

คุณสมบัติของแสงกันเสียงที่ใช้วัสดุเหลือทิ้ง



นาย ภูมิใจ ประเสริฐกุลวงศ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF NOISE BARRIER USING WASTED MATERIALS



Mr. Poomchai Prasertkunlavong

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      คุณสมบัติของแผงกันเสียงที่ใช้วัสดุเหลือทิ้ง  
โดย    นายภูมิใจ ประเสริฐกุลวงศ์  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา                         ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี


---

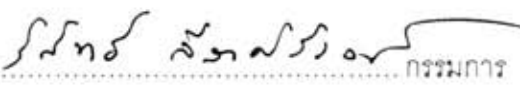
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวันย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ วิสิทธิ์ ลีลาศิริวงศ์)

ภูมิใจ ประเสริฐกุลวงศ์ : คุณสมบัติของแผงกั้นเสียงที่ใช้วัสดุเหลือทิ้ง (PROPERTIES OF NOISE BARRIER USING WASTED MATERIALS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.จักรพันธ์ จินตนาภักดี, 212 หน้า.

การลดปัญหามลพิษทางเสียงซึ่งส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณริมทางยกระดับที่มีความเหมาะสมในทางปฏิบัติวิธีหนึ่งคือ การติดตั้งแผงกั้นเสียงริมทาง เพื่อลดระดับเสียงทั้งในและนอกเขตทาง ซึ่งหากสามารถออกแบบแผงกั้นเสียงซึ่งใช้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมได้ จะเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้ง อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการผลิตหรือลดการนำเข้าของเทคโนโลยีจากต่างประเทศ วัสดุเหลือทิ้งที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้ได้แก่ แก้วแอลบดละเอียดซึ่งเหลือจากการเผาแก้วเป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐ แก้วลอยซึ่งได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินและน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษ แก้วแอลบดและแก้วลอยจะถูกใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ในการผสมมอร์ตาร์และทดลองใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และ 0.6 ส่วนน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษใช้เป็นสารผสมเพิ่ม และลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมลงร้อยละ 20 และ 25 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 การศึกษานี้ทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ ได้แก่ ความแข็งแรงของวัสดุ (กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์) ความคงทนของวัสดุในการต้านทานต่อสภาวะที่เป็นกรด และประสิทธิภาพในการลดทอนเสียงของตัวอย่างแผงกั้นเสียงขนาดกว้าง 2 เมตรและสูง 1 เมตร ซึ่งติดตั้งในห้องปฏิบัติการ (ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง และค่าการลดทอนเสียงทะลุผ่านของแผงกั้นเสียง) รวมทั้งตรวจวัดระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ณ สถานที่จริงบนทางยกระดับ จากผลการทดสอบพบว่าแผงกั้นเสียงที่ผลิตจากมอร์ตาร์ซึ่งมีการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยแก้วลอย ร้อยละ 20 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 มีความแข็งแรงและความคงทนดีที่สุด ในขณะที่การทดสอบประสิทธิภาพของแผงกั้นเสียงภายในห้องปฏิบัติการที่ใช้วัสดุที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน แต่มีความหนาเท่ากัน พบว่ามีความสามารถในการลดทอนเสียงทะลุผ่านใกล้เคียงกัน และไม่ต่ำกว่า 25 dBA อีกทั้งผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกั้นเสียงของแผงกั้นเสียงที่มีความยาว 50 เมตร สูง 2 เมตร โดยติดตั้งบนทางยกระดับที่มีความสูง 10 เมตร จากพื้นดิน พบว่าสามารถลดระดับเสียงได้สูงสุด 7 dBA ที่ตำแหน่งห่างจากแนวกำแพงกั้นเสียง 1 เมตร และสูงจากพื้นดิน 10 เมตร โดยระหว่างการทดสอบในสถานที่จริง ได้พบปัญหาซึ่งไม่สามารถควบคุมได้คือ ผลกระทบจากการสะท้อนของเสียงใต้ทางยกระดับซึ่งเป็นปัญหาสำคัญต่อการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของแผงกั้นเสียงบนทางยกระดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา.....2549.....

ลายมือชื่อนิสิต.....*John Chyng*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*Dr. Jiraporn*.....



# # 4770404121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: NOISE BARRIER / WASTED MATERIALS / FLY ASH/RICE HUSK ASH/ EXPRESSWAY

POOMCHAI PRASERTKUNLAVONG : PROPERTIES OF NOISE BARRIER USING  
WASTED MATERIALS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. CHATPAN  
JINTANAPAKDEE, 212 pp.

Installing noise barrier along the side of elevated roadway is one of the most practical methods to remediate the noise pollution affecting residence next to elevated roadway. There are many benefits if the noise barrier can be made of waste materials because the waste materials would be eliminated while the cost of making noise barriers could also be reduced. Waste materials considered in this study are rice husk ash (RHA) from burning bricks using rice husk as fuel, fly ash (FA) left over from coal power plant, and waste water from paper factory called black liquor. RHA and FA are pozzolanic materials, which can be used to replace cement by 20% in mixing mortar. Trial mortar mixes considered water-to-binder ratio of 0.5 and 0.6. Black liquor can be used as water-reducing admixture in mixing mortar. In this case, cement was reduced by 20 and 25% and water-to-cement ratio of 0.35 was used. Six mortar mixes were tested regarding strength and acid resistance. It was found that the mortar with 20% of cement replaced by FA and water-to-binder ratio of 0.5 has the best strength and resistance to acid. Noise barrier panels of 2m wide and 1m high using different mortar mixes—all with the same thickness—were tested in laboratory for sound absorption and transmission loss. It was found that all materials have similar sound properties, all having transmission loss more than 25 dBA, which is acceptable for noise barrier panels. Sound protection performance of a 50m long and 2m high noise barrier was also tested in-situ on an elevated roadway. It was found that this barrier can reduced the noise by as much as 7 dBA at a distance of 1m away from the barrier on the outside of roadway and at the same elevation of roadway (10m above ground) as compared to similar location without a barrier. During the field testing, reflection of sound under the elevated roadway was a major problem, which is difficult to control, and this effect reduces performance of the noise barrier.

Department..... CIVIL ENGINEERING.....  
Field of study..... CIVIL ENGINEERING.....  
Academic year ..... 2006.....

Student's signature..... *P. Poomchai*.....  
Advisor's signature..... *Chatpan Jintanapakdee*.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จัตรพันธ์ จินตนาภักดี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างมาก ตลอดระยะเวลาการเขียนวิทยานิพนธ์นี้ และกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล พิณแก้ว และ อาจารย์ วิสิทธิ์ ลีลาศิริวงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการเขียนวิทยานิพนธ์ อีกทั้งเชื้อเพื่อสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆในการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบพระคุณกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนต่อการทำวิจัย อีกทั้งขอขอบพระคุณ คุณธนาพันธ์ สุขสะอาด ที่เชื้อเพื่อข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย คุณกฤติกา เลิศสวัสดิ์ ที่ช่วยเหลือขณะทำการทดสอบในสถานที่จริง, คุณนิรันดร์ คงฤทธิ์ ที่ให้คำแนะนำอันมีประโยชน์ระหว่างการทำวิจัย นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ คุณไพรัตน์ เลิศศลารักษ์ ซึ่งเชื้อเพื่อสถานที่ในการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้คุณประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ คุณพ่อโอภาส ประเสริฐกุลวงศ์ คุณแม่ผ่องใส ประเสริฐกุลวงศ์ และครูบาอาจารย์ทุกท่าน เพื่อน้อมรำลึกพระคุณในการอบรมและให้การศึกษาแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่ 1    บทนำ .....	1
1.1    ความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2    วัตถุประสงค์การวิจัย .....	1
1.3    ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.4    ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย .....	2
1.5    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2    วิธีการลดระดับเสียงรบกวนจากการจราจร .....	5
2.1    พิสิกส์ของเสียง .....	5
2.2    หลักการลดระดับความดังของเสียง .....	12
บทที่ 3    การพัฒนาคุณภาพของวัสดุจากวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมและ ภาคการเกษตร .....	29
3.1    การใช้แก้วกลบในงานคอนกรีต.....	29
3.2    การใช้แก้วลอยในงานคอนกรีต .....	40
3.3    การใช้น้ำทิ้งจากการฟอกเยื่อกระดาษแทนสารผสมเพิ่มใน งานคอนกรีต .....	51
บทที่ 4    การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	63
4.1    วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ .....	63



	หน้า
4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ .....	64
4.3 วิธีการทดสอบ .....	66
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ .....	74
4.5 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ .....	81
<b>บทที่ 5</b> <b>แนวทางการออกแบบแผงกันเสียง .....</b>	<b>83</b>
5.1 แนวทางการออกแบบแผงกันเสียงในเชิงฟิสิกส์ .....	83
5.2 แนวทางการออกแบบแผงกันเสียงในเชิงวิศวกรรม .....	98
5.3 รายละเอียดการออกแบบแผงกันเสียงที่ใช้ในการศึกษานี้ .....	105
5.4 แบบรายละเอียดของแผงกันเสียง .....	126
<b>บทที่ 6</b> <b>การผลิตและทดสอบประสิทธิภาพของแผงกันเสียงในห้องปฏิบัติการ .....</b>	<b>137</b>
6.1 ขั้นตอนการผลิตแผงกันเสียง .....	137
6.2 การทดสอบประสิทธิภาพของแผงกันเสียงในห้องปฏิบัติการ .....	142
6.3 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผงกันเสียง .....	161
<b>บทที่ 7</b> <b>ขั้นตอนการติดตั้งแผงกันเสียงในบริเวณสถานที่ติดตั้งจริง .....</b>	<b>162</b>
7.1 สถานที่ติดตั้ง .....	163
7.2 ขั้นตอนการติดตั้งแผงกันเสียง .....	164
7.3 ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นขณะทำการติดตั้งแผงกันเสียง .....	172
7.4 รายการคำนวณเพื่อออกแบบโครงสร้างรองรับแผงกันเสียงบน ขอบข้างทางยกระดับ .....	173
7.5 แบบรายละเอียดการติดตั้งแผงกันเสียงบนทางยกระดับ.....	178
<b>บทที่ 8</b> <b>การทดสอบประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียง ณ สถานที่ติดตั้งจริง .....</b>	<b>181</b>
8.1 วัตถุประสงค์ในการทดสอบ .....	181
8.2 ทฤษฎีเกี่ยวข้องในการใช้ตรวจวัดค่าระดับเสียง.....	181
8.3 วิธีการตรวจวัดระดับเสียงและแผนการดำเนินงาน .....	185

	หน้า
8.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ .....	188
8.5 ผลการทดสอบ .....	190
8.6 สรุปผลการตรวจวัดและการวิเคราะห์ค่าระดับเสียงในการวิจัยครั้งนี้ ....	202
บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต .....	203
9.1 บทสรุป .....	203
9.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยในอนาคต .....	204
	213
รายการอ้างอิง .....	208
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	212

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ญ

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1	11
ตารางที่ 3.1	30
ตารางที่ 3.2	40
ตารางที่ 3.3	41
ตารางที่ 3.4	45
ตารางที่ 3.5	48
ตารางที่ 3.6	49
ตารางที่ 3.7	60
ตารางที่ 4.1	64
ตารางที่ 4.2	66
ตารางที่ 4.3	74
ตารางที่ 4.4	76
ตารางที่ 4.5	78
ตารางที่ 4.6	79
ตารางที่ 4.7	81
ตารางที่ 5.1	87
ตารางที่ 5.2	89
ตารางที่ 5.3	93
ตารางที่ 5.4	101
ตารางที่ 5.5	108
ตารางที่ 5.6	135
ตารางที่ 6.1	139

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 6.2	แสดงการคำนวณหาค่า Percent of open area และ Effective throat length ของแผ่นปิด Perforated ที่มีขายในห้องตลาด ..... 150
ตารางที่ 6.3	ผลการทดสอบค่า Transmission Loss ของแผงกันเสียงแต่ละชนิด ..... 159
ตารางที่ 8.1	ผลการตรวจวัดระดับเสียง (ระหว่างบริเวณข้างโรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะ และบริเวณหมู่บ้านสุขนิเวศน์) ..... 184
ตารางที่ 8.2	ปริมาณจราจรและความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่สัญจรบนทางยกระดับ ..... 194
ตารางที่ 8.3	ค่าระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมงที่ทำการตรวจวัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ..... 195



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

v

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วเสียง .....	7
รูปที่ 2.2 ความเปลี่ยนแปลงของระดับความดันเสียงกับความดันเสียง .....	8
รูปที่ 2.3 ความเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มเสียงกับความเข้มเสียง .....	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิดบีต .....	14
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดกลืนเสียงกับ ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไเป็นพลังงานความร้อน ของวัสดุพอรุนเมื่อนำมาใช้ร่วมกับเมมเบรน .....	18
รูปที่ 2.6 ลักษณะวัสดุดูดกลืนเสียงประเภทโพรงช่อง (Cavity – Absorber) .....	19
รูปที่ 2.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดเสียงของวัสดุโพรงช่อง ชนิดไม่มีใยแก้ว (HB) และชนิดมีใยแก้ว (SB) .....	19
รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการสลายตัวของพลังงานเสียงเนื่องจาก ความหนืด และ แรงเสียดทาน .....	20
รูปที่ 2.9 การดูดกลืนเสียงของวัสดุที่มีกลไกในการดูดกลืนเสียงแบบต่างๆ ตามช่วงของ ความถี่ .....	22
รูปที่ 2.10 (a) ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในแผ่น (b) การบรรจุเส้นใยแก้วลงใน ซีเมนต์โดยใช้ Putzmeister–Concentric Spray gun .....	23
รูปที่ 2.11 ลักษณะของแผงกันเสียงประเภทดูดกลืนเสียงและลักษณะการติดตั้งที่ใช้ใน ปัจจุบัน .....	24
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างทดสอบหาค่า Transmission Loss ซึ่งเป็นวัสดุที่แตกต่างกันสองชนิด	27
รูปที่ 3.1 ผิวของแก้วแกลบ .....	32
รูปที่ 3.2 เซลล์ที่เป็นรูพรุนของแก้วแกลบบดละเอียดแบบแห้ง .....	33
รูปที่ 3.3 ความถ่วงจำเพาะของแก้วแกลบกับอุณหภูมิในการเผา .....	34
รูปที่ 3.4 เวลาการก่อตัวปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมแก้วแกลบ .....	35
รูปที่ 3.5 การเข้มน้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมแก้วแกลบและแก้วลอย .....	36
รูปที่ 3.6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วแกลบเทาขาว .....	37
รูปที่ 3.7 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วแกลบดำ .....	37



ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.8 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้น 5% ที่อายุ 180 วัน .....	38
รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแฉ่ำลอยจากแหล่งต่างๆ .....	42
รูปที่ 3.10 ภาพขยาย Scanning Electron Microscope ของอนุภาคแฉ่ำลอยที่มีลักษณะต่างกัน .....	46
รูปที่ 3.11 ภาพขยาย Scanning Electron Microscope ของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแฉ่ำลอยจากแหล่งต่าง ๆ .....	47
รูปที่ 3.12 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ในสารละลาย $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ร้อยละ 5 .....	50
รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของมวลซีเมนต์ เนื่องจากการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดปริมาณน้ำ .....	56
รูปที่ 3.14 แผนภาพกระบวนการการฟอกเยื่อกระดาษในโรงงานฟอกเยื่อกระดาษ .....	61
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	67
รูปที่ 4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ .....	67
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงดัด .....	68
รูปที่ 4.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ .....	69
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อใช้ทดสอบกำลังรับแรงดึง .....	70
รูปที่ 4.6 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ .....	70
รูปที่ 4.7 การทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรด .....	71
รูปที่ 4.8 การติดตั้งวัดความเครียดบนมอร์ตาร์ที่ต้องการทดสอบ .....	72
รูปที่ 4.9 การติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์ในเครื่อง Universal Testing Machine และติดตั้งตัววัดค่าความเครียดทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ .....	73
รูปที่ 4.10 การเชื่อมต่อตัวความเครียดเข้ากับเครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (Data Logger) เพื่อบันทึกค่าความเครียดของมอร์ตาร์เมื่อได้รับแรงอัดจากเครื่อง Universal Testing Machine .....	73
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน	75
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน	77
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน	78

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.14 แผนภูมิแห่งเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นกรด .....	80
รูปที่ 5.1 (a) แนวการเดินทางของเสียงจากรถยนต์ที่อยู่บนถนนไปสู่ผู้ฟัง (b) กรณีที่มีแผงกั้นเสียงมาคั่นกลาง .....	84
รูปที่ 5.2 สเปคตรัมของเสียงรถยนต์บนถนน .....	85
รูปที่ 5.3 การลดเสียงด้วยตัวกำบัง (Barrier attenuation) ระยะที่ $\delta$ ต่าง ๆ .....	86
รูปที่ 5.4 แนวการเดินทางของเสียงจากรถยนต์ที่อยู่บนถนนไปสู่ผู้ฟังโดยมีแผงกั้นเสียงมาคั่นกลาง .....	88
รูปที่ 5.5 การลดระดับเสียงโดยแผงกั้นเสียง .....	89
รูปที่ 5.6 ความยาวของแผงกั้นเสียง .....	90
รูปที่ 5.7 รูปร่างของขอบบนกำบังกั้นเสียงแบบต่าง ๆ .....	91
รูปที่ 5.8 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของระดับเสียงที่ฝั่งตรงข้ามเมื่อใช้กำบังกั้นเสียงแบบสะท้อนเสียง .....	92
รูปที่ 5.9 การสะท้อนเสียงบนถนนในแผงกั้นเสียงแบบขนาน .....	92
รูปที่ 5.10 แผงกั้นเสียงแบบเหลี่ยมซ้อน .....	94
รูปที่ 5.11 รูปแบบการทำงานของแผงกั้นเสียงที่ผลานการทำงานกันระหว่างการสะท้อนเสียง และการลดทอนเสียงทะลุผ่านและการดูดกลืนเสียง .....	95
รูปที่ 5.12 (a) รูปแบบและขนาดของแผงกั้นเสียงที่ได้ออกแบบเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้ (b) แผงกั้นเสียงที่ได้บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงไว้ภายในและทำการปิดด้วยแผ่นปิดแบบเจาะรูพรุน (Perforate Cover) .....	96
รูปที่ 5-13 (a) รายละเอียดรูปแปลนของแผงกั้นเสียง (b) รายละเอียดของรูปตัดในแนวด้านข้างของแผงกั้นเสียง (c) รายละเอียดของรูปตัดในแนวด้านยาวของแผงกั้นเสียง .....	97
รูปที่ 5.14 ลักษณะของแผงกั้นเสียงที่ออกแบบในการศึกษานี้ .....	99
รูปที่ 5.15 ลักษณะหน้าตัดโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์เปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา .....	100
รูปที่ 5.16 การตัดโครงตาข่ายเป็นรูปทรงที่ต้องการและทำการฉาบมอร์ต้าให้ยึดเกาะกับโครงตาข่ายที่ตัดให้เป็นรูปร่างที่ต้องการไว้ .....	103



ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.17 ทิศทางของแรงลมที่กระทำต่อแผงกันเสียง .....	106
รูปที่ 5.18 การวางแผนกันเสียงบนพื้นราบ .....	106
รูปที่ 5.19 การกระจายน้ำหนักจากพื้นลงบนคาน .....	107
รูปที่ 5.20 การแบ่งพื้นที่เพื่อถ่ายน้ำหนักลงขอบของแผงกันเสียง.....	109
รูปที่ 5.21 (ก) รูปแบบและขนาดของแรงที่กระทำต่อ คาน B2 และ B3 (เนื่องจากแรงลม) (ข) แผนภาพแรงเฉือน (Shear Force Diagram) ของคาน B2 และ B3 (ค) แผนภาพโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) ของคาน B2 และ B3 .....	111
รูปที่ 5.22 รายละเอียดหน้าตัดของแผงกันเสียงที่ใช้ในการออกแบบ .....	113
รูปที่ 5.23 พฤติกรรมในการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	113
รูปที่ 5.24 รายละเอียดของหน้าตัดขอบแผงกันเสียงและรายละเอียดของเหล็กเสริม .....	115
รูปที่ 5.25 ภาพหน้าตัดของเฟอร์โรซีเมนต์และรายละเอียดของลวดตาข่ายภายใน หน้าตัดของชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์ .....	116
รูปที่ 5.26 รูปร่างของโครงตาข่ายทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า .....	117
รูปที่ 5.27 ลักษณะหน้าตัดของชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์, การวางลวดโครงตาข่าย, และ แผนภาพของความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ของหน้าตัด .....	118
รูปที่ 5.28 a) แบบจำลอง (model) ของหน้าตัดชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์เพื่อใช้ใน วิเคราะห์ความต้านทานประลัยของชิ้นส่วน b) ขั้นตอนในการวิเคราะห์เพื่อหาความต้านทานประลัยของชิ้นส่วน เฟอร์โรซีเมนต์ .....	121
รูปที่ 5.29 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับความโค้งที่ เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์ .....	123
รูปที่ 5.30 (ก) รูปแบบและขนาดของแรงที่กระทำต่อ คาน B2 และ B3 (เนื่องจากน้ำหนักของแผงกันเสียงเอง) (ข) แผนภาพแรงเฉือน (Shear Force Diagram) ของคาน B2 และ B3 (ค) แผนภาพโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) ของคาน B2 และ B3 .....	126

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.1	แบบหล่อเหล็กที่ใช้หล่อแผงกันเสียงในการศึกษาครั้งนี้ ..... 137
รูปที่ 6.2	(a) ลักษณะของเหล็กเสริมก่อนการหุ้มตัวโครงตาข่าย (b) ลักษณะของเหล็กเสริมหลังจากห่อหุ้มโครงตาข่ายเพื่อเตรียมจะวางลงในแบบหล่อ ..... 138
รูปที่ 6.3	การผสมมอร์ตาร์ตามอัตราส่วนที่ต้องการ ..... 139
รูปที่ 6.4	การจัดวางเหล็กเสริมบนแบบหล่อ และการฉาบมอร์ตาร์บนโครงตาข่าย ..... 140
รูปที่ 6.5	การหล่อขอบของแผงกันเสียงหลังจากการฉาบส่วนที่เป็นแผ่นผนังบางจนเต็มทั่วทั้งแผงแล้ว ..... 141
รูปที่ 6.6	แผงกันเสียงหลังถอดแบบที่อายุ 1 วัน ..... 141
รูปที่ 6.7	ขนาดของห้องกักวานที่ใช้ในการทดสอบ ..... 142
รูปที่ 6.8	อุปกรณ์กำเนิดคลื่นเสียงและวิเคราะห์เสียง ..... 143
รูปที่ 6.9	ลักษณะการติดตั้งลำโพงและไมโครโฟนในห้องทดสอบ ..... 143
รูปที่ 6.10	การรับ-ส่งสัญญาณของระบบวิเคราะห์เสียง ..... 144
รูปที่ 6.11	แผงกันเสียงเปล่าที่วางบนพื้นห้องทดสอบ ..... 145
รูปที่ 6.12	แผงกันเสียงที่บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงภายใน ..... 145
รูปที่ 6.13	แผงกันเสียงที่บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงภายในและปิดด้วยฝาปิดเจาะรู ..... 146
รูปที่ 6.14	การทดสอบเพื่อหาค่า Absorption Coefficient ของแผ่นกันเสียงที่มีความถี่ต่าง ๆ ซึ่งทำการปิดด้วยฝาปิดเจาะรู (Perforated Cover) ซึ่งทำมาจากไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรู 15 เซนติเมตร (ไม่ได้บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงลงในแผงกันเสียง) ..... 147
รูปที่ 6.15	ค่าการทดสอบหาค่า Absorption Coefficient ของแผ่นผนังกันเสียงโดยมีการใส่วัสดุดูดกลืนเสียงลงในแผงกันเสียง คือ แผ่นใยแก้ว หนา 5 เซนติเมตร และทำการปิดด้วยฝาปิดเจาะรู (Perforated cover) ทำมาจากไม้อัด ความยาวระหว่างจุดศูนย์กลางรู 15 เซนติเมตรแผ่น Perforated ทำมาจากไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรู 15 เซนติเมตร ..... 147

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงระหว่างแผงกันเสียงที่ไม่ได้บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงและแผงกันเสียงที่มีการบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียง (แผ่นใยแก้ว หนา 5 เซนติเมตร) ภายในแผงกันเสียงโดยแผงกันเสียงทั้งสองรูปแบบใช้ฝาปิดทำมาจากไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ 3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรู 15 เซนติเมตร .....	148
รูปที่ 6.17 แผนภูมิซึ่งช่วยในการคำนวณค่าความถี่ที่แผ่นปิดเจาะรูสามารถดูดกลืนเสียงได้ดี .....	151
รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงโดยไม่มีการใช้วัสดุดูดกลืนเสียงลงในแผงกันเสียงและทำการปิดด้วยฝาปิดเจาะรู (Perforated cover) ทำมาจากแผ่นเหล็กหนา 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งทำการ เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร และมีจำนวนรู 49 รูต่อ พื้นที่ 1 ตารางนิ้ว .....	152
รูปที่ 6.19 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงโดยมีการใส่วัสดุดูดกลืนเสียง คือ แผ่นใยแก้วหนา 5 เซนติเมตร ลงในแผงกันเสียงและทำการปิดด้วยฝาปิดเจาะรู (Perforated cover) ทำมาจากแผ่นเหล็กหนา 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และมีจำนวนรู 49 รูต่อ พื้นที่ 1 ตารางนิ้ว .....	153
รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงระหว่างแผงกันเสียงที่ไม่ได้บรรจุวัสดุดูดซับเสียงและแผงกันเสียงที่มีการบรรจุวัสดุดูดซับเสียง (แผ่นใยแก้ว หนา 5 เซนติเมตร) ภายในแผงกันเสียง โดยแผงกันเสียงทั้งสองรูปแบบใช้ฝาปิด ซึ่งทำมาจากแผ่นเหล็กเจาะรูหนา 0.5 มิลลิเมตร ขนาดของรูและระยะห่างระหว่างรู ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และมีจำนวนรู 49 รูต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว .....	153
รูปที่ 6.21 แผนผังของห้องกังวานคู่และการติดตั้งแผ่นกันเสียง.....	155
รูปที่ 6.22 การก่อกองอิฐมวลเบาเพื่อเตรียมทดสอบ .....	156
รูปที่ 6.23 การปรับแก้สัญญาณ (Calibration) ของไมโครโฟน .....	156



ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.24	การทดสอบการลดทอนเสียงทะลุผ่านของผนังอิฐมวลเบา ..... 157
รูปที่ 6.25	การทดสอบการลดทอนเสียงทะลุผ่านของแผงกันเสียงที่ทำการติดตั้ง เรียบร้อยแล้ว ..... 157
รูปที่ 6.26	การติดตั้งแผ่นปิดเจาะรู (Perforated Cover) ซึ่งภายในบรรจุวัสดุ ดูดกลืนเสียง ..... 158
รูปที่ 6.27	การติดตั้งแผงกันเสียงและแผ่นเจาะรู (Perforated Cover) พร้อมทั้งทำการ ทดสอบ ..... 158
รูปที่ 6.28	แสดงการเปรียบเทียบค่า Transmission Loss ของแผงกันเสียงแต่ละชนิด) .. 160
รูปที่ 7.1	แผนที่แสดงสถานที่ติดตั้งแผงกันเสียงในการวิจัยครั้งนี้ ..... 162
รูปที่ 7.2	ลักษณะการติดตั้งแผงกันเสียงบนขอบทางยกระดับ..... 163
รูปที่ 7.3	ลักษณะการติดตั้งแผงกันเสียงบริเวณริมทางยกระดับ..... 164
รูปที่ 7.4	การตรวจสอบหาตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีต ..... 165
รูปที่ 7.5	รูปขยายด้านข้างของบริเวณฐานรองรับแผงกันเสียง ..... 166
รูปที่ 7.6	ราวเหล็กเดิมที่ติดตั้งอยู่บนขอบข้างทางยกระดับ ..... 167
รูปที่ 7.7	การเจาะรูเพื่อเตรียมติดตั้งปลั๊กคอนกรีตบริเวณขอบข้างทางยกระดับ ..... 168
รูปที่ 7.8	การติดตั้งแผ่นเหล็กซึ่งเป็นฐานรองรับแผงกันเสียง ..... 168
รูปที่ 7.9	การติดตั้งเสา H-Beam เพื่อใช้ในการยึดแผงกันเสียงบริเวณริมทางด่วน ..... 169
รูปที่ 7.10	วิธีการติดตั้งแผงกันเสียงกับเสา H-Beam ..... 170
รูปที่ 7.11	การติดตั้งแผงกันเสียงโดยใช้เครนยกขึ้นสอดกับเสาเหล็ก ..... 170
รูปที่ 7.12	การติดตั้งฝาปิดเจาะรูกับแผงกันเสียงซึ่งภายในบรรจุวัสดุดูดซับเสียงไว้ ..... 171
รูปที่ 7.13	แนวของแผงกันเสียงหลังจากการติดตั้งแผงกันเสียงแล้วเสร็จ ..... 172
รูปที่ 7.14	(a) แรงต่อความยาวที่กระทำด้านข้างของเสาเหล็ก (b) โมเมนต์ดัดบริเวณโคนเสาเหล็กเนื่องจากแรงต้านความยาวที่กระทำ ด้านข้างของเสาเหล็ก ..... 173
รูปที่ 7.15	แรงภายในที่เกิดขึ้นบริเวณโคนเสาเหล็ก ..... 175
รูปที่ 7.16	แผ่นเหล็กรับแรงดึงด้านข้างซึ่งติดตั้งบริเวณข้างขอบข้างทางยกระดับ ..... 176
รูปที่ 8.1	แผนผังการติดตั้งเครื่องตรวจวัดระดับเสียง ..... 183

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 8.2 ตำแหน่งจุดตรวจวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนทางยกระดับ .....	187
รูปที่ 8.3 เครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter) .....	188
รูปที่ 8.4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเสียง .....	189
รูปที่ 8.5 การติดตั้งเครื่องตรวจวัดเสียงบริเวณริมทางยกระดับ .....	190
รูปที่ 8.6 บริเวณพื้นที่ซึ่งใช้ในการติดตั้งเครื่องตรวจวัดระดับเสียง (ถ่ายจากบนทางยกระดับ) .....	191
รูปที่ 8.7 บริเวณพื้นที่ซึ่งใช้ในการติดตั้งเครื่องตรวจวัดระดับเสียง (ถ่ายจากด้านล่างของทางยกระดับ) .....	192
รูปที่ 8.8 แผนภาพเปรียบเทียบระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ( $L_{eq, 1hr}$ ) ที่ได้จากการตรวจวัด ระดับเสียง ณ จุดต่างๆ บนทางยกระดับ .....	197
รูปที่ 8.9 ลักษณะทางโครงสร้างของทางยกระดับที่ทำการติดตั้งกำแพงกันเสียง .....	199
รูปที่ 8.10 แนวทางเดินของเสียงสะท้อนซึ่งมาจากบนทางยกระดับ .....	201
รูปที่ 9.1 กำแพงกันเสียงที่มีการประยุกต์ให้ยื่นออกมาจากแนวขอบทางยกระดับ .....	205



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

การจราจรของรถประเภทต่างๆ บนถนนทั้งบนทางราบและทางยกระดับได้ก่อให้เกิดมลพิษขึ้นหลายประการ เช่น มลพิษทางอากาศและเสียง ซึ่งปัญหามลพิษทางเสียงเป็นปัญหาที่สำคัญมากอันหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ความเป็นอยู่ ความสงบสุข และคุณภาพชีวิตของประชาชนที่อยู่ริมเส้นทางการจราจรและในบริเวณใกล้เคียง ต้นกำเนิดของเสียงมาจากหลายสาเหตุ เช่น เสียงเครื่องยนต์ เสียงของรถที่แหวกอากาศ เสียงจากยางล้อรถ เสียงล้อรถกระทบพื้น เสียงเบรก เสียงแตร รวมทั้งเสียงอันเนื่องจากการสั่นสะเทือนของรถและโครงสร้าง ซึ่งระดับความดังของเสียงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ปริมาณการจราจร ความเร็วรถ ขนาดของรถและเครื่องยนต์ ความขรุขระของพื้นผิวถนน รวมทั้งระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง

การควบคุมสาเหตุและปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ เพื่อลดปัญหามลพิษทางเสียงจึงเป็นไปได้ยาก ยกเว้นการเว้นระยะห่างจากขอบเขตทางซึ่งเป็นไปได้เฉพาะบริเวณนอกเมืองที่มีพื้นที่เพียงพอ ดังนั้นการลดปัญหามลพิษทางเสียงซึ่งส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณริมทางในเขตเมืองซึ่งมีความเหมาะสมในทางปฏิบัติที่ดีที่สุดอันหนึ่งคือ การติดตั้งแผงกันเสียงริมทางเพื่อลดระดับเสียงบริเวณริมทางด้านนอกเขตทาง แต่การติดตั้งแผงกันเสียงริมทางตลอดเส้นทางทั้งทางราบและทางยกระดับในเขตเมืองจะต้องใช้งบประมาณจำนวนมาก จึงควรมีการศึกษาและพัฒนาแผงกันเสียงที่มีประสิทธิภาพ มีความคงทน แข็งแรงปลอดภัย และมีราคาประหยัด ซึ่งหากสามารถผลิตขึ้นโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรหรืออุตสาหกรรมภายในประเทศ จะเกิดความคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อประเทศ

#### 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาแนวทางในการระดับเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นบนทางยกระดับโดยการใช้แผงกันเสียง รวมทั้งคำนึงถึงการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรหรืออุตสาหกรรมภายในประเทศ

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแผงกันเสียงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ผลิตขึ้นสำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นจากยานพาหนะบนทางยกระดับเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของเสียงรบกวนหลังจากได้ทำการติดตั้งแผงกันเสียงบนทางยกระดับ

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 การวิจัยนี้จะทดลองนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรหรืออุตสาหกรรมภายในประเทศที่เหมาะสมมาใช้ในการผลิตแผงกันเสียงริมทางเพื่อแก้ไขปัญหามลพิษทางเสียงจากโครงสร้างทางยกระดับ โดยออกแบบให้มีประสิทธิภาพ แข็งแรงปลอดภัย และสวยงาม

1.3.2 การวิจัยนี้จะทดสอบประสิทธิภาพของเนื้อวัสดุที่มีการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรหรืออุตสาหกรรมภายในประเทศ จำนวน 6 ส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยทดสอบทั้งความแข็งแรงและความคงทนของวัสดุที่สภาวะต่างๆ กันในห้องปฏิบัติการ

1.3.3 การวิจัยนี้จะทำการผลิตแผงกันเสียงจำนวน 6 ตัวอย่าง จากส่วนผสมที่กล่าวไปแล้วในข้อที่ 1.3.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงและลดทอนเสียงทะลุผ่านในห้องปฏิบัติการ

1.3.4 การวิจัยนี้จะทำการผลิตแผงกันเสียงต้นแบบเพื่อติดตั้งในบริเวณริมทางยกระดับ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแผงกันเสียงในสถานที่จริง โดยเลือกแผงวัสดุ 1 ตัวอย่างที่ดีที่สุดจากจำนวน 6 ตัวอย่างที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.3.5 การวิจัยนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของวัสดุต้นแบบดังกล่าวหากนำไปใช้ผลิตเป็นแผงกันเสียง

### 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาพฤติกรรมของเสียงและปัจจัยที่มีส่วนช่วยลดระดับความดังของเสียงในเชิงฟิสิกส์ และข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อประโยชน์ที่ใช้ในการวิจัยในการลดระดับความดังของเสียงโดยใช้แผงกันเสียง

1.4.2 ทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรหรืออุตสาหกรรมในประเทศ เพื่อเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมในการผลิตแผงกันเสียงริมทางยกระดับ ได้แก่ วัสดุประสานที่ใช้ในการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแผงกันเสียงซึ่งออกแบบให้มีลักษณะเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ แก้วฉนวนหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แก้วกลบซึ่งได้จากการใช้กลบเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมเผาอิฐ อำเภอบางบาล



จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และ น้ำทิ้งจากการฟอกเยื่อกระดาษจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกเยื่อกระดาษ บริษัทสยามคราฟท์ จังหวัดราชบุรี

1.4.3 ออกแบบลัดส่วนผสมของวัสดุที่ใช้สำหรับผลิตแผงกันเสียงซึ่งได้มาจากการ ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.4 ผลิตชิ้นส่วนตัวอย่างวัสดุจำนวนทั้งสิ้น 6 ส่วนผสมที่แตกต่างกัน และทำการ ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (ตามมาตรฐาน ASTM C109), การทดสอบหาค่ากำลัง รับแรงดัดของมอร์ตาร์ (ตามมาตรฐาน ASTM C348), การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ ตาร์ (ตามมาตรฐาน ASTM 190) และหาค่า Modulus of Elasticity (เพื่อเป็นข้อมูลในการ ออกแบบด้านความแข็งแรงของแผงกันเสียง) รวมทั้งการทดสอบความต้านทานต่อสภาพกรด ซึ่ง เป็นการทดสอบด้านความทนทานของวัสดุ

1.4.5 ออกแบบและผลิตตัวอย่างแผงกันเสียงต้นแบบ จำนวน 6 ตัวอย่าง โดย ออกแบบให้มีรูปทรง ขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน และคำนึงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับเสียง (Sound Absorption), การลดทอนของเสียงทะลุผ่าน (Sound Transmission Loss) ความแข็งแรงปลอดภัยในทางวิศวกรรม รวมทั้งความสวยงามของ แผงกันเสียง

1.4.6 ทดสอบแผงกันเสียงต้นแบบทั้ง 6 ตัวอย่างดังกล่าว ในห้องปฏิบัติการเพื่อหา ประสิทธิภาพในการการดูดซับเสียงและการลดทอนของเสียงทะลุผ่านตามมาตรฐาน ISO 141, ISO 143 ที่ช่วงความถี่ต่างๆและทดสอบความแข็งแรงของแผงกันเสียงต้นแบบ

1.4.7 จัดทำต้นทุนการผลิตของแผงกันเสียงต้นแบบดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบหาก นำไปใช้ผลิตเป็นแผงกันเสียงที่จะนำไปติดตั้งในสถานที่จริง

1.4.8 ผลิตแผงกันเสียงที่พัฒนาจากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรหรือ อุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยเลือกใช้ส่วนผสมซึ่งทำให้แผงกันเสียงมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด ทั้งใน เรื่องของต้นทุน ความแข็งแรงคงทน และประสิทธิภาพในการลดระดับเสียง แล้วทำการติดตั้งแผง กันเสียงริมทางยกระดับบริเวณทางด่วนสายอุดรรัถยา (แจ้งวัฒนะ-บางปะอิน) เป็นระยะทางยาว ประมาณ 50 เมตร ตัวแผงกันเสียงมีความสูงอย่างน้อย 2 เมตร โดยติดตั้งบนกำแพงกันริมทาง (Traffic Barrier)

1.4.9 ทดสอบโดยทำการตรวจวัดระดับเสียงที่ระยะ 1, 5, 10, และ 20 เมตร ห่างจาก กึ่งกลางของแผงกันเสียงในแนวตั้งฉากด้านนอกถนน รวมทั้งที่ความสูง 1.2, 3, 5, 10 เมตร จากพื้นดินและตรวจวัดระดับเสียงบริเวณที่ไม่ได้ติดตั้งแผงกันเสียงที่ระยะห่างเช่นเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบและหาประสิทธิภาพในการลดระดับของเสียง

1.4.10 ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบในภาคสนาม

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความเข้าใจในพฤติกรรมโดยทั่วไปของเสียงและพฤติกรรมของเสียงที่มีส่วนช่วยในการลดระดับความดังของเสียงรบกวนได้

1.5.2 สามารถประยุกต์ใช้วัสดุที่เหลือทิ้งจากทั้งภาคการเกษตรหรืออุตสาหกรรมภายในประเทศเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของแผงกันเสียงทั้งทางด้านช่วยลดระดับความดังของเสียงหรือเพิ่มความคงทนและความแข็งแรงของแผงกันเสียง

1.5.3 ทดแทนการนำเข้าและลดค่าใช้จ่ายในการใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ

1.5.4 เป็นแนวทางเพื่อใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของแผงกันเสียงที่สามารถผลิตเพื่อใช้ในประเทศ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วิธีการลดระดับเสียงรบกวนจากการจราจร

#### 2.1 ฟิสิกส์ของเสียง [Rettinger, 1968]

เสียง เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งซึ่งเปลี่ยนแปลงมาจากพลังงานรูปอื่น และสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นได้ด้วย อีกทั้งยังทำให้โสตประสาทของคนปกติเกิดความรู้สึกในการได้ยิน เสียงไม่มีตัวตน ไม่ต้องการที่อยู่ และไม่มีมวล ดังนั้นจึงอาจจะเชื่อได้ว่า เสียงไม่เป็นสสาร เสียงเกิดขึ้นจากการสั่นของวัตถุไม่ว่าจะเป็นสสารใดๆ แม้แต่อากาศเมื่อทำให้เกิดการสั่นด้วยความเร็วที่พอเหมาะก็จะทำให้เกิดเสียงได้

##### 2.1.1 รูปแบบการสั่นของคลื่นเสียง

ตัวอย่างเกี่ยวกับการเกิดเสียงที่เห็นได้ง่ายคือ การเคาะวัตถุ เช่น การเคาะแผ่นไม้ให้สั่น เมื่อเคาะแผ่นไม้ด้วยความแรงมาก ย่อมทำให้เกิดช่วงกว้างของการสั่น (Amplitude) มีค่ามากด้วย แสดงว่าเกิดพลังงานมากก็จะทำให้เสียงดังมากเช่นกัน ซึ่งผลของการสั่นของวัตถุทำให้อากาศเกิดการอัดและการขยาย เป็นคลื่นตามจังหวะของการสั่นของวัตถุ โดยเราทำการแบ่งลักษณะการสั่นของคลื่นเป็น 2 รูปแบบ คือ

##### (ก) การสั่นตามขวาง (Transverse Vibration)

คลื่นตามขวาง คือ คลื่นที่เมื่อเคลื่อนที่ไปในตัวกลางใด อนุภาคตัวกลางนั้นจะสั่นในแนวตั้งฉากกับแนวทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นแสง คลื่นความร้อน คลื่นวิทยุ

##### (ข) การสั่นตามยาว (Longitudinal Vibration)

คลื่นตามยาว คือคลื่นที่เมื่อเคลื่อนที่ไปในตัวกลางใด อนุภาคของตัวกลางนั้นจะสั่นในแนวเดียวกับแนวทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป เช่น คลื่นเสียง

จากลักษณะการสั่นซึ่งทำให้เกิดคลื่น สามารถให้คำนิยามของคำว่าคลื่น (Wave) ได้ดังนี้ "คลื่น คือสถานะหนึ่งของการรบกวนซึ่งเคลื่อนที่ไปในตัวกลางด้วยความเร็วจำกัด เมื่อการรบกวนเคลื่อนที่ไปในตัวกลางถึงไหนก็ตาม ตัวกลางก็จะปรากฏเป็นคลื่น ณ ที่นั้น"



### 2.1.2 รูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave motion and Sound wave)

รูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่น เป็นการเคลื่อนที่ที่มีจังหวะสม่ำเสมอ เป็นลักษณะเฉพาะ เรียกว่า การเคลื่อนที่ชนิด Simple Harmonic ซึ่งคลื่นเสียงก็มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบ Simple Harmonic ด้วย โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงจะประกอบด้วย

- การแกว่งครบ 1 รอบ (One complete vibration)
- ช่วงกว้างของการสั่น (Amplitude)
- คาบของการสั่น (Period)
- ความถี่ (Frequency)

### 2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นเสียง

#### (ก) ความเร็วของคลื่น (Velocity of wave)

ความเร็วของคลื่น คือระยะทางที่คลื่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ใน 1 วินาที มีหน่วยเป็นระยะทางต่อหน่วยเวลา

ความเร็วของเสียงมีผลต่อผู้ฟังอย่างมาก โดยปกติแล้วความเร็วของเสียงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ และความดันอากาศ ซึ่งความเร็วของเสียงที่ถูกต้อง คือ 331.4 เมตรต่อวินาที ที่ 0 องศาเซลเซียส

ความเร็วของเสียงในอากาศที่มีลักษณะอย่างเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอเมื่อความดันคงที่ แต่เมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงจะสามารถหาความเร็วเสียงได้จากสมการที่

2.1 และ 2.2

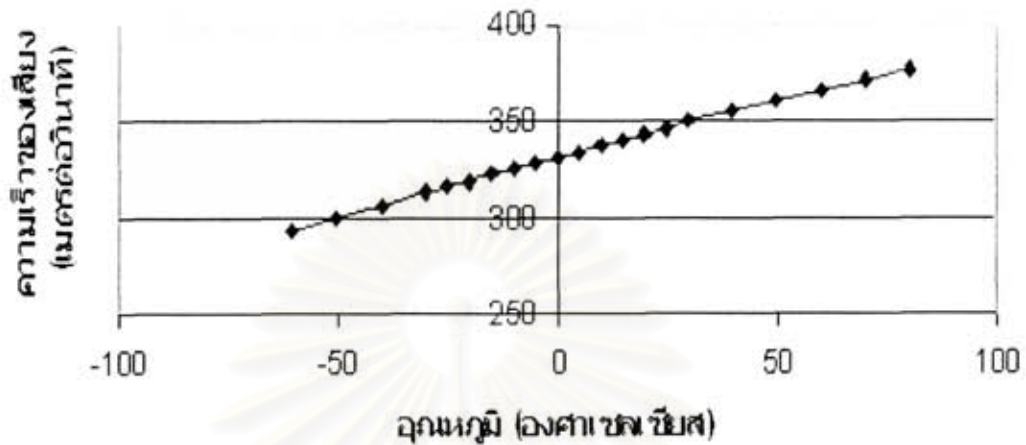
$$V = 20.06\sqrt{273 + c} \quad (2.1)$$

$$V = V'_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$V'_0$	คือ ความเร็วของเสียงในอากาศที่ 0 องศาเซลเซียส (เมตรต่อวินาที)
	$V'$	คือ ความเร็วของเสียงในอากาศที่ $t$ องศาเซลเซียส (เมตรต่อวินาที)
	$V$	คือ ความเร็วของเสียงในอากาศ (เมตรต่อวินาที)

$f$  คือ อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)

โดยใน รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอากาศกับความเร็วของเสียง



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วเสียง

(ข) ความยาวของคลื่น ( Wave Length)

ความยาวคลื่น 1 ลูก ประกอบด้วยหลังคลื่นกับท้องคลื่น (หรือลูกอัดกับลูกขยาย) หรือระยะทางระหว่างจุดสองจุด ซึ่งอยู่ในเฟสเดียวกันบนคลื่นที่อยู่ติดกัน มีหน่วยเป็นความยาวคลื่นหรือระยะทางต่อคลื่น

(ค) ความถี่ของคลื่น (Frequency of waves)

ความถี่ของคลื่น คือจำนวนคลื่นที่วิ่งผ่านจุดคงที่จุดหนึ่งในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที ซึ่งความเร็วของคลื่น, ความยาวของคลื่น, และความถี่ของคลื่นเสียงจะมีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในสมการที่ 2.3 คือ

$$v = f\lambda \quad (2.3)$$

เมื่อ	$v$	คือ ความเร็วของเสียงในอากาศ (เมตรต่อวินาที)
	$f$	คือ ความถี่ของคลื่น (เฮิรตซ์)
	$\lambda$	คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

### 2.1.4 ค่าความดันของเสียง (Pressure)

ค่าความดันต่ำที่สุดที่คนสามารถรับฟังได้เท่ากับ 0.0002 ไมโครบาร์ ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ และค่าความดันสูงที่สุดที่คนปกติสามารถรับฟังได้มีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศ หรือ 106 ไมโครบาร์

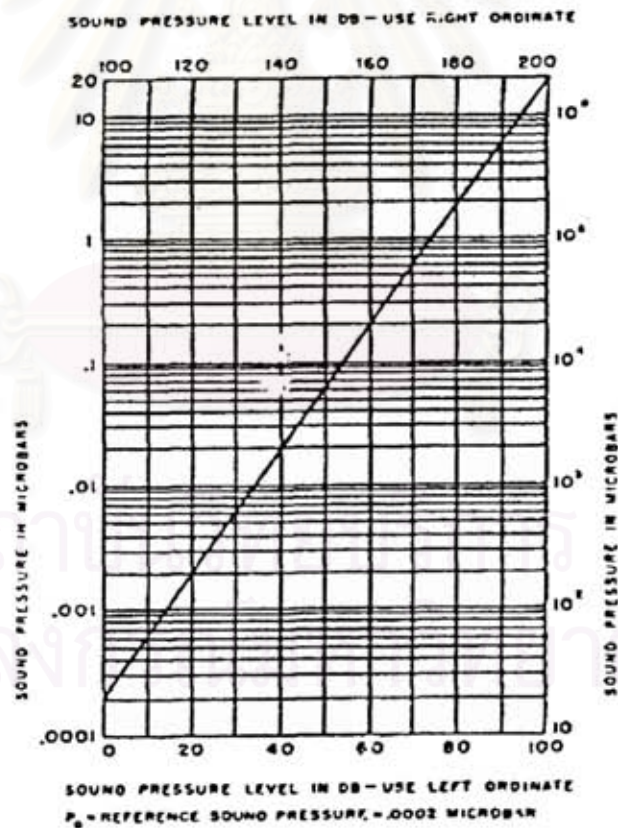
โดยที่เราใช้ค่าความดันต่ำที่สุด ซึ่งเท่ากับ 0.0002 ไมโครบาร์ เป็นความดันอ้างอิง (Reference Pressure) และสำหรับการวัดความดันเสียง เรานิยมใช้ในรูปแบบของระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level, SPL) ดังแสดงในสมการที่ 2.4 และรูปที่ 2.2

$$SPL = 20 \log_p P \quad (2.4)$$

เมื่อ

$SPL$  คือ ระดับความดันเสียง

$P_0$  คือ ความดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 0.0002 ไมโครบาร์



รูปที่ 2.2 ความเปลี่ยนแปลงของระดับความดันเสียงกับความดันเสียง

[Rettinger, 1968]



### 2.1.5 ความเข้มของคลื่นเสียง (Intensity of sound wave)

ความเข้มของคลื่นเสียง ณ จุดใดๆ คือปริมาณของพลังงานของคลื่นเสียงที่ตกตั้งฉากบนพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ณ จุดนั้นในเวลา 1 วินาที โดยความเข้มมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ให้  $I_o$  เป็นความเข้มของเสียงที่เบาที่สุดที่หูสามารถเริ่มได้ยินได้

$$I_o = \frac{P_o^2}{dc} \quad (2.5)$$

เมื่อ	$d$	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (0.00118 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	$c$	คือ ความเร็วของเสียง (34450 เซนติเมตรต่อวินาที)
	$P_o$	คือ ความดันอ้างอิง (0.0002 ไมโครบาร์)

$$I_o = \frac{(0.002)^2}{41} \quad (2.6)$$

ค่า  $I_o$  ขึ้นกับค่าความหนาแน่นของอากาศ (Density of Air) ความเร็วเสียง (Sound velocity) ซึ่งทั้งสองค่านี้ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน แต่สำหรับงานทางด้าน Architectural Acoustics จะมีผลกระทบน้อยและในการกล่าวถึงความเข้มเสียงเรานิยมพูดกันในรูปของระดับความเข้มเสียง (Intensity Level) ซึ่งมีหน่วยเป็น เดซิเบล (Decibel) โดยใช้  $I_o$  เป็นความเข้มอ้างอิง (Reference level)

### 2.1.6 ระดับความเข้ม (Intensity Level)

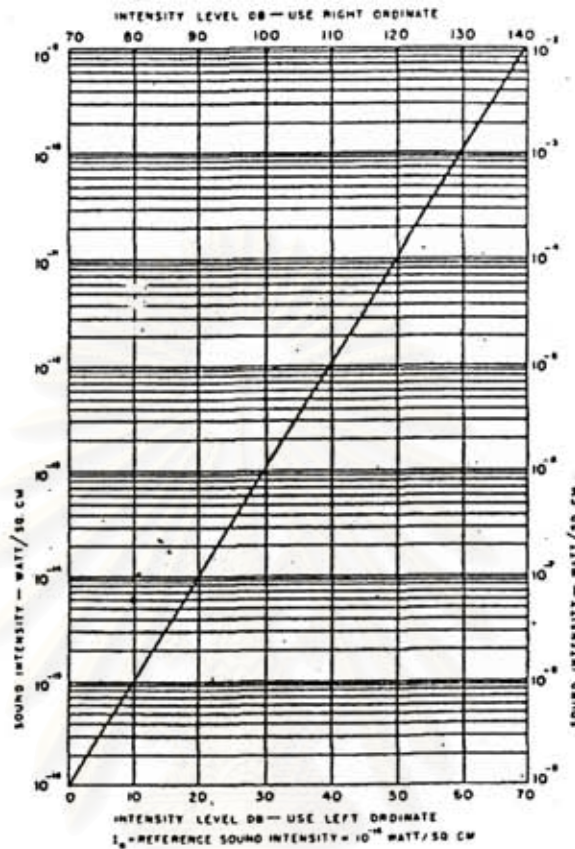
$$IL = 10 \log \frac{I}{I_o} \quad (2.7)$$

$$IL = 10 \log \frac{P^2 / dc}{P_o^2 / d_o c_o} \quad (2.8)$$

$$IL = 20 \log \frac{P}{0.0002} \quad (2.9)$$

= SPL (Sound Pressure Level)

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มเสียงกับความเข้มเสียง



รูปที่ 2.3 ความเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มเสียงกับความเข้มเสียง

[Rettinger, 1968]

### 2.1.7 พลังงานเสียง (Sound Power)

เป็นพลังงานที่ได้จากแหล่งกำเนิดของเสียงในช่องความถี่ทั้งหมด หรือในช่วงความถี่ที่เราจะทำการศึกษา ซึ่งโดยปกติแล้ว เราจะวัดปริมาณนี้เป็น วัตต์ (Watts)

พลังงานของเสียงที่ต่ำที่สุดที่หูคนปกติธรรมดาจะได้ยินได้ เป็นพลังงานอ้างอิง (Reference power) ซึ่งมีค่าเป็น  $10^{-12}$  วัตต์

### 2.1.8 ความดังของเสียง (Loudness)

ความดัง คือความรู้สึกที่เกิดขึ้นจากการที่พลังงานเสียง ซึ่งมีความเข้มต่างๆ กันตกกระทบเยื่อหูของเรา ซึ่งจากนิยามจะเห็นว่า ความดังของเสียงขึ้นอยู่กับความเข้มของพลังงานเสียง

ถ้าเราเพิ่มความเข้มของเสียงในขณะที่ผู้รับฟังยังคงอยู่ห่างจากต้นกำเนิดเสียงในระยะทางเท่าเดิม จะมีความรู้สึกที่เสียงดังมากขึ้น ถ้าความเข้มของพลังงานเสียงน้อยลงเสียงก็จะเบาลง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเสียงและความดังไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน แต่สัมพันธ์กันในรูปของมาตราส่วนลอการิทึม

การวัดความดังของเสียง เราวัดเป็นระดับความเข้ม (Intensity Level,  $IL$ ) ของเสียง โดยเอาความเข้มของเสียงที่เบาที่สุด ซึ่งมนุษย์เริ่มได้ยิน (Threshold of hearing) ซึ่งมีระดับความเข้มเท่ากับ  $10^{-16}$  วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นมาตรฐาน แล้วหาความเข้มของเสียงที่ได้ยินนั้นอยู่ในระดับใด

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว การคำนวณหาระดับความเข้มของเสียงต่างๆ เราใช้สูตร

$$IL = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $IL$  คือ ระดับความเข้มของเสียง (เดซิเบล)  
 $I_0$  คือ  $10^{-16}$  วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

ซึ่งจากตารางที่ 2.1 ได้แสดงค่าระดับความเข้มของเสียงในสถานการณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ระดับความเข้มของเสียงในสถานการณ์ต่างๆ [Rettinger, 1968]

ชนิดของเสียง	ระดับความเข้ม (เดซิเบล)
เสียงที่เบาที่สุดที่มนุษย์เริ่มได้ยิน	0
เสียงกระซิบเบาๆ	10-20
เสียงในสถานที่ทำงานที่มีเสียงเบาๆ	20-40
เสียงรถยนต์ที่เครื่องยนต์ทำงานเรียบ	40-50
การพูดคุยอย่างธรรมดา	60
การจราจรในถนนที่คับคั่ง	70-80
รถไฟที่กำลังแล่น	90-100
ฟ้าร้อง	110
เสียงดังที่มนุษย์ทนฟังได้	120



### 2.1.9 ขอบข่ายการได้ยิน (Limit of Audibility)

ถ้าเราฟังเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียง ซึ่งให้เสียงที่เริ่มต้นด้วยระดับความเข้ม (ความดัง) ต่ำมาก เราจะไม่ได้ยินเสียงเลย แต่ถ้าเพิ่มความเข้มมากขึ้นต่อไปอีกเราก็จะได้ยินเสียงดังมากขึ้น จนในที่สุดความรู้สึกในการได้ยินมากจนเรารู้สึกปวดหู เช่นนี้เรียกว่า Feel เสียงนั้นและจุดต่ำสุดของความเข้ม ทำให้เราเริ่มได้ยินเรียกว่า Threshold of Audibility และจุดสูงสุดที่เราเริ่มรู้สึกปวดหู เรียกว่า Threshold of Feeling ขีดจำกัดทั้งสองนี้ เปลี่ยนแปลงได้แล้วแต่บุคคลและความถี่ของเสียง

ความถี่ของเสียงที่ต่ำที่สุดที่คนธรรมดา รู้สึกได้ยินเสียงได้ คือ ประมาณ 20 เฮิรตซ์ และความถี่ของเสียงที่สูงที่สุดที่คนธรรมดารู้สึกได้ยินเสียงได้ คือประมาณ 20,000 เฮิรตซ์ ขีดจำกัดนี้จะเปลี่ยนแปลงตามวัย ซึ่งความถี่ต่างๆ ที่หูคนได้ยิน เรียกว่า Audio frequency เสียงที่มีความถี่เกินขีดจำกัดที่หูคนธรรมดาได้ยิน เรียกว่า Ultrasonic ส่วนเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่มนุษย์จะได้ยินเป็นเสียงได้ เรียกว่า เสียง Infrasonic

## 2.2 หลักการลดระดับความดังของเสียง

ปรากฏการณ์ธรรมชาติของเสียงที่มีผลต่อความสามารถในการลดระดับความดังของเสียง ประกอบด้วย

### 2.2.1 การสะท้อนของเสียง (Reflection of sound)

เมื่อคลื่นเสียงแผ่กระจายจากแหล่งกำเนิดมากระทบกับสิ่งกีดขวางหรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างรวดเร็วของตัวกลาง จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ ที่เรียกว่า การสะท้อนขึ้นที่ผิวของตัวกลางหรือสิ่งกีดขวางที่คลื่นเสียงตกกระทบ เหมือนลูกบอลที่ตกกระทบกำแพงแล้วสะท้อนกลับออกมา [Merken, 1989] นอกจากกรณีที่ว่าวัสดุซึ่งเสียงตกกระทบ เป็นวัสดุดูดกลืนเสียงตามที่ได้ผลิตมาให้เหมาะกับงานหนึ่งๆโดยเฉพาะ จึงมีการสะท้อนเสียงได้น้อย แม้ว่าผู้สังเกตต้องการรับเสียงตรง แต่ก็อาจมีเสียงสะท้อนออกมาบ้าง สำหรับในชีวิตประจำวัน ถ้าเสียงสะท้อนเคลื่อนที่กลับมาถึงผู้สังเกตโดยมีช่วงเวลาห่างจากเสียงตรงน้อยกว่า 0.1 วินาที ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงตรง และเสียงสะท้อนรวมกันเป็นเสียงเดียว แต่ถ้าเสียงสะท้อนเคลื่อนที่กลับมาถึงผู้สังเกตใช้เวลามากกว่า 0.1 วินาที ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงสะท้อนแยกกับเสียงตรงในลักษณะที่ซ้ำกันซึ่งเรียกว่า เสียงก้อง [สมพงษ์ ใจดี, 2523]

### 2.2.2 การหักเหของเสียง (Refraction of Sound)

เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และทิศทางการเคลื่อนที่ของเสียงซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การหักเห [Merken, 1989] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาอากาศที่ระดับต่างๆที่มีความแตกต่างกันในเรื่อง อุณหภูมิ ความชื้น ความหนาแน่น อันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเสียง ทำให้แนวทางการเคลื่อนที่และรูปร่างของคลื่นเสียงเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลต่อการได้ยินยกตัวอย่างเช่น เราจะได้ยินเสียงไกลๆ ในเวลากลางคืนดีกว่าในเวลากลางวัน ซึ่งเป็นเพราะอากาศระดับใกล้พื้นดินจะอุ่นหรือร้อนกว่าอากาศระดับสูงๆ ขึ้นไป พอตกลงคืนท้องฟ้าแจ่มใส พื้นโลกคายความร้อนออกไป ทำให้อากาศใกล้พื้นดินเย็นกว่าอากาศระดับสูง

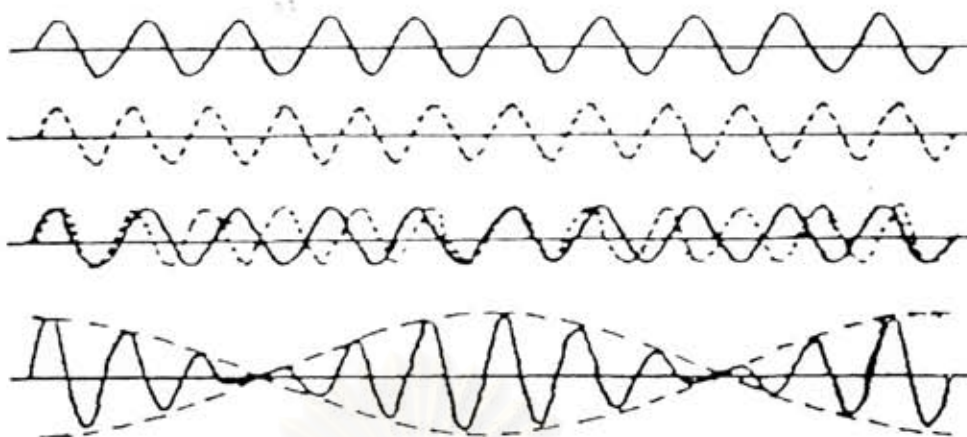
ดังนั้นในเวลากลางวันคลื่นเสียงจึงหักเหขึ้นไปเหนือพื้นดิน เนื่องจากเสียงเดินทางไปใกล้ๆ พื้นดินเร็วกว่าในเวลากลางคืน ในทางตรงกันข้ามเวลากลางคืน เสียงจะเดินทางโค้งงอลงสู่พื้นดิน นอกจากนั้นในเวลากลางคืนมีความเงียบสงบช่วยให้หูคนเรามีความไวต่อเสียงค่อยๆ ได้ [รำพึง มังคละสวัสดิ์, 2530]

### 2.2.3 การแทรกสอดของเสียง (Interference of Sound)

เมื่อคลื่นเสียงตั้งแต่ 2 แหล่งกำเนิดขึ้นไป เกิดขึ้นและเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งเดียวกัน คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะรวมกันเป็นคลื่นเสียงเดียว ซึ่งเรียกว่า การแทรกสอด [Merken, 1989] ซึ่งเป็นไปตามหลักการการรวมกันของคลื่น ทั้งนี้ถ้าคลื่นเสียงตั้งแต่ 2 แหล่งขึ้นไปที่มีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อยมาแทรกสอดกัน ในบางครั้งเสียงเหล่านี้จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive Interference) ทำให้เกิดการสั่นตัวของตัวกลางมากขึ้นจึงได้ยินเสียงดังมากกว่าปกติ และในบางครั้งคลื่นเสียงเหล่านี้จะแทรกสอดกันแบบหักล้าง (Destructive Interference) ทำให้การสั่นตัวของตัวกลางน้อยลง จึงได้ยินเสียงค่อยลง จนบางครั้งไม่ได้ยินเลย ดังนั้นเมื่อเกิดการแทรกสอดจึงทำให้ผู้สังเกตได้ยินเสียงดังและค่อยเป็นจังหวะ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า บีต (Beat) [Giancoli, 1980] ดังแสดงในรูปที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิดบิต [Merken, 1989]

