เทคนิคการออกแบบอาคารทรงกลมเพื่อให้มีคุณภาพเสียงที่ดี

นายสุริยะ เมืองประชา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DESIGN TECHNIQUES TO PROVIDE SOUND QUALITY IN SPHERE

Mr. Suriya Muangpracha

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการออกแบบอาคารทรงกลมเพื่อให้มีคุณภาพเสียงที่ดี
โดย	นายสุริยะ เมืองประชา
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ วัฒนสินธุ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สุนทร บุญญาธิการ)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์)

…… กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เทิดศักดิ์ เตชะกิจขจร)

…… กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วาริชา วงศ์พยัต)

…… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. รวิช ควรประเสริฐ)

สุริยะ เมืองประชา : เทคนิคการออกแบบอาคารทรงกลมเพื่อให้มีคุณภาพเสียงที่ดี.
(DESIGN TECHNIQUES TO PROVIDE SOUND QUALITY IN SPHERE)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์, 78 หน้า.

ปัจจุบันจากเทคโนโลยีที่ก้าวหน้า และความต้องการอาคารที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน ทำให้เกิดการออกแบบอาคารรูปทรงต่างๆขึ้น อาคารรูปทรงกลมเป็นอาคารที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานมาก เนื่องจากอาคารรูปทรงกลมนั้นมีอัตราส่วนต่อพื้นที่ใช้สอยต่ำ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานภายในอาคาร รวมถึงประหยัดค่าก่อสร้างเปลือกอาคารลงไปด้วย แต่อาคารรูปทรงกลมนั้นจะมาพร้อมกับปัญหาเกี่ยวกับสภาพเสียงภายในอาคารด้วยเช่นกัน ปัญหาด้านคุณภาพเสียงที่พบในอาคารทรงกลมคือ ปัญหาสภาพเสียงก้อง ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาในการใช้งานและการสื่อสารระหว่างผู้คนภายในอาคาร ทำให้ไม่สามารถใช้อาคารได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสวงหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคุณภาพเสียงที่ดีภายในอาคารทรงกลม รวมถึงศึกษาพฤติกรรมของเสียงที่เกิดขึ้นจริงภายในอาคารทรงกลม เพื่อวิเคราะห์ประมวลผล และเสนอแนวทางการออกแบบอาคารทรงกลม เพื่อให้มีคุณภาพเสียงที่ดี

ผลการวิจัยพบว่า การคำนวณค่าจากสูตร Reverberation Times = 0.161(V/Sa) นั้นสามารถใช้กับอาคารทรงเหลี่ยมทั่วไปได้ แต่จะไม่สามารถใช้กับอาคารทรงกลมได้ ค่าที่ได้จากสูตรนั้นจะมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดจริงภายในอาคารทรงกลม จากอาคารตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เมตร ค่าReverberation Times ที่ได้จากการคำนวณนั้นอยู่ที่ 3.6 วินาที แต่ค่า Reverberation Times ที่ได้จากการวัดจริงมีค่าอยู่ในช่วง 3.2-6.8 วินาที ขึ้นกับตำแหน่งที่ทำการวัดค่า หลังจากทำการปรับปรุงผิวผนังภายในอาคารแล้ว ค่า Reverberation Times เท่ากับ 1.2 วินาที ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานสำหรับเป็นห้องเรียน และสัมนา

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคุณภาพเสียงที่ดีภายในอาคารทรงกลมนั้นได้แก่ ปริมาตร รูปทรงภายในของอาคาร วัสดุพื้นผิวภายในของอาคาร ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงและความดังของเสียง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวชี้วัดว่าในอาคารทรงกลมจะมีปัญหามากน้อยเพียงใด

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....
ปีการศึกษา 2554

5374190425 : MAJOR ARCHITECTURE
KEYWORDS: DESIGN TECHNIQUES / PROVIDE SOUND QUALITY IN SPHERE

SURIYA MUANGPRACHA: DESIGN TECHNIQUES TO PROVIDE SOUND QUALITY IN SPHERE . ADVISOR: ASSOC. PROF. VORASUN BURANAKARN, Ph.D., 78 pp.

The advancement of technology. And demand for energy efficient buildings. The building shapes up. Spherical building is a building that is effective in saving energy. The building is a circular area with a low usable ratio. It can save energy in buildings. The cost savings to the building envelope. The building is circular with a problem with the building as well. The sound quality is found in the circular building. The resonance condition. This leads to problems in the implementation and communication between people inside the building. The building was not used to full capacity.

This research aims to identify factors associated with better sound quality inside the sphere. The behavior of the actual sound inside the sphere. To analyze the process. And design guidelines of the sphere. In order to the better sound quality.

The results showed that calculated from the formula. Reverberation Times = 0.161 (V / Sa) can be used for building a common edge. It does not apply to the circular building. The value of the formula is different from the actual measurement of the circular building 18 meters in diameter and Reverberation Times has calculated that at 3.6 seconds, but the Reverberation Times from the actual measurement values in the range of 3.2 to 6.8 seconds depending on the location of the measurement. After redesigning to the interior wall surface the Reverberation Times improve to 1.2 seconds, which is suitable for use as classrooms and seminars.

Factors associated with better sound quality and volume inside the spherical shape of the inside of the building. Surface materials within the building. Position of the sound source and sound volume. These factors are indicators the volume of issue in the sphere building.

Department: Architecture Student's Signature .....
Field of Study: Architecture Advisor Signature .....
Academic Year: 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร.วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ศ.ดร.สุนทร บุญญาธิการ รวมถึงคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางการทำงานตลอดจนแนวความคิดต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงขอขอบคุณพี่ๆ ชั้น 11 ทุกคน ตลอดจนผู้จัดทำรายงานการวิจัย เอกสารอ้างอิง ที่กล่าวถึงในการวิจัยชิ้นนี้เนื่องจากเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญของแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้จะไม่อาจสำเร็จได้หากปราศจากการสนับสนุนจากมารดา บิดา ที่ได้ให้ความสนับสนุน ความห่วงใย ความเข้าใจ ที่เป็นกำลังใจในการทำการวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนที่ให้กำลังใจ และขอขอบคุณทุกๆ คนที่มีส่วนร่วมในการวิจัยและที่ผ่านเข้ามาในงานวิจัยชิ้นนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ…… ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ…. ..... ญ

สารบัญแผนภูมิ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 3

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 3

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.6 นิยามและคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นเสียง 5

2.2 ฉนวนและตัวดูดซับเสียง 26

2.3 องค์ประกอบในการก่อให้เกิดคุณภาพเสียงที่ดีภายในอาคาร 28

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 31

3.1 วิธีการศึกษาวิจัย 32

3.2 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย 32

3.3 รูปแบบกรณีศึกษาในการวิจัย 33

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล 35

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 34

3.6 มาตรฐานและเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผล 39

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 38

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสภาพเสียงในอาคารทรงกลมจากทฤษฎีและบทความต่างๆ 41
4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสียงที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าจริงจากกรณีศึกษา 43
4.3 ผลการออกแบบปรับปรุง โดยพัฒนาจากผลวิเคราะห์ 63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ 70
5.1 อภิปรายผล 70
5.2 สรุปผลการวิจัย 73
5.3 ข้อเสนอแนะ 77
รายการอ้างอิง 78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 79

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุชนิดต่างๆ 26
ตารางที่ 3-1 แสดงค่าระดับเสียงพื้นฐานที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน.....37
ตารางที่ 4-1 แสดงค่าการดูดซับเสียงของไมโครไฟเบอร์ความหน้าแน่น 48k ความหนา 25 mm.....41

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1 แสดงภาพการสะท้อนของเสียงเมื่อตกกระทบกับวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ.....1
ภาพที่ 1-2 แสดงภาพการสะท้อนของเสียงเมื่อตกกระทบกับวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวโค้งเว้า.....2
ภาพที่ 1-3 แสดงภาพการสะท้อนของเสียงเมื่อตกกระทบกับวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวโค้งนูน.....2
ภาพที่ 2-1 แสดงส่วนสำคัญของคลื่นเสียง แสดงการส่งคลื่น เกิดการอัดและขยายตัว 5
ภาพที่ 2-2 แสดงการสะท้อนของเสียง.....6
ภาพที่ 2-3 แสดงการหักเหของเสียง.....7
ภาพที่ 2-4 แสดงการเลี้ยวเบนของเสียง.....8
ภาพที่ 2-5 แสดงการที่เสียงกระจายไปรอบตัวในลักษณะทรงกลม.....9
ภาพที่ 2-6 แสดงเสียงและกำลังความดันของเสียงโดยรอบผู้พูด.....9
ภาพที่ 2-7 แสดงเสียงมีความเข้มมากเมื่อออกจากแหล่งกำเนิดเสียง 10
ภาพที่ 2-8 แสดงการคำนวณความเข้มของเสียงกับระยะทาง 11
ภาพที่ 2-9 แสดงความเร็วของคลื่นเสียงที่วิ่งไปสู่ผู้รับฟังใน 2 ลักษณะ คือ ทางตรง
และการสะท้อนไปกลับ 12
ภาพที่ 2-10 แสดงรูปร่างของคลื่นเสียง (Wave forms) ของอุปกรณ์เครื่องมือและเครื่องดนตรี
3 ชิ้น.....13
ภาพที่ 2-11 แสดงส่วนประกอบของหู.....15
ภาพที่ 2-12 การแสดงปรากฏการณ์ของเสียงที่กระทบผนัง.....22
ภาพที่ 2-13 แสดงการกระจัดกระจายของเสียงเมื่อตกกระทบพื้นผิวขรุขระ.....23
ภาพที่ 2-14 แสดงการควบคุมเสียงภายในห้อง.....30
ภาพที่ 3-1 แสดงทิศทางของเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของวงกลม.....31
ภาพที่ 3-2 แสดงเครื่องวัดและวิเคราะห์เสียง.....34
ภาพที่ 4-1 แสดงรูปแบบอาคารทรงเหลี่ยมที่ใช้ในการวิจัย
ภาพที่ 4-2 แสดงขณะดำเนินการติดตั้งวัสดุดูดซับเสียงเพื่อทดสอบค่าที่ได้จากการออกแบบ
ภาพที่ 5-1 แสดงพฤติกรรมของเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของวงกลม

สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 2-1 แสดงช่วงความถี่ที่มนุษย์ในวัยต่างๆได้ยิน และความถี่ที่เกิดจากเครื่องดนตรีต่างๆ....17
แผนภูมิที่ 2-2 แสดงค่าระดับเสียงต่างๆ ที่ถูกเวจท์19

แผนภูมิที่ 2-3 แสดงกราฟทางวิศวกรรมที่เกณฑ์แสดงเกณฑ์เสียง (Noise Criteria, NC)24

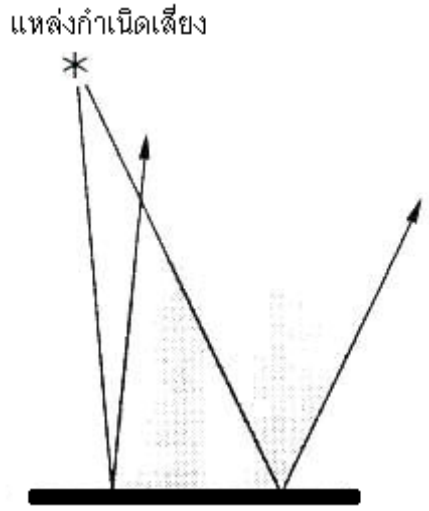
แผนภูมิที่ 2-4 แสดงรีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ที่เหมาะสมแต่ละรูปแบบการใช้งาน ในย่านความถี่ 500 และ 1000 เฮิร์ซ 28
แผนภูมิที่ 3-1 แสดงการให้ค่าน้ำหนักของความถี่เสียงในแต่ละมาตรฐาน ประกอบด้วย A B C.....35
แผนภูมิที่ 3-2 แสดงการวัดค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์.....36

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

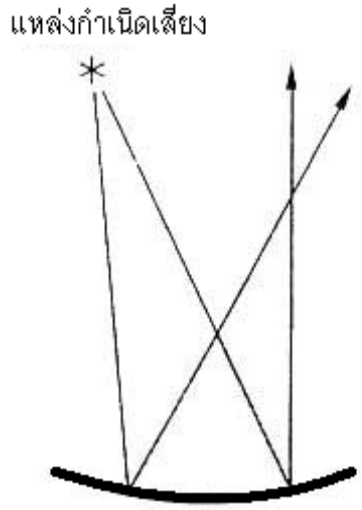
ปัจจุบันสภาวะแวดล้อมและสภาพอากาศของโลกได้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการใช้พลังงานในอาคารเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนที่กำลังทวีความรุนแรงขึ้น ทำให้การออกแบบอาคารจำเป็นต้องให้ความสำคัญในเรื่องการประหยัดพลังงาน จากการพิสูจน์พบว่า รูปทรงของอาคารเป็นตัวแปรหนึ่งมีผลต่อปริมาณการใช้พลังงานในอาคารเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่มีพื้นที่ใช้สอยเท่ากัน จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เห็นอาคารที่มีรูปทรงใหม่ๆ ซึ่งถูกออกแบบเพื่อลดพื้นที่เปลือกอาคารและปริมาณความร้อนที่จะเข้าสู่อาคารให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งานของอาคาร รูปแบบของอาคารรูปแบบหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เหมาะกับสภาพวะแวดล้อมในปัจจุบันคืออาคารที่มีพื้นที่ผิวน้อยและรูปทรงโค้งกลม เนื่องจากอาคารทรงนี้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่เปลือกอาคารกับพื้นที่ใช้สอยในอาคารต่ำกว่ารูปทรงอื่น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการประหยัดพลังงานที่สูงมาก ทำให้เป็นรูปแบบที่น่าสนใจในการออกแบบอาคารในปัจจุบัน

การออกแบบอาคารนั้นส่งผลถึงคุณภาพของเสียงภายในจึงต้องปรับปรุงและแก้ไขปัญหาทางด้านคุณภาพของเสียงภายในอาคารให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งแตกต่างจากการอาคารรูปทรงเหลี่ยม



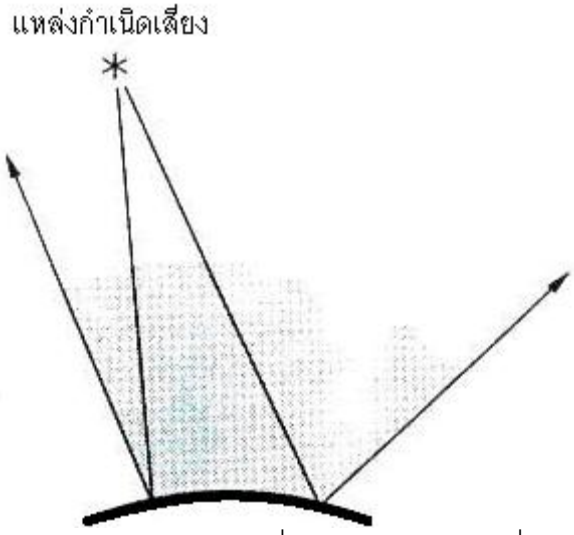
ภาพที่ 1-1 แสดงภาพการสะท้อนของเสียงเมื่อตกกระทบกับวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ

ที่มา : Michel Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design, 1933:21



ภาพที่ 1-2 แสดงภาพการสะท้อนของเสียงเมื่อตกกระทบกับวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวโค้งเว้า

ที่มา : Michel Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design, 1933:21



ภาพที่ 1-3 แสดงภาพการสะท้อนของเสียงเมื่อตกกระทบกับวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวโค้งนูน

ที่มา : Michel Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design, 1933:21

จากรูปด้านบนจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเดินทางของเสียงเมื่อตกกระทบกับผิววัตถุ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎ มุมตกกระทบ (Angle of incidence) จะมีค่าเท่ากับมุมสะท้อน (Angle of Reflection) ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับรูปของทรงอาคาร ลักษณะการใช้งานของอาคาร ทิศทางของต้นกำเนิดเสียง จะพบว่าอาคารทรงกลมนี้หากไม่ได้รับออกแบบโดยการวิเคราะห์เรื่องเสียงด้วยแล้ว จะเกิดปัญหาเรื่องเสียงสะท้อนเป็นอย่างมาก

จากปัญหาเรื่องคุณภาพของเสียงที่เกิดขึ้นจะพบว่า ลักษณะรูปทรงโค้งกลมของอาคาร เป็นสาเหตุให้เราควรหาเทคนิคและวิธีการออกแบบ และวิธีแก้ปัญหาเรื่องเสียงที่เหมาะสมต่อรูปทรงของอาคาร เพื่อให้ได้คุณภาพเสียงภายในอาคารที่ดี และสามารถใช้อาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. แสวงหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนของเสียง ซึ่งมีผลกับเกิดคุณภาพเสียงที่ดีที่เกิดจากอาคารรูปทรงทรงกลม
2. ศึกษาพฤติกรรมของเสียงที่เกิดขึ้นจริงภายในอาคารรูปทรงกลม
3. เสนอเทคนิคการออกแบบปรับปรุงอาคารทรงกลม ให้มีคุณภาพเสียงภายในที่ดี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาและวิเคราะห์ ตัวแปรที่มีผลกับ ทิศทางการเดินทางของเสียง การสะท้อนของเสียง การดูดซับเสียง การเล็ดลอดผ่านของเสียง และระดับเสียงพื้นฐาน จากกรณีศึกษา ที่เป็นอาคารทรงกลม และมีขนาดต่างๆกัน

