที่สุด และควรเลือกใช้เก้าอี้ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดีเพื่อให้ไม่เกิดความต่างของสภาพเสียงมากนักเมื่อมีผู้ใช้ไม่เต็มห้อง

โดยสรุปแล้ว การใช้วัสดุดูดซับเสียงจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการควบคุมคุณภาพทาง Acoustic ของห้อง เช่น Reverberation Control, Noise Reduction Control และ Echo Control เป็นต้น

2.2 สถาปนิกกับการออกแบบควบคุมเสียงภายในห้อง

ประเด็นทางการออกแบบควบคุมเสียงภายในอาคาร หรือ Building Acoustic Design นั้น อาจแบ่งได้เป็น 4ประเด็นใหญ่ๆ ได้แก่ Room Acoustic , Sound Isolation , Sound Reinforcing System และ Mechanical System Noise Control ในทั้ง 4 ประเด็นนี้ ประเด็นที่ค่อนข้างมีความสำคัญและเกี่ยวข้องโดยตรงกับสถาปนิก ก็คือเรื่อง Room Acoustic หรือการออกแบบเพื่อควบคุมสภาพเสียงภายในห้องนั้นเอง

ในการทำงานของสถาปนิกในเรื่อง Room Acoustic นั้น สถาปนิกจะมุ่งเน้นประเด็นไปที่ "ทำอย่างไรคุณภาพด้านต่างๆของเสียงภายในห้องที่ตนออกแบบจะเหมาะสมตามมาตรฐานที่สุด" โดยอาศัยการกำหนดและปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ดังกล่าว เช่นการออกแบบรูปร่างห้องและวัสดุที่ใช้กรุพื้นผิวต่างๆ และคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดเป็นต้น การตรวจสอบว่าตัวแปรต้นเหล่านี้จะก่อให้เกิดผลทางด้านเสียงภายในห้องอย่างไรนั้นสามารถทำได้โดยการคำนวณตามสูตรสำเร็จรูปต่างๆซึ่งเป็นข้อสรุปมาตรฐานที่เกิดขึ้นจากการศึกษาวิจัย การคำนวณดังกล่าวนี้มีอยู่หลายส่วน บางส่วนสามารถคำนวณหรือทำการประเมินด้วยมือได้ ซึ่งแม้สูตรหรือวิธีการคำนวณจะไม่ได้มีความซับซ้อนนัก แต่การจะทดลองปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆเพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานนั้น เป็นเรื่องที่ซ้ำซ้อน กลับไปกลับมาและเสียเวลาค่อนข้างมาก ผู้ออกแบบจะต้องคิดหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆภายในห้องที่ออกแบบไว้ แล้วคำนวณตามสูตรให้ได้ผลลัพธ์ออกมา หากพบว่าค่านั้นสูงหรือต่ำกว่ามาตรฐาน ผู้ออกแบบ ก็จะต้องเปลี่ยนแบบห้องใหม่และทดลองคำนวณดูอีกครั้งไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าต่างๆจะอยู่ในมาตรฐาน นอกจากนั้นยังมีค่าบางตัวที่สถาปนิกอาจต้องการใช้และไม่สามารถคำนวณด้วยมือได้เพราะสูตรมีความซับซ้อนหรือมีปริมาณเนื้อหาและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณมากเกินไป ต้องอาศัยการใช้หุ่นจำลอง หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะเท่านั้นอีกด้วย

โดยสรุปแล้วในการทำงานออกแบบควบคุมเสียงภายในห้องสำหรับสถาปนิกนั้น จะมีผลลัพธ์หรือคุณสมบัติทางด้านเสียงของห้องที่ต้องการทราบ เพื่อนำไปใช้ในการประเมินว่าห้องที่ทำการออกแบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากน้อยเพียงไร ดังนี้

-Intensity Level หรือ ระดับความดังของเสียง ณ ตำแหน่งของผู้ฟังต่างๆภายในห้อง มีหน่วยเป็น decibel (dB.)

-Ray Diagram หรือ แผนภาพแสดงลักษณะทิศทาง การรวมและกระจายของเสียง (Sound Distribution & Concentration) ที่เกิดขึ้นภายในห้อง

-Echogram หรือ แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลากับพลังงานที่ตกกระทบ ณ จุดใดจุดภายในห้อง เป็นข้อมูลมาตรฐานซึ่งแสดงพฤติกรรมของเสียงที่ตำแหน่งผู้ฟังโดยละเอียด สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติอื่นๆได้เกือบทุกค่า

-Reverberation Time (RT) หรือ ระยะเวลาก้องของเสียงภายในห้อง หลังจากแหล่งกำเนิดหยุด ซึ่งจะมีความเหมาะสมต่างกันในห้องแต่ละประเภท

-Echo Control หรือ การควบคุมเสียงสะท้อนที่จะก่อให้เกิดปัญหาในการรับฟัง

จากการศึกษาทฤษฎีทางด้านเสียง จะพบว่าคุณสมบัติและพฤติกรรมเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ ตัวแปรต้นที่สถาปนิกจะต้องเกี่ยวข้องหลายตัวด้วยกัน โดยสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