#### 2.2.4 การเลี้ยวเบนของเสียง (Diffraction of Sound)

การเลี้ยวเบนของเสียงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของเสียง เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่มากกระทบสิ่งกีดขวาง เช่น กรณีการเลี้ยวเบนของเสียงที่มุมตึก ทำให้สามารถได้ยินเสียงของคนที่อยู่ด้านหลังอีกด้านหนึ่งของตึก โดยไม่ต้องเห็นตัวคนพูด เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงทิศทางโดยการเลี้ยวเบนของคลื่นเสียงนี้แตกต่างจากการสะท้อนและการหักเหของเสียงเนื่องจากปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในตัวกลางเดียวกัน จากผลการเลี้ยวเบนของเสียงนี้ทำให้ไม่สามารถสร้างมุมหรือบริเวณที่อับเสียงได้อย่างสมบูรณ์ เพราะแสงกันเสียงหรืออุปกรณ์ที่เป็นสิ่งกีดขวางใดๆ ถ้าหากมีช่องเปิดหรือขอบเปิดไปสู่อีกด้านหนึ่ง จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของเสียงขึ้นบริเวณช่องเปิดหรือขอบเขตเปิดนั้นๆ ได้เช่นกัน [Merken, 1989]

#### 2.2.5 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect)

หากแหล่งกำเนิดเสียงและผู้สังเกตมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์ต่อกันในตัวกลางที่อยู่นิ่งนั้น ความถี่ของเสียงที่ปรากฏต่อผู้สังเกตจะแตกต่างกันไปจากความถี่ของคลื่นเสียงที่ส่งออกมา ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) [Giancoli, 1980] เช่นการได้ยินเสียงแตรรถหรือหวูดรถไฟ ขณะวิ่งผ่านผู้สังเกตจะทำให้ได้ยินเสียงสูงหรือต่ำผิดไปจากปกติหรืออาจกล่าวว่า "ปรากฏการณ์ ดอปเพลอร์ คือ ปรากฏการณ์ที่ระดับความถี่ของเสียงเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดเสียงและผู้สังเกต"



### 2.2.6 การสั่นพ้อง (Resonance)

ปรากฏการณ์สั่นพ้อง หมายถึง ปรากฏการณ์ที่วัตถุหรือสิ่งใดสิ่งหนึ่งเกิดการสั่นตัวเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยคลื่นที่มีความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของวัตถุหรือสิ่งของนั้น ทั้งนี้ถ้าคลื่นทั้งสองตรงกันจะทำให้เกิดการสั่นตัวอย่างรุนแรงของวัตถุนั้น กล่าวคือ แอมพลิจูดของการสั่นตัวจะกว้างขึ้นและทำให้เกิดเสียงดังขึ้น

### 2.2.7 เสียงกลบ (Noise)

ในชีวิตประจำวันบางครั้งเมื่อเรากำลังสนทนาอยู่ และเกิดมีเสียงจากสภาพแวดล้อมที่มีระดับเสียงดังกว่าระดับเสียงที่กำลังสนทนาอยู่ จนทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้นั้น ถือเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถอธิบายได้ โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เสียงกลบ ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ว่า ในขณะที่ฟังเสียงหนึ่งอยู่ (เสียงแรก) แล้วมีอีกเสียงหนึ่งค่อยๆ มีความเข้มหรือระดับความดังเพิ่มขึ้น (เสียงที่สอง) เรื่อยๆ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปและเสียงที่สองค่อยๆ ดังขึ้นจนเสียงที่สองมีระดับความดังมากกว่าเสียงแรกเกินกว่า 10 dB(A) จะทำให้ไม่สามารถได้ยินเสียงแรก แต่จะได้ยินเสียงที่สองแทน เหตุการณ์นี้เรียกว่า เสียงที่สองมีความเข้มหรือความดังของเสียงที่มากกว่าได้กลบเสียงแรก และจากการทดลองยังพบว่าเสียงที่มีความถี่ต่ำและมีความเข้มพอสมควรจะกลบเสียงสูงได้ง่ายกว่า (ราฟิง มังคละสวัสดิ์, 2530)

### 2.2.8 การดูดกลืนเสียง (Sound Absorption)

การดูดกลืนเสียง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงผลรวมของพลังงานเสียงที่ลดน้อยลงเมื่อผ่านตัวกลางใดๆ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การดูดกลืนเสียง คือ ความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานเสียงและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน [Olivia CT and Olivo TP, 1978] โดยวัสดุที่สามารถดูดกลืนคลื่นเสียงได้ดีจะเป็นวัสดุจำพวกเส้นใย (Fibrous) และวัสดุพรุน (Porous) เมื่อเสียงกระทบวัสดุใดๆ เสียงส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนและส่งผ่านเข้าไปในวัสดุนั้น ทั้งนี้จะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุนั้น ซึ่งได้แก่

- ลดระดับเสียง
- ทำให้ช่วงเวลาของการสะท้อนช้าหรือเร็วขึ้นได้
- ป้องกันไม่ให้เกิดเสียงก้อง (Echo) หรือขจัดเสียงสะท้อนที่ไม่ต้องการ

ปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นตัวชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติในการดูดกลืนเสียงคือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption Coefficient,  $\alpha$ )

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเป็นพลังงานเสียงส่วนหนึ่ง ซึ่งถูกดูดกลืนโดยผิววัสดุ เมื่อมีพลังงานเสียงมาตกกระทบผิววัสดุนั้นๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 [ASTM C423, 1998]

$$\alpha = \frac{(A_2 - A_1)}{S} \quad (2.11)$$

เมื่อ	$A_2$	คือ ค่าความสามารถในการดูดกลืนเสียงของห้องหลังจากนำวัสดุเข้าไปติดตั้งภายใน (ตารางเมตร)
	$A_1$	คือ ค่าความสามารถในการดูดกลืนเสียงของห้องทดลองก่อนนำแผ่นวัสดุเข้าไปติดตั้ง (ตารางเมตร)
	$S$	คือ ขนาดของแผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (ตารางเมตร)

โดยค่าความสามารถในการดูดกลืนเสียง (Sound Absorption) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$A_n = \frac{0.9120Vd}{C} \quad (2.12)$$

เมื่อ	$A_n$	คือ ค่าความสามารถในการดูดกลืนเสียง (ตารางเมตร)
	$V$	คือ ปริมาตรของห้องที่ใช้ในการทดลอง (ลูกบาศก์เมตร)
	$d$	คือ อัตราการสลายตัวของพลังงานเสียง (rate of decay)

$C$  คือ ความเร็วเสียง (เมตรต่อวินาที) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.13

$$C = 20.047\sqrt{273.15 + t} \quad (2.13)$$

เมื่อ	$t$	คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
-------	-----	-----------------------------

นอกจากนี้การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง (Noise Reduction Coefficient, NRC) สามารถทำได้โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียงของวัสดุ ที่ความถี่ 250 500 1000 และ 2000 Hz มาทำการค่าเฉลี่ย ดังสมการที่ 2.14

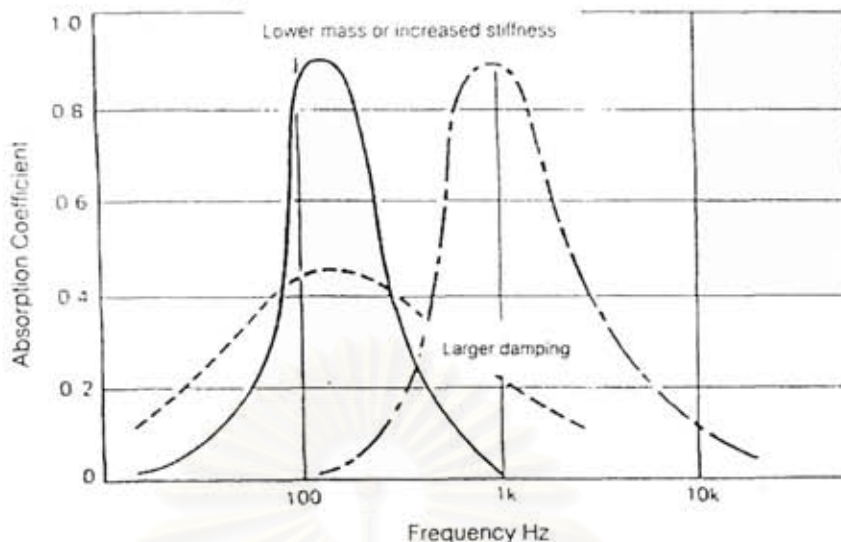
$$NRC = \frac{(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000})}{4} \quad (2.14)$$

องค์ประกอบที่มีผลต่อความสามารถในการดูดกลืนเสียงของวัสดุ ได้แก่ ความหนา, ความหนาแน่น, ความพรุน, ความต้านทานการไหล, ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Coefficient of Elasticity) และค่าความต้านทานเสียง (Acoustic Impedance) [David, 1991] โดยสามารถจำแนกประเภทของวัสดุดูดกลืนเสียงออกได้ เป็น 3 ประเภทตามกลไกการดูดกลืนเสียง ได้แก่

(ก) วัสดุดูดกลืนเสียงประเภทเมมเบรน (Membrane Absorber) ได้แก่ แผ่นโลหะบาง ไม้อัด พลาสติก กระดาษ ยิปซัมบอร์ด เป็นต้น โดยวัสดุเหล่านี้ไม่สามารถยืดหยุ่นได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปเนื่องจากการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นเสียงไปเป็นพลังงานความร้อนให้แก่วัสดุนั้นๆ ซึ่งวัสดุชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงได้ดีที่ความถี่ต่ำ เนื่องจากพลังงานเสียงที่ความถี่ต่ำจะทำให้เมมเบรนเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่ความถี่สูง ในขณะที่คลื่นความถี่สูงมักจะถูกสะท้อนออกจากเมมเบรนทำให้มีการสูญเสียพลังงานให้กับเมมเบรนน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตาม หากนำวัสดุที่เป็นเมมเบรนมาใช้ร่วมกับวัสดุพรุน ก็จะทำให้สามารถดูดกลืนคลื่นเสียงที่มีช่วงความถี่กว้างได้ดีมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ค่าความสามารถในการดูดกลืนเสียงสูงสุดของเมมเบรนยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายทอดพลังงานจากคลื่นเสียงไปเป็นพลังงานความร้อนของวัสดุอีกด้วย กล่าวคือ ถ้าความสามารถในการถ่ายเทพลังงานความร้อนของวัสดุมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดกลืนเสียงสูงสุดของเมมเบรนมีค่าลดลง แต่จะครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างมากขึ้น

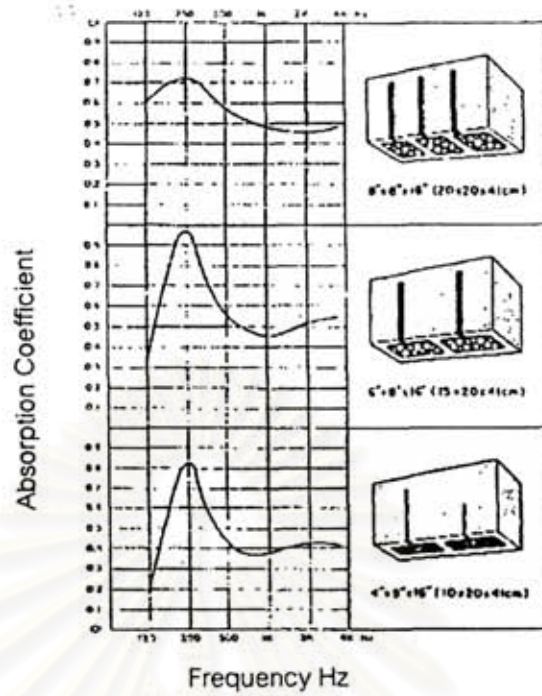
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



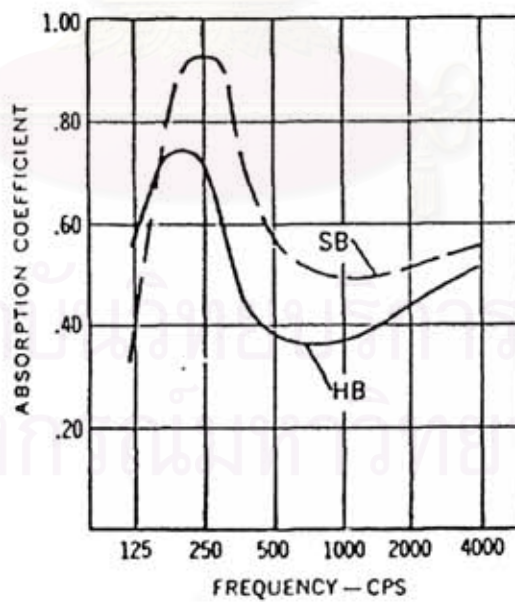


รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดกลืนเสียง กับความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไกเป็นพลังงานความร้อนของ วัสดุพูนเมื่อนำมาใช้ ร่วมกับเมมเบรน [Sound Research Laboratories Ltd., 1991]

(ข) วัสดุซับเสียงประเภทเป็นโพรงหรือช่อง (Resonator of Cavity Absorber) เป็น วัสดุที่มีลักษณะเป็นช่องหรือโพรงที่ขนาดแตกต่างกันในผนัง หรือโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งแต่ละช่อง เรียกว่า Sound box ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยถ้าโพรงอากาศมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กมากเมื่อ เทียบกับความยาวของคลื่นเสียงที่ตกกระทบบนช่องเปิดเรโซเนเตอร์ (Resonator) ก็จะทำให้มี ความจำเพาะกับความถี่นั้น ทำให้การสั่นตัวของปริมาตรอากาศเป็นจังหวะตามการคลื่นที่เข้าออก ของอากาศผ่านรูเปิดของโพรงอากาศ โดยวัสดุประเภทนี้จะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงที่มี ความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz โดยจะสามารถดูดกลืนเสียงได้สูงสุดในช่วงความถี่ 100-300 Hz และ ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น [Doelle and Arch, 1972] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แต่หากมี การผสมวัสดุดูดกลืนเสียงชนิดอื่น เช่น โยแก้ว หรือใยหิน ลงไปในช่องว่างภายใน Sound Box ก็จะทำให้มีความสามารถในการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น [Yerges, 1969] ดังแสดงในรูป ที่ 2.7

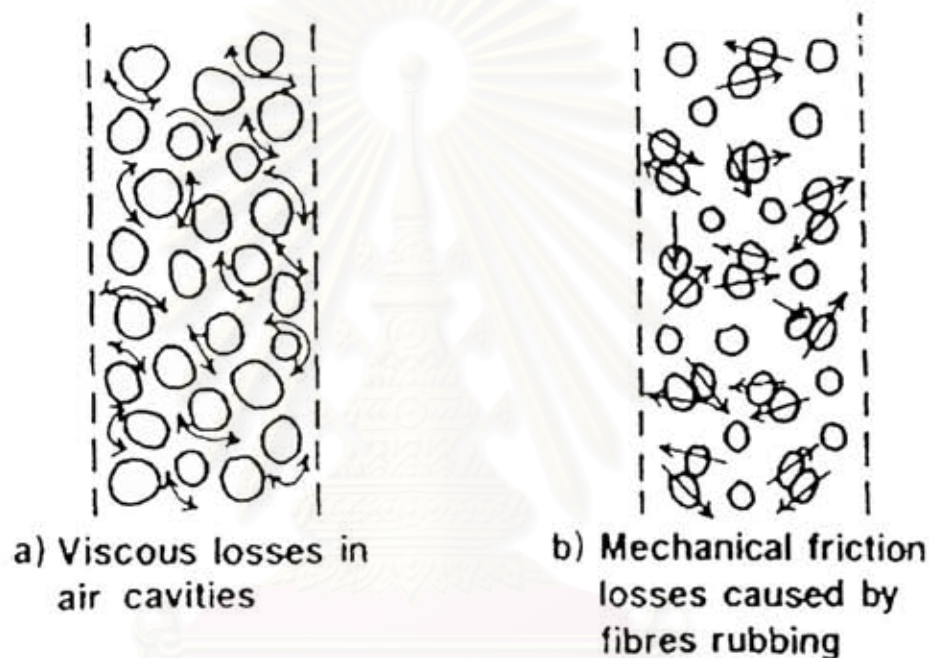


รูปที่ 2.6 ลักษณะวัสดุดูดกลืนเสียงประเภทโพรงช่อง (Cavity-Absorber)  
[Rettinger, 1968]



รูปที่ 2.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดเสียงของวัสดุโพรงช่อง ชนิดไม่มีใยแก้ว (HB) และ ชนิดมีใยแก้ว (SB) [Rettinger, 1968]

(ค) วัสดุดูดคลื่นเสียงประเภทเส้นใย (Fiber) หรือวัสดุที่มีรูพรุน (Porous or Dissipative Absorber) โดยวัสดุเหล่านี้จะมีช่องว่างอยู่ภายใน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่าขนาดความยาวคลื่นเสียงมาก ดังนั้นวัสดุชนิดนี้จึงเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานได้เป็นอย่างดี โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัสดุพรุน คือ เมื่อเสียงตกกระทบบนวัสดุเหล่านี้ โมเลกุลของอากาศจะเกิดการสั่นตัว ซึ่งโมเลกุลของอากาศนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเสียดทานและความหนืด (Friction and Viscous Loss) โดยมีลักษณะการสูญเสียพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการสลายตัวของพลังงานเสียงเนื่องจากความหนืดและแรงเสียดทาน

[Malcolm and Frederick, 1982]

นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ รวมทั้งการอัดและการขยายของคลื่นเสียงในระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างภายในวัสดุพรุน เป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ปรากฏการณ์ทั้ง 2 ชนิดนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมากเมื่อเสียงที่ตกกระทบมีความถี่สูง ซึ่งในขณะที่คลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อน เนื่องจากอากาศภายในช่องว่างของวัสดุพรุนจะถูกอัดขยายอย่างเป็นจังหวะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อน คลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำจะทำให้ระยะเวลาในการสั่นตัวของโมเลกุลอากาศในแต่ละครั้งยาวนานขึ้น ประกอบกับคุณสมบัติของวัสดุพรุน ซึ่งมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมากและความสามารถในการนำ

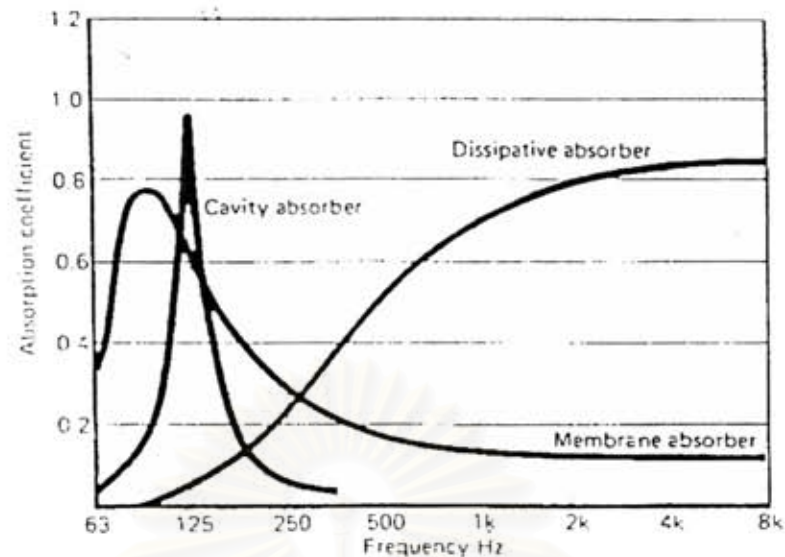


1. คุณสมบัติของวัสดุพรม ซึ่งมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมากและความสามารถในการนำความร้อนของเส้นใยค่อนข้างสูง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญของวัสดุพรมเมื่อได้รับคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำ ซึ่งลักษณะการใช้งานของวัสดุซับเสียงประเภทนี้สามารถแบ่งได้เป็น

- วัสดุที่ใช้การฉีดพ่น (Spray-on) ได้แก่ วัสดุที่ฉีดพ่น ฉาบ หรือทาลงบนพื้นแข็ง โดยประสิทธิภาพของการลดเสียงจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นวัสดุที่ฉีดพ่น องค์ประกอบของวัสดุที่ฉีดพ่นและสภาพของชั้น หรือผนังที่อยู่ใต้ชั้นฉีดพ่น ซึ่งวัสดุดังกล่าวประเภทนี้จะให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงความถี่สูง
- วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นกันหรือบัง (Blankets) ได้แก่ วัสดุที่ประกอบขึ้นเป็นแผง ฉาบ ฉนวน โดยทำจาก เส้นใย เช่น โยหิน (Rock wool) โยแก้ว เยื่อไม้ ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงจะขึ้นกับความหนาของชั้นวัสดุซับ ซึ่งโดยปกติจะมีความหนาประมาณ 25-125 มิลลิเมตร
- วัสดุที่มีลักษณะเป็นผ้า หรือพรม ได้แก่ วัสดุที่ใช้ ปูพื้น ทำม่าน หรือกระดาด ติดผนัง โดยประสิทธิภาพของวัสดุประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของเส้นใย โดย เส้นใยที่มีลักษณะตรงยาว (Cut piles) และมักจะให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนสูงกว่าเส้นใยที่มีลักษณะเป็นวง (Loop piles) แต่ประสิทธิภาพดังกล่าวจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตเส้นใย [Doelle and Arch, 1972]

จะเห็นได้ว่าข้อแตกต่างของวัสดุดูดกลืนเสียงแต่ละประเภทคือ วัสดุดูดกลืนเสียงแต่ละประเภทจะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงที่ความถี่แตกต่างกัน ซึ่งจากรูปที่ 2.9 ได้แสดงให้เห็นถึงกลไกในการดูดกลืนเสียงตามช่วงของความถี่ของวัสดุดูดกลืนเสียงในแต่ละประเภท

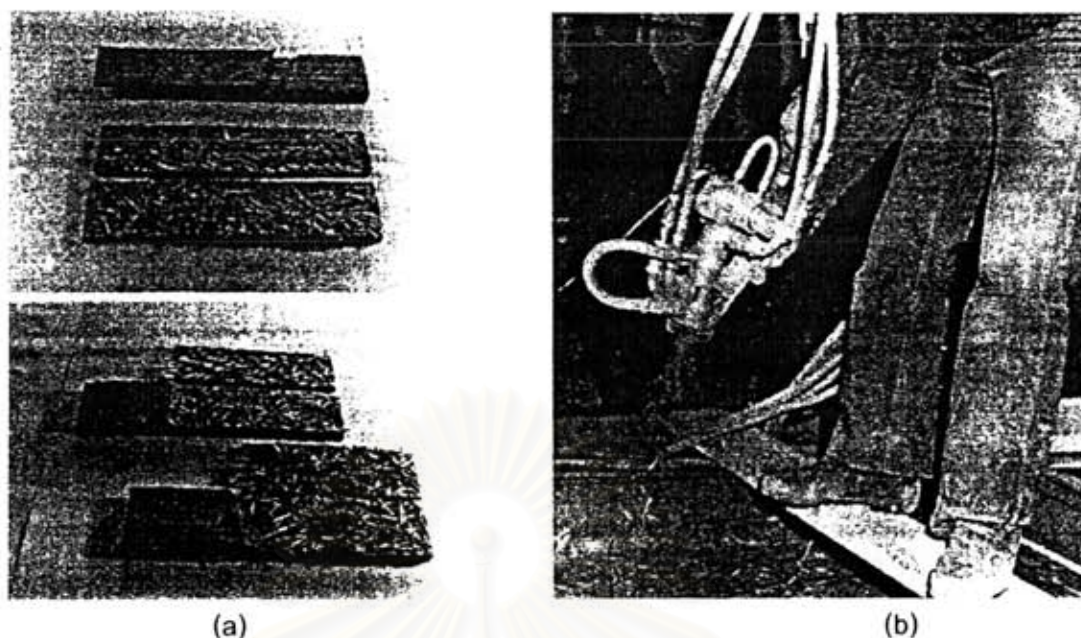
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 การดูดกลืนเสียงของวัสดุที่มีกลไกในการดูดกลืนเสียงแบบต่างๆตามช่วงของความถี่ [Sound Research Laboratories Ltd., 1991]

วัสดุประเภทเส้นใย (Fibrous) หรือวัสดุที่มีรูพรุน (Porous material) ชนิดต่างๆได้มีการนำมาใช้ในการดูดกลืนเสียง อาทิเช่น GRC หรือ Glass fiber Reinforced Concrete เป็นวัสดุที่นำใยแก้วมาผสมในซีเมนต์ มีส่วนประกอบคือ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ททรายและใยแก้วในอัตราส่วนประมาณ 4.5-5.5 % โดยน้ำหนักที่ความยาว fiber ประมาณ 34-38 มิลลิเมตรและอัตราส่วนระหว่าง ททราย ต่อ ซีเมนต์ (Sand/Cement ratio) และน้ำ ต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ 0.3 และ 0.28-0.38 ตามลำดับ โดยที่ความหนา 10 มิลลิเมตร และความสามารถในการรับแรงของคอนกรีต 20 กิโลกรัมต่อตารางเมตร สามารถลดเสียงได้ประมาณ 30 dB และเพิ่มถึง 35 dB ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (a) และ 2.10 (b)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 (a) ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในแผ่น [Graham True, 1986]  
 (b) การบรรจุเส้นใยแก้วลงใน ซีเมนต์โดยใช้ Putzmeister - Concentric Spraygun [Graham True, 1986]

โดยมีการนำวัสดุที่ใช้ใยแก้วผสมในซีเมนต์อย่างแพร่หลายในประเทศไทย อาทิเช่น โครงการพระราชดำริ ถนนระหว่าง ถนนวิภาวดีรังสิต – ถนนพหลโยธิน, โครงการส่วนเพิ่มเติมทางยกระดับ ดอนเมือง – โทลเวย์ และโครงการถนนยกระดับ รามคำแหง คิดเป็นพื้นที่ 8,225 ตารางเมตร โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งราคาวัสดุตุ้ดกสินเสียงที่นำเข้าจากต่างประเทศมีราคาประมาณ 8,000 บาทต่อตารางเมตร

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.11 ลักษณะของแผงกันเสียงประเภทตุคกลินเสียง  
และลักษณะการติดตั้งที่ใช้ในปัจจุบัน

อดิศักดิ์ นัยนาภรณ์ (2525) ทำการศึกษาหาวัสดุที่มีคุณสมบัติในการตุคกลินเสียง และมีค่าการสูญเสียพลังงานเสียงขณะส่งผ่านสูง สะดวกในการประยุกต์ติดตั้ง มีราคาถูก และ จัดหาง่าย เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุป้องกันเสียง อาทิเช่น การนำวัสดุที่ผลิตได้ง่ายในประเทศไทย เช่น แผ่นสังกะสี กระเบื้องแผ่นเรียบ วัสดุจำพวกไม้แผ่น โดยการตรวจสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติในการตุคกลินเสียงและค่าการสูญเสียพลังงานเสียงขณะส่งผ่าน ของวัสดุดังกล่าวในห้องทดลองและ

เปรียบเทียบราคาในการนำวัสดุชนิดต่างๆไปตัดแปลงให้เป็นแผงกันเสียง โดยมีการนำกระเบื้องแผ่นเรียบ ขนาดความหนา 6 และ 8 มิลลิเมตร แผ่นสังกะสีเบอร์ 26 และ 28 แผ่นเซลโลกรีดหนา 0.5 นิ้ว และวัสดุจำพวกไม้แผ่น เช่น ไม้ซัน ไม้เต็ง ไม้ตะเคียนหินและไม้ตะเคียนทอง มาทำการผลิตเป็นแผ่นตัวอย่าง ขนาด 225 ตารางเซนติเมตร โดยทำการทดลองในช่วงความถี่ 315-8000 Hz ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้าง ความคงทนถาวร และความเหมาะสมต่างๆ แล้วพบว่ากระเบื้องแผ่นเรียบหนา 6 และ 8 เซนติเมตร และแผ่นเซลโลกรีดหนา 0.5 นิ้ว มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำเป็นแผงกันเสียงสำหรับการจราจรบนทางด่วน หลังจากนั้นได้มีการทดลองฉาบวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผงกันเสียงด้วยพอลิโธคัสผสมทรายพบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันเสียงได้เพียงเล็กน้อย และจากการทดลองติดตั้งแผงกันเสียงในบริเวณทางด่วน บางบริเวณพบว่าแผงกันเสียงสามารถลดเสียงได้โดยเฉลี่ย 4 dB (A)

### 2.2.9 การส่งผ่านเสียง (Sound Transmission)

เมื่อคลื่นเสียงตกกระทบกับแผงกันเสียงที่ขวางทางเดินของเสียง แผงกันเสียงจะเกิดการสั่นตัว ซึ่งการสั่นตัวในลักษณะนี้เป็นสาเหตุให้อากาศที่อยู่ใกล้เคียงกับแผงกันเสียงทั้งสองด้านเกิดการสั่นตัวตามไปด้วย ส่งผลให้แผงกันเสียงที่คลื่นเสียงตกกระทบนั้น ประพฤติตัวเหมือนแหล่งกำเนิดเสียงอันใหม่ ซึ่งสนามเสียงใหม่อันเกิดจากวัตถุนี้ จะมีพลังงานน้อยกว่าพลังงานเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงในตอนแรก ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานของคลื่นเสียงที่ตกกระทบแผงกันเสียงนั้น จะถูกใช้ไปสำหรับทำให้วัสดุนั้นเกิดการสั่นตัว โดยเราสามารถบ่งบอกคุณสมบัติความสามารถในการกันเสียงของแผงกันเสียงด้วยค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่าน (Transmission Loss,  $TL$ ) ซึ่งการหา Transmission Loss ในห้องปฏิบัติการนั้น [Thumann and Miller, 1986] คือการหาค่าของพลังงานเสียงที่สูญเสียไปเนื่องจากการส่งพลังงานเสียงผ่านฉนวนกันเสียงไปยังห้องรับเสียง ซึ่งจะต้องอาศัยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $\tau$ ) ของพลังงานเสียงที่ส่งผ่านยกตัวอย่างเช่น

$$\tau = 0 \quad \text{ไม่มีเสียงส่งผ่าน}$$

$$\tau = 0.2 \quad \text{เสียงสามารถส่งผ่าน 20 \%}$$

$$\tau = 1 \quad \text{สรุปได้ว่าเสียงส่งผ่านทั้งหมด}$$

นอกจากนี้การหาค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านสามารถหาได้จากผลต่างของพลังงานเสียงทั้งหมดจากทั้งสองห้อง ดังสมการที่ 2.15 [ASTM E90, 1998]

$$TL = 10 \log \frac{W_1}{W_2}, \text{ dB} \quad (2.15)$$

โดย	$W_1$	คือ พลังงานเสียงทั้งหมดในห้องกำเนิดเสียงที่ใช้ส่งผ่านแผ่นกั้นทดสอบ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	$W_2$	คือ พลังงานเสียงที่ส่งทะลุผ่านแผ่นกั้นทดสอบไปยังห้องรับเสียง (วัตต์ต่อตารางเมตร)

ค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านขึ้นอยู่กับความถี่และคุณสมบัติการกั้นเสียง ในขณะที่ noise reduction ที่ได้จากการทดลองเป็นการลดลงของระดับความเข้มเสียงในหน่วยเดซิเบล (dB) ระหว่างห้องทั้งสองซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ของแผ่นกั้นเสียงและค่าการดูดกลืนเสียงของห้องรับเสียง

$$NR = 10 \log(I_1 / I_2) = L_1 - L_2, \text{ dB} \quad (2.16)$$

โดย	$NR$	คือ noise reduction
	$I_1$	คือ ความเข้มเสียงในห้องกำเนิดเสียง
	$I_2$	คือ ความเข้มเสียงในห้องรับเสียง
	$L_1$	คือ ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มเสียงของห้องกำเนิดเสียง
	$L_2$	คือ ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มเสียงของห้องรับเสียง

ในกรณีแผ่นกั้นเสียงมีคุณสมบัติในการดูดกลืนเสียง จะได้สมการที่ 2.17

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}, \text{ dB} \quad (2.17)$$