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา

1. ทดสอบปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ในการก่อให้เกิดสภาวะทางเสียงที่ดีจากทฤษฎี งานวิจัย และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์พฤติกรรมของเสียงที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าจริงจากกรณีศึกษา
3. ออกแบบปรับปรุง โดยพัฒนาจากผลวิเคราะห์ ซึ่งรวบรวมข้อมูลทางด้าน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการก่อให้เกิดสภาวะทางเสียงที่ดีภายในอาคารทรงกลม และประเมินผลสภาพทางเสียงภายในอาคาร

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ให้ความสำคัญของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อสภาวะทางเสียงที่ดี ในอาคารรูปทรงทรงกลม
2. เข้าใจพฤติกรรมการเดินทางของเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง และจากการสะท้อนของเสียงกับผนังอาคารที่เกิดขึ้น ในอาคารรูปทรงทรงกลม
3. เทคนิคการออกแบบปรับปรุงคุณภาพเสียงที่ดีภายในอาคารทรงกลม

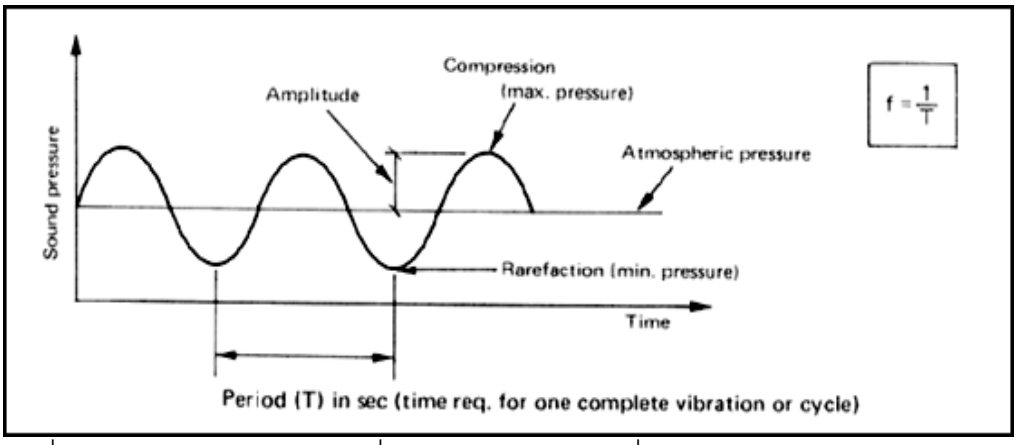
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นเสียง

2.1.1 ความหมายของเสียง

เสียงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนในอากาศหรือตัวกลางชนิดอื่นๆ การสั่นสะเทือนจะมีผลให้เสียงแผ่ไปในตัวกลางชนิดนั้นๆ ทิศทางการสั่นของโมเลกุลจะขนานกับทิศทางของการแผ่ของเสียง อันเป็นสมบัติของคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) ซึ่งคลื่นตามยาวนี้จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการแผ่ เมื่อมีการถ่ายทอดคลื่นตัวกลางนี้จะมีการยืดหยุ่นของโมเลกุลของวัตถุ ซึ่งตัวกลางที่กล่าวถึงนี้จะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ ซึ่งหมายความว่า ในสุญญากาศนั้นเสียงจะผ่านไม่ได้เลย

การเกิดคลื่นเสียงในอากาศ ซึ่งเกิดจากการสั่นของต้นกำเนิดเสียงนั้น จะทำให้โมเลกุลในอากาศเกิดการเคลื่อนที่ เรียกว่า Wave Motion การเคลื่อนไหวของคลื่นจะมี 2 ลักษณะ คือ ในลักษณะที่เป็นช่วงอัด หรืออากาศมีการกดตัว (Compression) และลักษณะที่ 2 คือ ช่วง ขยาย (Rarefaction) ลักษณะทั้งสองนี้เกิดเป็นคลื่นแผ่ออกไปรอบ คล้ายกับการโยนหินลงไปในบ่อน้ำจะเห็นคลื่นของน้ำแผ่ออกไปรอบด้าน ลักษณะที่กล่าวนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เราเรียกว่า แอมพลิจูด (Amplitude)



ภาพที่ 2-1 แสดงส่วนสำคัญของคลื่นเสียง แสดงการส่งคลื่น เกิดการอัดและขยายตัว

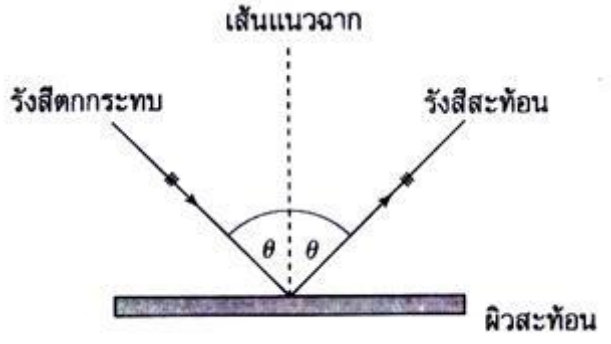
ที่มา:M.David Egan, Concepts in Architectural Acoustics, 1972:3

ในภาพที่ 2-1 แสดงการส่งคลื่นนั้นเกิดติดต่อกันไปเหมือนคลื่นของน้ำ เมื่อโยนหินลงไป ทำให้เกิดการอัด (Compressions) และการขยาย (Rarefaction) ช่วงของคลื่นข้นลงเราเรียกว่า แอมพลิจูด (Amplitude) แอมพลิจูด หมายถึงระยะการกระชับ (Displacement) ที่มีค่ามากที่สุด จากแนวสมดุลไปยังสันคลื่นหรือท้องคลื่น อธิบายง่ายๆ คือ แอมพลิจูดเป็นตัวแสดงกับพลังงาน ของคลื่นนั่นเอง ถ้าแอมพลิจูดพุ่งขึ้นสูง แสดงว่าพลังงานของคลื่นมีค่ามาก แต่ถ้าแอมพลิจูดต่ำ พลังงานของคลื่นจะมีค่าน้อย สรุปได้ว่า แอมพลิจูดของคลื่นเสียงแสดงถึงความดัง ค่อย ของเสียง ส่วนความยาวของคลื่น (Wavelength) นั้น คือระยะทางที่เสียงเดินทางไปได้ในช่วงเวลาที่ตัวกลาง ครบ 1 รอบ โดยทั่วไปใช้สัญลักษณ์ λ (Lamda) แทนความยาวคลื่น

2.1.2 คุณสมบัติของเสียงที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปัญหาของเสียงภายในอาคารทรงกลม

1. การสะท้อนของเสียง

- มุมตกกระทบ = มุมสะท้อน
- ทิศทางคลื่นตกกระทบ เส้นแนวฉากและทิศทางคลื่นสะท้อนต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน



ที่มา: http://www.neutron.rmutphysics.com

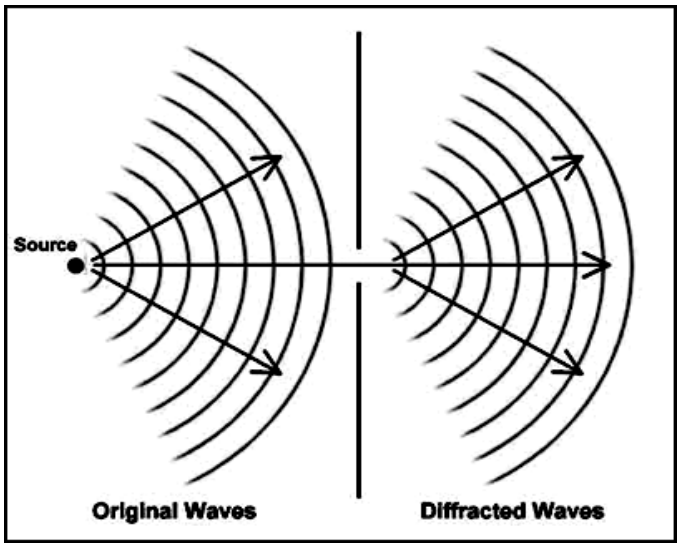
ภาพที่ 2-2 แสดงการสะท้อนของเสียง

3. การแทรกสอดของเสียง

เกิดได้เมื่อคลื่นเสียง เดินทางมาพบกัน จะเกิดการรวมตัวกันในสองลักษณะ คือการรวมตัวกันแบบเสริมกัน และการรวมตัวกันแบบหักล้างกัน

4. การเลี้ยวเบนของเสียง

- เกิดเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางในตัวกลางเดียวกัน



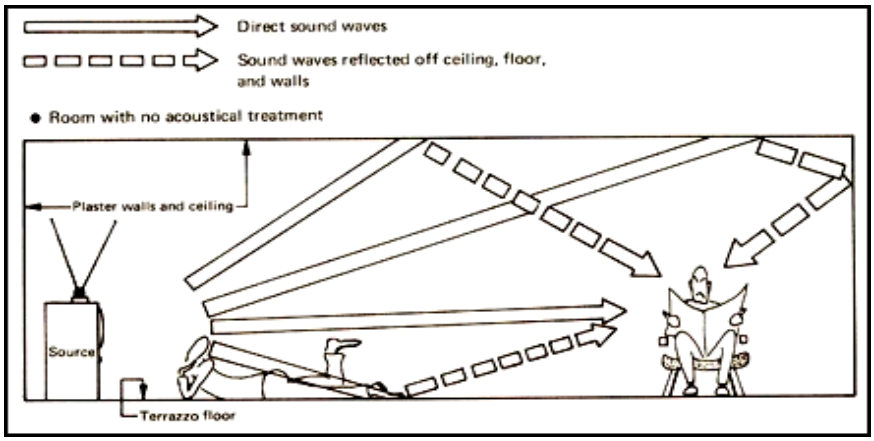
ภาพที่ 2-4 แสดงการเลี้ยวเบนของเสียง

ที่มา: http://www.20thcenturyvoice.com

2.1.3 **ความเร็วของเสียง** (SPEED OF SOUND)

ความเร็วของเสียง (SPEED OF SOUND)ถ้าเสียงสามารถเดินทางได้เร็วเท่าๆกับแสง ซึ่งเดินทางไปถึง 186,000 ไมล์ ต่อวินาที ปัญหาเรื่องการรับฟังเสียงที่ดีในหอประชุมใหญ่ หรือโรงละครก็จะไม่เกิดขึ้น แต่การเดินทางของคลื่นเสียงแต่ละตัวช้ามากทำให้เกิดปัญหาตามมาในเรื่องของการได้ยิน ในอุณหภูมิปกติของห้องทั่วๆไป เสียงจะเดินทางได้เร็วเพียงแค่ 1130 ฟุตต่อวินาทีเท่านั้น และสิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ การเกิดการสะท้อนของเสียงหรือ Echoes นั่นเอง ตัวอย่างเช่น เมื่อเสียงวิ่งออกจากต้นกำเนิดของเสียง คลื่นเสียงเกิดเป็น 2 ลักษณะ คือ คลื่นเสียงที่วิ่งตรงเข้าหูผู้ฟัง กับคลื่นเสียงที่วิ่งกระจายออกจากต้นกำเนิดของเสียงไปสัมผัสกับวัตถุอื่นๆของห้อง เช่น ผนัง เพดาน พื้น หรือเครื่องเรือน แล้วจึงสะท้อนกลับเข้าหูผู้ฟังอีกทีหนึ่ง คลื่นเสียงลักษณะที่ 2 นี้ คือตัวปัญหา ถ้าคลื่นนี้วิ่งเข้าสู่หูเราช้ากว่าคลื่นเสียงประเภทแรกเพียง 0.058 วินาที ก็จะเกิดเสียงก้อง

หรือเสียงสะท้อนให้รำคาญหูขึ้น การรับฟังเสียงจึงไม่สู้ดีนัก อาจเกิดความสับสนในเสียงที่ได้ยินได้ เพราะฉะนั้นความเร็วของเสียงจึงมีความสำคัญมากต่อการรับฟังที่ดี



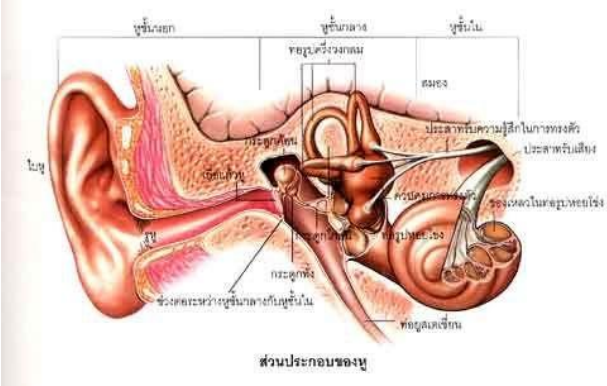
ภาพที่ 2-9 แสดงความเร็วของคลื่นเสียงที่วิ่งไปสู่ผู้รับฟังใน 2 ลักษณะ คือ ทางตรง และการสะท้อนไปกลับ

ที่มา: M.David Egan, Concepts in Architectural Acoustics, 1972:26

2.1.4 **การได้ยินเสียงของมนุษย์**

คลื่นเสียงที่เดินทางมาเข้าหูเรานั้น จะสูง-ต่ำ ดัง-ค่อย หรือไพเราะเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบใดบ้าง และเราเข้าใจเสียงนั้นได้อย่างไร หูมีความสำคัญอย่างไรต่อการได้ยินเสียงของเรา ลองมาตั้งใจฟัง"เสียง"จากตัวอักษรต่อไปนี้ดูครับ

คลื่นเสียงเกิดจากการอัดและขยายของตัวกลาง การอัดขยายนี้จะส่งต่อ ๆ กันไปจนถึงหูของผู้ฟังแล้วส่งต่อไปยังสมองในรูปของระดับเสียง ความดัง และคุณภาพของเสียง โดยปกติหูคนเราไวต่อการรับรู้เสียงที่มีความถี่สูงมากกว่าเสียงที่มีความถี่ต่ำเมื่อเสียงนั้นมีระดับความเข้มเสียงเท่ากัน นอกจากนี้ความไวต่อการรับรู้เสียงของคนเรายังขึ้นอยู่กับอายุ โดยพบว่าเด็กมีความรู้สึกไว ต่อช่วงความถี่สูงมากกว่าผู้ใหญ่ความไวต่อการได้ยินเสียงของคนจะลดลงเมื่ออายุมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความไวต่อการ ได้ยินเสียง จะลดลงด้วยสาเหตุอื่น ๆ อีกเช่น การได้รับฟังเสียงดังมากเกินไปเป็นระยะเวลานาน ๆ หรือจากการใช้ยาบางชนิด



ภาพที่ 2-11 แสดงส่วนประกอบของหู

ที่มา: http://www.20thcenturyvoice.com

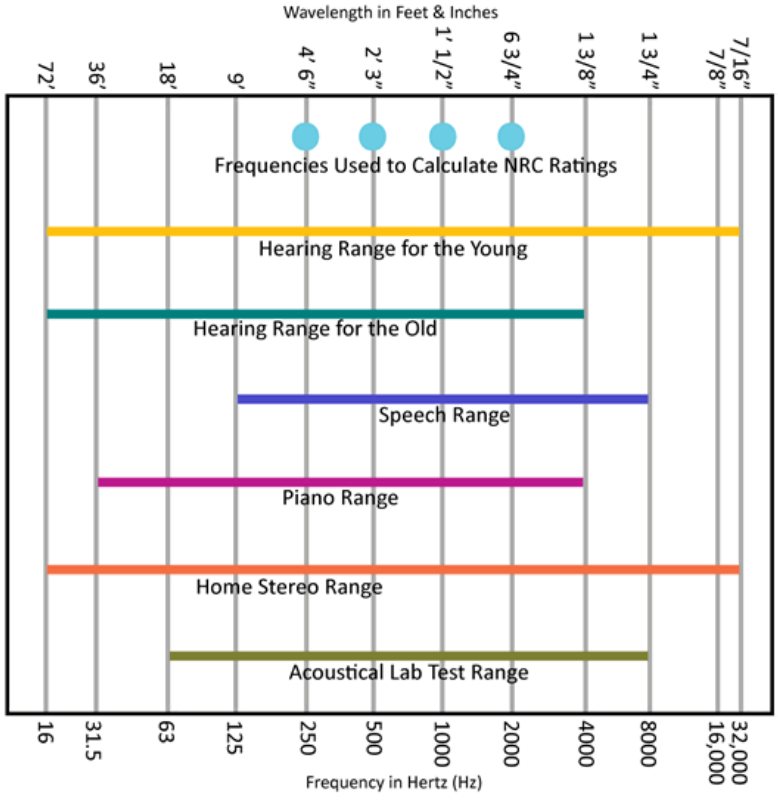
หูของ คนเราประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ หูชั้นนอก ประกอบด้วยใบหูซึ่งจะทำหน้าที่รับคลื่นเสียงและ ส่งผ่านไปตามช่องหูจนถึงชั้นเยื่อแก้วหูซึ่งกั้นระหว่างหูชั้นนอกและหูชั้นกลาง ส่วนที่สองคือ หูชั้นกลาง มีลักษณะเป็นโพรงอากาศที่ถูกแยกออกจากหูชั้นนอกด้วยเยื่อแก้วหูที่แปะติดกับ กระดูก 3 ชิ้นเล็กๆที่เรียงต่อกันเป็นโซ่ คือ ค้อน ทั่ง และโกลน ทำหน้าที่รับแรงสั่นสะเทือนและขยายเสียงต่อจากเยื่อแก้วหูแล้วส่งต่อไปยังหู ชั้นใน นอกจากนี้ที่หูชั้นกลางยังมีท่อยูสเตเชี่ยนที่ต่อไปยังส่วนบนของคอที่ต่อกับ โพรงจมูก ทำหน้าที่ระบายอากาศภายในหูชั้นกลาง ส่วนที่สามคือ หูชั้นใน ประกอบด้วยอวัยวะ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการได้ยินเป็นอวัยวะรูปหอย ภายในมีของเหลวและเซลขนที่ทำหน้าที่รับเสียงจากกระดูกโกลนในหูชั้นกลางแล้ว แปลงเป็นสัญญาณประสาทส่งไปยังประสาทหู (ประสาทสมองคู่ที่ 8) ซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณประสาทไปยังสมองเพื่อแปลความหมายของคลื่นเสียง และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทรงตัว

เนื่องจากเสียงเกิดจากการสั่นของวัตถุที่เป็นต้นกำเนิดเสียง และในการทำให้วัตถุสั่นต้องใช้พลังงาน "ถ้าพลังงานที่ใช้มีค่ามาก แอมพลิจูดของการสั่นจะมีค่ามาก แต่ถ้าพลังงานที่ใช้มีค่าน้อย แอมพลิจูดของการสั่นจะมีค่าน้อย" พลังงานในการสั่นของต้นกำเนิดเสียงจะถ่ายโอนให้กับอนุภาคของอากาศต่อกันเป็นทอดๆ มายังหูผู้ฟัง ทำให้แก้วหูเกิดการสั่น ผู้ฟังจึงรับรู้เสียงนั้น

การได้ยินครั้งหนึ่งๆ จะต้องมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ประการ ตือ ต้นกำเนิดเสียง ตัวกลางและประสาทรับเสียงในหู ขณะได้ยินเสียงหนึ่งๆ ความรู้สึกในการได้ยินของมนุษย์โดยทั่วไป แยกออกเป็นลักษณะต่างๆ ดังนี้

1. ความรู้สึกดัง-ค่อยของเสียง ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของคลื่นและความเข้มเสียง
2. ความรู้สึกทุ้ม-แหลมของเสียง ขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียง
3. ความไพเราะของเสียง ขึ้นอยู่กับคุณภาพเสียง

การได้ยินของมนุษย์ ความถี่เสียงที่มนุษย์ได้ยิน (Audible Frequency) จะมีความถี่ในช่วง 20-20,000 Hz (เฮิรตซ์) เสียงที่มนุษย์ไม่ได้ยินจะมีความถี่เสียงที่สูงกว่าหูมนุษย์รับฟังได้ (Ultrasonic Frequency) เป็นเสียงที่มีความถี่ มากกว่า 20,000 Hz ส่วนเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าหูมนุษย์ได้ยิน (Infrasonic Frequency) มีความถี่ต่ำกว่า 20 Hz ซึ่งหูของสัตว์บางชนิดได้ยิน เช่น ค้างคาว สุนัข ฯ



แผนภูมิที่ 2-1 แสดงช่วงความถี่ที่มนุษย์ในวัยต่างๆได้ยิน และความถี่ที่เกิดจากเครื่องดนตรีต่างๆ

ที่มา: http://www.20thcenturyvoice.com

ระดับเสียงพื้นฐาน(Background Noise) หมายถึงระดับเสียงปกติภายในห้องหรืออาคาร ในขณะที่ยังไม่มีสียงจากแหล่งกำเนิดอื่น หากระดับเสียงพื้นฐานภายในห้องมีมากเกินไป จะทำให้ความสามารถในการรับรู้หรือความเข้าใจน้อยลงไปด้วย โดยการที่เราจะเข้าใจข้อความของเสียงที่ส่งผ่านมานั้น เสียงจากเป้าหมายจะต้องมีความดังมากกว่าค่าระดับเสียงพื้นฐานอย่างน้อย 15 dB ระดับเสียงพื้นฐานนั้นจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งานห้องหรืออาคารต่างๆกันไป

2.1.5 **ระดับความดันเสียง** (Sound Pressure Level, SPL)

ระดับความดังเสียงที่จุดใดๆ คือ ความแตกต่างระหว่างความดันเสียง ณ จุดนั้นและระดับความดันเสียง ณ จุดเดียวกันเมื่อไม่มีเสียง ระดับความดันเสียงแปรผันตามค่า Logarithmic ของอัตราส่วนกำลังสองของความดันหนึ่งและอัตราส่วนของความดันอ้างอิง

$$SPL = 10 \log(P/Po)^2 = 20 \log P/Po$$

เมื่อ SPL = ระดับความดันเสียง, dB

P = ระดับความดันเสียงที่ต้องการวัด, Pa, μbar

Po = ความความดันเสียงอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับ 20 μPa (ไมโครปาสคาล) ซึ่งเป็นความดันเสียงที่ค่อยที่สุดที่ความถี่ 1,000 Hz ที่หูคนปกติเริ่มได้ยิน

ระดับความเข้มเสียงและระดับความดันเสียงจะตอบสนองการได้ยิน เริ่มจาก 0 เดซิเบล เหมือนระดับความเข้มเสียงและระดับความดันเสียง

2.1.6 **มาตราเดซิเบล** (The decibel scale)

หูของคนเราสามารถรับเสียงที่มีความดันเสียงสิบล้านเท่ามากกส่าความดันเสียงค่อยที่สุดที่ได้ยินโดยไม่เป็นอันตรายต่อประสาทหู การวัดเสียงโดยใช้มาตราเชิงเส้นธรรมดาย่อมไม่สำดวกสำหรับพิสัยที่กว้างยิ่งกว่านั้นหูคนยังสามารถตอบสนองต่อเสียงแบบลอการิทึ่ม (Logarithmic) ไม่ใช่แบบเชิงเส้น จึงเป็นการเหมาะสมที่จะบอกปริมาณเสียงเป็นอัตราเชิงลอการิทึ่ม ของค่าที่วัดได้ เรียกว่า เบล แต่ในทางปฏิบัติหน่วยของเบลค่อนข้างใหญ่ โดยทั่วไปนิยมใช้หน่วยที่เป็นเศษหนึ่งส่วนสิบของเบล เรียกว่า เดซิเบล (Decibel)

2.1.7 **ระดับเสียงเวจท์** (Weighted sound level)

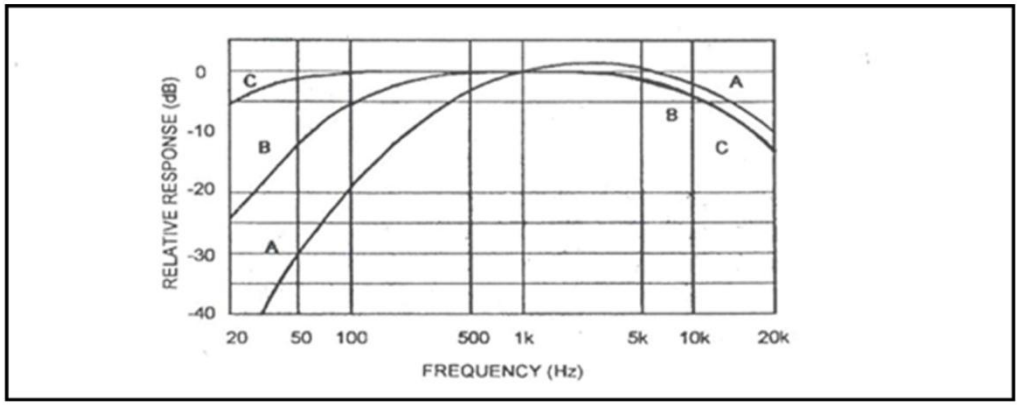
ระดับเสียงเวจท์ คือ ระดับเสียงที่ได้จากการวัดไมโครโฟนแล้วผ่านที่กรองเวจท์ (Weighting network) ซึ่งจะได้ระดับเสียงเวจท์ในหลายรูปแบบ เช่น A-weighted (dBA), B-weighted (dBB), C-weighted (dBC) และ D-weighted (dBD) การทีมีหลายเวจท์ก็เพราะว่าความรู้สึกบางอย่างของคน เช่น ภาวะรำคาญไม่ได้แปรแบบ linear กับความดังเมื่อเทียบกับความถี่ต่างกัน A-weighted เป็นการกรองเสียงที่ให้ผลโดยตรงกับความรู้สึกของคน Scale A มีคุณลักษณะการตอบสนองในการวัดเสียงได้เร็วกว่า Scale B, C และ D และใกล้เคียงกับคุณลักษณะการตอบสนองในการได้ยินของหูมนุษย์มากกว่า Scale B, C และ D

A-weighted เป็นการกรองเสียงเพื่อให้ผลตรงกับความรู้สึกของคน Scale A จะมีคุณลักษณะการตอบสนองในการวัดเสียงได้ดีกว่า Scale B และ C แต่จะใกล้เคียงกับคุณลักษณะการตอบสนองในการได้ยินของหูมนุษย์มากกว่า Scale B และ C

B-weighted มีเหตุผลการกรองเช่นเดียวกันกับ A-weighted แต่ใช้กับเสียงความเข้มปานกลาง ปัจจุบันไม่ค่อยใช้ การวัดด้วย Scale B จะตอบสนองได้ดีในความถี่ระหว่าง 400 Hz – 3,000 Hz

C-weighted ไม่มีการกรองมากนัก การวัดจะใกล้เคียงกับความเป็นจริง จะใช้วัดเสียงของกลุ่มความถี่ต่ำเนื่องจาก A-weighted จะถูกกรองมากเกินไป

D-weighted ใช้วัดเสียงจากอากาศยาน



แผนภูมิที่ 2-2 แสดงค่าระดับเสียงต่างๆ ที่ถูกเวจท์

ที่มา: Cowan, James, Architectural Acoustics Design Guide, 2000:20

2.1.8 **การดูดกลืนเสียง** (Absorption of sound)

อัตราที่เสียงถูกดูดซับในห้อง เช่น ห้องประชุม หรือมีโรงภาพยนตร์หรือโรงละคร เป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้มีเสียงหนวกหู (Noise) หรือเสียงที่ไม่พึงปรารถนาลดน้อยลง ทั้งจะสามารถควบคุมการสะท้อนกลับไปกลับมา (Reverberation) ของเสียงได้ดีด้วย วัสดุที่ผลิตขึ้นเพื่อประโยชน์ในการนี้เรียกว่าวัสดุอะคูสติกส์ (Acoustical Materials) ซึ่งอาจจะเป็นจำพวกไม้อัด หรือวัสดุอย่างอื่นก็ได้ โดยเฉพาะที่มีผิวนิ่มหรือรูพรุน ถ้าใช้วัสดุเหล่านี้และวางในตำแหน่งที่ถูกต้องแล้วทุกๆ คนในโรงภาพยนตร์หรือโรงละครย่อมจะได้ยินเสียงชัดเจนและไพเราะทั่วถึงกันหมด ไม่ว่าจะนั่งอยู่ที่จุดใดของห้องก็ตาม ตัวอย่างเช่น มุมของที่อาจจะเป็นมุมอับของเสียง สถาปนิกอาจติดตั้งวัสดุบุผนังหรือเพดานที่มีการสะท้อนเสียงจากมุมอื่นมาช่วยเสริมเสียงตรงมุมอับก็ได้ หรือในส่วนที่มีเสียงสะท้อนมากๆ จนฟังไม่รู้เรื่อง อาจแก้ไขโดยการบุวัสดุดูดซับเสียงหรือวัสดุอะคูสติกส์ ในบริเวณนั้นๆ เพราะฉะนั้นการออกแบบห้องและการบุวัสดุในแต่ละส่วนของห้องไม่จำเป็นจะต้องบุวัสดุกันเสียงทั่วทั้งห้อง อย่างไรก็ตามการตกแต่งห้องให้สวยงาม ฟังเสียงได้ชัดเจนย่อมต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำมาใช้ว่าปลอดภัย คงทน และทนไฟหรือไม่ มิฉะนั้นก็ก่อให้เกิดปัญหาอย่างอื่นตามมากับวัสดุที่ใช้ เช่น ไฟไหม้ มอดปลวกกิน หรือวัสดุดูดน้ำดูดความชื้น ทำให้เกิดเชื้อรา เป็นต้น

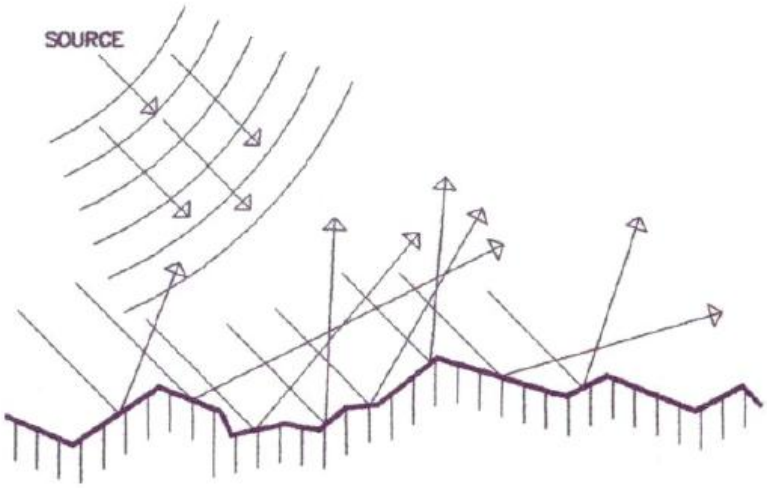
ตามปกติเสียงถูกดูดซับโดยถูกกระทำให้กลายเป็นพลังงานอย่างอื่น แล้วสุดท้ายกลายเป็นพลังงานความร้อน แต่พลังงานความร้อนเกิดขึ้นน้อยมากจนแทบจะไม่กระทบกระเทือนกับประสิทธิภาพของการดูดซับเสียงของวัสดดูดซับเสียง

ในเรื่องของความถี่ ถ้าความถี่สูงวัสดุวัสดุประเภทที่มีรูพรุน (Porous material) จะดูดซับเสียงได้มากกว่าความถี่ต่ำ แต่ในทางกลับกันถ้าเป็นผนังจำพวกไม้อัดหรือผนังกั้นห้อง (Panel vibration) การดูดซับเสียงจะน้อยลงสำหรับความถี่สูง แต่จะดูดซับเสียงที่มีความถี่ต่ำได้มากกว่า

พลังงานที่ถูกดูดซับสามารถอธิบายได้ในรูปของสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเสียง (Sound Absorption Coefficient, α) ที่ได้จากห้องทดลองหรือวัสดุที่เป็นพื้นผิวของห้อง ค่าดูดซับเสียงเป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของวัสดุที่มีช่วง จาก 0 ถึง 1 ถ้าผนังไม่ดูดซับเสียงซึ่งหาได้ยากในธรรมชาติ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงจะเท่ากับ 0 ถ้าผนังดูดซับเสียงไปทั้งหมด เช่น ช่องเปิดจะเท่ากับ 1

2.1.9 การกระจายของเสียง

ถ้าเสียงตกลงบนพื้นขรุขระ เสียงจะสะท้อนกระจัดกระจายออกไปทุกทิศทาง (เช่นเดียวกันกับคลื่นแสง) ถ้าเสียงมาถูกขอบหรือพื้นที่ขรุขระก็จะมีทั้งการสะท้อนและการกระจัดกระจาย มีการเลี้ยวมุมในลักษณะต่างๆกัน หากพื้นผิวที่มีพื้นหน้าขรุขระหรือมีร่องมากก็สามารถทำให้เสียงกระจัดกระจายออกไปได้มากที่สุดหากมีรูพรุน (Porous) ด้วยก็จะสามารถดูดกลืนคลื่นเสียงในเวลาเดียวกันได้



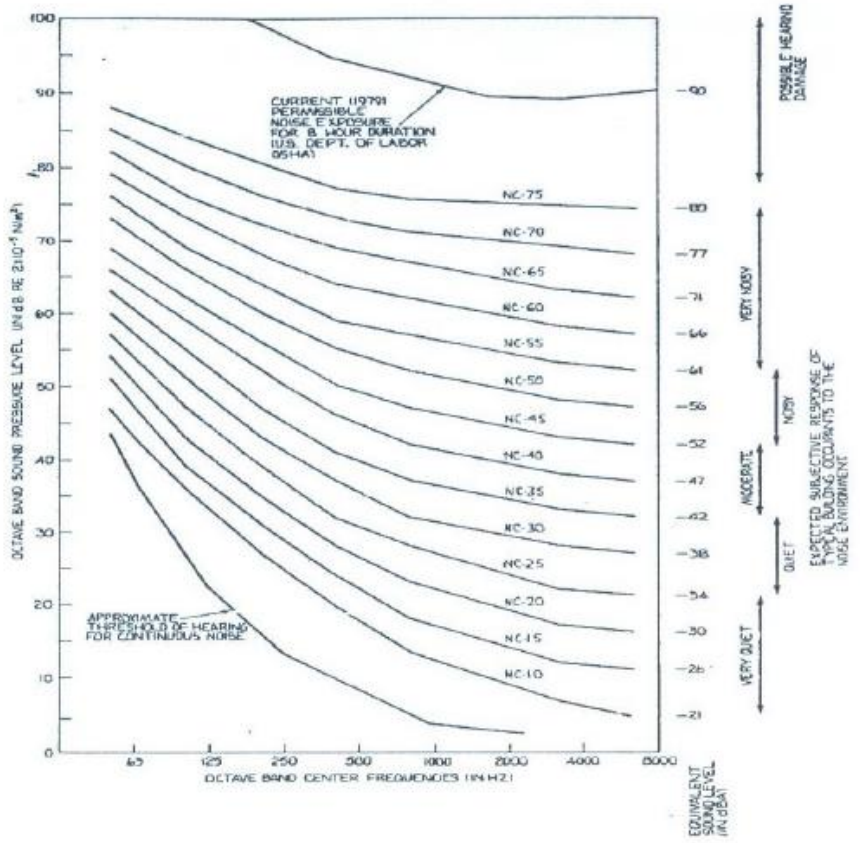
ภาพที่ 2-13 แสดงการกระจัดกระจายของเสียงเมื่อตกกระทบพื้นผิวขรุขระ