-รูปร่าง ขนาด ปริมาตร ของห้อง

-คุณสมบัติการดูดซับเสียงของวัสดุที่ใช้ภายในห้อง ขนาดและตำแหนงของวัสดุเหล่านั้น

-คุณสมบัติด้านพลังงาน ชนิด และตำแหน่ง ของแหล่งกำเนิด

-สภาพแวดล้อม เช่นอุณหภูมิ ที่จะมีผลต่อความเร็วสียง

-ตำแหน่งของผู้สังเกต หรือเครื่องมือวัด

2.3 การศึกษาโปรแกรมใกล้เคียงที่มีอยู่ในปัจจุบัน

2.3.1 การศึกษาการทำงานของโปรแกรม

จากการสำรวจโปรแกรมช่วยออกแบบทางด้านเสียงสำหรับอาคารที่มีอยู่ในท้องตลาดนั้น พบว่าโปรแกรมเกือบทั้งหมดจะมีวัตถุประสงค์ไปในเชิงวิศวกรรมระบบค่อนข้างมาก เช่นงานระบบที่เกี่ยวข้องกับเสียงและอุปกรณ์อิเล็กโทรนิคซึ่งควบคุมเสียงภายในอาคาร มักเป็นโปรแกรมที่ช่วยในการทดลองและคำนวณการติดตั้งระบบขยายเสียงต่างๆเพิ่มเติมลงไปในห้องหลังจากที่ห้องหรืออาคารออกแบบเรียบร้อยแล้ว ซึ่งขอบเขตงานเหล่านี้เป็นหน้าที่ของวิศวกรงานระบบทั้งสิ้น เมื่อพิจารณาเฉพาะโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อช่วยในการออกแบบควบคุมเสียงภายในห้องในแนวทางของสถาปนิก เช่นรูปร่างห้องควรจะเป็นอย่างไร วัสดุเป็นชนิดใด กลับพบว่ามีอยู่เพียงไม่กี่โปรแกรมที่มีการประชาสัมพันธ์และจำหน่ายอยู่ในท้องตลาด ตัวอย่างเช่น โปรแกรม CATT-Acoustic, Nempee, Ramsete, Aurora เป็นต้น ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้ถึงแม้จะมีประโยชน์ในการช่วยงานทางด้านการออกแบบสถาปัตยกรรมก็ตาม แต่ส่วนใหญ่มักมีการออกแบบหน้าตาและวิธีการใช้งานโปรแกรมไปในทางเทคนิคค่อนข้างมาก กล่าวคือมีการคำนวณและป้อนค่าต่างๆเป็นตัวเลข และหรือชุดคำสั่ง ไม่มีภาพหรือสัญลักษณ์เพื่อช่วยเหลือให้ผู้ใช้สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ผู้ที่ไม่มีพื้นความรู้จะต้องศึกษาเพิ่มเติมอย่างมากเพื่อให้สามารถใช้งานโปรแกรมเหล่านี้ได้ สาเหตุส่วนหนึ่งน่าจะมาจากการที่ผู้สร้างโปรแกรมเหล่านี้เป็นวิศวกรหรือ นักพัฒนาโปรแกรมโดยตรง ไม่ใช่ นักออกแบบหรือสถาปนิก อย่างไรก็ดี ในบรรดาโปรแกรมเหล่านี้ มีโปรแกรมหนึ่งที่ชื่อ CATT-Acoustic ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย CATT ประเทศ สวีเดน โปรแกรมนี้นับได้ว่ามีการใช้งานกันค่อนข้างแพร่หลายในวงการด้านเทคโนโลยีอาคารและการศึกษาเสียงในงานสถาปัตยกรรม เป็นโปรแกรมที่มีกระบวนการและความแม่นยำที่เป็นที่ยอมรับ มีลักษณะการใช้งานที่ไม่ซับซ้อนนัก พอที่สถาปนิกหรือนักออกแบบที่มีความรู้ทางเทคนิคพอสมควรสามารถใช้งานได้ และมีการพัฒนาของโปรแกรมมาอย่างต่อเนื่องมาถึง Version 8 สามารถปฏิบัติการบน ระบบ Window XP ได้ ผู้ศึกษาจึงนำโปรแกรม CATT-Acoustic นี้มาใช้เป็นตัวอย่างกรณีศึกษา เพื่อศึกษากระบวนการวิเคราะห์ การคำนวณของโปรแกรม ตลอดจน หาจุดบกพร่องในการใช้งานเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมของตนเองต่อไป