โดย	$L_1$	คือ ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มของเสียงในห้องกำเนิดเสียง
	$L_2$	คือ ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มเสียงในห้องรับเสียง
	$S$	คือ พื้นที่ของแผ่นกั้นทดสอบ (ตารางเมตร)
	$A$	คือ ค่าการดูดกลืนเสียงในห้องรับเสียง



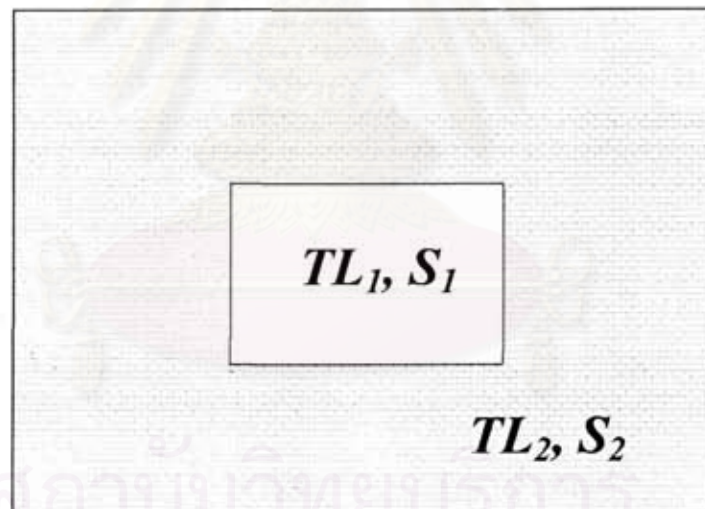
โดยค่า  $A$  จะมีความสัมพันธ์ กับค่าเวลากังวาน (Reverberation time) ดังนี้

ค่า Reverberation time ของ SABINE สามารถหาได้จากสมการที่ 2.18

$$T = 13.8r = 55.2V / A_c \text{ วินาที} \quad (2.18)$$

โดย	$r$	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของพลังงานเสียง
	$A_c$	คือ ค่าดูดกลืนเสียงเฉลี่ยของ SABINE
	$V$	คือ ปริมาตรของห้องรับเสียง (ลูกบาศก์เมตร)
	$T$	คือ ค่าเวลากังวานของห้องรับเสียง (วินาที)

แต่ในกรณีที่น่าสนใจคือการวัดค่า Transmission Loss ของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบซึ่งประกอบด้วยวัสดุสองชนิดอยู่ในตัวอย่างทดสอบเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างทดสอบหาค่า Transmission Loss ซึ่งเป็นวัสดุที่แตกต่างกันสองชนิด

สามารถที่จะทำการคำนวณเพื่อที่จะหาค่า Transmission Loss ของวัสดุแต่ละชนิดได้โดยมีวิธีทำการคำนวณดังต่อไปนี้

- ทำการหาค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านของตัวอย่างทดสอบทั้งตัวสองตัวอย่างเพื่อให้ได้ค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านซึ่งเป็นค่าผลรวมจากค่า

การสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งสมการที่ใช้หา ค่า Transmission Loss รวม ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (2.19)$$

โดย	$L_1$	คือ ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มของเสียงในห้องกำเนิดเสียง
	$L_2$	คือ ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มเสียงในห้องรับเสียง
	$S$	คือ พื้นที่ของแผ่นกั้นทดสอบ (ตารางเมตร)
	$A$	คือ ค่าการดูดกลืนเสียงในห้องรับเสียง

- เมื่อรู้ค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านรวมแล้ว เราต้องทราบค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านของวัสดุตัวใดตัวหนึ่งจากสองตัวเพื่อจะทำการแก้สมการเพื่อหาค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านของอีกวัสดุหนึ่ง [Metha et al., 1999] ซึ่งมีรายละเอียดของสมการดังต่อไปนี้

$$TL = 10 \log \frac{\sum A}{A_1 10^{-0.17L_1} + A_2 10^{-0.17L_2} + \dots + A_n 10^{-0.17L_n}} \quad (2.20)$$

โดย	$\sum A$	คือ ผลรวมของค่าเวลากังวานของวัสดุแต่ละชนิด (วินาที)
	$S_1$	คือ พื้นที่ผิวของวัสดุชนิดที่ 1
	$S_2$	คือ พื้นที่ผิวของวัสดุชนิดที่ 2
	$TL_1$	คือ ค่า Transmission Loss ของวัสดุชนิดที่ 1
	$TL_2$	คือ ค่า Transmission Loss ของวัสดุชนิดที่ 2
	$TL_n$	คือ ค่า Transmission Loss ของวัสดุชนิดที่ n

- ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่า ถ้าเราทราบค่า Transmission Loss รวมของตัวอย่างทดสอบ และค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านของวัสดุในตัวอย่างทดสอบตัวใดตัวหนึ่ง เราก็จะสามารถหาค่าการสูญเสียพลังงานของเสียงขณะส่งผ่านของวัสดุอีกตัวได้

### บทที่ 3

## การพัฒนาคุณภาพของวัสดุจากวัสดุเหลือทิ้งจาก ภาคอุตสาหกรรม และภาคการเกษตร

### 3.1 การใช้ซีเมนต์แกลบในงานคอนกรีต

ข้าวเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญมาก ในปีหนึ่งมีการเก็บเกี่ยวข้าวได้ประมาณ 17 ล้านตัน ซึ่งจะมีเปลือกข้าวหรือแกลบประมาณ 4 ล้านตัน [กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2538-2539] แกลบมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ เซลลูโลส (Cellulose) ลิกนิน (Lignin) และ เพนโตซาน (Pentosan) ประมาณ 80% และสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic Component) ประมาณ 20% จึงไม่เหมาะกับการนำไปเป็นอาหารสัตว์ แกลบมีค่าความแข็งประมาณ 6.6 ตาม Mohr Scale ซึ่งให้พลังงานความร้อนจากการเผาประมาณ  $13 \times 10^6$  จูลต่อกิโลกรัม คิดเป็นประมาณครึ่งหนึ่งของถ่านหิน ทำให้มีความพยายามในการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นแกลบส่วนใหญ่จึงถูกใช้ในการเผาเพื่อนำเอาพลังงานไปใช้ เช่น การเผาในโรงสี และการเผาอิฐ และยังมีอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในหลายจังหวัด เช่น นครสวรรค์ ร้อยเอ็ดและอยุธยา อย่างไรก็ตาม แกลบมีน้ำหนักเบา ซึ่งหน่วยน้ำหนักมีค่าประมาณ 130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

#### 3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

แกลบเมื่อผ่านการเผาที่สมบูรณ์จะได้แกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงประมาณ 90% ดังแสดงในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ยังมี ออกไซด์ของโซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และปริมาณการสูญเสียเนื่องจากการเผา (Loss on ignition, LOI) ที่ค่อนข้างต่ำ (ไม่เกิน 5%) ซึ่งองค์ประกอบของ LOI ส่วนใหญ่จะเป็นคาร์บอน (Carbon) ที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งถ้ามีปริมาณสูงแสดงว่าแกลบผ่านการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีผลต่อการนำไปใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ ถ้า LOI มีปริมาณสูงจะทำให้ปริมาณซิลิกาตกลงส่งผลให้กำลังรับแรงลดลงได้



ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วแกลบ [ปริญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2529]

สารประกอบ	แก้วแกลบ	แก้วแกลบ เทาขาว	แก้วแกลบดำ โรงสี	ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์
SiO <sub>2</sub>	86.9-97.3	88.33	89.95	21.00
K <sub>2</sub> O	0.6-2.5	2.76	1.49	0.50
Na <sub>2</sub> O	0-1.5	0.15	0.07	0.10
CaO	0.2-1.5	0.52	0.50	65.00
MgO	0.12-1.96	0.28	0.23	1.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-0.6	3.37	1.89	4.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2-2.9	NA	NA	-
SO <sub>3</sub>	0.1-1.1	0.12	0.02	2.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NA	0.48	0.54	5.00
LOI	NA	3.71	4.70	1.00

### 3.1.2 การเผาและชนิดของแก้วแกลบ

แกลบเมื่อถูกความร้อนจะเริ่มสูญเสียความชื้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล เกิดการเผาไหม้และถ้ามีอากาศเพียงพอจะกลายเป็นแก้วสีขาว การเผาแกลบในที่ที่มีอากาศไม่เพียงพอ และที่อุณหภูมิต่ำจะได้แกลบที่มีสีดำและมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงซึ่งทำให้ต้อง บดแก้วแกลบที่มีสีดำให้ละเอียดอย่างมากจึงจะสามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้ [ปริญา จินดา ประเสริฐ, 2526] การเผาในที่ที่มีอากาศไม่เพียงพอหรือระยะเวลาในการเผาสั้น ถึงแม้มีอุณหภูมิสูงก็ตาม แก้วแกลบดำที่ได้ก็จะมี LOI สูง

แกลบที่ผ่านการเผาที่สมบูรณ์ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 700 องศาเซลเซียส จะทำให้มีค่า LOI ต่ำและมีซิลิกาสูง ซึ่งความสามารถในการทำปฏิกิริยาของแก้วแกลบจะขึ้นอยู่กับสถานะของ ซิลิกา ซึ่งมีอยู่ 2 สถานะ คือ ออสันฐาน (Amorphous) และผลึก (Crystalline) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ ระยะเวลาในการเผา โดยซิลิกาที่เป็นผลึกจะค่อนข้างอยู่ตัวและมีความเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา แต่ซิลิกา ออสันฐานซึ่งได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา การเผาที่ อุณหภูมิสูงจะทำให้ซิลิกาเปลี่ยนรูปไปเป็นผลึกควออร์ตซ์ (Quartz), คริสโตบาไลต์ (Christobalite) และ ทริดีไมต์ (Tridimite) [Ibrahim and Helmy, 1981]

แก้วแกลบได้มาจากการเผาซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเผาแกลบผสมดินเหนียวหรือ ปูนขาวที่เหลือจากอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือกระดาษในอัตราส่วนที่เท่ากัน การเผาให้ความร้อนกับหม้อ

ต้มไอน้ำ (Boiler) ในโรงสี การเผาแกลบอย่างต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรรมซีเมนต์ ถ้ำแกลบที่ได้มีคุณสมบัติต่างกันไปบ้าง สำหรับประเทศไทย ถ้ำแกลบที่ใช้ในงานคอนกรีตแบ่งออกเป็น ถ้ำแกลบเทาขาว และถ้ำแกลบดำ ถ้ำแกลบเทาขาวได้มาจากการเผาที่นานและมีอากาศเพียงพอ ถ้ำแกลบดำได้มาจากการเผาที่มีอากาศไม่พอหรือมีเวลาในการเผาต่ำ

ถ้ำแกลบดำได้จากการเผาให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ (Boiler) ในโรงสีและเรียกแกลบนี้ว่า แกลบดำโรงสี (Black Boiler Ash) คุณสมบัติของการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีไม่คงที่นักขึ้นอยู่กับวิธีการป้อนแกลบ ช่วงเวลาการเผา และขนาดของเตา คุณสมบัติจะอยู่ในช่วง 800 องศาเซลเซียส และอาจสูงถึง 1200 องศาเซลเซียสได้ ช่วงเวลาของการเผาไม่นานนัก และขนาดของเตาที่เล็กทำให้มีอากาศไม่เพียงพอ คุณสมบัติของแกลบที่ได้จากการเผาโดยวิธีนี้มีความแตกต่างกันได้มาก ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเผา ถ้ำเผาช่วงเวลาสั้นแกลบที่ได้จะผ่านการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมีค่า LOI สูง แต่ถ้ำแกลบที่ได้จากการเผาโดยวิธีนี้มีค่า LOI ต่ำก็สามารถนำมาบดและผสมกับปูนซีเมนต์เป็นปอชโซลานาสามารถนำมาผลิตเป็นคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงได้ดี ถ้ำแกลบดำยังได้มาจากการเผาแกลบเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไรเซด (Fluidized bed burning) แต่สีที่ได้จะออกดำเทา

ถ้ำแกลบเทาขาวส่วนใหญ่มาจากการเผาในที่โล่งหรือในเตาขนาดเล็ก คุณสมบัติในการเผาขึ้นอยู่กับขนาดของกองแกลบ ถ้าเป็นกองใหญ่มาก คุณสมบัติอาจสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเป็นกองเล็กคุณสมบัติจะสูงเพียง 550 องศาเซลเซียส ถ้ำเผาโดยกองติดดิน การเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์เนื่องจากอากาศไม่สามารถเข้าไปช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีได้ เมื่อเผาเสร็จแล้วการเก็บถ้ำแกลบก็ทำได้ยากและมักจะมีสิ่งเจือปน เช่น เศษดินและหินติดมาด้วย นอกจากนี้การเผาในที่โล่งจะทำให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายได้ การเผาในที่โล่งควรเผาโดยยกพื้นบนตะแกรงและเพื่อให้คุณสมบัติของการเผาไม่สูงเกินไปควรใช้แกลบเพียงครั้งละ 20 กิโลกรัม หรือหนึ่งกระสอบ ซึ่งจะให้คุณสมบัติสูงสุดได้ไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส ถ้ำแกลบที่ได้จะมีสีเทาขาวและสามารถใช้ทำสารปอชโซลานาได้ดี [สมนึก ประภากรณากร, 2526]

### 3.1.3 การบดและลักษณะของแกลบเผาบดละเอียด

แกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 700 องศาเซลเซียสจะยังคงรักษาความพรุนและโครงสร้างเซลล์ไว้ได้ รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของเซลล์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุนของแกลบเผา แกลบที่เผาแล้วนำไปบดให้มีความละเอียดใกล้เคียงกับขนาดของปูนซีเมนต์ (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ด้วยวิธีร้อนแบบแห้ง) ถือว่าเป็นความละเอียดที่นำไปใช้งานได้ การบดถ้ำแกลบนิยมใช้การบดแห้ง ซึ่งการบดแห้งหมายความว่า เป็นการบดโดยที่ไม่มีการใส่น้ำลงไประหว่างการบด ส่วนการบดเปียกหมายความว่า เป็นการบดโดยที่ระหว่างการบดจะมีการใส่น้ำลงไปด้วย ซึ่งข้อดีของการใส่น้ำระหว่างการบดคือ ทำให้ถ้ำ



แกลบลที่กำลังทำการบดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่เกาะตามผิวของเครื่องบดอีกทั้งแกลบลถูกบดอย่างทั่วถึง ซึ่งในทางตรงกันข้ามถ้าใช้วิธีการบดแบบแห้งจะทำให้แกลบลมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนตามผิวของเครื่องบดอีกทั้งไม่มีน้ำเป็นช่วยให้เนื้อของแกลบลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอระหว่างการบดซึ่งเป็นผลให้แกลบลถูกบดได้ทั่วถึงน้อยกว่าการบดแบบเปียก แต่ทั้งนี้การบดเปียกกระทำได้อย่างยากกว่ามากเพราะหลังจากการบดต้องนำไปอบให้แห้งซึ่งจะทำให้แกลบลที่ถูกบดแล้วเกาะกันเป็นก้อน จึงอาจจะต้องนำมาบดแห้งอีกครั้งซึ่งเป็นการกระทำที่ย่างยากและซ้ำซ้อน ซึ่งโดยทั่วไปการบดแห้งสามารถบดให้แกลบลมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน (ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 ด้วยวิธีร่อนแบบเปียก) และการบดเปียกสามารถบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 38 ไมครอน (ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 400 ด้วยวิธีร่อนแบบเปียก) แต่ทั้งนี้ยังต้องขึ้นกับระยะเวลาในการบดอีกด้วย ซึ่งรูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายของเซลล์ที่เป็นรูปพรุนของแกลบลบดละเอียดแบบแห้ง



รูปที่ 3.1 ผิวของแกลบล [ปริญา จินดาประเสริฐ, 2529]





รูปที่ 3.2 เซลล์ที่เป็นรูพรุนของถ้ำแกลบบดละเอียดแบบแห้ง [ปริญา จินดาประเสริฐ, 2529]

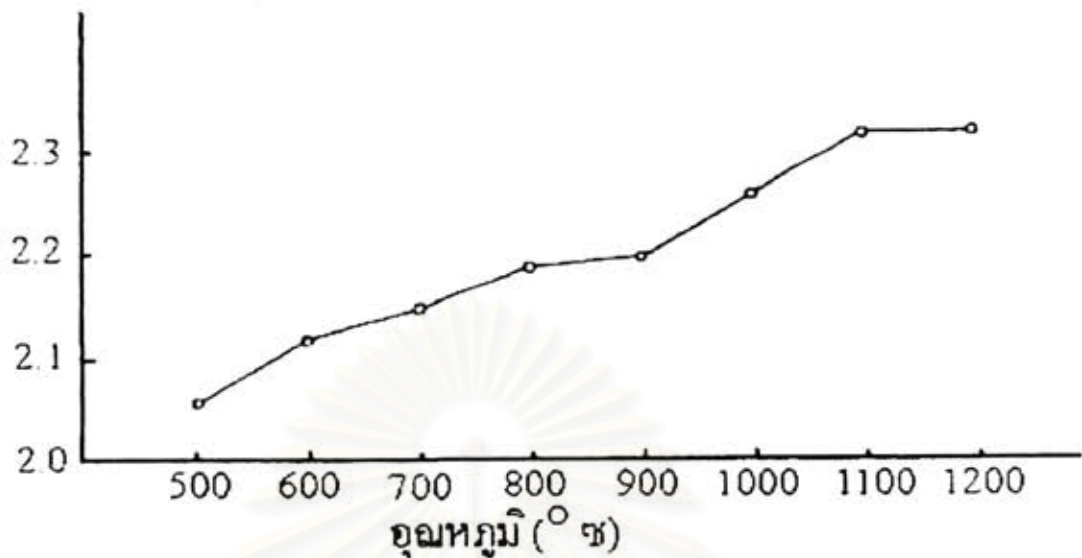
#### 3.1.4 คุณสมบัติของถ้ำแกลบ

##### (ก) ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของถ้ำแกลบขึ้นอยู่กับวิธีการเผา ถ้ำแกลบที่เผาไม่สมบูรณ์จะมีสิ่งที่ยังเผาไหม้ไม่หมดและคาร์บอนเหลืออยู่มากทำให้ถ้ำแกลบที่ได้จากการเผาที่ไม่สมบูรณ์ จะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ ถ้ำแกลบที่เผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์มีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.9-2.3 และยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาดังแสดงในรูปที่ 3.3 ถ้ำแกลบเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06 และจะเพิ่มขึ้นเป็น 2.2 และ 2.3 ที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะเนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนผสมอยู่น้อยลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ 3.3 ความถ่วงจำเพาะของถ้ำแกลบกับมุมหภูมิในการเผา

[Ibrahim and Helmy, 1981]

#### (ข) ความละเอียดและขนาด

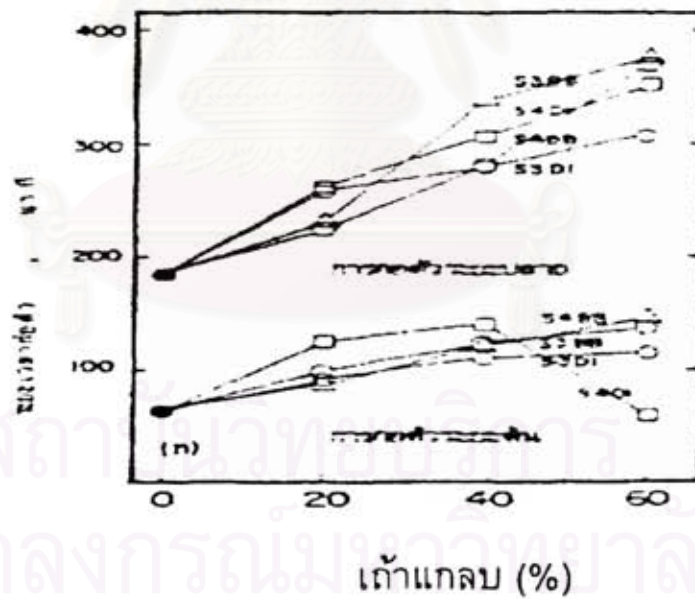
การวัดขนาดของอนุภาคถ้ำแกลบนิยมใช้พื้นที่ผิวและขนาดของอนุภาค ความละเอียดของถ้ำแกลบนอกจากวิธีและระยะเวลาในการบดแล้ว ก็ยังขึ้นอยู่กับเวลาและวิธีการเผาอีกด้วย ซึ่งการเผาถ้ำแกลบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะให้ถ้ำแกลบที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้พื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมาก จากการเป็นผลึกและการทำลายโครงสร้างเซลล์ที่มีรูพรุน ถ้ำแกลบเทาขาวซึ่งได้จากการเผา ณ อุณหภูมิที่พอเหมาะจะบดละเอียดกว่าถ้ำแกลบดำซึ่งได้จากโรงสี โดยใช้เวลาในการบด 1 ชั่วโมงเท่ากัน ถ้ำแกลบเทาขาวจะมีความละเอียด 14,300 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม [ปริญญา จินดา ประเสริฐ และ ชุมพล จันทรม, 2530]

ถ้ำแกลบส่วนใหญ่ที่ใช้กันมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์และถ้ำลอย ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5-20 ไมครอน แต่ทั้งนี้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคถ้ำแกลบที่ใหญ่ซึ่งมีขนาดประมาณ 25 ไมครอน และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคถ้ำแกลบที่เล็กมากซึ่งมีขนาดประมาณ 1 ไมครอนก็มีการใช้กันอยู่

### 3.1.5 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตสด

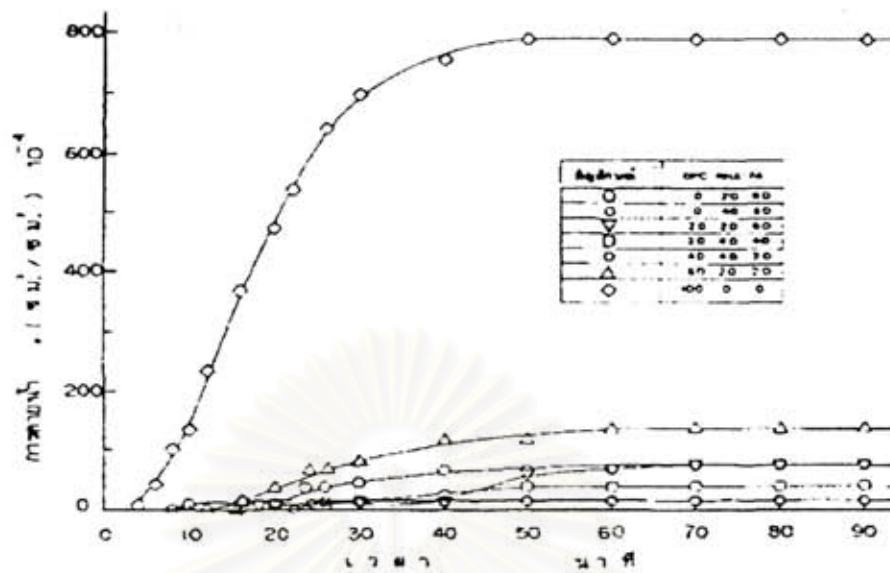
#### (ก) เวลาการก่อตัวและการเย็นน้ำ

เด้าแกลบทำให้การก่อตัวของเพสต์ช้าลง [Cook, 1979] เวลาการก่อตัวระยะต้นจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่เวลาการก่อตัวระยะปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้คอนกรีตเกิดการแข็งตัวช้าลงซึ่งทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สูงมาก ซึ่งเป็นผลดีต่องานคอนกรีตที่จะต้องเทคอนกรีตในปริมาณมากๆ โดยการวัดเวลาการก่อตัวของเพสต์นิยมใช้การวัดการจมของเข็มไวแคต (Vicat) และจากรูปที่ 3.5 จะแสดงการเย็นน้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเด้าแกลบและเด้าลอย จะเห็นได้ว่าเด้าแกลบทำให้การเย็นน้ำของมอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากเด้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งจากการเย็นน้ำคือการที่มีน้ำบางส่วนลอยตัวขึ้นมาที่ผิวหน้าของคอนกรีตทำให้บนผิวหน้าของคอนกรีตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดหรือต่ำสุด เมื่อคอนกรีตแข็งตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดการเป็นฝุ่นที่ผิว ซึ่งถ้าลดปัญหาการเย็นน้ำที่ผิวของคอนกรีตจะช่วยไม่เกิดการเป็นฝุ่นที่ผิวของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว



รูปที่ 3.4 เวลาการก่อตัวปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเด้าแกลบ [สมนึก ประภากรณานกร, 2526]





รูปที่ 3.5 การเติมน้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย  
[ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชุมพล จันทรสม, 2530]

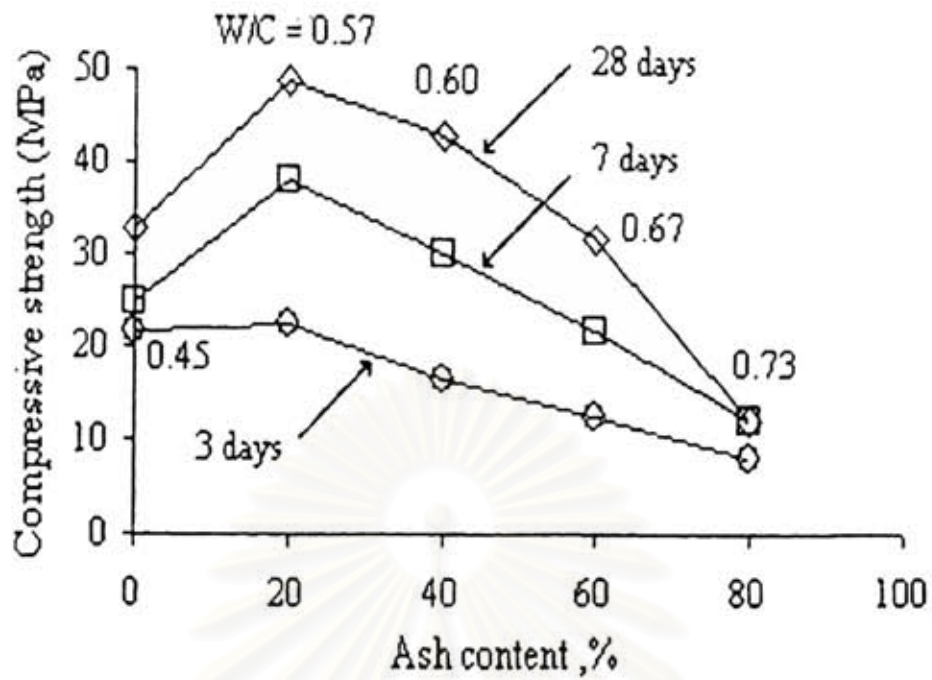
### 3.1.6 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

#### (ก) กำลังรับแรง

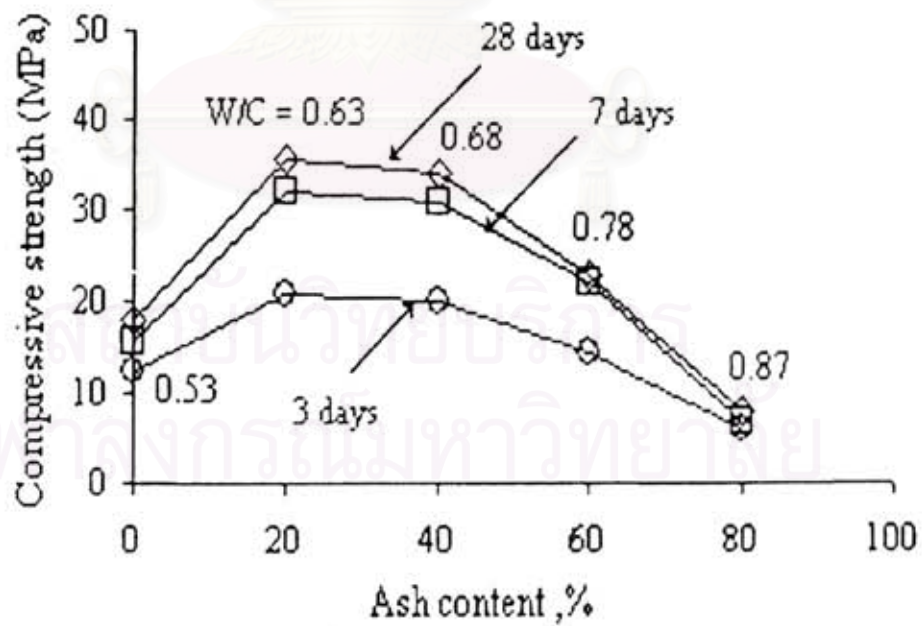
การพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับคุณภาพและปริมาณของเถ้าแกลบ เถ้าแกลบที่มีการเผาที่สมบูรณ์และบดละเอียดดีจะให้กำลังรับแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 ซึ่งแสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบเทาขาวและเถ้าแกลบดำ แต่ทั้งนี้ความต้องการน้ำของส่วนผสมที่มีเถ้าแกลบเทาขาวจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้กำลังรับแรงลดลงได้

นอกจากการผสมแทนที่ปูนซีเมนต์แล้ว ยังสามารถผสมเถ้าแกลบกับปูนขาว ซึ่งก็มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเช่นกัน แต่กำลังรับแรงจะต่ำเนื่องจากกำลังรับแรงของปูนขาวต่ำ และถ้าเถ้าแกลบผ่านการเผาที่ไม่สมบูรณ์ กำลังรับแรงจะลดลงตามปริมาณคาร์บอน

คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบในปริมาณไม่มาก คือ 20% จะให้กำลังค่อนข้างดีและปริมาณน้ำที่ต้องการเพิ่มขึ้นไม่มาก ส่วนผสมจะมีความสามารถในการเทได้ (Workability) ลดลงไม่มากนัก แต่ถ้าผสมปริมาณมาก 40-60% ส่วนผสมจะต้องการน้ำเพิ่มขึ้นมาก ในทางปฏิบัติจะใช้สารลดน้ำประเภท Super-Plasticizer



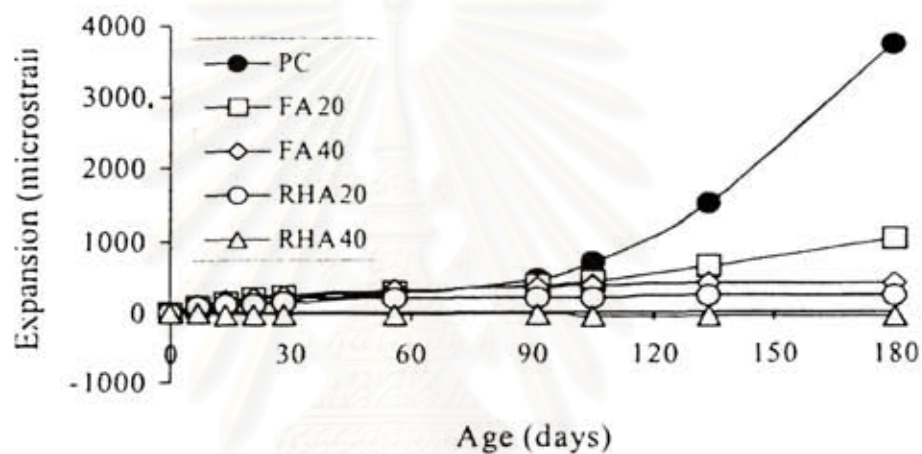
รูปที่ 3.6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ผสมเต้าแกลบเทาขาว  
[ปริญญา จินดาประเสริฐและ ชุมพล จันทรสม, 2530]



รูปที่ 3.7 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ผสมเต้าแกลบดำ  
[ปริญญา จินดาประเสริฐ และชุมพล จันทรสม, 2530]

### (ข) การต้านทานการทำลายของซัลเฟต

มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบมีความคงทนต่อสารละลายซัลเฟตได้ดีกว่ามอร์ตาร์ซึ่งไม่มีการผสมเถ้าแกลบหรือเถ้าลอยดังแสดงในรูปที่ 3.8 มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ 40% โดยน้ำหนักจะให้ค่าการขยายตัวต่ำที่สุด ในขณะที่มอร์ตาร์ธรรมดาจะมีค่าการขยายตัวสูงสุด ซึ่งจากผลในรูปที่ 3.8 เมื่อทำการศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) ในมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเถ้าแกลบจะเกิด  $\text{CaSO}_4$  และ Ettringite ในปริมาณมากรวมทั้งการทำลาย C-S-H เจล โดยการดึงแคลเซียม (Decalcification) ในขณะที่แท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบจะมี  $\text{CaSO}_4$  และ Ettringite น้อยกว่ามาก