ที่มา : Michel Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design, 1933:2

2.1.10 เกณฑ์เสียง

ระดับเสียงของสภาพแวดล้อม (Ambient sound level) ในพื้นที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อระดับเสียงในพื้นที่นั้น และเป็นตัวบอกถึงคุณภาพของเสียงเป็นตัวบอกความพึงพอใจหรือไม่พึงพอใจของกลุ่มคนในพื้นที่ เสียงของสภาพแวดล้อมเป็นตัวกำบังหรือตัวกั้นการส่งผ่านของเสียง ความต้องการระดับเสียงจากสภาพแวดล้อมของแต่ละอาคารแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพื้นที่และความสำคัญของกิจกรรม เกณฑ์เสียงเป็นที่ยอมรับและใช้กันมากในการประเมินปัญหาที่เกิดขึ้นจากเสียงและใช้เป็นเป้าหมายในการออกแบบเพื่อให้ได้เสียงแบคกราวด์ตามที่ต้องการและป็นที่พอใจเป็นเกณฑ์เสียงมีพื้นฐานขึ้นกับระดับเสียงรบกวนเสียงพูด ซึ่งเป็นลักษณะเส้น วิธี

หาเกณฑ์เสียงโดยการลากความสัมพันธ์ระหว่างความดังกับความถี่จะได้ค่าเกณฑ์เสียง (Noise Criteria, NC) ที่อยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุดของเส้นนั้น



แผนภูมิที่ 2-3 แสดงกราฟทางวิศวกรรมที่เกณฑ์แสดงเกณฑ์เสียง (Noise Criteria, NC)

ที่มา : Cavanaugh. J Willaim and Wilkes, Architectural Acoustics Principles and Practice, 1998:37

2.1.11 **เวลาการสะท้อนกลับของเสียง** (Reverberation Time, RT60)

เสียงที่ก้องสะท้อนกลับไปกลับมา เช่น ห้องประชุมที่มีผนังแบบฉาบปูน เมื่อสร้างเสร็จและยังไม่มีการตกแต่ง เสียงที่เกิดขึ้นจากต้นกำเนิดเสียงสะท้อนกลับมาหาเราในเวลาที่ยาวนาน เวลาที่ยาวนานคือเวลาที่ทำให้เกิดการรบกวน เพราะฉะนั้นนอกจากการจำกัดการสะท้อนแล้ว เรายังควรลดเวลาของการสะท้อนกลับให้น้อยลง จะช่วยให้การได้ยินดียิ่งขึ้น ตามหลักวิชาการเรียกว่า “Reverberation Time” หรือเขียนย่อว่า RT หรือ RT60 วิธีการลดเวลาของการสะท้อนกลับให้น้อยลงวิธีหนึ่งก็คือ การเลือกใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ดี เช่น พรม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ 0.63 ในความถี่ที่ 500 Hz แทนพื้นที่หินขัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ 0.02 (ค่า

สัมประสิทธิ์ของ 0.63 คือ ความสามารถของวัสดุในการดูดซับเสียงได้ 63%และค่าของ 0.02 มีการดูดซับเสียงได้เพียง 2% เท่านั้น)

Reverberation Time (RT หรือ RT60) คือ เวลาการสะท้อนกลับของเสียงที่คงเหลืออยู่เมื่อต้นเสียงหยุดแล้ว เป็นการวัดค่าของเวลาทีเสียงสะท้อนกลับที่มีระดับเสียงลดลง 60dB เมื่อต้นเสียงหยุดแล้ว ถ้าเวลาน้อยไปจะทำให้รู้สึกว่าเสียงในห้องนั้นหายเร็วเกินไป ไม่มีชีวิตชีวา หรือเสียงแห้ง(Dead Sound) โดยเฉพาะห้องเล่นดนตรี แต่ถ้าค่าของเวลามากไป ก็จะได้ยินเสียงสะท้อนมาก (Live Sound)

การออกแบบห้องต่างๆ การสะท้อนเสียงและการใช้วัสดุสะท้อนเสียง กระจายเสียง และดูดซับเสียงมีความสำคัญอย่างมากต่อผู้ที่ใช้ เพราะหากเสียงก้องเกินไปจะทำให้การสื่อสารข้อมูลผิดพลาดไปขาดความชัดเจน ซึ่งมีผลต่อการทำงานของผู้ที่อยู่ในพื้นที่ เพราะฉะนั้นการออกแบบห้องจำเป็นต้องควบคุมความก้องกังวาน(RT60) ให้เหมาะสม

การหาค่า RT ตามวิธีของซาบิน (Sabine) มีดังนี้ (Cabanaugh, William J; and Wikes, Joseph A,1998)

RT = 0.161 V/A (In metric Units

เมื่อ RT = Reverberation Time (RT), Second

V = ปริมาตรของห้อง, m^3

A = ค่าการดูดซับเสียงรวมของห้อง, (Sabine, m^3)

= $S1\alpha1 + S2\alpha2 + S3\alpha3 + \ldots\ldots\ldots\ldots Sn\alpha n$

S1,2,3 = พื้นที่ผิวของห้อง, m^2

α1,2,3= สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

2.2 ฉนวนและตัวดูดซับเสียง

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุชนิดต่างๆ

ที่มา: M.David Egan, Architectural Acoustics, 1988:32-33

SOUND ABSORPTION DATA FOR COMMON BUILDING MATERIALS AND FURNISHINGS

Material	Sound Absorption Coefficient 125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC Number *
Walls[1-3, 9, 12]							
Sound-Reflecting:							
1. Brick, unglazed	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.05
2. Brick, unglazed and painted	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00
3. Concrete, rough	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.05
4. Concrete block, painted	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08	0.05
5. Glass, heavy (large panes)	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.05
6. Glass, ordinary window	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	0.15
7. Gypsum board, 1/2 in thick (nailed to 2 × 4s, 16 in oc)	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09	0.05
8. Gypsum board, 1 layer, 5/8 in thick (screwed to 1 × 3s, 16 in oc with airspaces filled with fibrous insulation)	0.55	0.14	0.08	0.04	0.12	0.11	0.10
9. Construction no. 8 with 2 layers of 5/8-in-thick gypsum board	0.28	0.12	0.10	0.07	0.13	0.09	0.10
10. Marble or glazed tile	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00
11. Plaster on brick	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
12. Plaster on concrete block (or 1 in thick on lath)	0.12	0.09	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05
13. Plaster on lath	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03	0.05
14. Plywood, 3/8-in paneling	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.15
15. Steel	0.05	0.10	0.10	0.10	0.07	0.02	0.10
16. Venetian blinds, metal	0.06	0.05	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10
17. Wood, 1/4-in paneling, with airspace behind	0.42	0.21	0.10	0.08	0.06	0.06	0.10
18. Wood, 1-in paneling with airspace behind	0.19	0.14	0.09	0.06	0.06	0.05	0.10
Sound-Absorbing:							
19. Concrete block, coarse	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25	0.35
20. Lightweight drapery, 10 oz/yd², flat on wall (*Note:* Sound-reflecting at most frequencies.)	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35	0.15
21. Mediumweight drapery, 14 oz/yd², draped to half area (i.e., 2 ft of drapery to 1 ft of wall)	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60	0.55
22. Heavyweight drapery, 18 oz/yd², draped to half area	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65	0.60
23. Fiberglass fabric curtain, 8 1/2 oz/yd², draped to half area (*Note:* The deeper the airspace behind the drapery (up to 12 in), the greater the low-frequency absorption.)	0.09	0.32	0.68	0.83	0.39	0.76	0.55
24. Shredded-wood fiberboard, 2 in thick on concrete (mtg. A)	0.15	0.26	0.62	0.94	0.64	0.92	0.60
25. Thick, fibrous material behind open facing	0.60	0.75	0.82	0.80	0.60	0.38	0.75
26. Carpet, heavy, on 5/8-in perforated mineral fiberboard with airspace behind	0.37	0.41	0.63	0.85	0.96	0.92	0.70
27. Wood, 1/2-in paneling, perforated 3/16-in-diameter holes, 11% open area, with 2 1/2-in glass fiber in airspace behind	0.40	0.90	0.80	0.50	0.40	0.30	0.65
Floors[9, 11]							
Sound-Reflecting:							
28. Concrete or terrazzo	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
29. Linoleum, rubber, or asphalt tile on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05
30. Marble or glazed tile	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00
31. Wood	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.10
32. Wood parquet on concrete	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07	0.05
Sound-Absorbing:							
33. Carpet, heavy, on concrete	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65	0.30
34. Carpet, heavy, on foam rubber	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73	0.55
35. Carpet, heavy, with impermeable latex backing on foam rubber	0.08	0.27	0.39	0.34	0.48	0.63	0.35
36. Indoor-outdoor carpet	0.01	0.05	0.10	0.20	0.45	0.65	0.20
Ceilings[6, 8-10] †							
Sound-Reflecting:							
37. Concrete	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
38. Gypsum board, 1/2 in thick	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09	0.05
39. Gypsum board, 1/2 in thick, in suspension system	0.15	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09	0.05
40. Plaster on lath	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03	0.05
41. Plywood, 3/8 in thick	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.15
Sound-Absorbing:							
42. Acoustical board, 3/4 in thick, in suspension system (mtg. E)	0.76	0.93	0.83	0.99	0.99	0.94	0.95
43. Shredded-wood fiberboard, 2 in thick on lay-in grid (mtg. E)	0.59	0.51	0.53	0.73	0.88	0.74	0.65

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุชนิดต่างๆ (ต่อ)

ที่มา: M.David Egan, Architectural Acoustics, 1988:32-33

Material	Sound Absorption Coefficient 125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC Number *
44. Thin, porous sound-absorbing material, 3/4 in thick (mtg. B)	0.10	0.60	0.80	0.82	0.78	0.60	0.75
45. Thick, porous sound-absorbing material, 2 in thick (mtg. B), or thin material with airspace behind (mtg. D)	0.38	0.60	0.78	0.80	0.78	0.70	0.75
46. Sprayed cellulose fibers, 1 in thick on concrete (mtg. A)	0.08	0.29	0.75	0.98	0.93	0.76	0.75
47. Glass-fiber roof fabric, 12 oz/yd²	0.65	0.71	0.82	0.86	0.76	0.62	0.80
48. Glass-fiber roof fabric, 37 1/2 oz/yd² (*Note:* Sound-reflecting at most frequencies.)	0.38	0.23	0.17	0.15	0.09	0.06	0.15
49. Polyurethane foam, 1 in thick, open cell, reticulated	0.07	0.11	0.20	0.32	0.60	0.85	0.30
50. Parallel glass-fiberboard panels, 1 in thick by 18 in deep, spaced 18 in apart, suspended 12 in below ceiling	0.07	0.20	0.40	0.52	0.60	0.67	0.45
51. Parallel glass-fiberboard panels, 1 in thick by 18 in deep, spaced 6 1/2 in apart, suspended 12 in below ceiling	0.10	0.29	0.62	1.12	1.33	1.38	0.85
Seats and Audience[1, 5, 7, 9] ‡							
52. Fabric well-upholstered seats, with perforated seat pans, unoccupied	0.19	0.37	0.56	0.67	0.61	0.59	
53. Leather-covered upholstered seats, unoccupied¶	0.44	0.54	0.60	0.62	0.58	0.50	
54. Audience, seated in upholstered seats¶	0.39	0.57	0.80	0.94	0.92	0.87	
55. Congregation, seated in wooden pews	0.57	0.61	0.75	0.86	0.91	0.86	
56. Chair, metal or wood seat, unoccupied	0.15	0.19	0.22	0.39	0.38	0.30	
57. Students, informally dressed, seated in tablet-arm chairs	0.30	0.41	0.49	0.84	0.87	0.84	
Openings[9] ¶							
58. Deep balcony, with upholstered seats			0.50–1.00				
59. Diffusers or grilles, mechanical system			0.15–0.50				
60. Stage			0.25–0.75				
Miscellaneous[3, 9, 11]							
61. Gravel, loose and moist, 4 in thick	0.25	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.70
62. Grass, marion bluegrass, 2 in high	0.11	0.26	0.60	0.69	0.92	0.99	0.60
63. Snow, freshly fallen, 4 in thick	0.45	0.75	0.90	0.95	0.95	0.95	0.90
64. Soil, rough	0.15	0.25	0.40	0.55	0.60	0.60	0.45
65. Trees, balsam firs, 20 ft² ground area per tree, 8 ft high	0.03	0.06	0.11	0.17	0.27	0.31	0.15
66. Water surface (swimming pool)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.00

*NRC (noise reduction coefficient) is a single-number rating of the sound absorption coefficients of a material. It is an average that only includes the coefficients in the 250 to 2000 Hz frequency range and therefore should be used with caution. See page 50 for a discussion of the NRC rating method.

†Refer to manufacturer's catalogs for absorption data which should be from up-to-date tests by independent acoustical laboratories according to current ASTM procedures.

‡Coefficients are per square foot of seating floor area or per unit. Where the audience is randomly spaced (e.g., courtroom, cafeteria), mid-frequency absorption can be estimated at about 5 sabins per person. To be precise, coefficients per person must be stated in relation to spacing pattern.

§The floor area occupied by the audience must be calculated to include an *edge effect* at aisles. For an aisle bounded on both sides by audience, include a strip 3 ft wide; for an aisle bounded on only one side by audience, include a strip 1 1/2 ft wide. No edge effect is used when the seating abuts walls or balcony fronts (because the edge is shielded). The coefficients are also valid for orchestra and choral areas at 5 to 8 ft² per person. Orchestra areas include people, instruments, music racks, etc. No edge effects are used around musicians.

¶Coefficients for openings depend on absorption and cubic volume of opposite side.

Test Reference

"Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method," ASTM C 423. Available from American Society for Testing and Materials (ASTM), 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103.

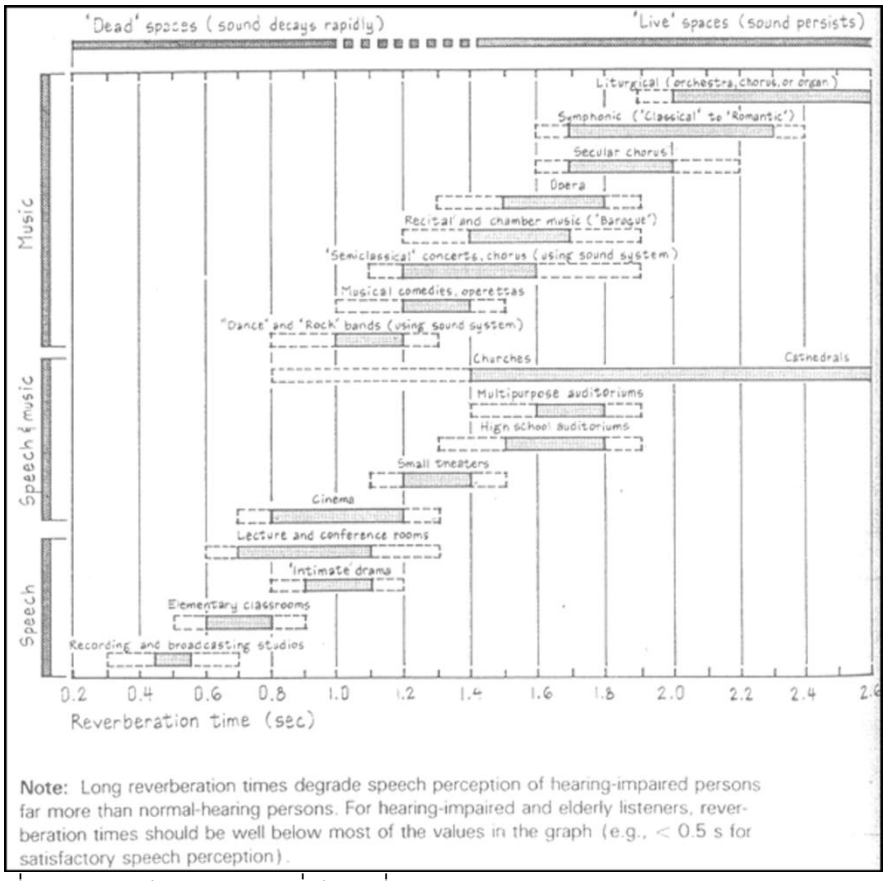
Sources

1. L. L. Beranek, "Audience and Chair Absorption in Large Halls." *Journal of the Acoustical Society of America*, January 1969.
2. A. N. Burd et al., "Data for the Acoustic Design of Studios," British Broadcasting Corporation, BBC Engineering Monograph no. 64, November 1966.
3. E. J. Evans and E. N. Bazley, "Sound Absorbing Materials," H. M. Stationery Office, London, 1964.