การทำงานของโปรแกรม CATT นั้น มีลักษณะเป็น Module คือการทำงานในหน้าที่ต่างๆ จะแยกออกจากกันเป็นหลายส่วน โดยแต่ละส่วน จะมีการ บันทึก File ข้อมูลแยกออกจากกัน เช่น ข้อมูลของห้อง ข้อมูลของแหล่งกำเนิดเสียง ข้อมูลของจุดรับเสียง เป็นต้น File ต่างๆนี้จะถูกสร้างและแก้ไขใน Module ของโปรแกรมย่อยคนละส่วนกัน โดยในการคำนวณและคาดการณ์สภาพเสียงที่จะเกิดขึ้น จะมีโปรแกรมส่วนกลางที่ หรือ Module หลักซึ่งจะ ดึงค่าตัวแปรที่ตั้งเอาไว้ใน File ต่างๆเหล่านี้มารวมกันเพื่อประมวลผล การเก็บ File แยกกันเป็นส่วนๆตามกลุ่มข้อมูลเช่นนี้ มีข้อดีคือเราสามารถสร้าง File เตรียมเอาไว้ก่อนเป็นส่วนๆได้ โดยเราสามารถดึง File ใดที่ต้องการมาใช้ในการคำนวณก็ได้ หรือสามารถนำ File ที่เราเคยสร้างเอาไว้ในงานหนึ่งไปใช้กับงานอื่นๆที่ต้องการคุณสมบัติใกล้เคียงได้ โดยไม่เริ่มต้องสร้างใหม่ทั้งหมด เช่นใช้ File คุณสมบัติของแหล่งกำเนิดที่เคยสร้างไว้ มาใช้คำนวณในห้องลักษณะใหม่เป็นต้น

การใช้งานโปรแกรมจะเริ่มจากการสร้าง Project ใหม่ขึ้น เมื่อเริ่มสร้าง Project โปรแกรมจะทำการสร้าง File ที่ใช้เก็บข้อมูลของ Module ต่างๆให้โดยอัตโนมัติ ซึ่งได้แก่ File สำหรับเก็บข้อมูลห้อง, File สำหรับเก็บข้อมูลตัวรับเสียง (Receiver), File สำหรับเก็บข้อมูลแหล่งกำเนิดเสียง (Source), File สำหรับเก็บข้อมูลการคำนวณ(Prediction), และ File สำหรับจดข้อมูลหมายเหตุของ Project File ทั้งหมดนี้จะถูกเก็บรวมเอาไว้ใน Folder ที่มีชื่อเดียวกับ Project และเรียก Folder นี้ว่า Input Folder

เมื่อสร้าง File ครบถ้วนแล้ว เราจะเริ่มทำงานจาก Module ที่ใช้ในการปรับแต่งคุณสมบัติของห้อง Module นี้ มีลักษณะเหมือนโปรแกรมอีกโปรแกรมหนึ่งที่แยกการทำงานออกมาอิสระ ทำการสร้างห้องที่มีลักษณะเป็นระนาบ 3 มิติรวมทั้งการใส่คุณสมบัติทางการดูดซับเสียงให้แก่ระนาบเหล่านี้ด้วย กระบวนการที่ใช้ในการสร้างห้องนี้จะใช้การพิมพ์ชุดคำสั่งซึ่งคล้ายกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เริ่มจากการเขียนคำสั่งเพื่อกำหนดจุดอ้างอิงใน 3 มิติ และใช้จุดเหล่านั้นสร้างระนาบขึ้นมาเป็นพื้น ผนัง ฝ้าเพดาน รูปแบบต่างๆ ประกอบกันเป็นห้องที่สมบูรณ์ อีกส่วนหนึ่งคือการกำหนดค่าการดูดซับเสียง(Absorption Coefficients) ในช่วงความถี่ Octave Band ต่างๆ และกำหนดลักษณะการสะท้อนเสียงแบบขนาน (Specula Reflection) หรือ แบบกระจาย (Diffuse Reflection) ให้แก่ระนาบต่างๆเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป เมื่อเขียนชุดคำสั่งต่างๆเรียบร้อยแล้วจึงบันทึก File ข้อมูลห้องนี้เอาไว้ แล้วปิด Module เพื่อเข้าสู่การทำงานส่วนต่อไป

ลำดับถัดไปคือการตั้งค่าคุณสมบัติของจุดรับเสียง (Receiver) ซึ่งประกอบได้แก่ จำนวนของจุดรับ และ ตำแหน่งอ้างอิงใน 3 มิติ สามารถกำหนดจุดล่วงหน้าเอาไว้ได้ไม่เกิน 100ตำแหน่ง แต่ในการคำนวณจะเลือกเพียงบางตำแหน่งมาใช้ เมื่อกำหนดแล้วทำการบันทึกไว้ เป็น File ข้อมูลตัวรับเสียง จากนั้นจะเป็นการกำหนดคุณสมบัติของ แหล่งกำเนิดเสียง (Source) ซึ่งได้แก่ จำนวนแหล่งกำเนิด(กำหนดล่วงหน้าได้ไม่เกิน 260 ตำแหน่ง โดยปกติเรียกใช้เพียง1ตำแหน่ง), ตำแหน่งของจุดกำเนิด, มุมองศาที่เสียงพุ่งออกไป(หรือกำหนดโดยตำแหน่งจุดเป้าหมายก็ได้) และกำหนด Sound Pressure Level หรือ SPL (dB.) ที่ระยะห่าง 1 เมตร รอบๆแหล่งกำเนิด ของทุกๆ Octave Band โดยอาจเลือกกำหนดให้เสียงกระจายออก

จากแหล่งกำเนิดเท่ากันทุกทิศทาง หรือกำหนด SPLในองศาต่างๆจากแหล่งกำเนิดโดยละเอียดก็ได้ เมื่อกำหนดเรียบร้อยแล้วก็ทำการบันทึก เป็น File ข้อมูลแหล่งกำเนิด