รูปที่ 3.8 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้น 5% ที่อายุ 180 วัน  
[ปริญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2546]

### (ค) การทำลายโดยกรด

คอนกรีตและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ไม่ดีนัก เพราะมีความเป็นด่างสูงและสามารถถูกทำลายโดยกรดได้ง่าย การกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ และส่วนใหญ่จะทำให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ การลดการทำลายของกรดสามารถทำได้โดยการใช้สารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยสารปอซโซลานจะลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้



### (ง) การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์

การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ส่วนผลมมีความเป็นด่างสูง และจะสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งอ็อกซิจินของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มของ  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้เมื่อซึมผ่านผิวคอนกรีตเข้าไปจนถึงเหล็กเสริม การใช้แก้วเกลบสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้เมื่อทดสอบโดยวิธีการวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202

### (จ) การต้านทานด้านอื่น

การคาร์บอนเนชันเป็นการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วโดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงจาก pH 13 เหลือเพียง 8-9 และทำให้ฟิล์มซึ่งเคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลายได้เช่นกัน การเพิ่มแก้วเกลบจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทำให้การคาร์บอนเนชันเกิดได้มากขึ้น การเลือกส่วนผลมที่มีเนื้อแน่น (Dense) และการบ่มที่ดีจะทำให้การคาร์บอนเนชันเกิดในระดับที่ไม่อันตราย นอกจากนี้การคาร์บอนเนชันเกิดเฉพาะคอนกรีตที่แห้งพอประมาณและไม่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตที่เปียกชื้นตลอดเวลา นอกจากนี้คุณสมบัติหลายๆ ด้านของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังรับแรง ซึ่งการเลือกใช้แก้วเกลบที่มีคุณภาพดีและใช้ผลมในปริมาณที่พอเหมาะจะไม่ทำให้กำลังของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นคุณสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

### 3.1.7 สรุปคุณสมบัติของแก้วเกลบ

เกลบเป็นวัสดุเหลือทางการเกษตรที่มีในปริมาณมากในประเทศไทย การเผาเกลบที่มีอากาศพอเพียงจะได้แก้วเกลบเทาขาว แต่การเผาเกลบที่อากาศไม่พอเพียงหรือช่วงการเผาล้นจะได้แก้วเกลบดำ แก้วเกลบที่ผ่านการเผาที่สมบูรณ์มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงถึง 90% มีปริมาณสารที่ไม่ได้เผาไหม้และคาร์บอนต่ำ การเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 700 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ซิลิกาที่ไม่เป็นผลึกและว่างไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อนำไปบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นสารปอชโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ แต่เนื่องจากที่ผ่านมากการนำแก้วเกลบไปใช้งานคอนกรีตยังไม่แพร่หลาย ทั้งนี้เพราะสารปอชโซลานอื่น โดยเฉพาะแก้วลอยสามารถนำมาใช้ได้ง่ายกว่าโดยไม่ต้องบดและมีอยู่ในที่เดียวในปริมาณมากทำให้จัดการได้ง่าย ซึ่งทำให้การวิจัยด้านแก้วเกลบจะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วลอย ดังนั้นการใช้แก้วเกลบในงานคอนกรีตจึงยังคงต้องให้ความสนใจระมัดระวัง และจากผลการศึกษาจากข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วพบว่า การแทนที่ซีเมนต์ที่บดละเอียดอย่างน้อยมีความละเอียดเท่ากับความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปริมาณ 20% ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (Water/Binder ratio) ที่ อัตราส่วน 0.5 และ 0.6 จะได้กำลังและคุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีที่สุด

### 3.2. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้ จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน ถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้าเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้

#### 3.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence ประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณ ตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินที่มาของเถ้าลอย ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา ด้วยเหตุนี้จึงมีการแยกประเภทของเถ้าลอยดังมาตรฐาน ASTM C618 เป็น Class F และ Class C ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618

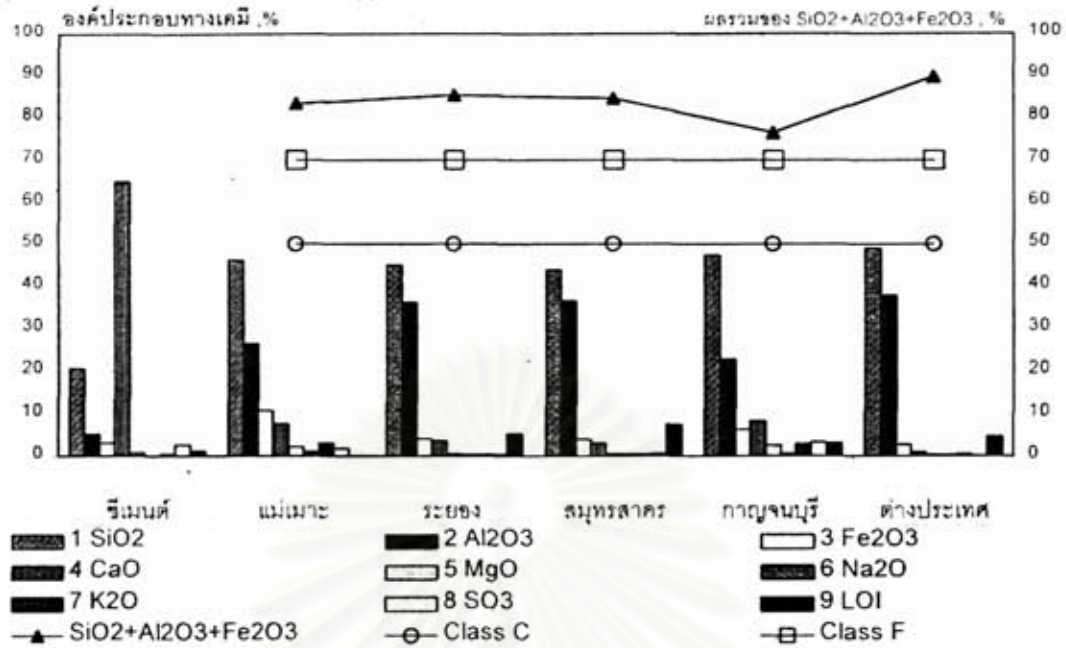
Chemical Composition	Class of fly ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), เปอร์เซ็นต์ต้องไม่น้อยกว่า	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์( $\text{SO}_3$ ), เปอร์เซ็นต์ต้องไม่มากกว่า	5	5
ปริมาณความชื้น, เปอร์เซ็นต์ต้องไม่มากกว่า	3	3
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI), เปอร์เซ็นต์ต้องไม่มากกว่า	6	6
อัลคาไลน์ ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), เปอร์เซ็นต์ต้องไม่มากกว่า	1.5	1.5

ส่วนองค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะตั้งแต่ พ.ศ. 2533-2541 ดังแสดงในตารางที่ 3.3 คุณสมบัติโดยทั่วไปผลรวมร้อยละของออกไซด์ของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่า 70% ปริมาณ CaO จะสูงมากกว่า 10 ปริมาณ LOI ต่ำมากคือน้อยกว่า 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือ ปริมาณ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จะสูงกว่าแหล่งอื่นดังแสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2534-2541  
[วารสารณ์ คุณากิจ, 2536]

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี , %								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	LOI
2534	42.8	23.3	14	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24	15	11.2	2.8	1	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.2	13.2	13	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18	8.5	13.3	1.4	0.9	2	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	13	13	2.5	1.2	3	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	12.3	10	1.2	0.6	3.3	2	0.8
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1





รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [ชัย และคณะ, 2542]

### 3.2.2 การเผาและชนิดของถ่านหิน

ถ่านหินสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่

1. แอนทราไซต์ (Anthracite)
2. บิทูมินัส (Bituminous)
3. ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous)
4. ลิกไนต์ (Lignite)

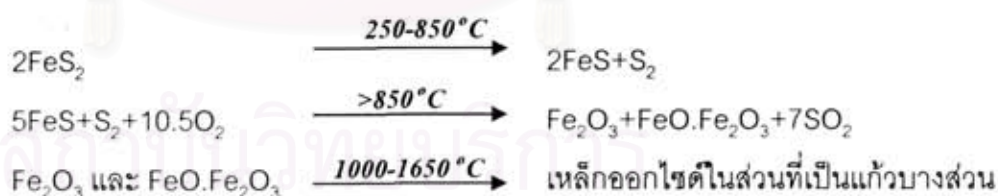
ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนสูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดแล้วยังมี พีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมใช้ในการเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

ในประเทศไทยมีแหล่งถ่านหินที่สำคัญอยู่หลายแหล่ง ได้แก่ ที่แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ และแม่ตึบ อำเภองาว จังหวัดลำปาง ที่บ้านปูและบ้านป่าคา อำเภอสี จังหวัดลำพูน และที่เหมืองกระบี่ บ้านปุด้า จังหวัดกระบี่ โดยเฉพาะที่แม่เมาะมีโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่และเป็นแหล่งผลิตถ่านลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย โดยผลิตได้ถึงประมาณ 3 ล้านตันต่อปี [มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545]

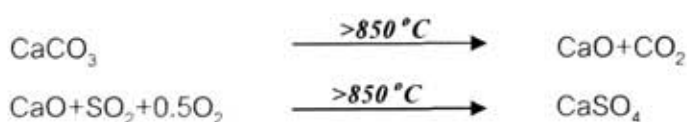
การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผา ความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ [Demir et al., 2001] ซึ่งอุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในการเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1100-1400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็น ถ่านลอย ส่วนที่เหลือจะเป็นถ่านหนักหรือถ่านก้นเตา ถ่านลอยที่ได้จากการเผานี้ประมาณร้อยละ 70-90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นถ่านลอยที่เหมาะสม สำหรับใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำ คอนกรีต ซึ่งโรงไฟฟ้าแม่เมาะใช้การเผาลักษณะนี้

ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz), เคาลินไนต์ (Kaolinite), อิลไลต์ (Illite), ไพไรต์ (Pyrite) และแคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite), มาเคไซต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

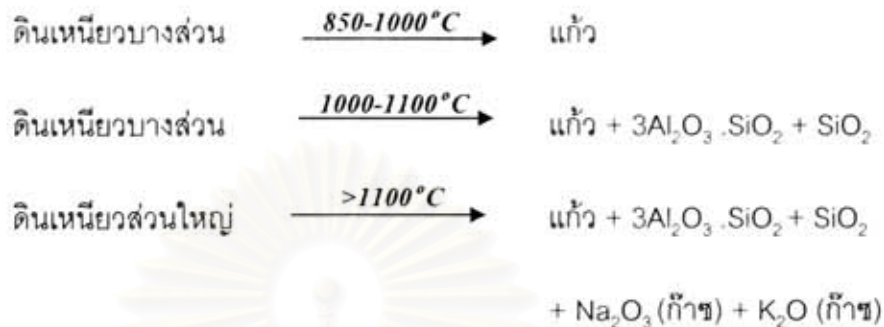
1. ไพไรต์และมาเคไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไตต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแมกเนไตต์ ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในรูปผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของถ่านหินดังสมการ



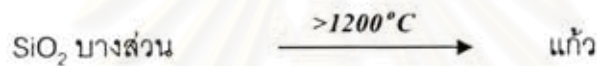
2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และแอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) ดังสมการ



ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็นแก้ว มุลไลต์ (Mullite,  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) และ ควออร์ทซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) ในรูปของผลึกของคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) ดังสมการ



4. ควออร์ทซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้ว ดังสมการ



จะเห็นได้ว่าแก้วด้านหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียสของระบบฟลูอิดไดซ์เบด อุณหภูมิจะไม่สูงพอ ด้านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึกซึ่งในการเผาระบบนี้แก้วด้านหินจะมีปริมาณซิลเฟอรัสสูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมด้านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซิลเฟอรัส แต่จะทำให้แก้วด้านหินมีปริมาณ  $\text{CaO}$  และ  $\text{CaSO}_3$  สูงได้

ในระบบความร้อนปานกลาง อุณหภูมิในการเผาประมาณ 1300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้แก้วด้านหินหลอมละลาย ดังนั้นแก้วด้านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมดและแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่ การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1500 องศาเซลเซียส ด้านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย แก้วด้านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูง และส่วนที่เป็นผลึกจะเหลือน้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ด้านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซ ซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในแก้วด้านหิน ทำให้แก้วด้านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิเป็นแก้วลอยกลวง (Cenosphere)



### 3.2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย [ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542]

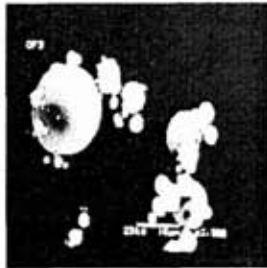
คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอยจะแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (Fly Ash Concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเผาไหม้เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C618-97 ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยมาตรฐาน ASTM C 618-97

ข้อกำหนดทางกายภาพ	class of fly ash	
	F	C
ความละเอียด: ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 35 หลังการร่อนแบบเปียก, Max %	34	34
หาค่าซีเมนต์: โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
7 วัน, Min % เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน, Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ, Max % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว: การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave, Max %	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		5
ความหนาแน่น, Max จากค่าเฉลี่ย%	5	5
ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325, Max จากค่าเฉลี่ย %	5	-
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง % LOI กับ % ของปริมาณที่ค้ำอยู่บนตะแกรงเบอร์ 325)	255	0.03
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ตาร์ที่ 28 วัน, Max% ที่แตกต่างกันจากตัวควบคุม	0.03	0.03

## (ก) รูปร่างแก้วลอย :

แก้วลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม ในบางครั้งอาจจะมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยมดังรูปที่ 3.10



แก้วลอยลักษณะกลม



แก้วลอยลักษณะที่มีรูพรุน



แก้วลอยที่มีลักษณะไม่แน่นอน

รูปที่ 3.10 ภาพขยาย Scanning Electron Microscope ของอนุภาคแก้วลอยที่มีลักษณะต่างกัน  
[ชัย และคณะ, 2542]

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนจะเผาและชนิดของถ่านหิน จากการศึกษาแก้วลอยจากแหล่งผลิตต่างๆ ประกอบด้วยแก้วลอยลิกไนต์จาก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางและจากแหล่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งจากจุดเด่นทางด้านรูปร่างของแก้วลอยที่มีทรงกลมหลังจากทดแทนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตแล้ว จะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีตทำให้เนื้อแน่นทึบ หรือในการเทคอนกรีตในที่แคบๆที่ต้องการให้ลื่นไหลได้ซึ่งคอนกรีตบางชนิดจำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุน อาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์



เถ้าลอยแม่เมาะ



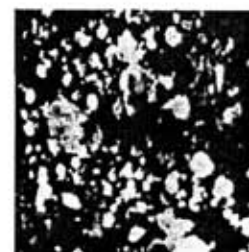
เถ้าลอยจากระยอง



เถ้าลอยจากสมุทรสาคร



เถ้าลอยจากกาญจนบุรี



เถ้าลอยจากต่างประเทศ

รูปที่ 3.11 ภาพขยาย Scanning Electron Microscope ของอนุภาคปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [ชัย และคณะ, 2542]

#### (ข) ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) โดยวิธีร่อนแบบเปียก (Wet Sieveing) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine Specific Surface Area Technique) ตามมาตรฐาน ASTM C204 หรือวิธี Particle-size Analysis หรือวิธี Burnauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ นั้นการบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าวไม่ค่อยสัมพันธ์กันนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.5



ตารางที่ 3.5 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์  
ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542]

Sample Type	Specific Gravity	Retained on Sieve 325 (%)	Air Permeability (cm <sup>2</sup> /g)	Mean Particle (mm)
ซีเมนต์	3.1	4.7	3120	13.0
แม่เมาะ	2.0	37.4	2370	28.5
ระยอง	2.1	32.9	3880	32.0
สมุทรสาคร	2.2	17.8	5380	18.3
กาญจนบุรี	2.5	45.9	7720	44.2
ต่างประเทศ	2.2	26.9	4880	27.0

การวัดความละเอียดของเถ้าลอยยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM C618 และนำไปใช้ตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34 เถ้าลอยโดยทั่วไปมีปริมาณค้างตะแกรง 45 ไมครอน อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30 เถ้าลอยแม่เมาะค่อนข้างหยาบและมีปริมาณค้างตะแกรงเบอร์ 325 สูงกว่าเถ้าลอยที่ใช้งานโดยทั่วไป

### 3.2.4 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตสด

#### (ก) เวลาการก่อตัวและการเย็มน้ำ

ระยะเวลาการก่อตัวจะแปรผันตามปริมาณที่แทนที่ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นโดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [C. Jaturapitakkul et al., 1999] แต่เวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก การวัดเวลาการก่อตัวนิยมใช้การวัดการจมของเข็มไวแคต (Vicat) ตามมาตรฐาน ASTM C191

คอนกรีตที่มีปริมาณของปูนซีเมนต์ต่ำหรือมีมวลรวมส่วนละเอียดต่ำจะมีการเย็มน้ำมาก การผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้ปริมาณอนุภาคส่วนละเอียดของส่วนผสมเพิ่มขึ้นและการเย็มน้ำลดลง [ปริญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร, 2529] นอกจากนี้ยังทำให้ส่วนผสมเกาะตัวกันได้ดีเป็นผลให้โอกาสในการเกิดการแยกตัว (Segregation) ของคอนกรีตน้อยลงด้วย

### (ข) ความสามารถในการเทได้

เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลมและช่วยให้มีปริมาณเพลสต์เพิ่มขึ้น ทำให้การเคลื่อนตัวของคอนกรีตดีขึ้น และลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคในเนื้อคอนกรีต จึงนิยมใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตปั๊ม (Pumped Concrete)

### 3.2.5 คุณสมบัติของซีเมนต์เพลสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

#### (ก) กำลังรับแรง

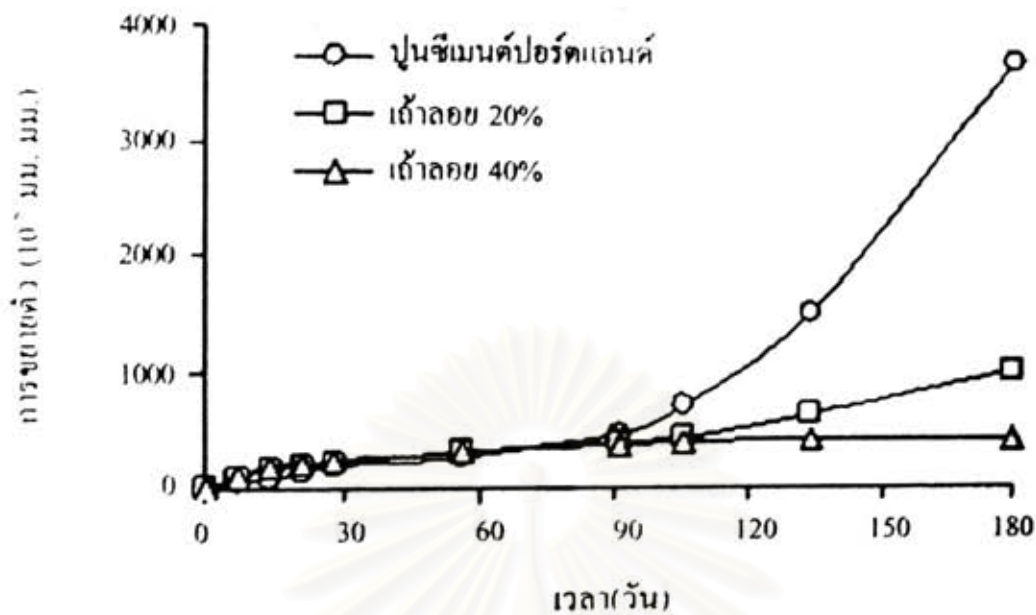
กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุต้นจะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.6 เนื่องจากปฏิกิริยาในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เมื่ออายุมากขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมากขึ้น และกำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่มากเกินไป กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะลดลงไม่มากนัก ซึ่งโดยปกติเวลาที่ใช้ในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพื่อให้มีกำลังรับแรงสูงสุดจะใช้ระยะเวลาประมาณ 1-6 เดือน

ตารางที่ 3.6 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ [Chindaprasirt et al., 2003]

ส่วนผสม OPC:FA	การยุบตัว (มิลลิเมตร)	กำลังอัด (MPa)		
		3วัน	7วัน	28 วัน
100:0	220	46.5	52.5	7
80:20	230	44	49	56.5
60:40	240	26.5	32.5	55
40:60	240	23	27.5	47.5

#### (ข) การต้านทานการทำลายของสารซัลเฟต

การลดการทำลายของซัลเฟตขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้แทนที่และความละเอียดของเถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งเถ้าลอยที่ละเอียดสามารถลดปริมาณน้ำและเถ้าลอยสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างทำให้เพลสต์แน่นขึ้น จึงทำให้สารซัลเฟตซึมเข้าได้ยากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.12 เถ้าลอยส่วนหยาบที่ไม่มีส่วนละเอียดทำให้เพลสต์มีความแข็งแรงลดลงและเกิดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์มากขึ้น



รูปที่ 3.12 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ร้อยละ 5  
[ปริญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2546]

#### (ค) การทำลายโดยกรด

น้ำหนักและกำลังรับแรงของมอร์ตาร์และคอนกรีตจะลดลงจากการทำลายของกรดซัลฟูริก การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ เถ้าลอยหยาบสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ได้ดีกว่าเถ้าลอยละเอียด เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหยาบทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลงเพราะเถ้าลอยหยาบมีความด่างจำเพาะต่ำกว่าเถ้าลอยละเอียดและปูนซีเมนต์และจากการที่เถ้าลอยหยาบสามารถยึดเกาะกับเพสต์ได้ดี [P.Chindaprasirt et al., 2004]

#### (ง) การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์

การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ส่วนผสมมีความเป็นด่างสูง และจะสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ อีออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้เมื่อซึมผ่านผิวคอนกรีตเข้าไปจนถึงเหล็กเสริม การใช้เถ้าลอยสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้เมื่อทดสอบโดยวิธีการวัดการไหลผ่านของกระแสไฟตามมาตรฐาน ASTM 1202



### (จ) การด้านทานด้านอื่น

เราจะพบว่า การเพิ่มเถ้าลอยจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทำให้การคาร์บอนเนชันเกิดได้มากขึ้น การบ่ม 7 วัน และ 28 วัน สามารถลดการคาร์บอนเนชันได้เกือบครึ่งเมื่อเทียบกับ การบ่มเพียงวันเดียว การเลือกส่วนผสมที่มีเนื้อแน่น จะทำให้การคาร์บอนเนชันเกิดในระดับที่ไม่เป็นอันตราย นอกจากนี้การคาร์บอนเนชันเกิดเฉพาะคอนกรีตที่แห้งพอประมาณและไม่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตที่เปียกชื้นตลอดเวลา สำหรับโครงสร้างประเภทนี้จึงไม่ต้องคำนึงถึงการคาร์บอนเนชัน

### 3.2.6 สรุปคุณสมบัติของเถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย ซึ่งเถ้าลอยมีคุณสมบัติความเป็นสารปอซโซลาน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสามารถทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลงเนื่องจากเถ้าลอยมีราคาต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ACI 226.3R แนะนำว่าควรใช้เถ้าลอยชนิด F ในปริมาณร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15-35 เมื่อใช้เถ้าลอยชนิด C การใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำและอาจเป็นปัญหาในการใช้งาน ซึ่งจากรายงานการวิจัยจะพบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปริมาณ ร้อยละ 20 ต่ออัตราส่วนวัสดุผงจะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังสูงที่สุด

## 3.3 การใช้น้ำทิ้งจากการฟอกเยื่อกระดาษแทนสารผสมเพิ่มในงานคอนกรีต

### 3.3.1 ประเภทของสารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มในคอนกรีต คือ วัสดุซึ่งเมื่อเติมลงในคอนกรีตแล้วจะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติใหม่ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมทั้งตอนที่ยังเป็นคอนกรีตเหลว และเมื่อแข็งตัวแล้ว สารที่ใส่เติมในคอนกรีตนี้จะไม่รวมถึงสารที่ใช้เติมในระหว่างการผลิตปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม ซึ่งใช้เติมเพื่อทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติพิเศษ [Rixon, M.R., 1978] อีกนัยหนึ่ง สารผสมเพิ่มในคอนกรีต คือ วัสดุที่นอกเหนือจากส่วนผสมของคอนกรีต คือ น้ำ มวลรวม และซีเมนต์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นตามวัตถุประสงค์ ก่อนการรับรองเพื่อการใช้งานนั้น จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบถึงคุณสมบัติที่ต้องการ และหาผลกระทบต่างๆที่อาจเกิดตามมาในส่วนที่เกี่ยวกับการใช้งานว่าด้วยกำลัง (Strength) และความสามารถเทได้ (Workability) เพื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่มีสารผสมเพิ่มกับคอนกรีตที่ไม่มีสารผสมเพิ่มหรืออาจจะเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่มีสารผสมเพิ่มชนิดเดียวกัน ซึ่งมาจากคนละแหล่ง สารผสมเพิ่มในคอนกรีตปัจจุบัน แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ได้ 8 กลุ่ม [Rixon, 1977] ดังต่อไปนี้

(ก) สารเร่งการก่อตัว (Accelerating Admixtures) คือ สารผสมเพิ่มที่เติมลงในคอนกรีตเพื่อเร่งการก่อตัวของซีเมนต์ และเพิ่มอัตรากำลังของคอนกรีตในระยะสั้นให้สูงขึ้น เนื่องจากสารผสมเพิ่มชนิดนี้มีผลต่อพฤติกรรมของการก่อตัวของซีเมนต์เฟส และทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาของคอนกรีต โดยทั่วไปสารผสมเพิ่มชนิดนี้ จะมีสารละลายของด่างสูง ทำให้ผลการหน่วงของยับยั้งในปฏิกิริยาเคมีของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ลดลง จึงช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำมีอัตราสูง จึงทำให้เวลาการก่อตัวของซีเมนต์เร็วขึ้น ดังนั้นสารผสมเพิ่มชนิดนี้จึงเหมาะกับคอนกรีตในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติประมาณ 15-20 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งการก่อสร้าง แต่ข้อสำคัญคอนกรีตจะต้องเทให้เรียบร้อยประมาณครึ่งชั่วโมงหลังจากผสมเสร็จ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้มีส่วนสำคัญ จากการทดลองพบว่า สารผสมเพิ่มชนิดนี้เหมาะกับปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาแบบที่ 1 และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แข็งตัวเร็วแบบที่ 3

สารผสมเพิ่มชนิดที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีสารเคมีหลักคือ แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride), แคลเซียมฟอร์มเมต (Calcium Formate), ไตรเอ็ดตาโนลามีน (Triethanolmine), ลิเทียมออกซาลेट (Lithium Oxalate), โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride), โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Chloride), โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) แต่ส่วนมากจะใช้ แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเคมีเพื่อเร่งปฏิกิริยา

ประโยชน์การใช้งานของสารผสมเพิ่มชนิดนี้คือ ช่วยให้การดำเนินงานในสภาพอากาศหนาวมีประสิทธิภาพดีขึ้น เพราะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังเหมาะสมกับงานเร่งด่วนหรืองานซ่อมแซมเพื่อให้สามารถถอดแบบได้เร็ว นอกจากนี้ยังเหมาะกับงานก่อสร้างในช่วงของน้ำทะเลขึ้นลงอีกด้วย แต่ข้อเสียของแคลเซียมคลอไรด์ ก็คือ ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมน้อยลง เนื่องจากคลอไรด์มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของเหล็กเสริม แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตและส่วนของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมด้วย นอกจากนี้ยังทำให้การหดตัวของคอนกรีตขณะแข็งตัวเพิ่มขึ้น อาจทำให้เกิดรอยร้าวได้ ในกรณีนี้ใช้อัตราของแคลเซียมคลอไรด์ 2% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์จะทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้นประมาณ 70% ที่อายุ 4 วัน และประมาณ 15% ที่อายุ 3 เดือน

(ข) สารหน่วงการก่อตัว (Retarding Admixtures) คือ สารผสมเพิ่มในคอนกรีตเพื่อทำให้การก่อตัวช้าลงเพราะสารผสมเพิ่มจะถูกดูดเข้าไปในสภาพเปียกของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ซึ่งทำให้เป็นเยื่อหุ้มรอบๆ อนุภาคของซีเมนต์ซึ่งจะป้องกันผิวไม่ให้เกิดปฏิกิริยาชั่วคราวหนึ่ง เยื่อหุ้มนี้จะถูกทำลายจากปฏิกิริยาของส่วนประกอบอื่นๆ ของซีเมนต์ จึงทำให้ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำดำเนินต่อไป นอกจากนี้ยังสันนิษฐานได้ว่า สารชนิดนี้มีปฏิกิริยากับพวกซิลิเกต (Silicates) จึงทำให้เกิดการหน่วงการก่อตัวและยืดเวลาไปได้หลายวัน



ส่วนประกอบทางเคมีของสารชนิดนี้คล้ายกับสารลดน้ำในคอนกรีต (Water Reducing Admixture) แล้วส่วนประกอบทางเคมีของสารหน่วงการก่อตัวได้มาจากเยื่อเซลลูโลส (Cellulose) แป้ง (Starch) หรือน้ำตาล (Sugar) โดยที่สารเคมีหลัก คือ ลิกโนซัลโฟเนท (Lignosulphonate) ที่มีน้ำตาลปนอยู่ด้วย เกลือของกรดไฮดรอกซีคาร์บอกซิลิก (Hydroxycarboxylic Acid Salt) และคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำตาล

โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะสูญเสียความสามารถเทได้ (Workability) ภายหลังจากผสมชั่วคราวระยะเวลาหนึ่งแล้วจะค่อยๆ แข็งตัว ทำให้การกระทุ้งและจี้เพื่อให้เนื้อคอนกรีตแน่นตัวทำได้ยาก ทั้งนี้สามารถปรับได้โดยปรับปรุงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ความสามารถในการเท และอุณหภูมิ ดังนั้น ในทางปฏิบัติ สารหน่วงการก่อตัวใช้เพื่อประโยชน์ในการยืดเวลาการทำงานออกไป และทำให้การทำงานในอุณหภูมิสูงมีคุณภาพดีขึ้นตลอดทั้งสามารถลดจำนวนรอยต่อจากการหยุดเทคอนกรีตที่ต้องใช้เวลาหลายชั่วโมง ข้อเสียของสารชนิดนี้ก็คือ เมื่อใช้ในอัตราที่สูงๆ อาจทำให้คอนกรีตไม่มีการก่อตัวเลย

(ค) สารกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Admixtures) คือสารผสมเพิ่มที่เติมลงในคอนกรีต เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ กระจายภายในเนื้อคอนกรีตโดยไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตซึ่งได้แก่ อัตราการก่อตัวและการแข็งตัว ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.05 ถึง 1.25 มิลลิเมตร ตามพฤติกรรมของสารนี้จะทำให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการถูกทำลายจากสภาพอากาศเย็นถึงจุดเยือกแข็งดีขึ้น เพราะหาปัญหาการถูกทำลายจากสภาพอากาศเย็นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำในเนื้อคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะขยายตัวก่อให้เกิดแรงดันซึ่งมีค่ามากกว่าความต้านทานแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ดังนั้น คอนกรีตที่ผสมสารกักกระจายฟองอากาศแล้วจะเกิดฟองอากาศเป็นจำนวนหลายล้านฟองแผ่กระจายสม่ำเสมอทั่วไปในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นที่เก็บน้ำจะช่วยรับแรงดันภายในเมื่อน้ำในคอนกรีตแข็งตัว เมื่อน้ำแข็งละลายเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ผลจากแรงดึงผิวจะทำให้ น้ำกลับคืนเข้าไปในเนื้อคอนกรีตตามเดิม ดังนั้นฟองอากาศจึงทำหน้าที่เป็นประตุน้ำสำหรับป้องกันการทำลายความเสียหายแก่คอนกรีต เนื่องจากฟองอากาศนี้เป็นช่องว่างที่ไม่ต่อเนื่องกันตลอดในคอนกรีต จึงไม่ทำให้คอนกรีตมีการไหลซึมของน้ำเพิ่มขึ้น แต่กำลังของคอนกรีตอาจลดลงบ้าง ซึ่งก็แก้ปัญหาโดยสามารถลดปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตได้อย่างมาก