2.3 องค์ประกอบในการก่อให้เกิดคุณภาพเสียงในอาคารที่ดี

2.3.1 การออกแบบห้องโดยการควบคุมคุณภาพอะคูสติกส์ และการเดินทางของเสียงภายในอาคาร

Reverberation Time (RT60) หมายถึง เวลาการสะท้อนกลับของเสียงที่คงเหลืออยู่เมื่อต้นเสียงหยุดแล้ว เป็นการวัดค่าของเวลาทีเสียงสะท้อนกลับที่มีระดับเสียงลดลง 60 dB เมื่อต้นเสียงหยุดแล้ว



แผนภูมิที่ 2-4 แสดงรีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ที่เหมาะสมแต่ละรูปแบบการใช้งาน ในย่านความถี่ 500 และ 1,000 เฮิร์ซ

ที่มา: Cavanaugh, William J; and Wikes, Joseph A, Acrhitectural Acoustics: Principles andPractice, 1998:156

โดยที่ในการวิจัยนี้จะใช้การทดสอบที่ความถี่ 1,000 Hz และประเภทการใช้งานของอาคารเป็นห้องเรียน และสัมนา จึงมีค่า RT60 ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.7-1.1 วินาที

รีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ สามารถคำนวณหาได้ด้วยสมการ

$$RT = 0.161\ V/A$$

เมื่อ RT คือ รีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ (reverberation time, RT60)
มีหน่วยเป็น วินาที
V คือ ปริมาตรห้อง มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3)
A คือ การดูดซับเสียงรวมของห้อง มีหน่วยเป็นซาบิน (sabins)

(Egan, 1972)

ค่าการดูดซับเสียงรวมเกิดจากผลรวมของค่าการดูดซับของทุกพื้น ที่ผิวภายในห้อง ตามสมการที่

$$A = \sum S\ \alpha$$

เมื่อ A คือ การดูดซับเสียงรวมของห้อง มีหน่วยเป็นซาบิน (sabins)
S คือ พื้นที่ผิวในห้อง มีหน่วยเป็นตารางเมตร
α คือ ค่าการดูดซับเสียงของผิววัสดุ

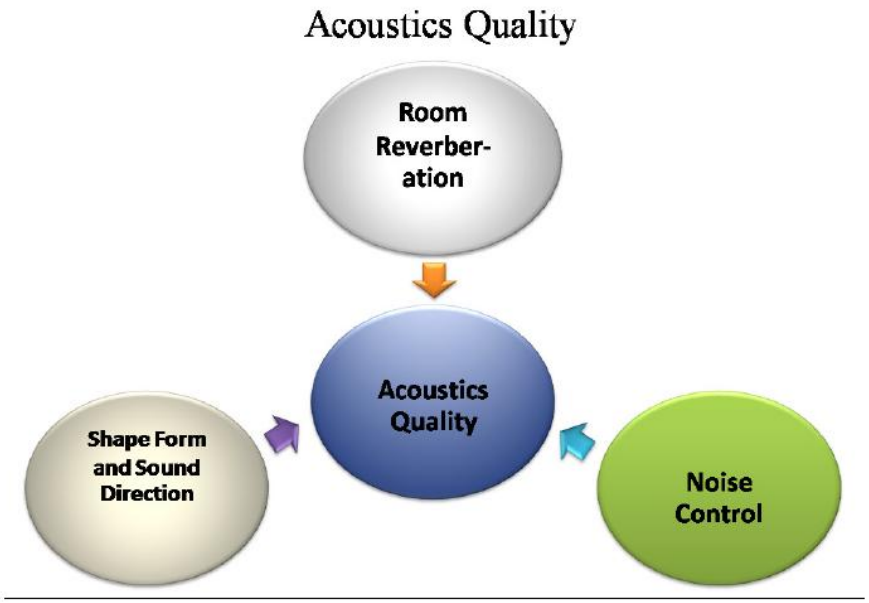
(Egan, 1972)

คุณสมบัติของรีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ในแต่ละรูปแบบการใช้งานของห้องมีความต้องการที่แตกต่างกัน กรณีในห้องที่ต้องการความนิ่งเงียบเช่นห้องอัดเสียง ต้องการรีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ที่ต่ำ กรณีห้องที่ต้องการความก้องกังวาลของเสียงเช่นห้องแสดงดนตรี ต้องการรีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ที่สูง ตามแผนภูมิที่ 2-1 ห้องสำหรับประชุมสัมมนาและห้องเรียนต้องการ รีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ ประมาณ 0.7-1.1 วินาที

จากทฤษฎีและแนวความคิดในการประเมินปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพเสียง คือ การกำจัดเสียงรบกวนที่ไม่ต้องการออกไป (Noise Control) และควบคุมเสียงภายในที่ต้องการให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน โดยผู้ที่อยู่ในอาคารสามารถได้ยินเสียงอย่างชัดเจนจากพลังงานธรรมชาติของมนุษย์ หรือผู้พูด โดยไม่ต้องใช้ระบบเสียง (Sound System) ในการใช้งาน

เสียงรบกวน (Noise) หรือเสียงที่ทำให้เกิดความรำคาญเป็นผลต่อสมาธิของผู้ฟัง โดยระดับที่ทำให้เกิดการรบกวนขึ้นอยู่กับการใช้งานในแต่ละประเภท วิธีป้องกันเสียงรบกวนจากการศึกษาแหล่งกำเนิดเสียงและระดับของเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น รูปแบบการส่งผ่านของเสียงเข้าสู่อาคาร เสียงที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร เช่น เสียงจากการจราจร เสียงฝนตก เป็นต้น เสียงรบกวนที่เกิดภายในอาคาร ได้แก่ เสียงจากระบบปรับอากาศ และเสียงจากกลุ่มคน

ระดับเสียง (Sound Pressure Level) ที่เกิดขึ้นภายในอาคาร เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงหรือผู้พูด และระยะห่างของผู้รับฟัง ดังนั้น การสร้างประสิทธิภาพในการรับฟังภายใน คือ การที่ผู้รับฟังทุกตำแหน่งในห้อง ได้ยินเสียงจากผู้พูดได้อย่างชัดเจน การควบคุมเสียงภายในอาคารมีความสัมพันธ์กับขนาดและรูปทรงของอาคารต่างๆ ค่าการสะท้อนเสียง การกระจายเสียง และการดูดซับเสียง ของพื้นผิวภายในห้อง (ผนัง พื้น ฝ้าเพดาน) และ เสียงก้องภายในห้อง สามารถสรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 2-14 แสดงการควบคุมเสียงภายในห้อง

ที่มา : สราวุฒิ โสนะมิตร. ปัจจัยสำคัญในการออกแบบห้องประชุมเพื่อสร้างคุณภาพเสียงที่ดี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551)

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

จากทฤษฎีพบว่าการที่อาคารจะมีสภาพทางเสียงภายในที่ดีนั้น ขึ้นกับองค์ประกอบหลายส่วน ทั้งทางด้าน Acoustics ที่จะต้องกำหนดค่าต่างๆภายในห้องให้เหมาะสม และทางด้านการออกแบบที่จำเป็นต้องกำหนดรูปทรงของอาคารเพื่อให้เหมาะสมต่อลักษณะการใช้งาน ต้องกำหนดประเภทการใช้งานของอาคารที่แน่นอน มีการกำหนดตำแหน่งของผู้พูด และผู้ฟัง รวมถึงวัสดุภายในอาคารต้องมีค่าการดูดซับเสียง และได้รับการติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม สภาวะทางเสียงภายในอาคารจึงจะเหมาะสมกับการใช้งาน

ซึ่งปัจจุบันอาคารทรงต่างๆทั่วไปนั้นได้มีการออกแบบและติดตั้งอย่างดีแล้วเพื่อที่จะสามารถใช้งานสภาพทางเสียงภายในอาคารที่ดี แต่ในอาคารทรงกลมนั้นยังเป็นปัญหาอยู่ ซึ่งสาเหตุสำคัญที่อาคารทรงกลมมีปัญหาเรื่องสภาวะทางเสียงที่ยากต่อการแก้ไขนั้น เนื่องจากรูปทรงของอาคารเองนั้น มีลักษณะโค้ง ซึ่งเป็นที่มาของปัญหาเรื่องการโฟกัสของเสียง

จากทฤษฎีที่กล่าวว่า มุมการสะท้อนของเสียงนั้น มุมตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อน เมื่อนำมารวมกับลักษณะโค้งของอาคารทรงกลม สิ่งที่เกิดขึ้นคือ เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของวงกลม ลักษณะการเกิดเสียงจะมีลักษณะเป็นทรงกลมเช่นกัน ทำให้เสียงจะกระจายออกไป โดยมีลักษณะที่ขนานกับพื้นผิวของอาคาร จะทำให้เกิดการสะท้อนของเสียงที่ไม่มีที่สิ้นสุด ทำให้ค่าความก้องภายในอาคารสูงมาก อันเป็นที่มาของปัญหาสภาวะทางเสียงภายในอาคารทรงกลม

3.1 วิธีการศึกษาวิจัย

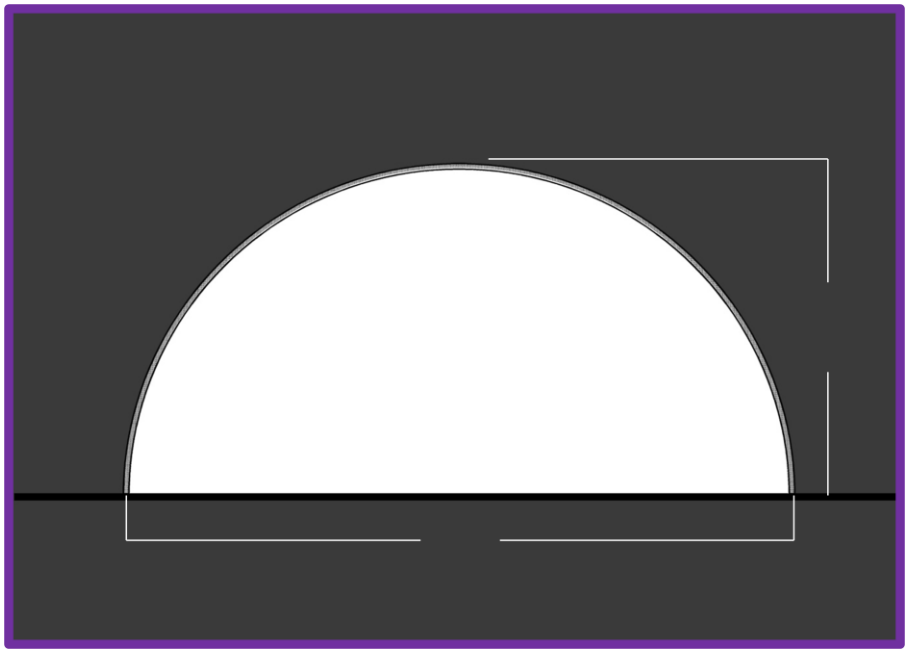
3.1.1 รวบรวมข้อมูล ทฤษฎี จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อสรุปปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ในการก่อให้เกิดสภาวะทางเสียงที่ดีภายในอาคารทรงกลม

3.1.2 เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์พฤติกรรมของเสียงที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าจริงภายในอาคาร ทั้งอาคารทรงเหลี่ยม และทรงกลม โดยดำเนินตามวิธีการออกแบบทั่วไปที่ใช้ในปัจจุบัน และการออกแบบโดยใช้แนวคิดใหม่

3.1.3 ออกแบบปรับปรุง โดยพัฒนาจากผลวิเคราะห์ ซึ่งรวบรวมข้อมูลทางด้าน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการก่อให้เกิดสภาวะทางเสียงที่ดีภายในอาคารทรงกลม และประเมินผลสภาพทางเสียงภายในอาคาร

3.2 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

- งานวิจัยชิ้นนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาสภาพเสียงภายในอาคารทรงกลม จะไม่คำนึงถึงเสียงจากภายนอกอาคาร
- ค่าระดับเสียงของสภาพแวดล้อมต้องอยู่ในช่วง 35-50 dBA
- ในการวิจัยนี้ จะทำการวิจัยโดยใช้แหล่งกำเนิดเสียงซึ่งสามารถสร้างเสียงที่มีความถี่ 1,000-1,500 Hz และในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งนั้นเสียงที่ใช้ในการทดสอบจะต้องมีความดังอยู่ในช่วง 100-110 dBA เท่านั้น
- รูปแบบของอาคารที่ใช้ในการศึกษาและวิจัย จะเป็นอาคารทรงกลมเท่านั้น และอัตราส่วนของความสูงของอาคารกับเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น จะต้องเป็น 1:2 เท่านั้น



ภาพที่ 3-1 แสดงลักษณะอาคารที่ใช้ในงานวิจัย

- ตัวแปรที่สนใจในการวิจัยนี้ได้แก่ ขนาดของอาคาร ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง ตำแหน่งของผู้รับฟัง ตำแหน่งของวัสดุดูดซับเสียง

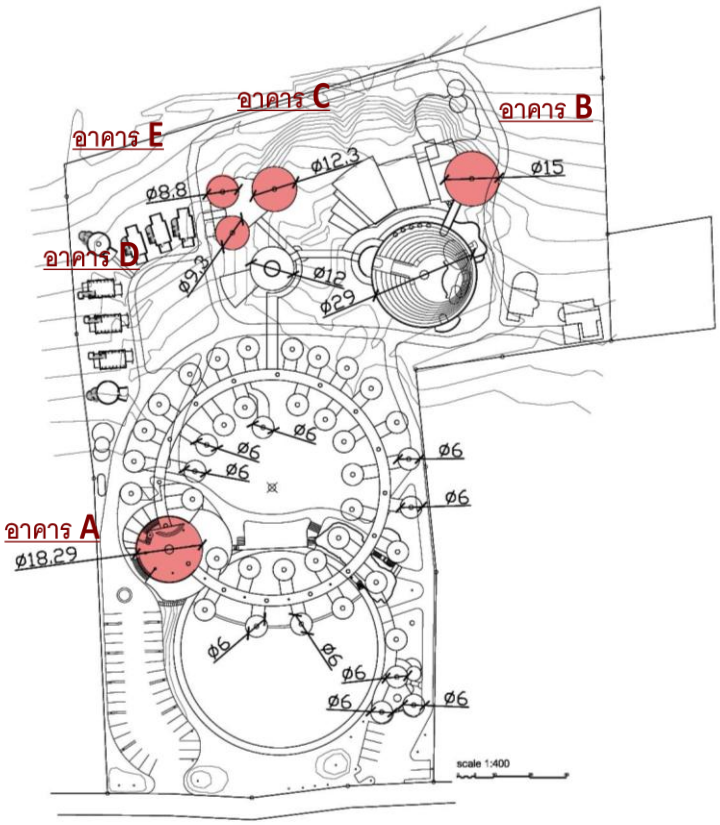
- ลักษณะการใช้งานของอาคารที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ อาคารที่เหมาะแก่การใช้งานในการสัมนา และการเรียนการสอน โดยค่า Reverberation times ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.7-1.1 วินาที

3.3 รูปแบบกรณีศึกษาในการวิจัย

อาคารที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้ได้เลือกไว้เป็นสองรูปแบบ คืออาคารทรงเหลี่ยม และอาคารทรงกลม โดยเลือกให้มีขนาดและลักษณะการใช้งานใกล้เคียงกัน เพื่อสามารถใช้ในการเปรียบเทียบ โดยจะเน้นไปที่อาคารทรงกลมเป็นหลักโดยเลือกไว้ 5ขนาด เพื่อให้สามารถเห็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

3.3.1 รายระเอียดของอาคารทรงเหลี่ยมที่ใช้ในการวิจัย อาคารมีขนาดพื้นที่ 612 ตร.ม. มีลักษณะเป็นทรงห้าเหลี่ยม วัสดุกรุผิวภายใน ส่วนของผนังเป็นเมทัลชีท และส่วนของพื้นเป็นคอนกรีตหนา อาคารมีปริมาตร 940 ลบ.ม. ลักษณะการใช้งาน ใช้เป็นห้องประชุมสัมมนา และเป็นห้องเรียน

3.3.2 รายละเอียดของอาคารทรงกลมที่ใช้ในการวิจัย อาคารทรงกลมจะแบ่งเป็น 5 ขนาด



ภาพที่ 3-2 แสดงผัง, ขนาดและตำแหน่งของอาคารที่ใช้ในงานวิจัย

ภาพที่ 3-3 แสดงทัศนียภาพและลักษณะรูปทรงของอาคารที่ใช้ในการศึกษาและวิจัย

3.3.2.1 อาคาร A เป็นอาคารทรงกลมขนาดใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลางความยาว 18 ม. ความสูง 9 ม. มีปริมาตร 1527.43 ลบ.ม. พื้นที่ผิวของอาคาร 763.72 ตร.ม. วัสดุกรุผิวภายใน ส่วนของผนังเป็นคอนกรีตบาง และส่วนของพื้นเป็นคอนกรีตบาง ลักษณะการใช้งานใช้เป็นLobby สำหรับรับแขกที่มาใช้งานที่พักของรีสอร์ท

3.3.2.2 อาคาร B อาคารทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว 15 ม. ความสูง 7.5 ม. มีปริมาตร 883.93 ลบ.ม. พื้นที่ผิวของอาคาร 530.36 ตร.ม. วัสดุกรุผิวภายในส่วนของผนังเป็นคอนกรีตบาง และส่วนของพื้นเป็นคอนกรีตหนา ลักษณะการใช้งาน ใช้เป็น ห้องประชุมสัมมนา และห้องเรียนขนาดเล็ก

3.3.2.3 อาคาร C อาคารทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว 11.2 ม. ความสูง 5.76 ม. มีปริมาตร 367.96 ลบ.ม. พื้นที่ผิวของอาคาร 295.68 ตร.ม. วัสดุกรุผิวภายในส่วนของผนังเป็นคอนกรีตบาง และส่วนของพื้นเป็นคอนกรีตหนา ลักษณะการใช้งาน ใช้เป็น ห้องประชุมสัมมนา และห้องเรียนขนาดเล็ก