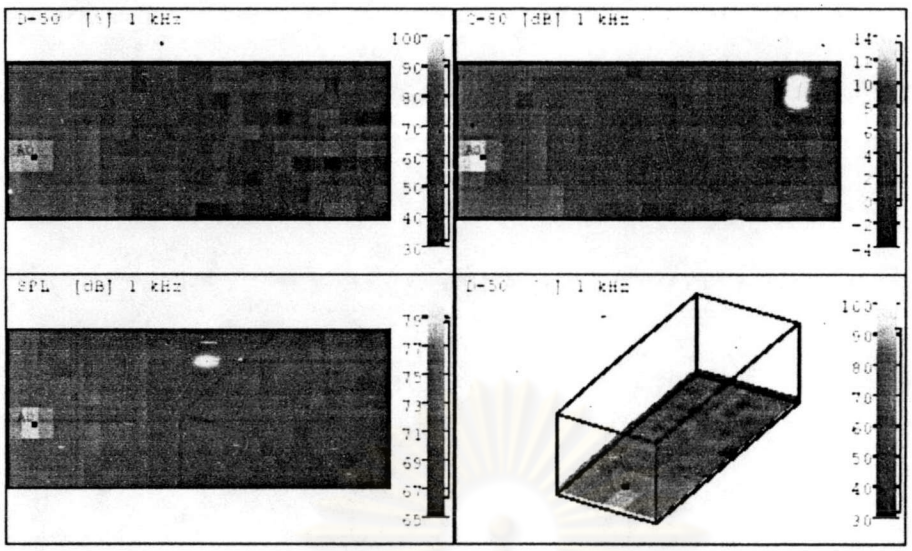
เมื่อทำการบันทึกข้อมูลครบทั้ง 3 File แล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นเตรียมการประมวลผล โปรแกรมจะให้ผู้ใช้เลือกรายละเอียดปลีกย่อยอื่นๆเพิ่มเติมอีก และข้อมูลทั้งหมดจะถูกดึงไปเก็บไว้ใน File สำหรับเก็บข้อมูลการคำนวณ(Prediction), หากมีค่าใดที่ผู้ใช้ไม่ได้ระบุไว้เมื่อสร้าง File ข้อมูลแต่ละตัว โปรแกรมจะทำการใส่ค่า Default ให้เพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลได้ และเมื่อเรากดปุ่ม Run File ข้อมูลการคำนวณจะทำการอ่านค่าที่ได้บันทึกเอาไว้ใน Input Folder ทั้งหมดและสร้างกลุ่มของ File ข้อมูลการแสดงผล ไว้ใน Folder ใหม่ที่เรียกว่า Output Folder ซึ่งจะเป็น Sub Folder ของ Input Folder ที่ผู้ใช้สร้างขึ้นเอาไว้ในตอนแรก File ต่างๆใน Output Folder นี้ จะใช้สำหรับเก็บข้อมูลของการแสดงผล และการวิเคราะห์ ที่เรียกว่า Plot file เช่น Plot File สำหรับจัดหน้าจอมุมมองของห้อง , Plot File สำหรับการจัดหน้าแสดงผลการวิเคราะห์ เป็นข้อมูลที่ใช้ในการนำเสนอ รวมทั้งการเล่นเสียงตัวอย่างซึ่งเป็นผลจากการคำนวณอีกด้วย

ส่วนหน้าที่ของผู้ใช้งานขั้นต่อไปก็คือ การกำหนดหน้าจอเพื่อแสดงมุมมองของห้อง หรือผลการวิเคราะห์ เราสามารถดึงมุมมองหลายๆด้าน หรือผลการวิเคราะห์ มาวางในพื้นที่ทำงานบนหน้าจอได้แตกต่างกันถึง 4 มุมมองหรือผลการวิเคราะห์ด้วยกัน เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบผลการทำงาน ในมุมมองของห้องนั้น หากเป็นรูปด้าน 2 มิติจะสามารถ Pan และ Zoom ได้ส่วนมุมมอง 3 มิติจะสามารถหมุนมุมมองได้อีกด้วย อีกทั้งยังสามารถแสดงผลเป็น Shade สีได้อีกด้วย เมื่อกำหนดมุมมองแล้วขั้นต่อไปก็คือการเลือกลักษณะของการคำนวณ

ในโปรแกรม CATT นี้จะแบ่งความละเอียดของการคำนวณเป็น 3 ระดับ ตามความละเอียดและความรวดเร็วของการคำนวณ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถทราบผลคร่าวๆในระดับความละเอียดที่ต้องการได้โดยไม่ต้องใช้เวลามากเกินไป ทั้งนี้ผู้ใช้ยังสามารถเลือกให้ประมวลผลผสมกันมากกว่า 1 แบบขึ้นไปก็ได้ แต่ทั้งนี้โปรแกรมต้องใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วย รูปแบบการคำนวณทั้ง 3 ระดับได้แก่