3.3.2.4 อาคาร D อาคารทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว 9 ม. ความสูง 4.5 ม. มีปริมาตร 190.93 ลบ.ม. พื้นที่ผิวของอาคาร 190.93 ตร.ม. วัสดุกรุผิวภายในส่วนของผนังเป็นคอนกรีตบาง และส่วนของพื้นเป็นคอนกรีตหนา ลักษณะการใช้งาน ใช้เป็น ห้องประชุมสัมมนา และห้องเรียนขนาดเล็ก

3.3.2.5 อาคาร E อาคารทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว 8.5 ม. ความสูง 4.25 ม. มีปริมาตร 160.84 ลบ.ม. พื้นที่ผิวของอาคาร 170.30 ตร.ม. วัสดุกรุผิวภายในส่วนของผนังเป็นคอนกรีตบาง และส่วนของพื้นเป็นคอนกรีตหนา ลักษณะการใช้งาน ใช้เป็น ห้องประชุมสัมมนา และห้องเรียนขนาดเล็ก

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.4.1 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรเรื่องคุณภาพของเสียง

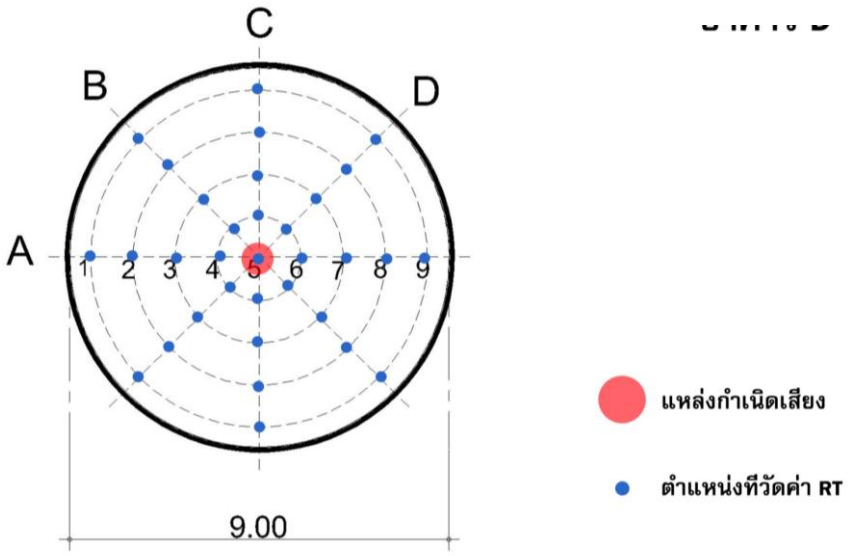
- ตรวจวัดระดับเสียงสภาพแวดล้อม (background noise) ภายในห้อง มีหน่วยเป็น เดซิเบลเอ (dBA)
- ระดับเสียงภายในห้องเมื่อทดสอบโดยใช้จุดกำเนิดเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วง 1,000-1,500 Hz ใช้หน่วยวัดเป็น เดซิเบลเอ (dBA)
- ค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ (Reverberation Time; RT60) มีหน่วยเป็นวินาที (sec)
- ตำแหน่งของจุดกำเนิดเสียง และตำแหน่งของผู้รับฟัง โดยกำหนดตามลักษณะการใช้งาน

-ปริมาณและค่าดูดซับเสียงของวัสดุต่างๆภายในห้อง

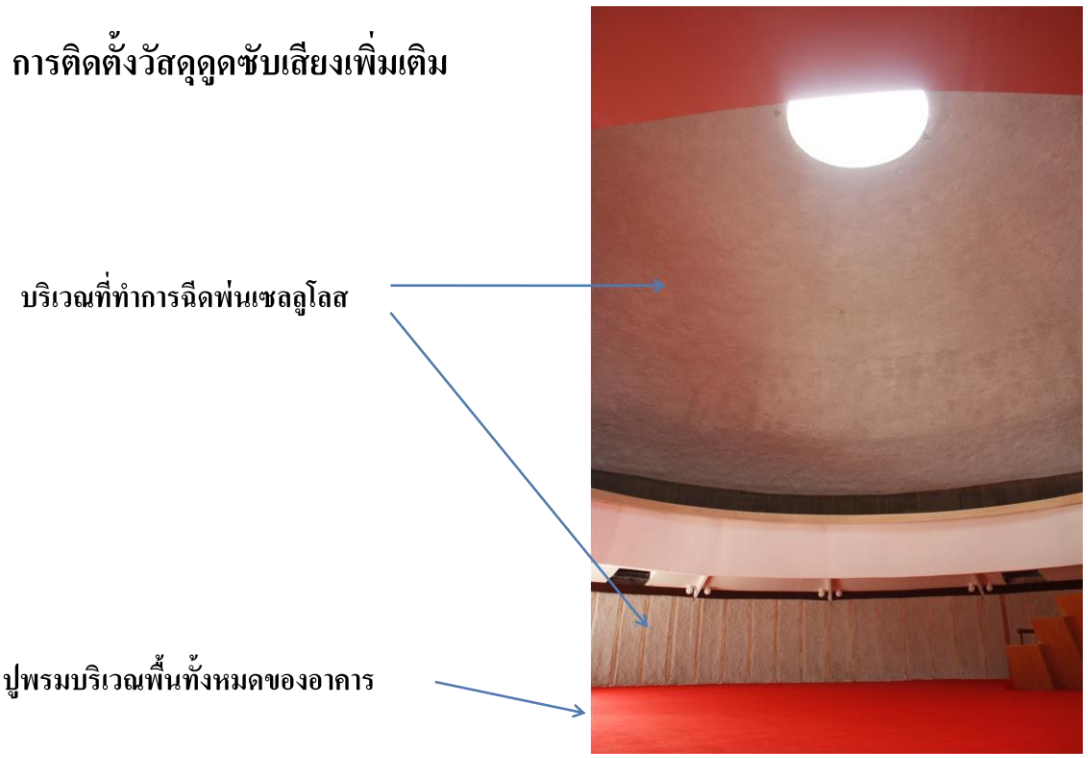
-ตำแหน่งของวัสดุดูดซับเสียงภายในห้อง

3.4.2 วิธีทดสอบตัวแปรต่าง ๆในการวิจัย

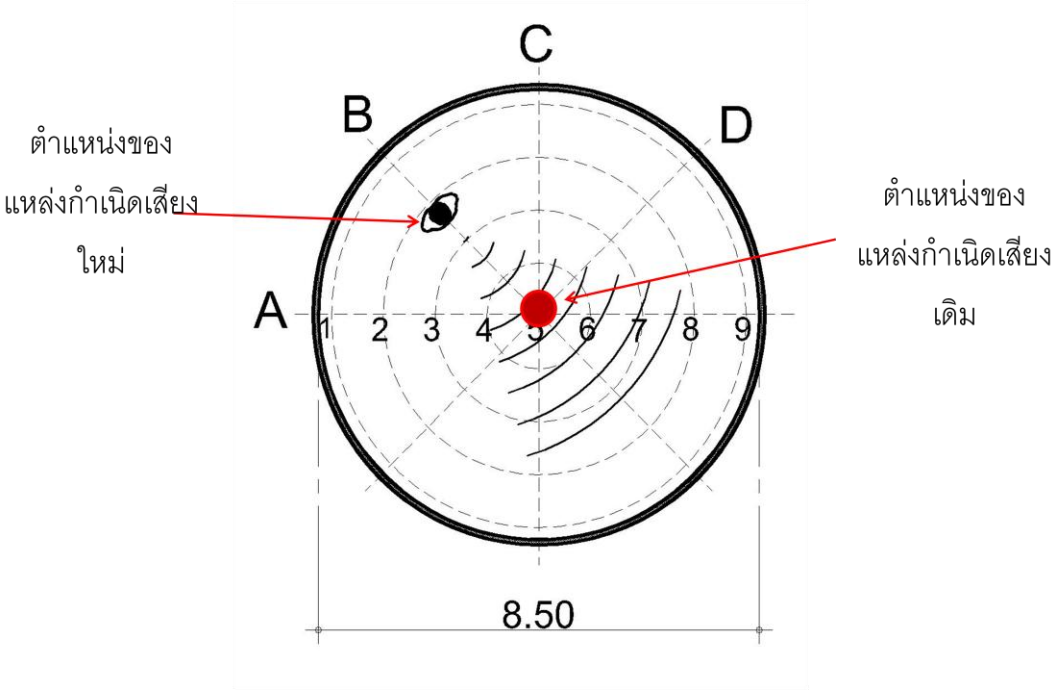
3.4.2.1 ทำการเก็บค่า RT ทั่วบริเวณของอาคารทรงกลม โดยเริ่มจากจุดศูนย์กลางของวงกลม กระจายออกไปตามรัศมี โดยให้ห่างจากจุดศูนย์กลางของอาคารเพิ่มขึ้นจุดละ 1 m. และให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของอาคาร



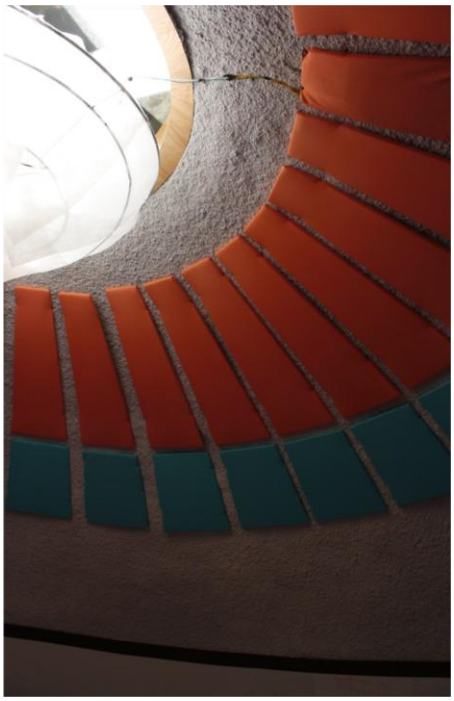
3.4.2.2 ติดตั้งฉนวนประเภทเซลลูโลส ความหนา 25 mm. ซึ่งมีค่าการดูดซับเสียงที่ความถี่ 1000-2000 Hz เท่ากับ 0.91 ไว้บริเวณผนังอาคารทั้งหมด และในส่วนของบริเวณพื้นใช้พรมซึ่งมีความหนา 0.25 mm.



3.4.2.3 ทำการย้ายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง เพื่อค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม และหาจุดวิกฤตของอาคารที่มีลักษณะเป็นทรงกลม

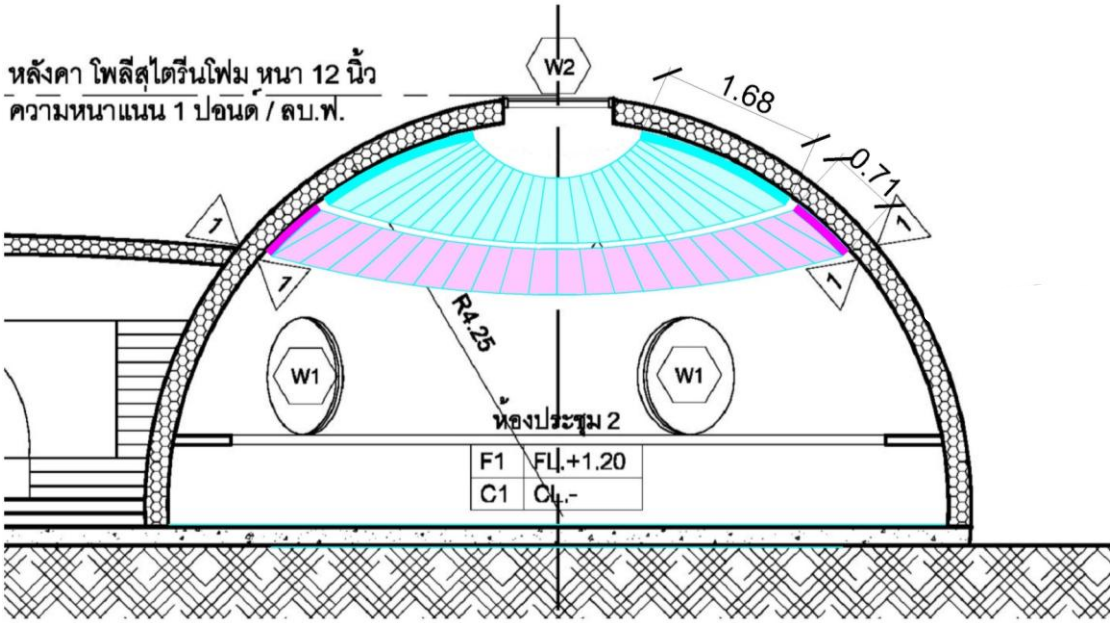


3.4.2.4 เพิ่มปริมาณฉนวนดูดซับเสียงภายในอาคาร โดยทำการเพิ่มฉนวนใยแก้วที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 45k และหนา 25 mm. เพื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับเสียงภายในอาคาร

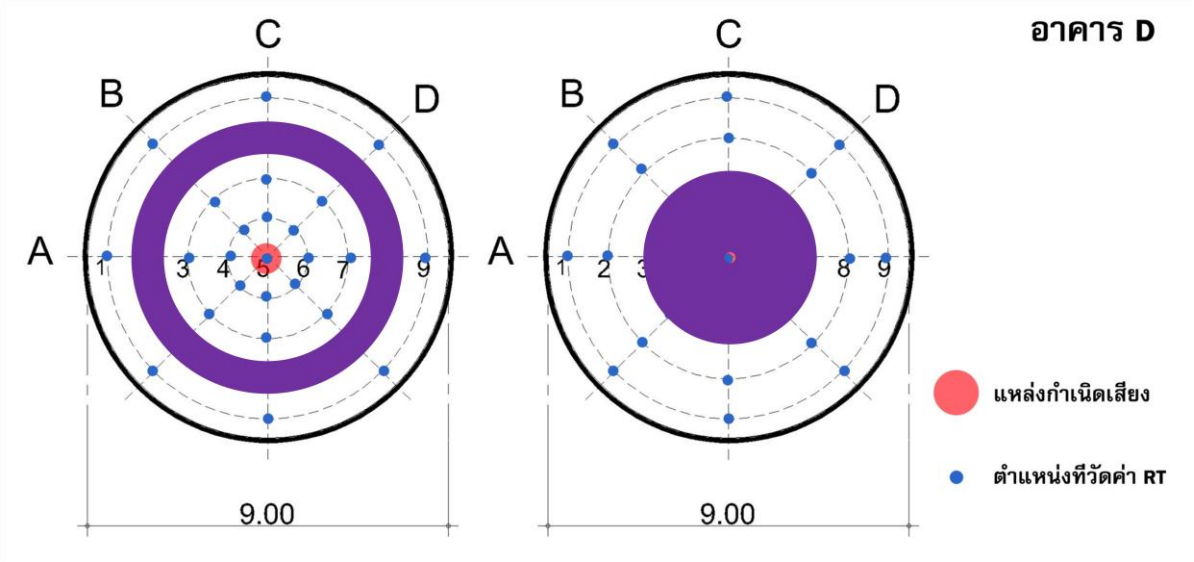


การติดตั้งฉนวนใยแก้วเพิ่มเติม

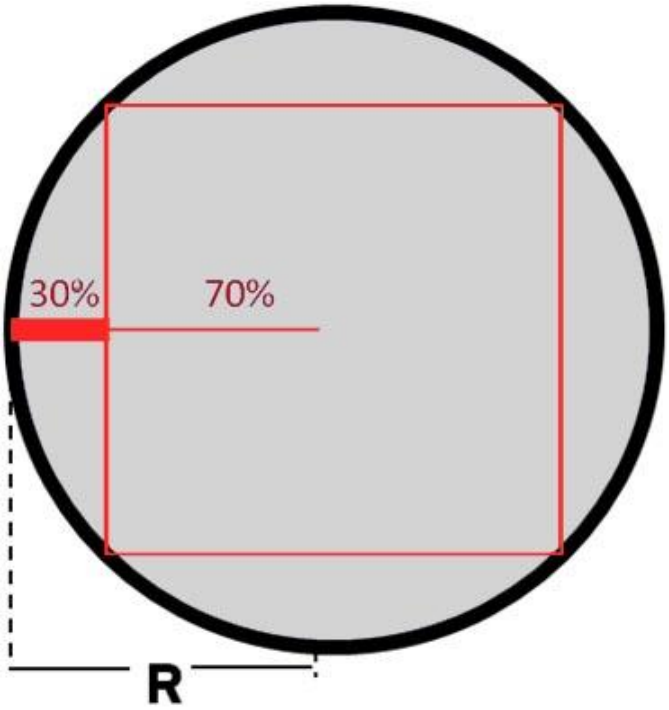
ฉนวนที่ติดตั้ง มีปริมาณ 39.6 ตร.ม.
ซึ่งฉนวนที่ทำการติดตั้งเพิ่มเติมมีค่าการดูดซับเสียงเท่ากับ 29.7 sabine



3.4.2.5 ทดสอบปัจจัยเกี่ยวกับตำแหน่งของวัสดุดูดซับเสียง และการสะท้อนเสียงของอาคารทรงกลมเพิ่มเติมโดยการย้ายตำแหน่งวัสดุดูดซับเสียง โดยนำมาวางบริเวณจุดศูนย์กลางของอาคาร



3.4.2.6 ทำการทดสอบเพิ่มเติม โดยการติดตั้งวัสดุดูดซับเสียงในลักษณะที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของอาคาร โดยใช้วัสดุเป็นฉนวนใยแก้ว ความหนาแน่นเท่ากับ 45k และหนา 25 mm.