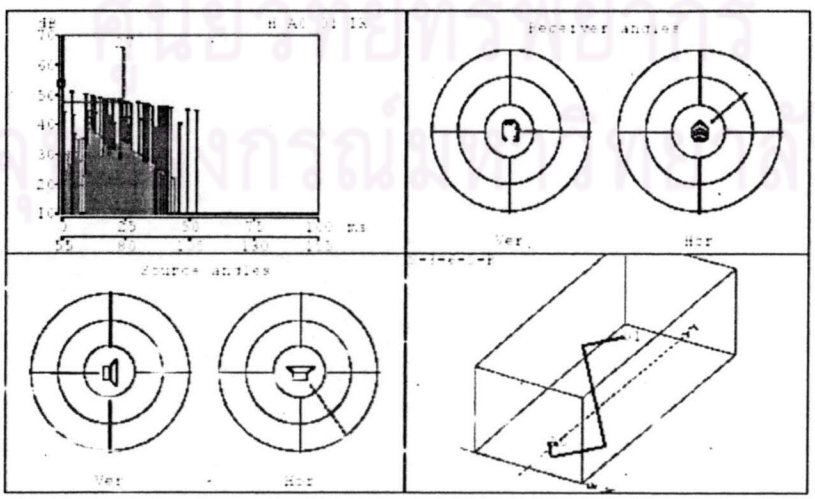
-Audience Area Mapping: เป็นการคำนวณหาระดับความดังของ Direct Sound ที่จะได้ยินในตำแหน่งต่างๆของห้อง และแสดงผลออกมาในลักษณะสีตามช่อง Grid โดยโปรแกรมจะใช้เทคนิคการคำนวณที่เรียกว่า Ray trace หรือการยิงรังสี(Ray)จากแหล่งกำเนิดไปยังผู้ฟังนั่นเอง สามารถกำหนด Ray ได้สูงสุดถึง 3,000 เส้น โดยความเร็วในการคำนวณจะต่ำลงเมื่อจำนวน Ray นี้เพิ่มขึ้น การคำนวณระดับความดังนี้จะคำนวณจาก Direct sound และ Early Reflection ที่อยู่ในระยะเวลาที่กำหนด (ไม่ควรน้อยกว่า เวลาที่ระดับความดังลดลง 30 dB.หรือ 50%ของ RT.) เรายังสามารถเลือกระนาบที่จะทำการวิเคราะห์ได้ และการคำนวณแบบ Ray trace นี้จะกำหนดให้มีตัวรับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ความสูง 0.5 เมตร ครอบคลุมทุกช่วง Grid เหนือพื้นที่ที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณพลังงานจาก Ray ที่ตัวรับแต่ละตัวรับได้ออกมาเป็น ระดับความดัง (SPL/dB.) และค่าอื่นๆที่กำหนด ให้เป็นสีต่างๆแสดงในช่องGrid บนระนาบที่จะทำการวิเคราะห์ โดยจะสามารถแสดงผลได้ทีละช่องความถี่เท่านั้น การคำนวณและแสดงผลด้วยวิธีนี้จะเป็นการคิดรวมๆ โดยไม่ได้อ้างอิงกับจุด Receiver ที่ตั้งไว้หรือแสดง Echogram แต่อย่างใด

I20975600



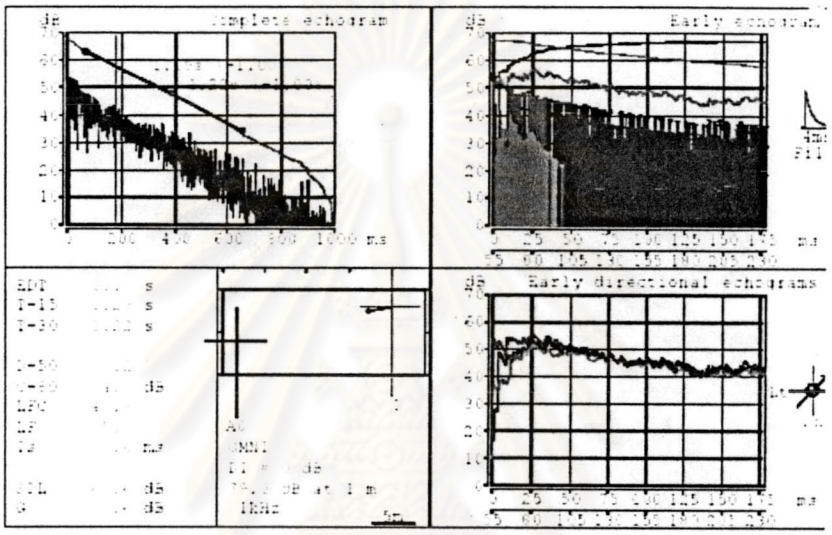
รูปที่ 2.34 การแสดงผลการคำนวณ Audience Area Mapping ของโปรแกรม CATT