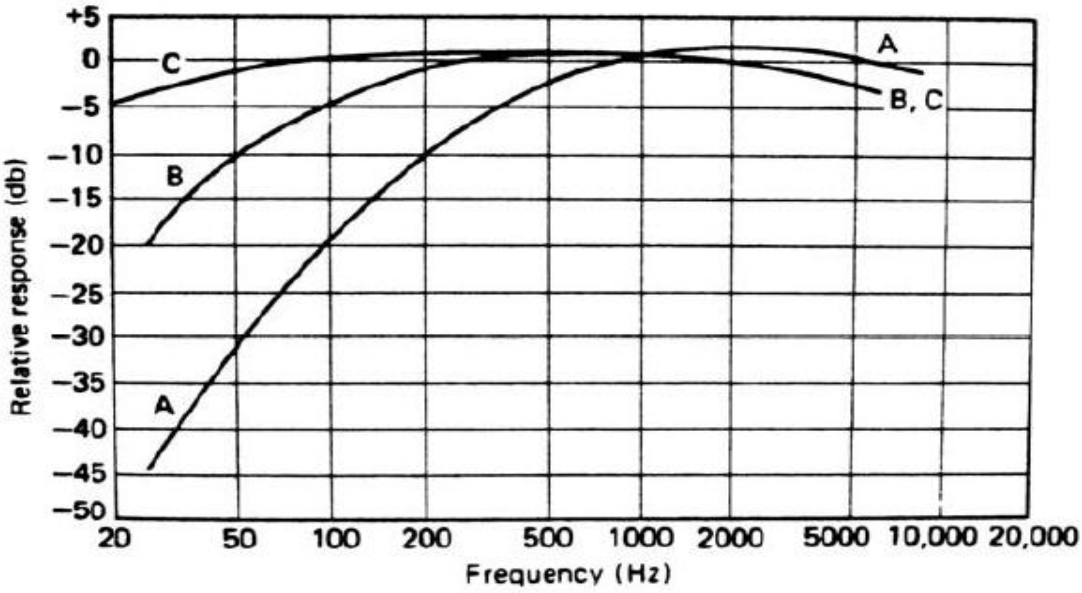


3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.5.1 เครื่องวัดและวิเคราะห์เสียง

เครื่องวัดและวิเคราะห์เสียง (audio analyzer) รุ่น PHONIC PAA3 สำหรับวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติด้านการได้ยินในสภาพแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ใช้วัดระดับเสียงในมาตรวัดแบบเอ (scale A) ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่ตอบสนองต่อการได้ยินของมนุษย์ มีหน่วยเป็น เดซิเบลเอ (dBA) ในย่าน 30-90 dBA และวัดค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ (RT60) มีหน่วยเป็น วินาที

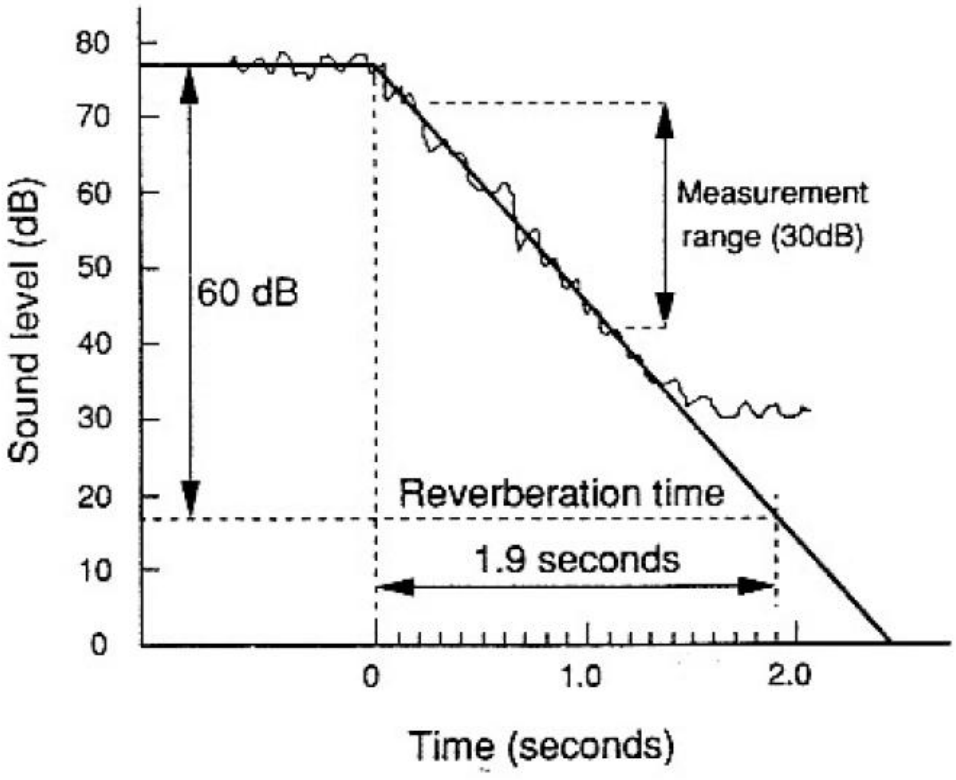
ภาพที่ 3-2 แสดงเครื่องวัดเสียง



Internationally standardized A, B, and C weighting curves.

แผนภูมิที่ 3-1 แสดงการให้ค่าน้ำหนักของความถี่เสียงในแต่ละมาตรฐาน ประกอบด้วย A B C (Steinand Reynolds, 2000)

วิธีการวัดค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ในงานวิจัยนี้ ใช้การสร้างเสียงที่ที่มีระดับเสียงที่ดังกว่าสภาพแวดล้อมประมาณ 40-50 dBA ซึ่งเป็นลักษณะเสียงไม่ต่อเนื่อง ในช่วงความถี่ 1000-1500 Hz และใช้เครื่องวัดเสียงคำนวณค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ เมื่อเวลาที่ทำให้ระดับเสียงในสภาพแวดล้อมนั้น หายไป 30 dBA เครื่องวัดและวิเคราะห์เสียงจะคำนวณค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์



Reverberation time definition with a sample decay. The slope of the decay is, in practice, measured between −5 dB and −35 dB of the initial level.

แผนภูมิที่ 3-2 แสดงการวัดค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ (Barron, 1993: 27)

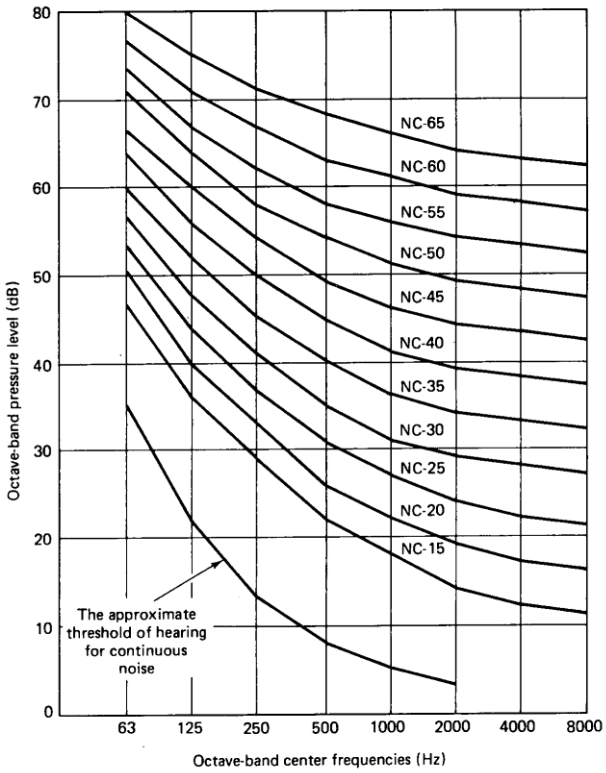
3.6 มาตรฐานและเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผล

การประเมินผลนั้นจะใช้เกณฑ์ต่างๆ เพื่อใช้ในการวัดและทดสอบ ตามลักษณะการใช้งานภายในอาคาร โดยตัวแปรที่สนใจในขั้นต้นนั้นคือ ค่าความดังของเสียงภายในอาคาร ค่าระดับเสียงพื้นฐาน และค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ (Reverberation Time; RT60)

ค่าความดังของเสียงภายในอาคารนั้น จำเป็นต้องอ้างอิงกับค่าระดับเสียงสภาพแวดล้อมเนื่องจากการที่มนุษย์จะได้ยินเสียงและสามารถแบ่งแยกและเข้าใจความหมายได้นั้น ค่าความดังของเสียงจะต้องมีค่ามากกว่าระดับเสียงพื้นฐานอย่างน้อย 5 dBA ซึ่งเกณฑ์ของค่าระดับเสียงพื้นฐานสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าระดับเสียงพื้นฐานที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน

	NC Curve	PNC Curve
Sleeping quarters	25-35	25-40
Living quarters	35-45	30-40
Office or classroom	30-35	30-40
Recording studio	15-20	10-20
Retail store or restaurant	35-50	35-45
Laboratory or engineering	40-45	40-50
Computer Areas	45-60	45-55



แผนภูมิที่ 3-3 แสดง Noise Criteria (NC) Curves

ค่ารีเวอร์เบอร์เรชั่นไทม์ (Reverberation Time; RT60)จะแบ่งแยกตามลักษณะการใช้งานต่างๆกัน เนื่องจากการใช้งานแต่ละประเภทนั้นจำเป็นต้องมีค่าที่เฉพาะตัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน

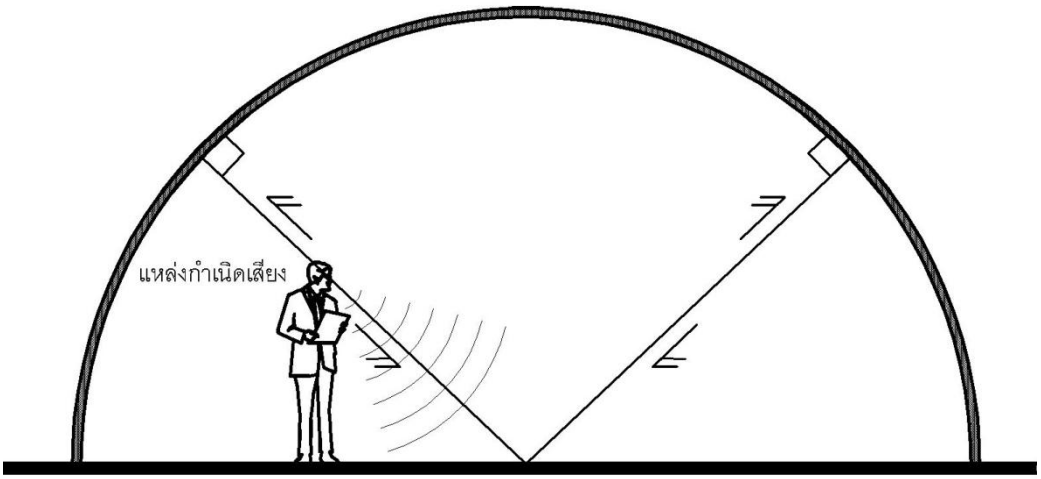
บทที่ 5
อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผล

5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลให้อาคารทรงกลมมีปัญหาเรื่องสภาพเสียงก้องคือ การสะท้อนของเสียงภายในอาคารทรงกลม

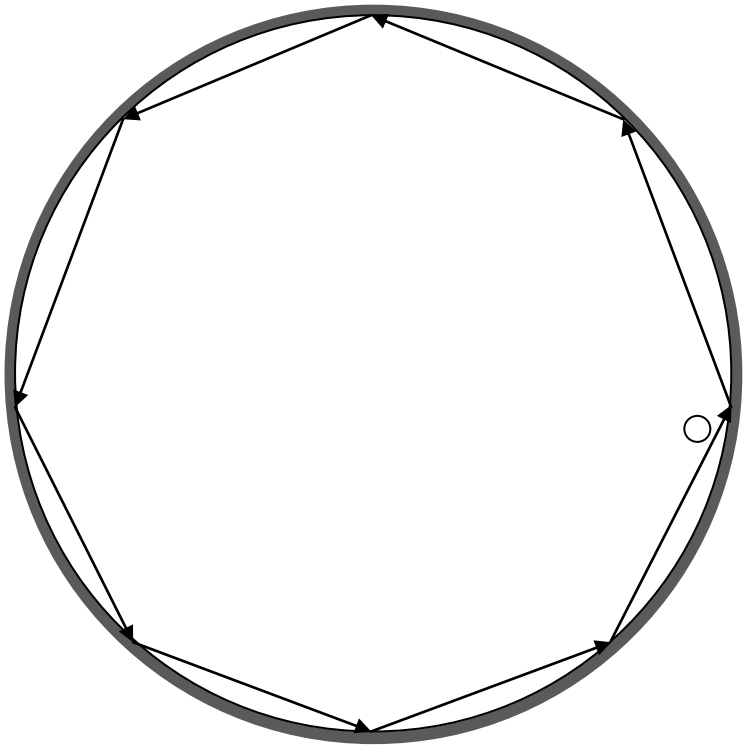
รูปแบบการสะท้อนเสียงที่ก่อให้เกิดปัญหาในอาคารทรงกลมแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

1) การสะท้อนเสียงบริเวณจุดศูนย์กลางของวงกลม



ภาพที่ 5-1 แสดงลักษณะการสะท้อนเสียงที่ก่อให้เกิดปัญหาในอาคารทรงกลม

2) การสะท้อนเสียงโดยรอบของผิวอาคารทรงกลม



ภาพที่ 5-2 แสดงลักษณะการสะท้อนเสียงที่ก่อให้เกิดปัญหาในอาคารทรงกลม

5.1.2 จากผลการทดสอบการติดตั้งวัสดุดูซับเสียงภายในอาคารทรงกลมนั้น จะเห็นได้ว่าค่าการดูดซับเสียงภายในอาคารที่เกิดขึ้นจริง เมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณแล้วมีค่าที่ค่อนข้างตรงกัน

แต่ค่าการดูดซับเสียงที่ได้จากการคำนวณนั้น จะเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งในอาคารทรงกลมทั่วไปนั้นการวัดค่าที่บริเวณต่างๆของห้อง จะมีค่าRTที่แตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งสามารถใช้การคำนวณและติดตั้งโดยใช้สูตร

$$RT = 0.161\ V / A \quad \text{(หน่วยเป็น sec.)}$$

5.1.3 ในขั้นแรกที่เราแก้ปัญหาในอาคารทรงกลมโดยการติดตั้งฉนวนดูดซับเสียงนั้น เราจะเห็นได้ว่า การเพิ่มปริมาณฉนวนภายในห้องนั้น จะลดปัญหาสภาพเสียงก้องได้ แต่ค่า RT ใน

บริเวณที่แตกต่างกันนั้น ก็ยังคงมีค่าที่ต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากทิศทางการเดินทางของเสียงภายในอาคารทรงกลมนั้นมีลักษณะพิเศษ ที่แตกต่างจากอาคารทรงอื่นๆ

5.1.4 การทดสอบโดยการย้ายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง ทำให้เราพบว่า แม้เราจะย้ายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงไปบริเวณใดก็ตามภายในอาคารทรงกลม จุดที่ยังคงมีปัญหามากที่สุดยังคงเป็นบริเวณจุดศูนย์กลางของอาคาร และบริเวณที่มีปัญหารองลงมาคือบริเวณใกล้ผนังของอาคาร

5.1.5 การเพิ่มฉนวนภายในอาคาร โดยรอบของอาคารนั้น จะสามารถช่วยลดปัญหาของเสียงก้องภายในอาคารได้ แต่ยังไม่สามารถแก้ปัญหาในส่วนของจุดศูนย์กลางของวงกลม ได้

5.1.6 เมื่อเราแก้ปัญหาสภาพเสียงในอาคารทรงกลม ด้วยวิธีการย้ายตำแหน่งของฉนวนมาไว้บริเวณจุดศูนย์กลาง จะเห็นได้ว่า ค่า RT บริเวณต่างๆภายในห้องมีค่าลดลงมาก รวมถึงค่า RT ที่มีความแตกต่างแต่ละจุดภายในอาคาร กลับมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

5.1.7 การติดตั้งวัสดุดูดซับเสียงให้มีลักษณะตั้งฉากกับผนังของอาคารนั้นพบว่า ค่า RT ในบริเวณผนังของอาคารโยรอบ มีค่าลดลงไป

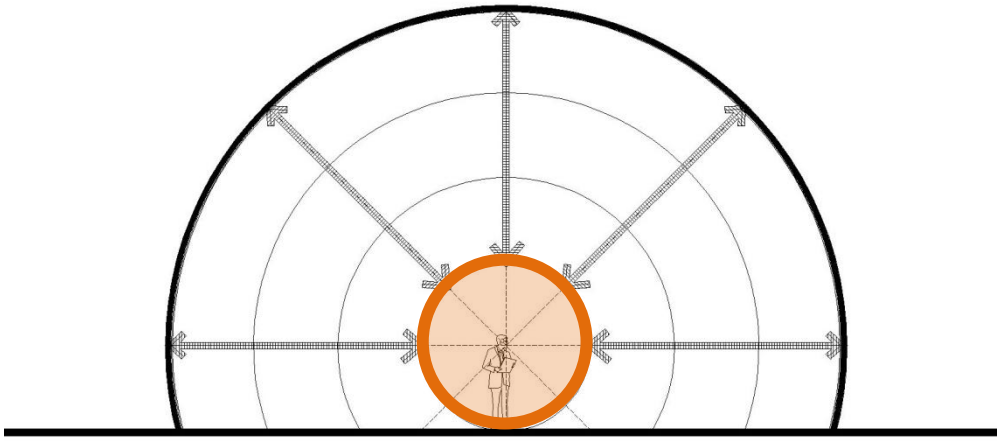
5.2 **สรุปผลการวิจัย**

เทคนิคการออกแบบอาคารทรงกลมเพื่อให้ได้คุณภาพเสียงที่ดี สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.2.1 การควบคุมค่าRT การควบคุมค่าRTถือเป็นจุดสำคัญ การควบคุมค่าRTในอาคารทรงกลมสามารถกำหนดได้โดย