-B.Early Part Detailed ISM: เป็นการคำนวณ รายละเอียดของ Early Reflection สำหรับใช้ศึกษาคุณภาพเสียง โดยใช้หลักการของ Image Source Model หรือ (ISM) ในการคำนวณ โดยสามารถเลือกช่วงความถี่ที่จะใช้ในการคำนวณแค่เพียงช่วงเดียวเท่านั้นเช่นกัน เราสามารถกำหนดจำนวนครั้งของการสะท้อน หรือเวลาที่จะใช้ในการคำนวณได้ ผลการคำนวณจะแสดงพลังงานของเสียงที่กระทบกับ Receiver ตัวใดๆที่เลือกเอาไว้ ออกมาในลักษณะของ Echogram หรือแสดงเส้นทางการวิ่งของเสียงมายัง Receiver ตัวนั้นๆ หรือแสดงการวิเคราะห์อื่นๆ เช่น Image Source Space เป็นต้น โดยในการคำนวณรูปแบบนี้ ยังสามารถเลือกให้แหล่งกำเนิดเสียงมีมากกว่า 1 แหล่ง (Multi Source) ได้อีกด้วย โดยข้อมูลทั้งหมดจะแสดงเฉพาะช่วงแรกถึงเวลาที่กำหนดเท่านั้น ดังนั้นถ้ากำหนดเวลา หรือจำนวนครั้งการสะท้อนต่ำเกินไป อาจจะทำให้ Reflect ครั้งสำคัญบางส่วนโดนตัดไป



รูปที่ 2.35 การแสดงผลการคำนวณ Early Part Detailed ISM ของโปรแกรม CATT

-C.Full Detailed Calculation : เป็นระดับการคำนวณที่ละเอียดที่สุด เราสามารถกำหนดจำนวน Ray ต่อช่วง Octave ความถี่ได้ และกำหนดระยะเวลาที่ต้องการใช้ใน Process ได้อีกด้วย ผลลัพธ์ของการคำนวณคือ Echogram ที่สมบูรณ์แบบ โดยใช้วิธีการคำนวณที่เรียกว่า Randomized Tail Correction Cone Tracing (RTC) สามารถนำ Echogram นี้มาประเมินค่า RT และค่ารายละเอียดระดับสูงอื่นๆอีกมากมาย ออกมาเป็นตัวเลข รวมทั้งสามารถนำค่าเหล่านี้ไปทดลองเล่นกับ File เสียง (.wav) ได้ด้วย สำหรับ Echogram นั้น สามารถเรียกให้แสดงผลของ Receiver ตัวใด ที่ความถี่ใดก็ได้ (ในการคำนวณจะคิดที่ทุกความถี่ แต่เลือกแสดงผลได้ทีละความถี่) และสามารถกำหนด Multi source ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.36 การแสดงผลการคำนวณ Early Part Detailed ISM ของโปรแกรม CATT

นอกจากนั้นโปรแกรม CATT ยังมีขีดจำกัด และความสามารถอื่นๆที่ได้ระบุไว้ดังต่อไปนี้

-การสร้างห้อง จำกัดจำนวนระนาบสูงสุดที่ 5000 ระนาบ แต่ความเหมาะสมต่อการใช้งานอยู่ที่ 100-500 ระนาบ สามารถปรับเปลี่ยน Scale ของห้อง รวมทั้ง กำหนดให้เป็นเหมือนวัตถุ หมุน ขยับตำแหน่ง และ Copy ได้ มีการใช้คำสั่ง Mirroring เพื่อสร้างห้องที่สมมาตร ได้รวดเร็วขึ้น (เขียนเพียงครึ่งเดียว) แต่การสร้างจะต้องใช้ชุดคำสั่งเหมือนการเขียนโปรแกรมเท่านั้น สามารถใช้ Function ทางคณิตศาสตร์ และ Loop ต่างๆเพื่อช่วยในการสร้างได้

-Absorption และ Diffusing Properties ใน Library สามารถมีได้ไม่จำกัดจำนวน Frequency Range ที่รองรับได้ในโปรแกรมจะอยู่ระหว่าง 125 ถึง 16 kHz. สำหรับ 8 kHz และ 16 kHz ใช้การคำนวณเดียวกับ 2 kHz. และ 4 kHz. สามารถกำหนดวัสดุแบบ Diffuse Reflection ได้แต่จะใช้ Memory มากกว่าในการคำนวณ

-Source Directivity หรือการกระจายเสียงของแหล่งกำเนิด สามารถกำหนดทุกๆ 15 องศา ตามแนวนอนและแนวตั้ง โดยไม่จำเป็นต้องสมมาตร ระดับความดังของเสียงในแต่ละองศาสามารถกำหนดได้ตั้งแต่ –50dB. ถึง +15dB. จากระดับความดังที่กำหนดปกติ และกำหนดระดับความดัง แยกตาม Octave ได้อิสระ

-Data Output เลือกการวิเคราะห์จาก 260 Source, 100 Receiver และ เลือก Octave ที่ต้องการวิเคราะห์ สามารถวิเคราะห์ Diagram และค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเสียงภายในห้องได้เกือบทุกค่า ในระดับ Full Detailed Calculation

-มีความสามารถในการ Export ข้อมูลไปยังโปรแกรมอื่นๆได้ เช่น Microsoft Excel, AutoCAD, รวมทั้ง VRML 2.0

2.3.2 ปัญหาที่พบในการใช้งานโปรแกรมตัวอย่าง

จากศึกษาวิเคราะห์การใช้งานและความสามารถของโปรแกรม CATT ในหัวข้อที่ผ่านมา แม้ว่าโปรแกรมค่อนข้างจะครอบคลุมในประเด็นต่างๆของการออกแบบควบคุมเสียงและมีความสมบูรณ์ค่อนข้างมาก แต่สำหรับผู้ใช้ซึ่งเป็นสถาปนิกแล้ว ยังพบปัญหาในการใช้งานอยู่หลายประการด้วยกัน ซึ่งพอจะสรุปเป็น 4 ประเด็นหลักดังนี้

<u>-ความไม่เป็นมิตรต่อผู้ใช้ ความยากในการเรียนรู้ หากผู้ใช้ไม่มีพื้นฐานความเข้าใจทางด้านเสียงก็อาจจะไม่สามารถใช้โปรแกรมได้</u>

สาเหตุของปัญหาเกิดจาก

-การออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) มีความซับซ้อน มีข้อมูลมาก ไม่มีการใช้สัญลักษณ์ หรือการเชื่อมโยงข้อมูลเป็นลำดับเพื่อให้ผู้ใช้เริ่มใช้งานได้ถูกต้อง และลักษณะของ Interface ไม่ดึงดูดเท่าที่ควร

-การสร้างบางส่วนเช่นการสร้างห้อง ต้องใช้การสั่งงานด้วยภาษาคล้ายการเขียนโปรแกรม ซึ่งเป็นข้อเสียอย่างมากของโปรแกรม ทำให้ผู้ใช้ที่ไม่มีความชำนาญทางด้านการเขียนโปรแกรมไม่สามารถใช้งานโปรแกรมได้ โดยเฉพาะผู้ใช้งานซึ่งเป็นสถาปนิกส่วนมากจะไม่มีชำนาญในด้านนี้

-ตัวแปรที่ต้องป้อนรวมทั้งผลลัพธ์ เป็นข้อมูลในเชิงเทคนิคค่อนข้างมาก เป็นศัพท์ทางเทคนิคที่ผู้ใช้ทั่วไปไม่คุ้นเคยแทบทั้งสิ้นซึ่ง ผู้ใช้งานที่ยังไม่มีพื้นความรู้ทางด้านการออกแบบเสียง อาจจะไม่สามารถใช้งานโปรแกรมได้

<u>-ความไม่สะดวกในการใช้งาน และขั้นตอนการทำงานใช้เวลามาก</u>

สาเหตุของปัญหาเกิดจาก

- ขั้นตอนในการทำงานค่อนข้างซับซ้อน ต้องผ่านหลายขั้นตอนเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ ทำให้ใช้เวลาในการทำงานนาน

-แม้โปรแกรมจะมีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่ผู้ใช้ต้องป้อนรายละเอียดจำนวนข้อมูลเข้าไปมากเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ต้องป้อนค่าคุณสมบัติในทุกๆช่วงความถี่ในขณะที่การแสดงผลสามารถเลือกได้เพียงทีละช่วงความถี่เท่านั้น หรือการกำหนดพลังงานจากแหล่งกำเนิดทีละองศา ทำให้ต้องใช้เวลามากเกินความจำเป็น

-การที่โปรแกรม ไม่มีการตั้งค่าเริ่มต้นอัตโนมัติให้ ดังนั้นผู้ใช้จะต้องป้อนข้อมูลให้ครบถ้วนก่อนโปรแกรมจึงจะเริ่มทำงานได้

<u>-ไม่เหมาะในการช่วยออกแบบ ไม่ยืดหยุ่นในการแก้ไขปรับเปลี่ยนกลับไปมา</u>

สาเหตุของปัญหาเกิดจาก

-เทคนิคการป้อนค่าของโปรแกรม ตัวอย่างเช่นการจัดวางตำแหน่งของแหล่งกำเนิด และจุดรับเสียงหรือ Receiver ยังทำได้ไม่สะดวกนัก เนื่องจากต้องป้อนค่าตำแหน่งเป็นตัวเลข ผู้ใช้ต้องทราบค่าของตัวแปรทุกตัวเป็นตัวเลขทุกตัว ทำให้โปรแกรมไม่ยืดหยุ่น ไม่เหมาะกับการประมาณ หรือช่วยคิดแบบคร่าวๆ ในลักษณะ Sketch

โปรแกรมไม่มีการแสดงภาพ Graphic ที่สื่อให้เห็นพฤติกรรมและการที่ของเสียงในขณะที่คำนวณ โดยผู้ใช้จะเห็นแต่เพียงค่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นเท่านั้น เมื่อไม่มีภาพแต่รู้เพียงตัวเลขที่เป็นผลลัพธ์ ความเข้าใจในพฤติกรรมของเสียงในความเป็นจริงก็อาจจะไม่ชัดเจนนัก ไม่เข้าใจจุดผิดพลาด ทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ตรงจุด