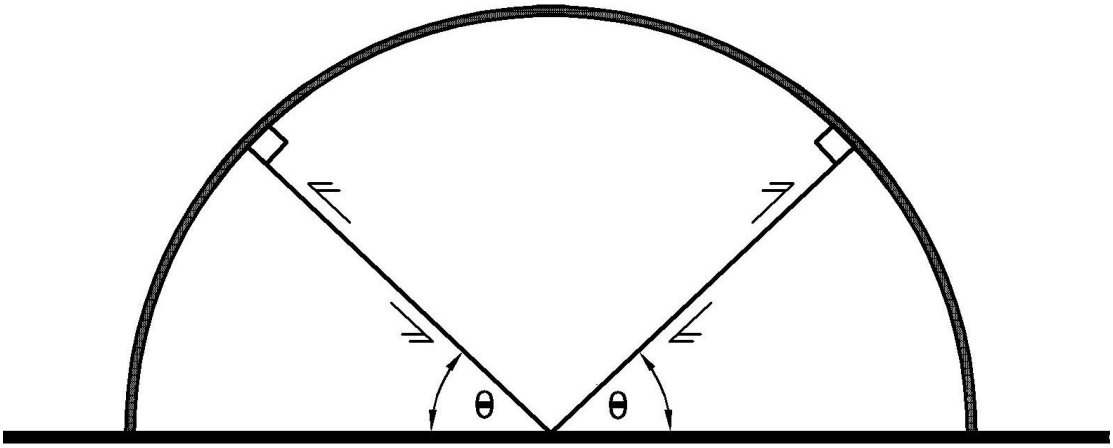
การเลือกและการวางตำแหน่งของวัสดุดูดซับเสียง ซึ่งวัสดุดูดซับเสียงนี้ควรเลือกให้เหมาะกับความถี่ของเสียงที่เราต้องการที่จะดูดซับไว้ ซึ่งวัสดุดูดซับเสียงที่เหมาะสมนั้น

5.2.2 จากการศึกษาพฤติกรรมของเสียงที่ทำให้เกิดปัญหาขึ้นภายในอาคารรูปทรงกลม สามารถสรุปได้ดังนี้



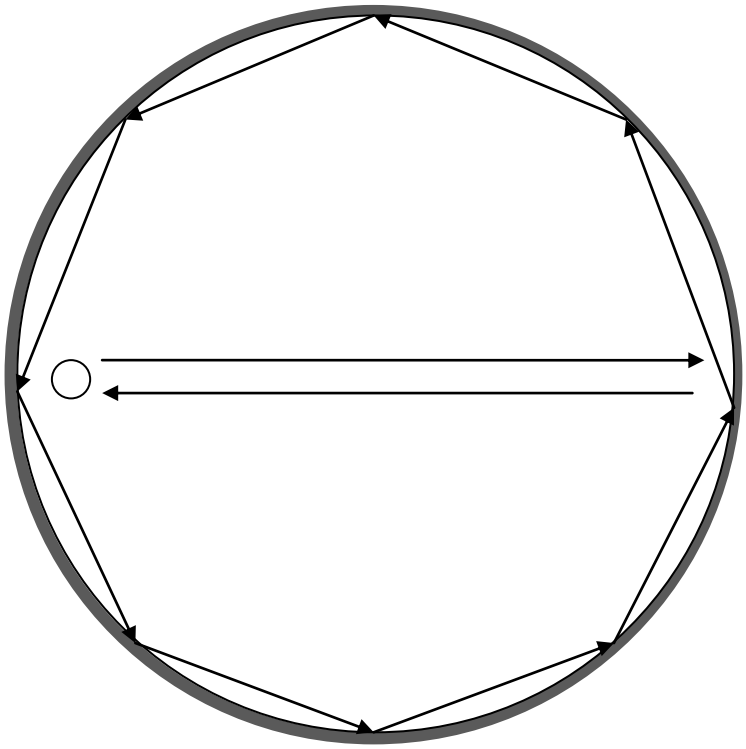
ภาพที่ 5-1 แสดงพฤติกรรมของเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของวงกลม

จากภาพจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่สำคัญของปัญหาการสะท้อนเสียงในอาคารทรงกลมนี้คือ เมื่อเสียงถูกสะท้อนมายังบริเวณจุดศูนย์กลางของวงกลมแล้ว เสียงจะไม่เปลี่ยนทิศทางการเดินทางอีก เสียงจะเดินทางตามรัศมีของวงกลม

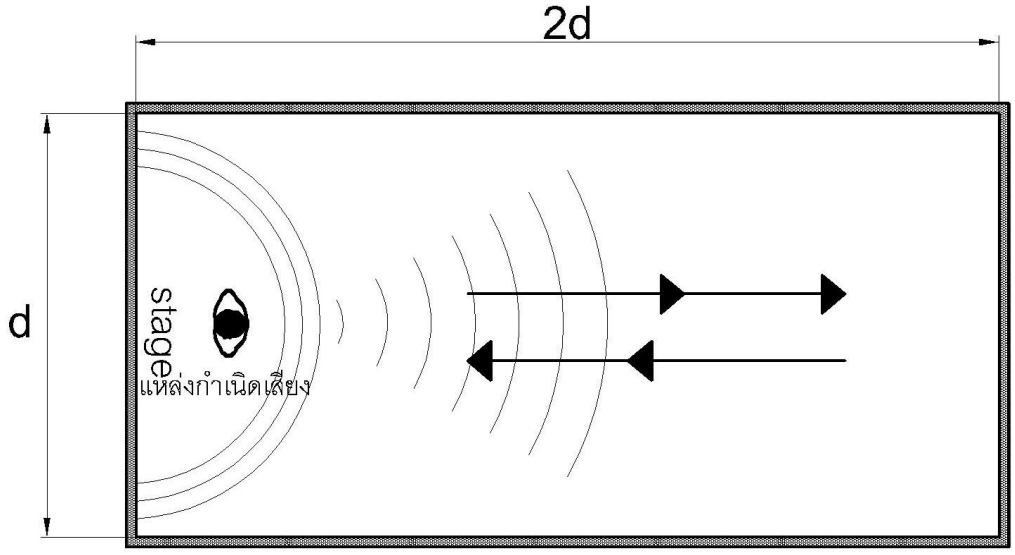


ภาพที่ 5-1 แสดงพฤติกรรมของเสียงเมื่อเสียงวิ่งผ่านจุดศูนย์กลางวงกลม

ซึ่งเป็นเหตุให้บริเวณดังกล่าวนั้นเกิดสภาพเสียงก้องมากกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นเราจึงควรทำการหยุดเสียงที่เดินทางมายังบริเวณจุดศูนย์กลางของวงกลมให้มากที่สุด



ภาพที่ 5-1 แสดงพฤติกรรมของเสียงเมื่อเสียงวิ่งไปตามส่วนโค้งของอาคาร



ภาพที่ 5-1 แสดงพฤติกรรมของเสียงในอาคารทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

และส่วนอีกส่วนคือการเดินทางของเสียงซึ่งเดินทางตามผนังของตัวอาคาร อาจเปรียบเทียบได้กับอาคารทรงสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวกับความกว้างของอาคารนั้นแตกต่างกันมาก คือ อาคารทรงเหลี่ยมที่มีความยาวของตัวอาคารมากนั้นจะก่อให้เกิดปัญหาสภาพเสียงก้องเช่นเดียวกับอาคารทรงกลม

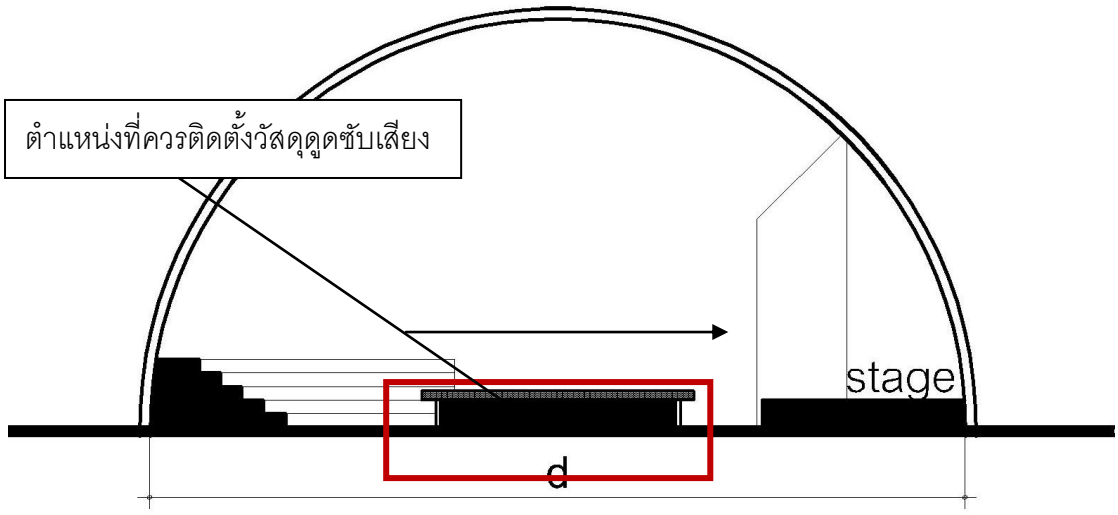
5.2.3 เทคนิคการออกแบบอาคารทรงกลม ให้ใสภาพเสียงที่ดี

การกำหนดลักษณะการใช้งาน เนื่องจากอาคารทรงกลมนั้นในบริเวณที่ต่างกันจะมีค่าทางAcousticที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องมาจากรูปทรงของอาคาร ทำให้จำเป็นต้องกำหนดลักษณะการใช้งาน เพื่อง่ายต่อการควบคุมสภาวะทางเสียงให้เป็นไปตามที่ต้องการ

เมื่อเรากำหนดลักษณะการใช้งานได้แล้วจะทำให้เราทราบค่าระดับเสียงพื้นฐานภายในอาคารที่เหมาะสม เราสามารถควบคุมระดับเสียงพื้นฐานภายในอาคารได้โดย การติดตั้งวัสดุดูดซับเสียง เพื่อช่วยลดความดังของเสียงรบกวนต่างๆ โยการติดตั้งวัสดุดูดซับเสียงเพื่อลดระดับเสียงพื้นฐานนี้หากเป็นไปได้ควรติดตั้งบริเวณต้นกำเนิดของปัญหา ซึ่งจะทำให้การแก้ปัญหาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

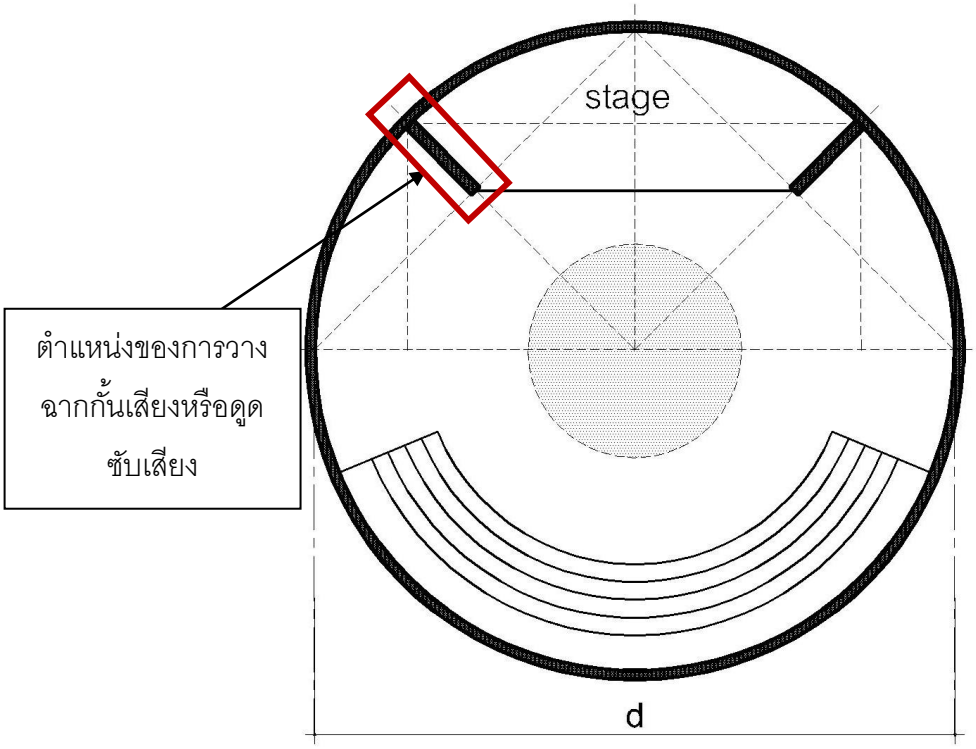
การจัดโซนสำหรับการใช้งาน เนื่องจากบริเวณต่างๆของอาคารที่ค่าทางAcousticที่แตกต่างกันมากนั้น จึงควรกำหนดบริเวณการใช้งานในส่วนของผู้พูด และผู้ฟังให้ชัดเจน เพื่อให้การสื่อสารภายในอาคารเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวางตำแหน่งของวัสดุดูดซับเสียง การวางตำแหน่งของวัสดุดูดซับเสียงนั้นถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการได้มาซึ่งสภาพเสียงที่ดีภายในอาคารทรงกลม การวางตำแหน่งของวัสดุดูดซับเสียงนั้นหากเป็นไปได้ควรติดตั้งบริเวณจุดศูนย์กลางของวงกลม



ภาพที่ 5-1 แสดงตัวอย่างการออกแบบอาคารทรงกลมเพื่อให้มีคุณภาพเสียงที่ดี

ควรมีแผงกั้นเสียง หรือดูดซับเสียงที่ยื่นออกมาจากผนังอาคารอย่างน้อยส่วนที่ยื่นออกมาควรมีความยาวไม่น้อยกว่า d/8 โดยติดให้ตั้งฉากระหว่างกัน



ภาพที่ 5-1 แสดงตัวอย่างการออกแบบอาคารทรงกลมเพื่อให้มีคุณภาพเสียงที่ดี

5.3 ข้อเสนอแนะ

เทคนิคการออกแบบอาคารทรงกลมเพื่อให้มีคุณภาพเสียงที่ดี ที่ได้จากการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปยังปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดสภาพเสียงก้องภายในอาคาร ซึ่งเป็นปัญหาหลักของอาคารทรงกลม ซึ่งหากมีผู้สนใจทำการศึกษาต่อผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

5.3.1 ศึกษาลักษณะการใช้งานอาคารที่เหมาะสมกับอาคารทรงกลม โดยที่สามารถนำความรู้ความเข้าใจ เกี่ยวกับพฤติกรรมของเสียงภายในอาคารทรงกลมไปใช้ประกอบด้วยได้

5.3.2 ศึกษาเกี่ยวกับปริมาณการติดตั้งฉนวน ตำแหน่งการติดตั้ง ประสิทธิภาพ และความคุ้มทุนในการติดตั้งฉนวนในลักษณะต่างๆ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สราวุฒิ โสนะมิตร. **ปัจจัยสำคัญในการออกแบบห้องประชุมเพื่อสร้างคุณภาพเสียงที่ดี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

สุธีวัน โล่ห์สุวรรณ. **นวัตกรรมการสร้างสรรค์ห้องเรียนคุณภาพสูงด้วยระบบธรรมชาติ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

สุนทร บุญญาธิการ. **การออกแบบประสานระบบมหาวิทยาลัยชินวัตร**. กรุงเทพมหานคร:โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

สุนทร บุญญาธิการ. **เทคนิคการออกแบบบ้านประหยัดพลังงานเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีกว่า**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โอเอส พริ้นติ้งเฮ้าส์, 2545.

สุนทร บุญญาธิการ. **เทคนิคการออกแบบบ้านประหยัดพลังงาน**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

สุนทร บุญญาธิการ. **บ้านชีวาทิตย์ บ้านพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อคุณภาพชีวิตผลิตพลังงาน**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2547.

ภาษาอังกฤษ

Barron, M. **Auditorium Acoustics amd Architectural Design.** London: E&FN spon, and imprint of Chapman & Hall, 1993

Cavanaugh, William J; and Wikes, Joseph A, **Architectural Acoustics: Principles and Practice.** New York: John Wiley & Sons, 1998.

Cowan, James. **Architectural Acoustics Design Guide.** New York: McGraw-Hill, 2000

Egan, M. D. **Architectural acoustic.** New York: McGraw-Hill, 1988.

Egan, M. D. **Concepts in architectural acoustic.** New York: McGraw-Hill, 1972.

Miller, Richard K. and Montone, Wayne V, **Handbook Acoustical Enclosures and Barriers.** The United States of America: The Fairmont Press, 1978.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุริยะ เมืองประชา เกิดวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2526 สถานที่เกิดจังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ในปีการศึกษา 2551

เข้าศึกษาต่อปริญญาสถาปัตยกรรมมหาบัณฑิต กลุ่มวิชาเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อม สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553