การทำงานแบบ 3 มิติ แม้จะให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องตามความจริงทุกประการ แต่ก็ทำให้การสร้างห้องรวมทั้งการคำนวณและแสดงผลทำได้ค่อนข้างช้า แทบเป็นไปไม่ได้เลยที่จะเห็นผลลัพธ์ทันที ประเด็นนี้ยังทำให้เกิดความไม่ยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนรูปร่างห้องและวัสดุ ทำให้โปรแกรมเป็นเพียงแค่การจำลองสถานการณ์เมื่อห้องนั้นได้รับการออกแบบเสร็จสมบูรณ์มาก่อนแล้วจึงทำการส่งแบบนั้นเข้าไปให้โปรแกรมประมวลผล มีการทำงานไปในทิศทางเดียว ทดลองแก้ไขกลับไปกลับมาไม่ได้ และไม่ยืดหยุ่นพอที่จะใช้ช่วยในกระบวนการคิดและออกแบบ โดยถ้าหากผลลัพธ์ที่ได้ไม่ผ่านมาตรฐาน ก็จะต้องออกแบบใหม่ทั้งหมดแล้วจึงส่งให้โปรแกรมคำนวณไปเรื่อยๆจนกว่าผลลัพธ์จะเหมาะสม ซึ่งยุ่งยากและใช้เวลามาก ไม่ช่วยให้เกิดความคิดในการพัฒนา ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและทรัพยากรเป็นอย่างมาก

<u>-ผลลัพธ์ไม่ตรงตามความต้องการของสถาปนิก</u>

สาเหตุของปัญหาเกิดจาก

-Out put ที่ออกมาก็มาก แต่ส่วนใหญ่ลึกเกินไป ไม่เกี่ยวข้องกับสถาปนิก มีความซับซ้อนในเรื่องผลวิเคราะห์ต่างๆส่วนใหญ่เป็นค่าเชิงเทคนิคซึ่งไม่จำเป็นต่อการช่วยออกแบบห้องเบื้องต้น เนื่องจากสถาปนิกต้องการทราบค่าคุณสมบัติทางด้านเสียงที่สำคัญเพียงบางค่าเท่านั้น

ผลลัพธ์ของโปรแกรมแสดงเฉพาะค่าเทคนิคที่ผู้ใช้ทั่วไปไม่เข้าใจความหมาย และไม่มีการประเมินผลลัพธ์ที่ได้นั้นว่าดีหรือไม่ มีความเหมาะสมต่อห้องประเภทต่างๆมากน้อยเพียงไร รวมทั้งไม่มีคำแนะนำว่าจะต้องทำอย่างไรเพื่อแก้ไขให้ได้ผลลัพธ์ตามต้องการ ข้อมูลความรู้เหล่านี้ต้องอ้างอิงจากแหล่งอื่นต้องซึ่งทำให้ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งแก่ผู้ใช้งานทั่วไป

2.3.3 ข้อดีและประเด็นที่น่าสนใจของโปรแกรมตัวอย่าง

อย่างไรก็ดี โปรแกรม CATT ก็มีแนวคิดในการใช้งานและคำนวณของโปรแกรมที่น่าสนใจและอาจนำมาใช้ในโปรแกรมที่จะพัฒนาขึ้นได้ อยู่หลายประการด้วยกันซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้

-ในส่วนของการจัดเก็บข้อมูลนั้น โปรแกรม CATT มีการทำงานเป็น Module และบันทึก File แต่ละส่วนแยกกัน มีข้อดีคือสามารถนำข้อมูลที่เราสร้างขึ้นกลับมาใช้ใหม่ได้ทุกครั้งที่ต้องการ ขึ้น แต่ข้อเสียคือเกิดจำนวน File ขึ้นหลาย File ด้วยกัน ทำให้การจัดการ File ข้อมูลเหล่านี้ยากขึ้น

-โปรแกรมมี Interface บางส่วนในโปรแกรมที่ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้ง่าย ซึ่งน่าจะหยิบยกมาเป็นตัวอย่างในการพัฒนา การใช้ภาพประกอบที่ทำให้เข้าใจและใช้งานได้ง่ายด้วย เช่นการกรอกค่าระดับความดังที่องศาและความถี่ต่างๆ

-โปรแกรมมีการแบ่งระดับการคำนวณ ในลักษณะต่างๆให้ผู้ใช้เลือก ทำให้ไม่ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเสมอไป หากผู้ใช้ต้องการทราบข้อมูลเพียงเบื้องต้นก็ไม่ต้องคำนวณข้อมูลในระดับรายละเอียดออกมา เทคนิคการแบ่งระดับความละเอียดของการคำนวณเช่นนี้เป็นข้อดีที่อาจนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาได้ ทั้งนี้รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณลักษณะต่างๆของโปรแกรม เช่น Ray Diagram , การสร้าง Echogram และการใช้ Receiver เป็นตัวตรวจสอบ เป็นต้น

-ความสามารถในการเล่นเสียง เป็นข้อดีที่เห็นได้ชัดมากของโปรแกรมนี้ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจถึงสภาพเสียงจริงได้ง่ายกว่าการบอกค่าวิเคราะห์เป็นตัวเลขมากมาย แต่ทั้งนี้ถ้าหากมีการเพิ่มการเล่นเสียงต้นฉบับเพื่อเปรียบเทียบกับสภาพเสียงที่เกิดขึ้นด้วยจะทำให้เห็นความแตกต่างที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น