ประโยชน์ของสารชนิดนี้ จะทำให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อสภาพอากาศเย็นถึงจุดเยือกแข็ง และต่อต้านเกลือที่ใช้ละลายหิมะ ดังนั้นจึงเหมาะกับงานคอนกรีตในบริเวณภูมิอากาศเย็นจัดถึงจุดเยือกแข็ง นอกจากนี้สารกระจายฟองอากาศยังทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการไหลลื่นได้ดี ตลอดทั้งยังทำให้การแยกตัวของวัสดุและการเยิ้มของน้ำในคอนกรีตลดลงได้อย่างมาก ส่วนข้อเสียของสารชนิดนี้อาจทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงบ้าง



(ง) สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing Admixtures) หรือสารเพิ่มความไหลื่น (Plasticizing Admixtures) เป็นสารผสมเพิ่ม เพื่อให้คอนกรีตสามารถไหลื่นได้ดีขึ้น ทำให้เทง่ายและทำงานสะดวก สารผสมเพิ่มชนิดนี้มีสารประกอบหลักพวกไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอกซิล (Carboxyl) เมทอกซี (Methoxy) และกลุ่มของกรดซัลโฟนิค (Sulphonic Acid Group) คอนกรีตที่เติมสารชนิดนี้จะสามารถลดปริมาณน้ำได้ประมาณ 5-15 % ทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมาก

(จ) สารลดปริมาณน้ำในอัตราสูง (High-range Water Reducing Admixture) หรือสารเติมเพื่อการไหลื่นสูง (Superplasticizing Admixture) เป็นสารผสมเพิ่มที่เติมลงในคอนกรีตด้วยอัตราที่สูงกว่าสารลดปริมาณน้ำธรรมดา โดยสามารถลดปริมาณน้ำได้ประมาณ 20 ถึง 33 % ซึ่งขึ้นกับชนิดของซีเมนต์ มวลรวมและอุณหภูมิ สารผสมเพิ่มชนิดนี้เป็นสารเติมเพื่อการไหลื่นชนิดใหม่ซึ่งประกอบขึ้นทางเคมีโดยมีสารเคมีหลักพวกฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)

คอนกรีตที่ผสมสารชนิดนี้จะทำให้กำลังเพิ่มสูงขึ้นในระยะเวลาดับ และยังทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางความทนทาน (Durability) และป้องกันการรั่วซึม (Water-proofing) ได้เป็นอย่างดี

ซึ่งทั้งสารลดปริมาณน้ำและสารลดปริมาณน้ำในอัตราสูงจะกล่าวถึงรายละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 3.3.2 และ 3.3.3

(ข) สารผสมกันซึม (Waterproofing Admixture) เป็นสารผสมเพิ่มที่เติมลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ป้องกันการรั่วซึมได้ โดยทั่วไปคอนกรีตจะมีความพรุนทำให้น้ำซึมผ่านได้ สารชนิดนี้จะช่วยอุดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำ หรือทำให้ผิวของคอนกรีตสามารถขับไล่น้ำหรือเปียกน้ำได้น้อยที่สุด ทั้งนี้ภายใต้แรงดันน้อยๆ หรือจากแรงตึงผิวเท่านั้น แต่ถ้ามีความดันสูงๆหรือ ใต้น้ำอาจทำให้สารชนิดนี้ประสิทธิภาพน้อยลงจึงควรใช้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและอัดให้แน่นอย่างทั่วถึง ดังนั้นประโยชน์ของสารชนิดนี้จึงเหมาะกับงานกำแพงคอนกรีตกันดิน หรืองานคอนกรีตห้องใต้ดินเพื่อป้องกันน้ำเนื่องจากแรงตึงผิว สารชนิดนี้ได้จากสารประกอบหลักพวกสบู่และพวกแคลเซียม ไฮเดียม หรือแอมโมเนียมที่ไม่ละลายน้ำ

(ค) สารเติมคอนกรีตปั๊ม (Pumping Aid Admixture) เป็นสารผสมเพิ่มที่ช่วยให้การปั๊มคอนกรีตทำงานได้ง่ายขึ้นและลดอัตราการอุดตันภายในท่อส่งคอนกรีตซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในระหว่าง 10 ถึง 20 เซนติเมตร คอนกรีตที่จะเทด้วยวิธีปั๊มควรจะมีส่วนผสมของปริมาณความละเอียดสูง แต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ ชนิดของมวลรวม โดยเฉพาะทรายจะต้องพิจารณาเป็นพิเศษถึงรูปร่างและขนาดโดยรวมทั้งปริมาณน้ำอีกด้วย นอกจากนี้คอนกรีตจะต้องมีความไหลื่นดีและทำงานง่าย โดยทั่วไปค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่เหมาะสมในการปั๊มไม่น้อยกว่า

7.5.ช.ม. คอนกรีตที่แห้งจะทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในท่อส่งมากเกินไป แต่คอนกรีตที่เหลวมากๆ จะทำให้การปั๊มคอนกรีตง่ายขึ้น ทั้งนี้จำเป็นต้องไม่แยกตัวออกจากส่วนผสมของคอนกรีตเพราะจะทำให้เกิดการอุดตันภายในท่อส่ง การปั๊มคอนกรีตจะมีประโยชน์อย่างมากในงานก่อสร้างที่ต้องใช้ปริมาณคอนกรีตสูง ทำให้สามารถเทคอนกรีตได้จำนวนมากในเวลาอันสั้น ซึ่งการเทคอนกรีตด้วยการปั๊มคอนกรีตอาจจะสูงถึงอัตราประมาณ 40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สารชนิดนี้ส่วนมากที่ใช้เป็นสารไม่กระจายฟองอากาศ เช่น สารลดปริมาณน้ำธรรมชาติ หรือสารเพิ่มการไหลลื่นพิเศษ

(ง) **สารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ (Miscellaneous)** คือสารผสมเพิ่มพิเศษในคอนกรีตชนิดต่างๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นยกตัวอย่าง เช่น สารสำหรับปูนฉาบ (Grouting) สารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitor) สารทำให้เกิดสีต่างๆ (Pigments) สารช่วยการยึดเกาะ (Bonding) เหล่านี้ เป็นต้น

### 3.3.2 คุณสมบัติของสารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing Admixture)

[Rixon, M.R., 1977]

สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing Admixture) หรือสารเติมเพื่อการไหลลื่น (Plasticizing Admixture) สารชนิดนี้ใช้เติมในคอนกรีตเพื่อให้เกิดการไหลลื่นดีขึ้นโดยปริมาณน้ำไม่เปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปปริมาณน้ำที่ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีสมบูรณ์มีจำนวนน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ต้องใช้เพื่อการเทคอนกรีตได้สะดวก ดังนั้นปริมาณน้ำที่เหลือนี้จึงไม่เป็นผลดีต่อคุณสมบัติคอนกรีต เช่น ทำให้เกิดการเยิ้มที่ผิวของคอนกรีต ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง บางครั้งน้ำปูนไหลออกจากข้างแบบทำให้เกิดการสูญเสียจำนวนซีเมนต์ไปด้วย การใช้สารลดปริมาณน้ำทำให้คอนกรีตสามารถเทได้โดยสามารถลดปริมาณน้ำลงยังผลให้มีคุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้นทั้งทางกลสมบัติ (Mechanical Properties) และการต้านทานการไหลซึมผ่านของน้ำ (Waterproofing)

ประโยชน์ของสารลดปริมาณน้ำที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป พอแจกแจงได้ดังนี้

- ทำให้คอนกรีตเทง่ายขึ้น โดยใช้ปริมาณน้ำคงเดิม ดังนั้นกำลังของคอนกรีตจึงไม่เปลี่ยนแปลงมาก
- ทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยการลดปริมาณน้ำลง และยังสามารถเทได้ง่ายเช่นเดิม
- ทำให้สามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้ เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์และความสามารถเทได้ยังคงเดิม ยังผลให้ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตลงได้



สารลดปริมาณน้ำดังกล่าวก่อนการใช้งานจะต้องทดสอบหาคุณสมบัติเสียก่อนเนื่องจากพฤติกรรม (Mode of Action) ของสารลดปริมาณน้ำมีการกระตุ้นที่ผิว (Surface Active Agent) ให้มีการกระจายมวลซีเมนต์ให้แยกจากกัน ให้มีความละเอียดสม่ำเสมอ

ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของซีเมนต์ที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำได้มากขึ้น ซึ่งกลไกการทำงานของสารเคมีผสมเพิ่มก็คือสารผสมเพิ่มจะถูกดูดไปที่ผิวของซีเมนต์เกิดเป็นเปลือกหุ้มมวลซีเมนต์ ทำให้ลดการเสียดทานระหว่างมวลเป็นเหตุให้มวลซีเมนต์แยกออกจากกัน จึงทำให้ลดแรงเสียดทานระหว่างมวลซีเมนต์ลง ถ้าพิจารณาในแง่ของแรงเฉือนจะเห็นว่าแรงเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับมวลรวมจะมีน้อยลง จึงต้องการพลังงานในการเทคอนกรีตน้อยลง ที่สำคัญคือทำให้พื้นที่ผิวของซีเมนต์ที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำมีมากขึ้นจึงเกิดแรงยึดเกาะระหว่างซีเมนต์กับมวลรวมมากขึ้น เป็นผลให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาว่าสารลดปริมาณน้ำมีคุณสมบัติในการกระจายมวลซีเมนต์ได้นั้น เมื่อมองในแง่ของประจุไฟฟ้าแล้วจะพบว่าในสารลดปริมาณน้ำนี้มีการกระตุ้นที่ผิวทำให้ประจุไฟฟ้าที่ผิวไม่สมดุลย์ (Unbalanced Charge) เมื่อเติมลงในน้ำก็จะหนีขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ โดยประจุลบอยู่ในน้ำ ส่วนหางของมันเป็นอยู่ในอากาศ ดังนั้นเมื่อเติมลงในซีเมนต์ ประจุลบจะถูกดูดไปอยู่ที่ผิวของมวลซีเมนต์ ทำให้เกิดประจุบวกรอบๆมวลซีเมนต์ยังผลให้มวลซีเมนต์ไม่รวมตัวกัน เนื่องจากมีประจุเหมือนกัน ในขณะที่เดียวกันความชื้นที่อยู่ในก้อนซีเมนต์ก็就会被ดูดออกมา ทำให้ก้อนซีเมนต์เกิดการแตกกระจายดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของมวลซีเมนต์ เนื่องจากการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดปริมาณน้ำ [ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2544]



นอกจากนี้เมื่อเติมสารลดปริมาณน้ำลงในคอนกรีตจะทำให้ฟองอากาศกระจายออกมาจากมวลซีเมนต์ เนื่องจากการกระตุ้นที่ผิว ทำให้ฟองอากาศเกิดประจุลบเช่นเดียวกับมวลซีเมนต์ ยังผลให้มวลซีเมนต์กับฟองอากาศไม่จับรวมตัวกันเนื่องจากมีประจุเหมือนกัน ดังนั้นสารลดปริมาณน้ำแบ่งออกได้ 3 ชนิด

(ก) ลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulphonate) เป็นสารเคมีซึ่งมีพื้นฐานมาจากอุตสาหกรรมการทำเยื่อไม้หรือเยื่อกระดาษ ซึ่งมีลิกนิน (Lignin) เมื่อผ่านขบวนการหมักหรือฟอกซึ่งมีปฏิริยากันในระบบซัลไฟต์เกิดเป็นลิกโนซัลโฟเนตขึ้น นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ แบ่งอยู่ด้วย เช่น เยื่อเซลลูโลส (Cellulose) น้ำตาลและเกลือซัลเฟต โดยปกติทั่วไปแล้วส่วนประกอบของเนื้อไม้จะมีลิกนินประมาณ 20% อยู่ด้วยสารชนิดนี้ส่วนมากที่พบก็มี แคลเซียมและโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต

(ข) ไฮดรอกซีคาร์โบซีริก แอซิด (Hydroxycarboxylic Acids) เป็น สารเคมีที่มีส่วนประกอบของสารเคมีอินทรีย์ ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และคาร์บอกซิล (Carboxyl) มักจะอยู่ในรูปเกลือของโซเดียมรวมอยู่ด้วย ซึ่งได้จากผลผลิตที่ใช้ทำเครื่องบริโภคและปรุงยา โดยกรรมวิธีทางเคมีและชีวเคมี โดยปกติจะมีสารละลายของเกลือประมาณ 30%

(ค) ไฮดรอกซีเลทโพลิเมอร์ (Hydroxylated Polymers) เป็นสารเคมีซึ่งได้จากการกรรมวิธีทางโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของสารจำพวกแป้งและข้าว สารเคมีชนิดนี้จะทำให้เกิดการหน่วงก่อดัวของซีเมนต์ แต่ก็แก้ไขโดยเติมสารแคลเซียมคลอไรด์ลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของสารให้มีคุณภาพดีขึ้นได้ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีต จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัตราการใช้ปกติ (Normal Dosage) จากการแนะนำของผู้ผลิตจะสามารถลดปริมาณน้ำได้ถึง 10% และทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นประมาณ 25% ที่อายุ 7 และ 28 วัน เมื่อคอนกรีตที่ออกแบบอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 และค่าการยุบตัว 76 มิลลิเมตร

อย่างไรก็ดีในการลดปริมาณน้ำก็ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง เช่น อัตราส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์ การยุบตัว อัตราการเติม คุณสมบัติซีเมนต์ อัตราส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์จะมีผลต่อประสิทธิภาพของสารลดปริมาณน้ำซึ่งพบว่าชนิดของสารไฮดรอกซีเลทโพลิเมอร์และไฮดรอกซีคาร์โบซีริก จะมีประสิทธิภาพมากกว่า สารลิกโนซัลโฟเนต เมื่อใช้กับปริมาณซีเมนต์สูงหรืออัตราส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์ต่ำ ในขณะที่สารลิกโนซัลโฟเนตจะใช้ได้ดีกับส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำ ในขณะที่สารลิกโนซัลโฟเนตจะใช้ได้ดีกับส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำหรืออัตราส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์สูง

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สารลดปริมาณน้ำจะใช้ได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ที่อัตราส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์อยู่ในช่วงระหว่าง 6.5 ถึง 7

คุณสมบัติของซีเมนต์ก็มีผลต่อสารลดปริมาณน้ำด้วยเหมือนกันโดยเฉพาะในกรณีของสารลดปริมาณน้ำที่พบว่ามีประสิทธิภาพการลดปริมาณน้ำจะลดลงเมื่อใช้ซีเมนต์ที่มีปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) หรือแอลคาไลต์สูง การวิจัยพบอีกว่าสารลดปริมาณน้ำจะใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตต่ำและโดยทั่วไปปริมาณน้ำจะลดลงได้ประมาณ 5-10% ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติทางเคมีของซีเมนต์ รวมทั้งส่วนผสมของคอนกรีต การลดน้ำในอัตรานี้จะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นถึง 10-20% อัตราการใช้สารลดปริมาณน้ำที่มีประสิทธิภาพมากอยู่ระหว่าง 0.1-0.2 % โดนน้ำหนักปูนซีเมนต์แต่ก่อนการใช้ ควรจะทำการทดสอบหาอัตราการใช้สูงสุดที่จะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเสียก่อน

### 3.3.3 คุณสมบัติของสารลดปริมาณน้ำในอัตราสูง (High Range Water Reducing Admixture) [Rixon, M.R., 1977]

สารลดปริมาณน้ำในอัตราสูง (High Range Water Reducing Admixture) หรือสารเติมเพื่อการไหลลื่นสูง (Superplasticizer Admixture) เป็นสารเคมีที่ใช้เติมเพื่อการลดปริมาณน้ำได้มากกว่าสารลดปริมาณน้ำธรรมดาถึง 10 เท่า โดยไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการชะลอการก่อตัวของซีเมนต์ และไม่มีฟองอากาศ สารลดปริมาณน้ำในอัตราสูง เป็นสารเคมีชนิดใหม่ เริ่มใช้ในประเทศอังกฤษครั้งแรกเมื่อปี 1972 ส่วนในประเทศไทยได้มีการพัฒนาเกี่ยวกับสารประเภทนี้ตั้งแต่ปี 1960 เป็นต้นมา ใช้เวลาอยู่นาน 5-8 ปี ซึ่งสารลดปริมาณน้ำในอัตราสูงมีการใช้อย่างกว้างขวางในยุโรป ญี่ปุ่น และอเมริกาเหนือ กับงานโครงสร้างทุกชนิดรวมทั้งอาคาร สะพาน โครงสร้างทางทะเล ตลอดจนทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น งานคอนกรีตอัดแรง งานคอนกรีตสำเร็จรูปต่างๆ สารเคมีเพื่อลดปริมาณน้ำในอัตราสูง แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

(ก) Sulphonated Naphthalene Formaldehyde Condensates เป็นสารเคมีที่ได้จากกรรมวิธีทางเคมี โดยใช้แนบทาลีน (Naphthalene,  $C_{10}H_8$ ) ผ่านขบวนการซัลโฟเนต (Sulphonation) ด้วยกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) จะได้สารประกอบของแนบทาลีนกับกรดซัลโฟนิก ( $SO_3H$ ) ต่อมานำสารที่ได้ทำปฏิกิริยากับฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde  $CH_2O$ ) ได้สารประกอบชนิดใหม่แล้วนำไปทำการแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ (Polymerization) แต่เนื่องจากสารประกอบชนิดใหม่นี้มีสภาพเป็นกรด ดังนั้นกลุ่มของกรดซัลโฟนิก จึงถูกทำลายความเป็นกรด (Neutralization) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) ได้สารประกอบทางเคมีของเกลือ Sulphonated Naphthalene Formaldehyde Condensates



(ข) Sulphonated Melamine Formaldehyde Condensates เป็นสารเคมีที่ได้จากกรรมวิธีเมลามาไมน์ (Melamine,  $C_3H_6N_6$ ) ทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ได้สารประกอบของไตรเมทริคอลเมลามาไมน์ (Trimethylol Melamine) แล้วนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับโซเดียมไบซัลไฟท์ (Sodium Bisulphite,  $NaHSO_3$ ) ได้สารประกอบชนิดใหม่ แล้วจึงนำไปทำการแปรสภาพโดยวิธีโพลีเมอร์ได้เป็นสารประกอบของเกลือ Sulphonated Melamine Formaldehyde Condensates

พฤติกรรม (Mode of Action) ของสารเคมีชนิดนี้มีคุณสมบัติให้เกิดการลอยตัวของมวลซีเมนต์ (Cement-Dispersion characteristic) คล้ายกับพฤติกรรมของสารลดปริมาณน้ำธรรมชาติ แต่ทว่ามีความสามารถในการกระจายมวลซีเมนต์ได้มากกว่าอย่างสม่ำเสมอว่า ประโยชน์ของสารลดปริมาณน้ำในอัตราสูง ก็เพื่อผลิตคอนกรีตไหล (Flowing Concrete) ที่มีค่ายุบตัวสูงถึง 200 มิลลิเมตร หรือมากกว่านี้ และเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูง (High strength concrete) ซึ่งทำให้ลดปริมาณน้ำได้ถึง 30% ในขณะที่ยังคงรักษาความสามารถในการเทเท่าเดิม นอกจากนี้ยังใช้เพื่อลดปริมาณซีเมนต์ซึ่งลดได้อย่างน้อยที่สุด 10-20% ในขณะที่ยังคงรักษาความสามารถในการเทและกำลังของคอนกรีตให้เท่าเดิมอยู่นอกจากนี้ยังทำให้ลดราคาในการบ่มคอนกรีตลงได้อีกด้วย

### 3.3.4 คุณสมบัติของน้ำทิ้งจากการฟอกเยื่อกระดาษแทนสารผสมเพิ่มในงานคอนกรีต [สุพรรณ ศิริวัชรินทร์, 2525]

จากการศึกษาขั้นต้นได้พบว่าสารลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulphonate) ได้จากขบวนการผลิตเยื่อกระดาษ จึงได้ทำการศึกษารายละเอียดทางเคมีของน้ำเสียจากขบวนการหมักเยื่อกระดาษของโรงงานกระดาษของบริษัทสยามคราฟท์ จำกัด อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี ซึ่งใช้ระบบที่ให้ Lignosulphonate ได้พอสมควร ซึ่งตามขบวนการผลิตกระดาษที่แสดงในรูปที่ 3.14 การฟอกเยื่อกระดาษเริ่มต้นจากการนำเอาซันอ้อย (Bagasse) ซึ่งได้จากโรงงานน้ำตาลมาเข้าเครื่องแยกไส้ (Pith) ซึ่งไม่มีเส้นใยออกไปโดยทั่วไปจะมีอยู่ประมาณ 30% ที่เหลือเป็นส่วนที่มีเส้นใย (Depithed Bagasse) จะถูกส่งเข้าเครื่องย่อย (Pandia Digester) เพื่อฟอกให้สะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 14% ใช้อัตราส่วนของซันอ้อยต่อสารละลายเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนักอุณหภูมิภายในเครื่องประมาณ 140-180 องศาเซลเซียส ใช้เวลานานประมาณ 14-18 นาที ลักษณะของซันอ้อยที่ออกจากเครื่องย่อย จะมีความเข้มข้น (Consistency) สูง จึงนำไปเข้าถังเป่าลม (Blow Tank) แล้วพ่นน้ำเข้าไป เมื่อเยื่อซันอ้อยออกจากถังเป่าลมจะต้องผ่านเครื่องล้าง (Washer) ซึ่งมีจำนวน 4 ขั้นตอนโดยใช้น้ำสะอาด (Mill water) ล้างผ่านที่ตะแกรงจนได้เยื่อซันอ้อยที่สะอาดเพื่อนำไปทำเยื่อกระดาษต่อไป ส่วนน้ำที่ใช้ล้างผ่านตะแกรงอันสุดท้าย เรียกว่า แบล็กลิคเกอร์ (Black Liquor) เป็นของเหลวสีน้ำตาลไหม้ มีปริมาณของแข็ง (Solid content) ประมาณ 12-14%



ในขบวนการผลิตของโรงงานพยายามที่จะแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกมาใช้ใหม่ จึงต้องผ่านขบวนการการระเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นถึง 35-40 % แล้วเข้าเครื่องเป่า (Cyclone) เพื่อเร่งการระเหยเพิ่มขึ้นให้ความเข้มข้นถึง 55-60% แล้วจึงเข้าเครื่องต้ม (Boiler) เกิดเป็นซี้เด้าโซดา ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ซึ่งซี้เด้านี้ เมื่อให้ทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะได้สารละลาย  $\text{NaOH}$  และ  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งสามารถที่จะนำสารละลาย  $\text{NaOH}$  กลับไปใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อกระดาษได้อีกครั้ง

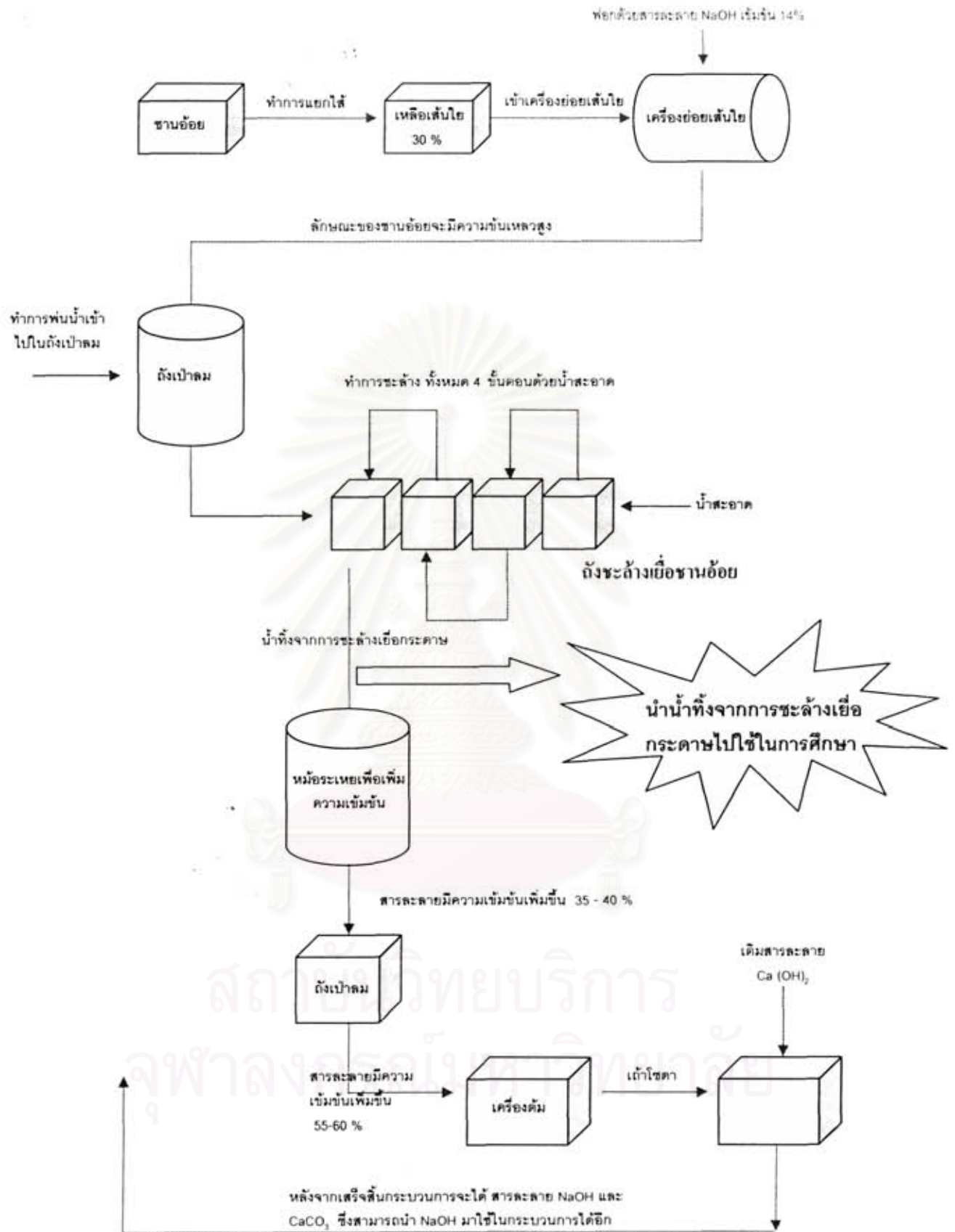
น้ำเสียที่ล้างเยื่อขานอ้อยที่เป็น แบล็กลิกเกอร์ นี้มีส่วนผสมของ Lignin ออกมาจากขานอ้อยและเนื่องจากผ่านขบวนการผลิตจึงเกิดสารประเภทโซเดียมลิกโนซัลไฟเฟนท (Sodium Lignosulphoante) ขึ้น ทั้งนี้เพราะว่า Lignin เข้าไปจับโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) ในกรรมวิธีผลิตเยื่อขานอ้อยตอนเริ่มแรกเมื่อใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปล้างขานอ้อยนั้น

ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของแบล็กลิกเกอร์ ซึ่งใช้เป็นสารผสมคอนกรีตในงานวิจัยนี้ กับสารผสมเพิ่มต่างๆไป จะพิจารณาในแง่ของส่วนประกอบทางเคมีของสารทั้งสอง โดยนำผลการวิเคราะห์ทางเคมีของแบล็กลิกเกอร์ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของแบล็กลิกเกอร์ ของกรมวิทยาศาสตร์ บริการ  
เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางเคมีของสารลดน้ำโดยทั่วไป

Type	Edmeades	Modified*
Solid Content ,%	30	30
Calorific Value, Cal/g	-	3308
Ash,%	-	20.88
Nitrogen,%	-	0.18
Sodium (as $\text{Na}_2\text{O}$ ),%	-	12.6
Calcium (as $\text{CaO}$ ),%	0.1	0.04
Sulpher , %	0.6	0.6
Silica (as $\text{SiO}_2$ ),%	-	1.02
Insoluble matter (in water), %	0.9	0.08

\* ทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของ Solid Content จาก 50% มาเป็น 30%



รูปที่ 3.14 แผนภาพกระบวนการการฟอกเยื่อกระดาษในโรงงานฟอกเยื่อกระดาษ

### 3.3.5 สรุปเกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำทิ้งจากการฟอกเยื่อกระดาษแทนสารผสมเพิ่มในงานคอนกรีต

เนื่องจากน้ำยาแบล็กลิคเคอร์ที่ทำการศึกษามาจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษโดยตรง จึงต้องศึกษาหาอัตราการใช้ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากการไหลของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C230-80 และจากกำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109-80 ซึ่งทำการทดสอบโดยการกำหนดให้ส่วนผสมที่เป็นซีเมนต์ หยาบและน้ำคงที่ แล้วค่อยๆ เพิ่มจำนวนน้ำยาแบล็กลิคเคอร์ จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้น้ำยาแบล็กลิคเคอร์ในปริมาณ 1-2 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จะเพิ่มการไหลเพียง 4 % แต่ถ้าใช้ปริมาณน้ำยาแบล็กลิคเคอร์ระหว่าง 2-6 % จะเพิ่มการไหลถึง 55 % แต่ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยาแบล็กลิคเคอร์เกิน 6 % จะทำอัตราการไหลลดน้อยลง คือประมาณ 5% และเมื่อพิจารณาถึงเรื่องกำลังอัดของมอร์ตาร์ จะพบว่าถ้าใช้ปริมาณน้ำยาแบล็กลิคเคอร์ในส่วนผสมมอร์ตาร์ ระหว่าง 1-6 % จะให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมน้ำยาแบล็กลิคเคอร์ แต่ถ้าใช้เกินกว่า 6 % จะให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมน้ำยาแบล็กลิคเคอร์ ซึ่งปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะพบว่าปฏิกิริยาของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะสมบูรณ์ได้เมื่อสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ประมาณ 0.25 ดังนั้นส่วนผสมของมอร์ตาร์จึงไม่ควรใช้สัดส่วนผสมต่ำกว่านี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้

การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตแผงกันเสียงถือว่ามีค่าสำคัญเพราะถือเป็นข้อมูลที่ช่วยในการเลือกชนิดของวัสดุและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการผลิตแผงกันเสียง อีกทั้งข้อมูลจากการทดสอบคุณสมบัติยังเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบขนาดของแผงกันเสียงอีกด้วย ซึ่งการทดสอบในการวิจัยนี้จะทดสอบทั้งคุณสมบัติด้านความแข็งแรง และความคงทนของวัสดุ ซึ่งจากการศึกษารายงานวิจัยของนักวิจัยหลายท่านที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของวัสดุที่เหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรมทำให้สามารถสรุปอัตราส่วนผสมที่เลือกใช้ในการทดสอบคุณสมบัติเพื่อหาชนิดและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบและผลิตแผงกันเสียง ซึ่งในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุจะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (Compressive Strength of Mortar), การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ (Tensile Strength of Mortar), การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ (Flexural Strength of Mortar), การทดสอบความคงทนต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด (Acid Attack), และการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ (Modulus of Elasticity of Mortar)

### 4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ในการเลือกวัสดุที่ใช้ในการหล่อแผงกันเสียงซึ่งในการวิจัยครั้งนี้คณะผู้วิจัยเลือกใช้มอร์ตาร์ (ซีเมนต์ผสมกับทราย) เป็นวัสดุพื้นฐานในการหล่อแผงกันเสียง สาเหตุที่เลือกใช้มอร์ตาร์ในการหล่อแผงกันเสียงนั้นเพราะมอร์ตาร์มีส่วนผสมของทรายซึ่งเป็นมวลรวมที่มีขนาดเล็กทำให้สามารถเทลงแบบหล่อที่มีขนาดเล็กหรือชิ้นส่วนผนังบางที่มีความบางมากได้ง่าย ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้วัสดุที่เหลือใช้จากภาคเกษตรหรืออุตสาหกรรมภายในประเทศ มาแทนที่ส่วนผสมของมอร์ตาร์บางส่วน ซึ่งวัสดุเหลือใช้มี 3 ชนิดได้แก่

- เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเศษเหลือที่เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อใช้เป็นพลังงานในการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีความละเอียดสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ด้วยวิธีการร่อนเปียก (การร่อนผ่านตะแกรงโดยผสมน้ำขณะทำการร่อน) ได้ทั้งหมด และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยซึ่งทางผู้วิจัยจะนำมาใช้ผสมในมอร์ตาร์พบว่าเป็นเถ้าลอยประเภท F (ซึ่งมีผลรวมของสารประกอบของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ประมาณ ร้อยละ 70) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

- เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เป็นเศษเหลือจากการเผาแกลบซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐจากโรงเผาอิฐในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยนำเถ้าแกลบ (เฉพาะที่มีสีเทาขาว) ที่ได้จากโรงอิฐมาบดละเอียดจนมีความละเอียดสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ด้วยวิธีการร่อนเปียกได้ทั้งหมดและจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำมาใช้ผสมในมอร์ตาร์จะมียังองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงใน ตารางที่ 4.1

#### ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและเถ้าลอยโดยวิธี

X-Ray Fluorescence (ซึ่งทำการวิเคราะห์โดย Research and Development Office, Egat Public Company Limited เมื่อวันที่ 17 มกราคม 2549)

Sample name	Chemical Composition (%)										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
Rice Husk Ash	87.74	0.79	3.03	1.84	0.09	0.40	0.34	2.66	0.00	0.84	2.27
Fly Ash	33.03	18.56	17.74	20.17	0.45	2.46	1.56	2.76	0.23	2.69	0.34

- น้ำทิ้งจากขบวนการผลิตเยื่อกระดาษในโรงงานผลิตกระดาษ (Black Liquor) ของบริษัทสยามคราฟท์ จำกัด อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 3.14 และมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.7

ซึ่งจากการศึกษาในผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการหล่อแม่พิมพ์แล้ว จึงนำมาทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีความแข็งแรงและความทนทาน

#### 4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาดต่างๆ ตามจุดประสงค์ในการทดสอบ จำนวน 8 ส่วนผสม เพื่อนำมาทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทั้งทางด้านความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุเพื่อนำมาเปรียบเทียบหาวัสดุและส่วนผสมที่ดีที่สุดสำหรับการหล่อแม่พิมพ์จริงซึ่งส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ตาร์มีดังนี้คือ



- มอร์ตาร์ปกติใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water/cement ratio, w/c) เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก **(ใช้สัญลักษณ์ OPC, w/c 0.5)**
- มอร์ตาร์ปกติใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water/cement ratio, w/c) เท่ากับ 0.6 โดยน้ำหนัก **(ใช้สัญลักษณ์ OPC, w/c 0.6)**
- มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ด้วยเถ้าลอยเป็นปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนของวัสดุประสาน (ปริมาณปูนซีเมนต์ + ปริมาณเถ้าลอย) ต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (water/binder ratio, w/b) 0.5 โดยน้ำหนัก **(ใช้สัญลักษณ์ FA 20%, w/b 0.5)**
- มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ด้วยเถ้าลอยเป็นปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนของวัสดุประสาน (ปริมาณปูนซีเมนต์ + ปริมาณเถ้าลอย) ต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (water/binder ratio, w/b) 0.6 โดยน้ำหนัก **(ใช้สัญลักษณ์ FA 20%, w/b 0.6)**
- มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบโดยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ด้วยเถ้าแกลบเป็นปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนของวัสดุประสาน (ปริมาณปูนซีเมนต์ + ปริมาณเถ้าแกลบ) ต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (water/binder ratio, w/b) 0.5 โดยน้ำหนัก **(ใช้สัญลักษณ์ RHA 20%, w/b 0.5)**
- มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบโดยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ด้วยเถ้าแกลบเป็นปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนของวัสดุประสาน (ปริมาณปูนซีเมนต์ + ปริมาณเถ้าแกลบ) ต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (water/binder ratio, w/b) 0.6 โดยน้ำหนัก **(ใช้สัญลักษณ์ RHA 20%, w/b 0.6)**
- มอร์ตาร์ผสมน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกเยื่อกระดาษโดยลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมลง โดยไม่มีการแทนที่ด้วยสารปอซโซลาน ซึ่งลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง 20% เติมน้ำยา Black Liquor เป็นปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (water/cement ratio, w/c) เท่ากับ 0.35 โดยน้ำหนัก **(ใช้สัญลักษณ์ BL 20%, w/c 0.35)**
- มอร์ตาร์ผสมน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกเยื่อกระดาษโดยลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมลง โดยไม่มีการแทนที่ด้วยสารปอซโซลาน ซึ่งลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง 25% เติมน้ำยา Black Liquor เป็นปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วน



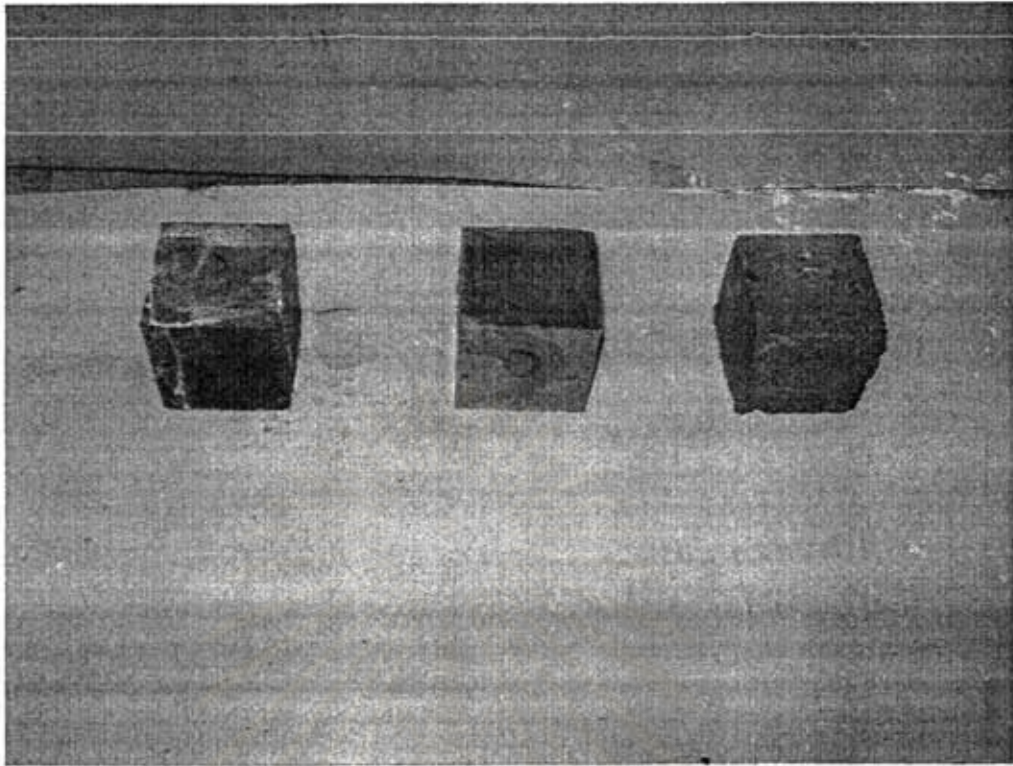
ระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water/cement ratio, w/c) เท่ากับ 0.35 โดยน้ำหนัก (ใช้สัญลักษณ์ BL 25%, w/c 0.35)

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

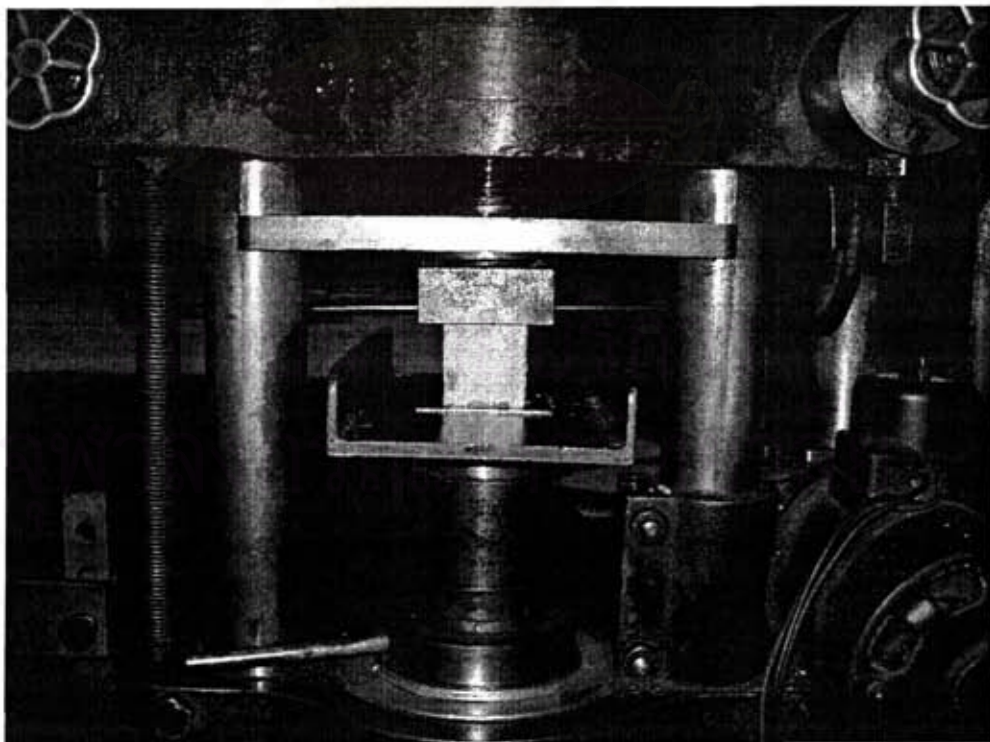
ชนิดวัสดุ	น้ำหนักของส่วนผสม (สำหรับ 1 ม <sup>3</sup> )							
	อัตราส่วน น้ำต่อ ซีเมนต์ (w/c)	อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุ ประสาน (w/b)	ปูนซีเมนต์ (กิโลกรัม)	เถ้าลอย (กิโลกรัม)	เถ้ากลบ (กิโลกรัม)	น้ำยา Black Liquor 5% (กิโลกรัม)	ทราย (กิโลกรัม)	น้ำ (กิโลกรัม)
OPC , w/c 0.5	0.5	-	565	-	-	-	1553	282
OPC , w/c 0.6	0.6	-	552	-	-	-	1517	331
FA 20% , w/b 0.5	-	0.5	452	113	-	-	1553	282
FA 20% , w/b 0.6	-	0.6	441	110	-	-	1517	331
RHA 20% , w/b 0.5	-	0.5	452	-	113	-	1553	282
RHA 20% , w/b 0.6	-	0.6	441	-	110	-	1517	331
BL 20% , w/c 0.35	0.35	-	496	-	-	25	1705	174
BL 25% , w/c 0.35	0.35	-	474	-	-	24	1737	166

#### 4.3 วิธีการทดสอบ

- การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทำโดยการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์โดยใช้แบบหล่อรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีอัตราส่วนผสมซึ่งจำแนกชนิดและอัตราส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.2 ถอดแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งทำการทดสอบที่อายุ 3, 7, 28, 56 วัน ตามลำดับ

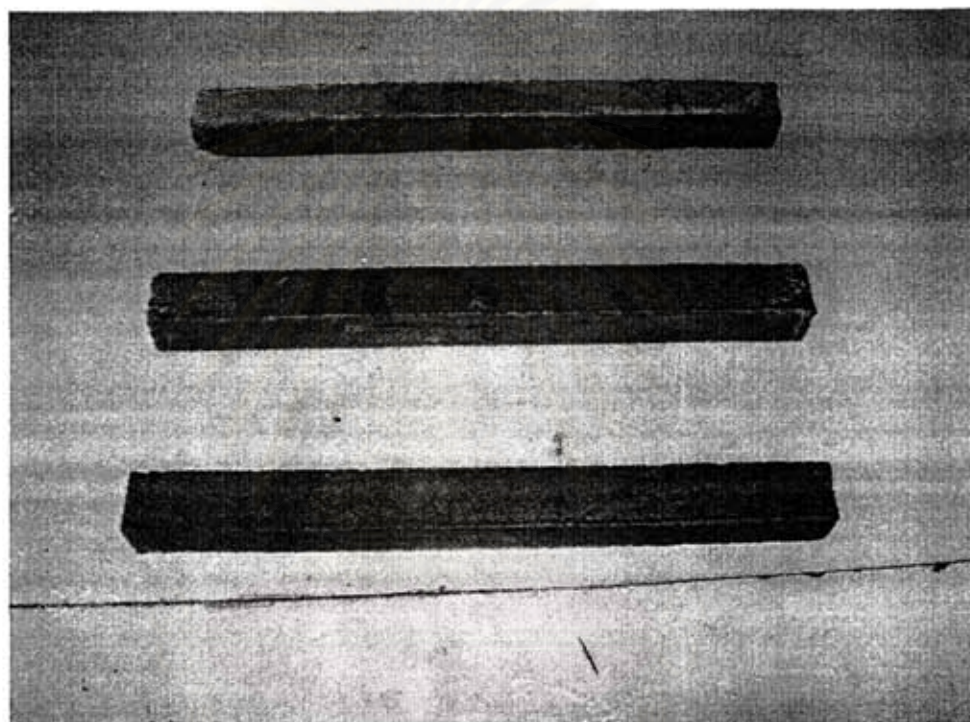


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

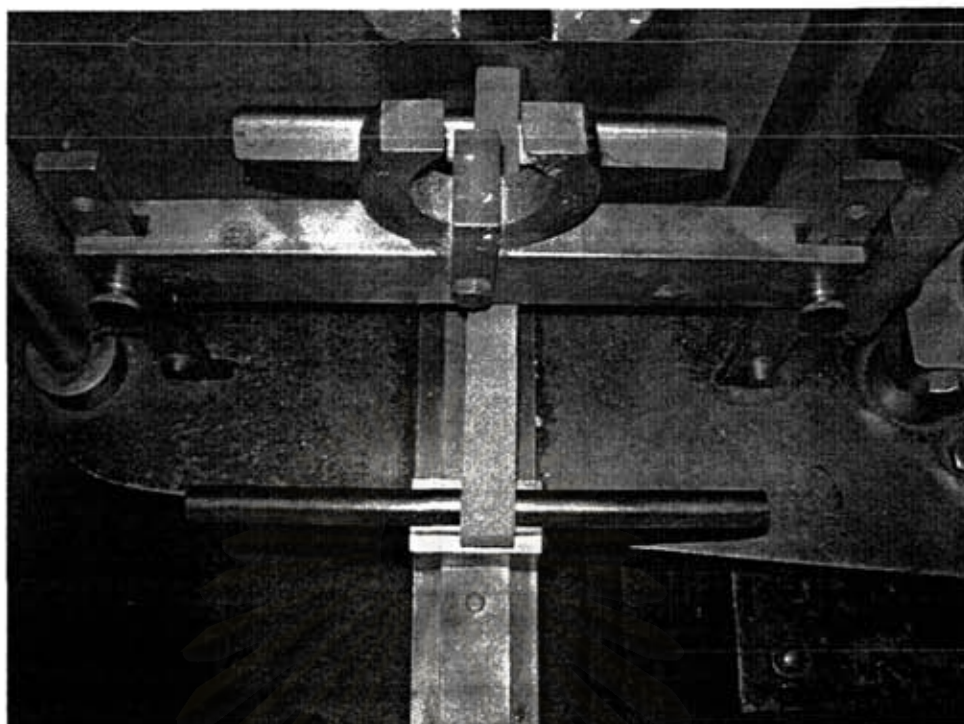
การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ ทำโดยการหล่อแท่งคานทดสอบ ขนาด 25 x 25 x 250 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยมีอัตราส่วนผสมเหมือนกับส่วนผสมของตัวอย่างที่ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทำการถอดแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำ ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C348 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งทำการทดสอบที่อายุ 3, 7, 28, 56 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงดัด

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

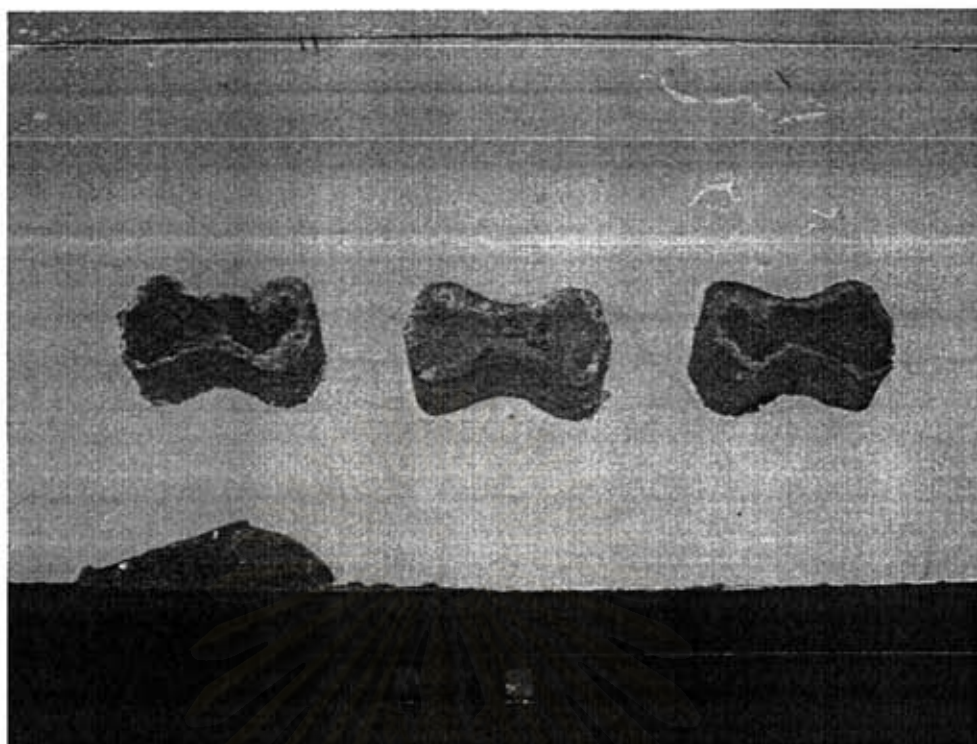




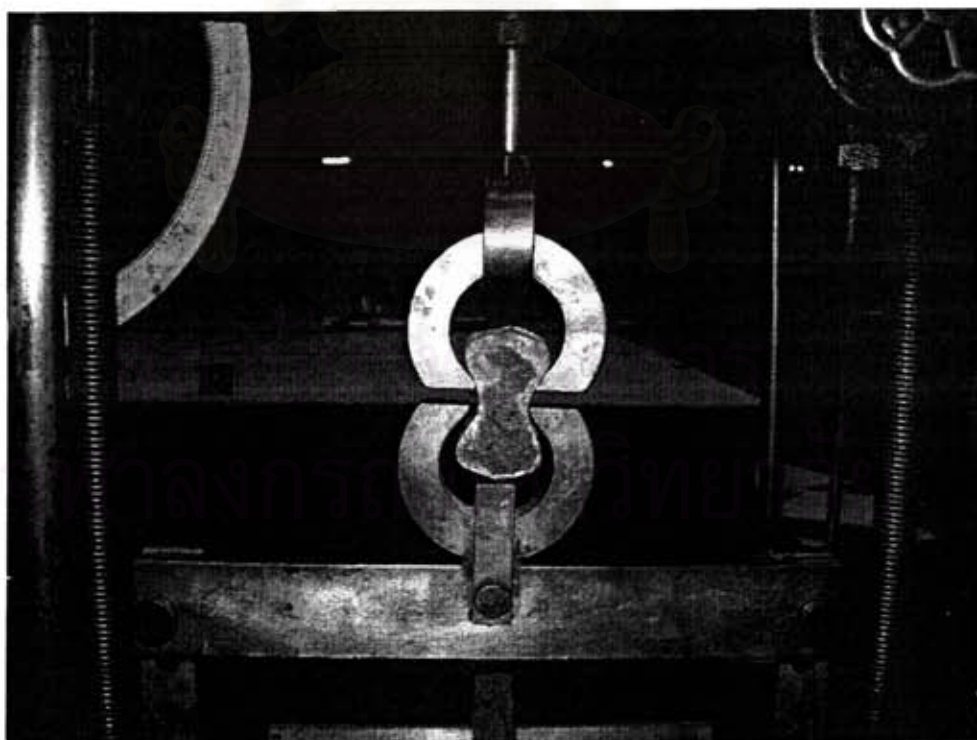
รูปที่ 4.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าร์

- การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าร์ โดยการหล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบ ซึ่งจะใช้แบบหล่อบรีเคท (Briquet Molds) ซึ่งมีรูปร่างของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.5 และมีอัตราส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทำการถอดแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปป้อนในน้ำ ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM C190 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทำการทดสอบที่อายุ 3, 7, 28, 56 วัน ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงดึง



รูปที่ 4.6 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอเตอร์

- การทดสอบความทนทานต่อกรดของมอร์ตาร์ซึ่งเป็นการทดสอบที่ไม่มีในมาตรฐาน ASTM ดังนั้น จึงได้อ้างอิงวิธีการทดสอบจากบทความเรื่อง "คุณสมบัติทางกลและความทนทานของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ" ของ บุรฉัตร ฉัตรวิระ และพีรชล สุภัทธรรม ซึ่งตีพิมพ์ในวารสารรวมบทความจาก การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 เล่ม 1 หน้า MAT19-24 ซึ่งได้กล่าวถึงวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

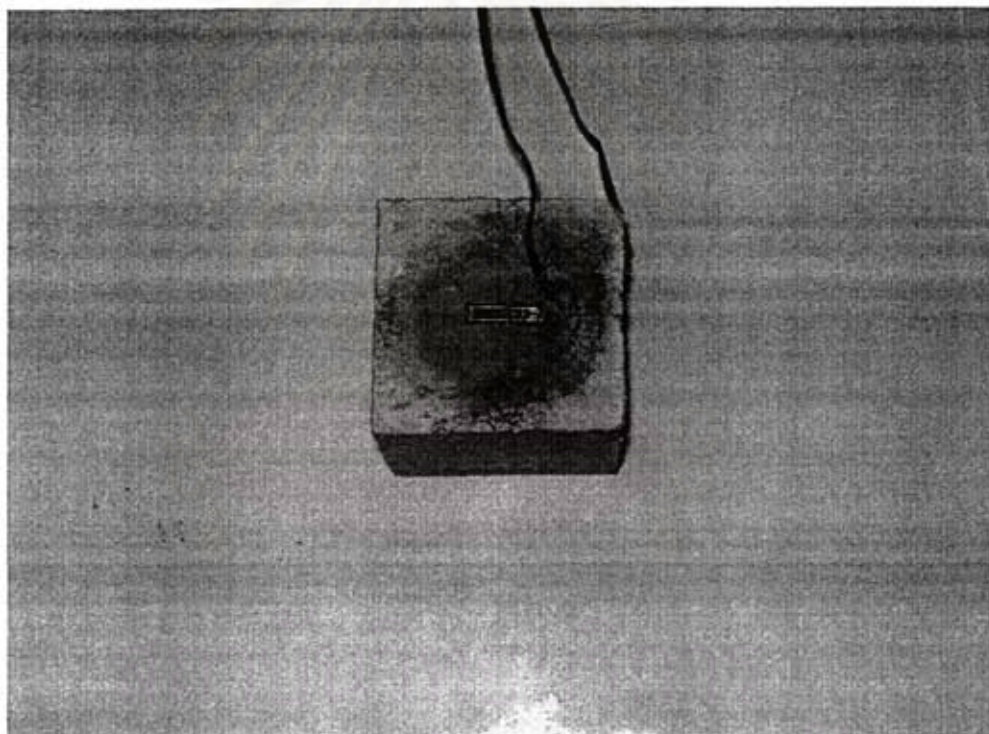
ทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทำการถอดแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปต้มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำมาแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เข้มข้นร้อยละ 5 มีค่า pH เท่ากับ 0.35 ทำการทดสอบหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ที่ระยะเวลา 7, 28, 56 วัน ที่แช่ในสารละลายกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เพื่อหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์



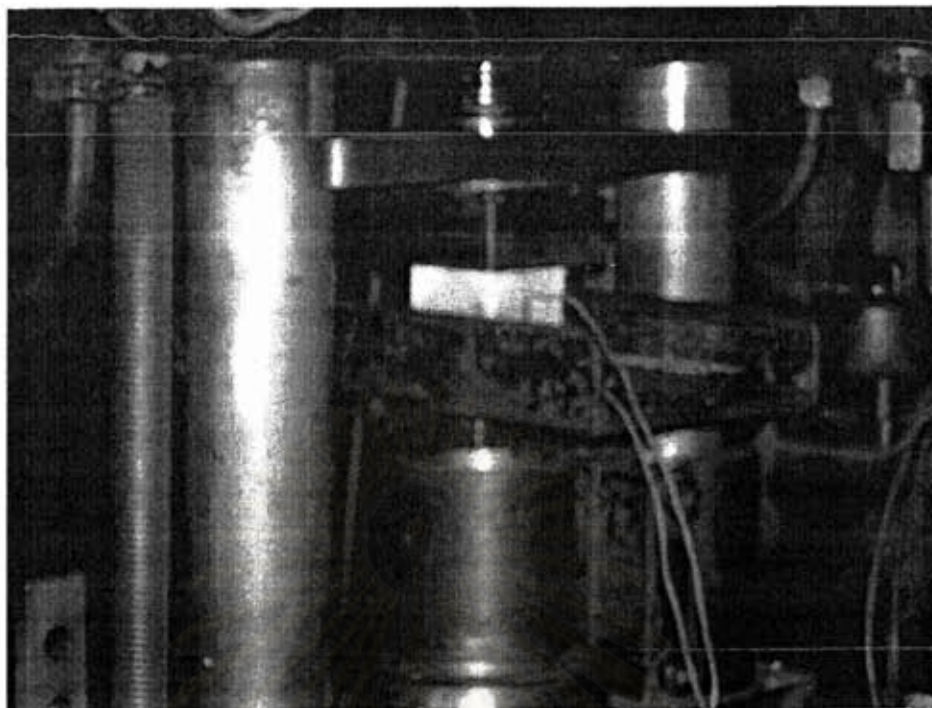
รูปที่ 4.7 การทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรด



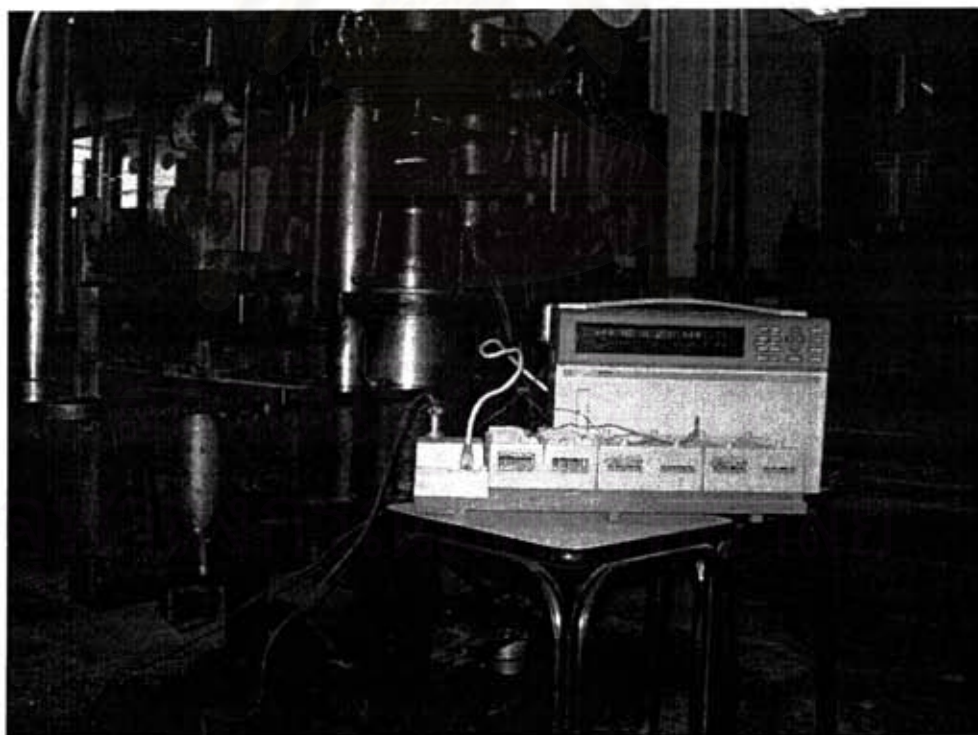
การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ (Modulus of Elasticity of Mortar) เป็นการทดสอบที่ไม่มีในมาตรฐาน ASTM ดังนั้นผู้วิจัยจึงออกแบบวิธีการทดสอบโดยการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์โดยใช้แบบหล่อรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  เซนติเมตร โดยมีอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.2 ถอดแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำ เมื่อมอร์ตาร์ถึงอายุที่ต้องการคือ 7, 28 และ 56 วัน ทำการติดตั้งตัววัดค่าความเครียด (Strain gauge) ในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.8 เพื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียด (Strain) กับความเค้น (Stress) ของมอร์ตาร์ ที่ขึ้นตัวอย่างได้รับเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดของมอร์ตาร์ซึ่งก็คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ (Modulus of Elasticity of Mortar) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.8 การติดตั้งตัววัดความเครียดบนมอร์ตาร์ที่ต้องการทดสอบ



รูปที่ 4.9 การติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์ทในเครื่อง Universal Testing Machine และติดตั้งตัววัดความเครียดเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ท



รูปที่ 4.10 การเชื่อมต่อตัววัดความเครียดเข้ากับเครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (Data Logger) เพื่อบันทึกค่าความเครียดของมอร์ตาร์ทเมื่อได้รับแรงอัด จากเครื่อง Universal Testing Machine

#### 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

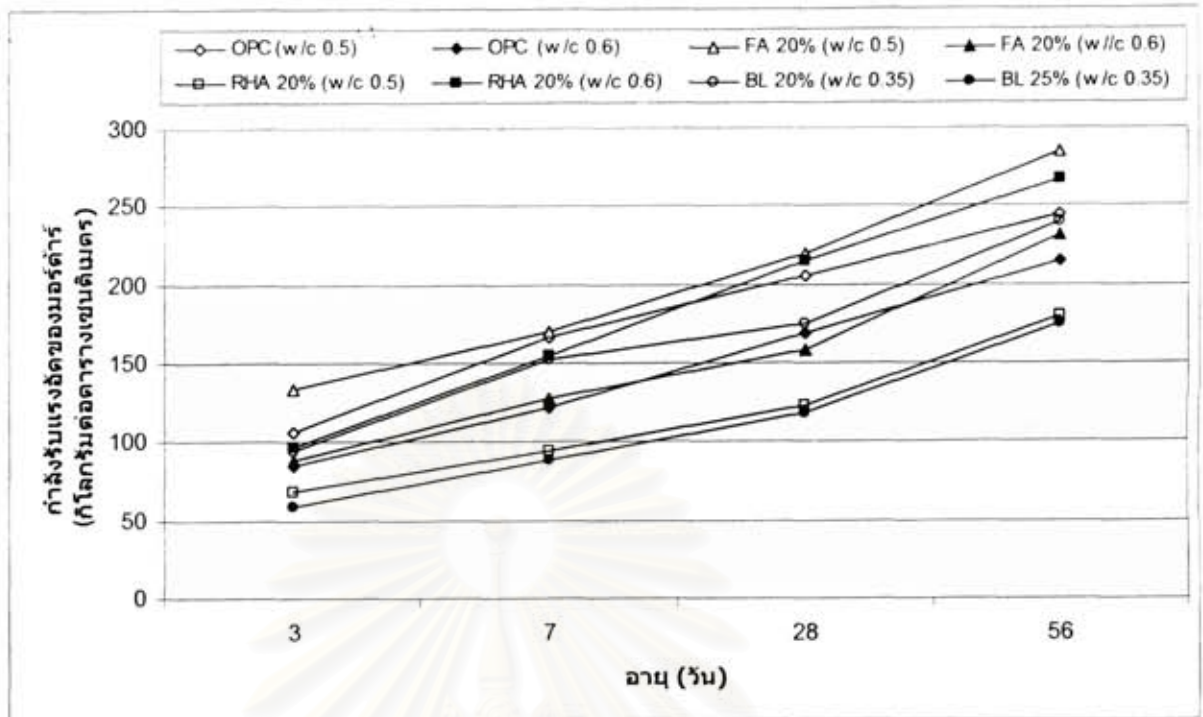
##### 4.4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

หลังจากหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์และทำการบ่มให้ได้อายุของมอร์ตาร์ตามที่ต้องการแล้ว จึงนำตัวอย่างขึ้นมาจากภาชนะที่ทำการบ่ม เช็ดตัวอย่างให้แห้งแล้วทำการวัดขนาดหน้าตัด ความสูงและ ซึ่งน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ จากนั้นจึงนำไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งทำการกดตัวอย่าง มอร์ตาร์จนตัวอย่างเกิดการแตกร้าว เพื่อหาลำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน
OPC (w/c 0.5)	106	166	206	245
OPC (w/c 0.6)	85	122	169	215
FA 20% (w/c 0.5)	134	170	220	285
FA 20% (w/c 0.6)	89	128	158	232
RHA 20% (w/c 0.5)	68	94	123	180
RHA 20% (w/c 0.6)	97	155	214	267
BL 20% (w/c 0.35)	94	152	175	240
BL 25% (w/c 0.35)	59	88	118	175





รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน

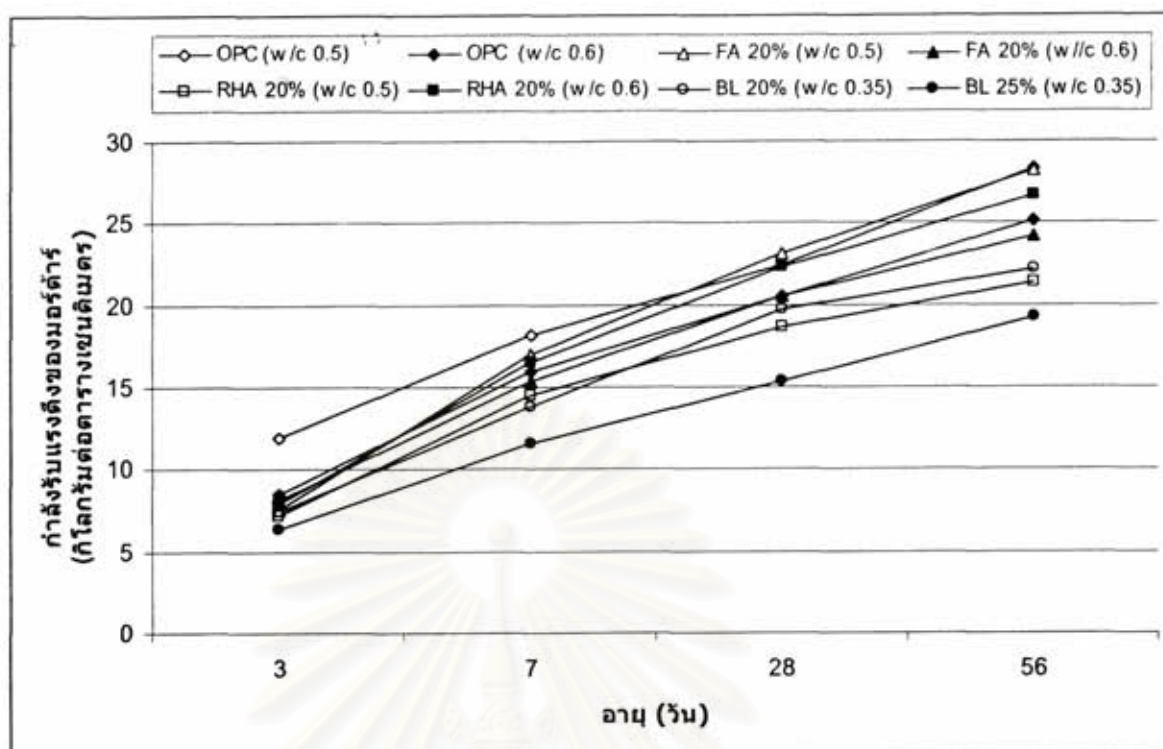
จากรูปที่ 4.11 จะสังเกตได้ว่าในส่วนผสม 3 ชนิดคือ (1) ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 (OPC, w/c 0.5) (2) ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย 20 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 (FA 20%, w/b 0.5) และ (3) ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 (RHA 20%, w/b 0.6) จะเป็นกลุ่มที่การพัฒนากำลังอัดที่ดี แต่ส่วนผสม FA 20%, w/b 0.5 จะให้กำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งมีข้อน่าสังเกตตรงที่ว่าส่วนผสม FA 20%, w/b 0.5 และส่วนผสม OPC, w/c 0.5 จะมีค่ากำลังอัดในช่วง 56 วัน มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันซึ่งตามทฤษฎีแล้วกำลังในระยะต้นของมอร์ตาร์ที่ผสมสารปอซโซลานจะมีอัตราการพัฒนากำลังที่ช้ากว่ามอร์ตาร์ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ล้วนแต่จากผลการทดสอบในการศึกษานี้พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยจะมีอัตราการพัฒนากำลังอัดในระยะต้นได้ใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ล้วนนั้น อาจมีสาเหตุมาจากเถ้าลอยที่ใช้ในการผสมมอร์ตาร์มีปริมาณ CaO ในปริมาณที่สูง ซึ่ง CaO เป็นสารประกอบหลักในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าส่วนผสม FA 20%, w/c 0.5 มีการพัฒนากำลังอัดในระยะต้นได้ดี

#### 4.4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์

หลังจากหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์และทำการบ่มให้ได้อายุของมอร์ตาร์ตามที่ต้องการ แล้วจึงนำตัวอย่างขึ้นมาจากภาชนะที่ทำการบ่ม เช็ดตัวอย่างให้แห้ง และบันทึกขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างที่จะทดสอบ แล้วทำการดึงตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM C190 ที่อายุ 3, 7, 28, 56 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน
OPC (w/c 0.5)	11.9	18.2	22.5	28.3
OPC (w/c 0.6)	8.5	16.0	20.6	25.1
FA 20% (w/c 0.5)	7.6	17.1	23.1	28.2
FA 20% (w/c 0.6)	8.1	15.3	20.6	24.2
RHA 20% (w/c 0.5)	7.2	14.5	18.6	21.4
RHA 20% (w/c 0.6)	7.9	16.5	22.3	26.7
BL 20% (w/c 0.35)	7.5	13.9	19.8	22.2
BL 25% (w/c 0.35)	6.4	11.6	15.3	19.3



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน

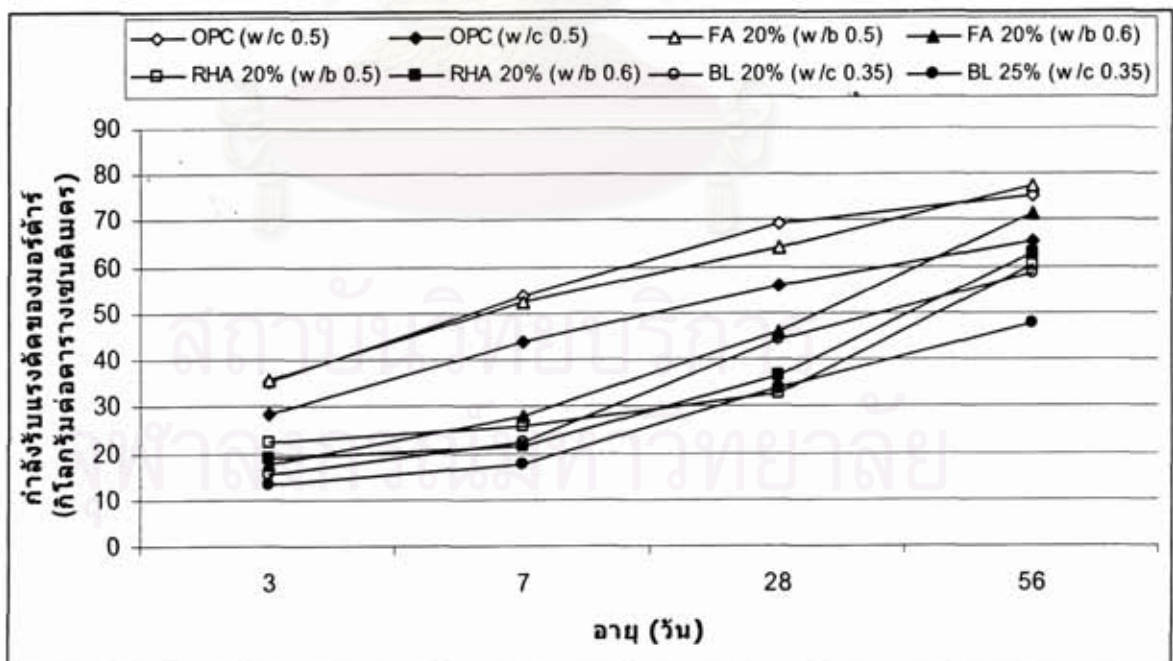
#### 4.4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์

หลังจากหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์และทำการบ่มที่ให้ได้อายุของมอร์ตาร์ตามที่ต้องการแล้ว จึงนำตัวอย่างขึ้นมาจากภาชนะที่ทำทุการบ่มเข็ดตัวอย่างให้แห้ง และทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง Universal Machine ตามมาตรฐาน ASTM C 348



ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน
OPC (w/c 0.5)	35.3	53.9	69.4	75.6
OPC (w/c 0.5)	28.2	43.9	56.1	65.7
FA 20% (w/b 0.5)	35.6	52.4	64.0	77.4
FA 20% (w/b 0.6)	17.6	28.0	46.0	71.4
RHA 20% (w/b 0.5)	22.2	25.6	33.0	60.2
RHA 20% (w/b 0.6)	19.1	21.4	36.6	62.9
BL 20% (w/c 0.35)	15.4	22.3	44.3	58.4
BL 25% (w/c 0.35)	13.2	17.5	34.0	47.6



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน

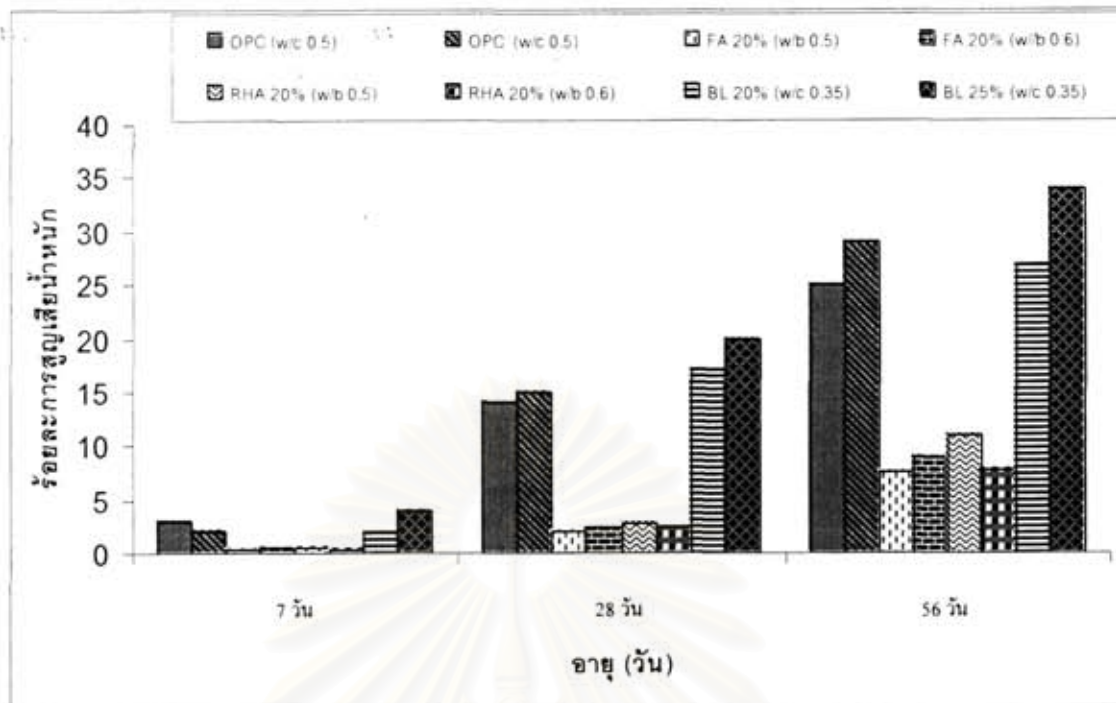
จากผลการทดสอบทั้งกำลังรับแรงดึงในหัวข้อที่ 4.4.2 และกำลังรับแรงดัดจากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบแล้วในหัวข้อที่ 4.4.1 โดยจะพบว่ากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเหตุผลหลักที่ทำให้มอร์ตาร์ซึ่งผสมเถ้าลอยมีกำลังรับแรงดัดและแรงดึงใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องมาเถ้าลอย ซึ่งในทางทฤษฎีแล้ว กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดึงจะแปรผันตามกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ดังนั้นแนวโน้มของการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ในการการรับแรงดัดและแรงดึงจึงมีลักษณะคล้ายกับการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

#### 4.4.4 ผลการทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด

หลังจากทำการแช่ตัวอย่างมอร์ตาร์ในกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 5% เป็นเวลา 7, 28, 56 วัน จึงนำมาชั่งเพื่อหาร้อยละของน้ำหนักที่สูญหายจากการถูกกัดกร่อนด้วยกรด

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าการสูญหายน้ำหนักของมอร์ตาร์ต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด

ส่วนผสม	ร้อยละของน้ำหนักมอร์ตาร์ที่สูญหาย		
	7 วัน	28 วัน	56 วัน
OPC (w/c 0.5)	3	14	25
OPC (w/c 0.5)	2	15	29
FA 20% (w/b 0.5)	0.7	2	7.5
FA 20% (w//b 0.6)	0.9	2.5	9
RHA 20% (w/b 0.5)	0.5	2.8	11
RHA 20% (w/b 0.6)	0.4	2.4	7.7
BL 20% (w/c 0.35)	2	17	27
BL 25% (w/c 0.35)	4	20	34



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นกรด

จากรูปที่ 4.14 จะสังเกตได้ว่าในกรณีที่มีการแทนที่ปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบจะทำให้มอร์ตาร์มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจากกรดได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ ซึ่งถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของสารปอซโซลานซึ่งช่วยให้ผิวของมอร์ตาร์มีความคงทนดีกว่ามอร์ตาร์ซึ่งไม่ได้แทนที่ด้วยสารปอซโซลาน

#### 4.4.5 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของมอร์ตาร์

เมื่อทำการติดตั้งตัววัดความเครียด (Strain Gauge) กับตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ จึงทำการติดตัววัดความเครียดกับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) จากนั้นทำการกดตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยความเค้น (Stress) และหน่วยความเครียด (Strain) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบ



ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์

ส่วนผสม	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)		
	7 วัน	28 วัน	56 วัน
OPC (w/c 0.5)	154,596	186,392	228,000
OPC (w/c 0.5)	145,137	167,889	231,268
FA 20% (w/b 0.5)	165,952	198,533	240,602
FA 20% (w/b 0.6)	143,396	171,968	227,665
RHA 20% (w/b 0.5)	125,802	157,447	186,161
RHA 20% (w/b 0.6)	149,702	189,238	243,840
BL 20% (w/c 0.35)	145,643	177,644	225,477
BL 25% (w/c 0.35)	136,753	162,912	231,255

ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์จะมีค่าอยู่ประมาณ 200,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

#### 4.5 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง, กำลังรับแรงดัด, ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ทั้ง 8 ส่วนผสม พบว่าส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าลอย 20 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 (FA 20%, w/b 0.5) และส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 (OPC, w/c 0.5) มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันเมื่ออายุของมอร์ตาร์ไม่เกิน 56 วัน จัดเป็นกลุ่มที่ให้กำลังอัดสูงที่สุด อีกทั้งเมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้นพบว่ามอร์ตาร์ซึ่งมีส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย 20 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 (RHA 20%, w/b 0.6) ก็มีอัตราการพัฒนากำลังที่ดีเช่นกัน ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการพิจารณาในแง่ของความแข็งแรงของวัสดุเท่านั้น แต่เมื่อมาพิจารณาในแง่ของความคงทนจะพบว่า มอร์ตาร์ซึ่งมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย สารปอซโซลาน (เถ้าลอยและเถ้าแกลบ) จะพบว่ามีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีกว่ามอร์ตาร์ซึ่งไม่มีการแทนที่

ด้วยสารปอซโซลานเพราะสารปอซโซลานจะช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์,  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งเป็นสารประกอบในมอร์ตาร์ที่จะทำปฏิกิริยากับกรดทำให้มอร์ตาร์เกิดการสึกกร่อนได้ อีกทั้งสารปอซโซลานยังช่วยทำให้เนื้อมอร์ตาร์มีความทึบน้ำมากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของกรดได้ดีขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งในแง่ของความแข็งแรงและความคงทนจะพบว่า **“ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าลอย 20 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 (FA 20%, w/b 0.5) มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อผลิตแผงกันเสียงได้”** ซึ่งสาเหตุที่เลือกใช้เถ้าลอย ทั้งๆ ที่ส่วนผสมซึ่งแทนที่ปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ 20 เปอร์เซ็นต์และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 (RHA 20%, w/b 0.6) ก็มีคุณสมบัติด้านกำลังและความทนทานใกล้เคียงกับเถ้าลอยซึ่งมีการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 20 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 (FA 20%, w/b 0.5) แต่เนื่องมาจากเราไม่สามารถใช้เถ้าแกลบซึ่งได้มาจากการเผาโดยตรงได้ เพราะเถ้าแกลบหลังจากการเผาจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องทำการบดเถ้าแกลบก่อนที่จะนำมาใช้งาน ซึ่งขั้นตอนในการบดนั้นค่อนข้างจะใช้เวลาและได้ปริมาณเถ้าแกลบที่บดในแต่ละครั้งค่อนข้างน้อย (ซึ่งจากการบดในการทำวิจัยจะบดได้เพียงครั้งละ 5 กิโลกรัมต่อเวลาการบด 90 นาที) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าลอยซึ่งมีขนาดอนุภาคหลังจากการเผาที่มีขนาดเล็กอยู่แล้ว จึงสามารถนำเถ้าลอยมาใช้ผสมมอร์ตาร์ได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการบดเหมือนเถ้าแกลบ ยิ่งในกรณีที่ต้องการใช้มอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่มีการแทนที่ปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบในปริมาณมากการใช้เถ้าลอยแทนที่จะมีความสะดวกกว่าการใช้เถ้าแกลบเป็นอย่างมาก แต่ทั้งนี้ส่วนผสมที่ใช้น้ำทั้งจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากำลังของส่วนผสมทั้งสองที่ใช้น้ำทั้งจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษนั้นให้กำลังที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ผสมสารปอซโซลาน อีกทั้งยังพิจารณาในด้านของความคงทนจะพบว่าส่วนผสมที่ใช้น้ำทั้งจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษจะมีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดต่ำกว่าส่วนผสมที่มีสารปอซโซลานมาก ซึ่งสาเหตุก็เนื่องมาจากได้มีการลดปริมาณซีเมนต์ลงซึ่งทำให้ปริมาณของวัสดุประสานน้อยจึงมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ อีกทั้งการไม่ผสมสารปอซโซลานลงในส่วนผสมก็จะทำให้มอร์ตาร์มีความทนทานต่ำเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่มีการผสมสารปอซโซลาน



## แนวทางการออกแบบแผงกั้นเสียง

### 5.1 แนวทางการออกแบบแผงกั้นเสียงในเชิงฟิสิกส์

การลดระดับเสียงโดยใช้แผงกั้นเสียงถือว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคในการลดระดับเสียงแบบอื่น การพิจารณาการออกแบบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น วัสดุที่ใช้ ตำแหน่ง ความสูงและรูปร่างของแผงกั้นเสียง รวมทั้งระดับเสียงเดิม ในบางครั้งการพิจารณาออกแบบแผงกั้นเสียงอาจไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อการลดระดับเสียงเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นและมีความสำคัญในระดับเดียวกัน เช่น เพื่อเป็นฉากบังระหว่างผู้ใช้รถบนทางพิเศษกับผู้อยู่อาศัยในอาคารที่อยู่ใกล้ทางพิเศษ แต่บางครั้งการแก้ไขปัญหาระดับเสียงแก่ผู้ได้รับผลกระทบก็อาจจะเกิดผลข้างเคียงโดยเมื่อติดตั้งแผงกั้นเสียงแล้ว แผงกั้นเสียงอาจจะก่อให้เกิดปัญหาอื่นตามมาเช่น ระยะเวลาการมองเห็นและการสะท้อนแสงซึ่งจะเป็นผลเสียที่รบกวนผู้ขับขี่บนทางพิเศษ ดังนั้นการใช้แผงกั้นเสียงให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดจึงมีความซับซ้อนกว่าการพิจารณาเฉพาะการลดระดับเสียงเท่านั้น

#### 5.1.1 แนวความคิดในการออกแบบแผงกั้นเสียงเพื่อลดระดับเสียง

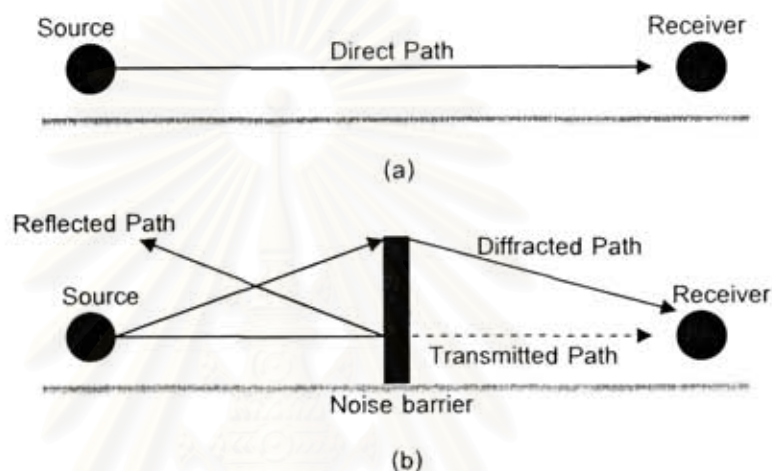
เกณฑ์การออกแบบแผงกั้นเสียงเพื่อลดระดับเสียงตามวิธีที่แนะนำโดย FHWA (Federal Highway Administration), 2001 แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา นั้นเป็นหลัก การกำหนดความสูงและความยาวของแผงกั้นเสียงที่เหมาะสม โดยหลักการดังกล่าวมีสมมติฐานว่าระดับเสียงที่ผู้รับได้รับนั้นมาจากการเลี้ยวเบนของระดับเสียงที่ผ่านแผงกั้นเสียงหรือจากส่วนอื่นๆที่เปิดไว้โดยไม่มีเสียงในส่วนที่เดินทางผ่านแผงกั้นเสียง ดังนั้น วัสดุที่ใช้ทำแผงกั้นเสียงจะต้องมีความหนาแน่นหรือมีความหนามากพอที่จะลดระดับเสียงที่ผ่านแผงกั้นเสียงที่ติดตั้งไว้ระหว่างทางเดินรถกับผู้ได้รับผลกระทบ จากรูปที่ 5.1 (a) เป็นเส้นการเดินทางของเสียงซึ่งแต่เดิมอาจแทนด้วยเส้นตรง (Direct Path) ที่ลากจากแหล่งกำเนิดไปยังผู้รับผลกระทบ เมื่อมีแผงกั้นเสียง ระดับเสียงจะเดินทางอ้อมแผงกั้นเสียงซึ่งอธิบายได้โดยเส้นตรงที่ลากจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดบนสุดของกำแพงกั้นเสียง (Diffraction Path) จากนั้นจึงลากต่อไปยังผู้รับผลกระทบ โดยมีเสียงบางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (Reflection Path) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (b)

ส่วนระดับเสียงที่เดินทางผ่านแผงกั้นเสียงโดยตรง (Transmitted Path) จะสูญเสียพลังงานขณะที่ทะลุผ่านแผงกั้นเสียงอย่างมาก ทำให้เมื่อนำระดับเสียงที่ทะลุผ่านไปรวมกับระดับ



เสียงที่ได้จากการเลี้ยวเบนจะพบว่าระดับเสียงไม่ได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการคำนึงถึงเฉพาะระดับเสียงจากการเลี้ยวเบนเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นเมื่อมีการติดตั้งแผงกั้นเสียง ระดับเสียงที่ผู้ได้รับจะมีผลมาจากระดับเสียงที่มาจากจากการเลี้ยวเบน (Diffracted Noise) อ้อมแผงกั้นเสียง ซึ่งระดับเสียงนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้ง, รูปร่าง และขนาดของแผงกั้นเสียง แต่ระดับเสียงอีกส่วนหนึ่ง คือ ระดับเสียงที่เดินทางผ่านแผงกั้นเสียง (Transmitted Noise) ซึ่งระดับเสียงนั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำแผงกั้นเสียง



รูปที่ 5.1 (a) แนวทางเดินทางของเสียงจากรถยนต์ที่อยู่บนถนนไปสู่ผู้ฟัง  
(b) กรณีที่มีแผงกั้นเสียงมาคั่นกลาง

### 5.1.2 วัสดุที่ใช้ทำแผงกั้นเสียงและเสียงที่เดินทางทะลุผ่านแผงกั้นเสียง (Transmitted Noise)

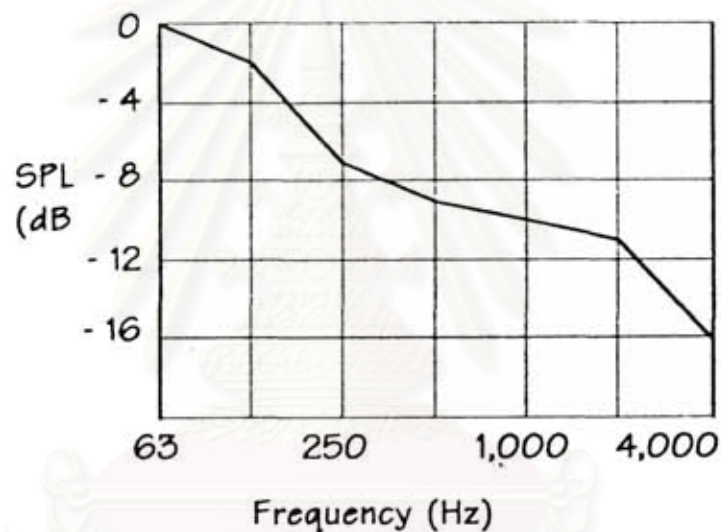
ประสิทธิภาพของวัสดุในการลดระดับเสียงของแผงกั้นเสียงนั้น หมายถึง วัสดุใดๆที่สามารถลดทอนระดับเสียงที่ทะลุผ่าน (Transmitted Loss) ลงได้อย่างน้อย 10 dB (A) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับเสียงเดิมก่อนจะทะลุผ่านแผงกั้นเสียง สาเหตุที่ต้องให้วัสดุสามารถลดทอนระดับเสียงได้อย่างน้อย 10 dB (A) นั้น เนื่องจากว่า แหล่งกำเนิดสองแหล่งที่มีระดับเสียงต่างกันเกิน 10 dB (A) ระดับเสียงรวมจะไม่เพิ่มระดับเสียงของแหล่งกำเนิดที่ระดับเสียงสูงกว่า

ซึ่ง Noise Control Manual by David A. Harris ได้เสนอวิธีการคำนวณหาความสามารถในการลดทอนเสียงทะลุผ่านในลักษณะเชิงมวลของวัสดุของแผงกั้นเสียงซึ่งมีทิศทางของเสียงซึ่งตกกระทบในแนวตั้งฉากกับแผงกั้นเสียงเป็นไปตามสมการที่ 5.1

$$TL = 20 * \log(f * w) - 47.5 \text{ dB(A)} \quad (5.1)$$

เมื่อ	$f$	คือ ความถี่ของเสียง (Hz)
	$w$	คือ น้ำหนักต่อตารางเมตรของกำแพงกั้นเสียง
	$TL$	คือ ค่าความสามารถในการลดทอนเสียงทะลุผ่าน (dB)

เสียงที่เกิดบนถนนจะมีการรบกวนมากเมื่อมีรถยนต์แล่นผ่านตลอดเวลาเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดเสียงแบบเส้น (Line source) และให้สเปกตรัมของเสียงรถยนต์บนถนนมีลักษณะของความดังที่ความถี่ต่างๆโดยประมาณดังแสดงในรูปที่ 5.2



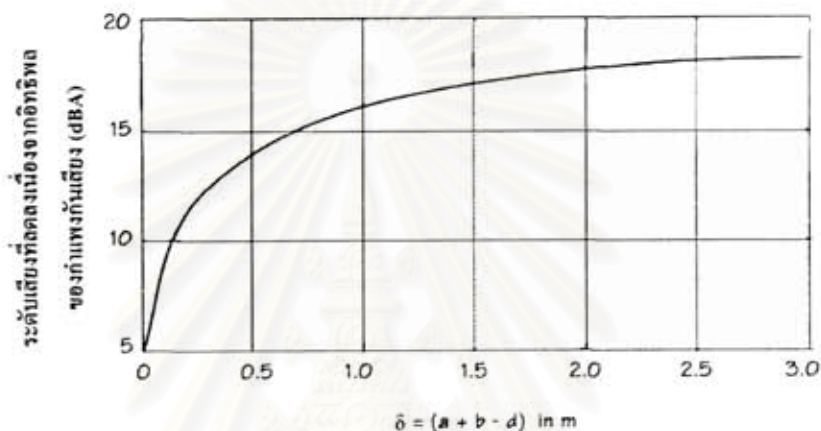
รูปที่ 5.2 สเปกตรัมของเสียงรถยนต์บนถนน

สำหรับกำแพงที่มีความยาวมากแต่มีความสูงจำกัดเรียกว่า Semi-Infinite Barrier จะสามารถกั้นหรือลดทอนเสียงด้วยตัวกำแพง (Barrier attenuation) ที่ระยะ  $\delta$  ต่างๆได้จากสมการที่ 5.2 หรือหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะ  $\delta$  ใดๆ กับ ค่าความเข้มของเสียงดังรูปที่ 5.3

$$\delta = a + b - d \quad (5.2)$$

เมื่อ	$a + b$	คือ ระยะทางที่สั้นที่สุดจากแหล่งกำเนิดข้ามยอดแผงกั้นเสียงถึงผู้รับเสียง
	$d$	คือ ระยะทางเส้นตรงจากแหล่งกำเนิดทะลุแผงกั้นเสียงถึงผู้รับเสียง

จากรูปที่ 5.3 จะพบว่า การลดเสียงของแผงกั้นเสียงมีค่าไม่เกิน 18 dB (A) แต่ในทางปฏิบัติ การลดเสียงของกำแพงจริงมีค่าประมาณ 15 dB (A)



รูปที่ 5.3 การลดเสียงด้วยตัวกำแพง (Barrier attenuation) ที่ระยะ  $\delta$  ต่างๆ

ในการออกแบบและใช้งานโดยทั่วไป เราสามารถใช้แผงกั้นเสียงที่มีสมบัติดูดกลืนเสียง (Absorption Type) หรือแบบที่มีการผสมผสานกันระหว่างแบบดูดกลืนและสะท้อน (Reflection type) ในบางกรณีโครงสร้างของแผงกั้นเสียง ก็สามารถจะมีลักษณะโปร่งที่มีช่องว่างด้านใน (Enclosure Model) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ต้องคำนึงถึงการก้องที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างด้วยการใส่วัสดุดูดกลืนเสียงลงไป ในช่องว่างนั้นก็เป็น การลดเสียงก้องภายในโครงสร้างได้ทางหนึ่ง ในการลดทอนของเสียงทะลุผ่านนั้น พลังงานเสียงที่ทะลุผ่านกำแพงจะต้องมีขนาดที่น้อยกว่าพลังงานเสียงที่เลี้ยวเบนที่จุดสูงสุดของแผงกั้นเสียงอย่างน้อย 10 dB (A) ซึ่งกรณีนี้จะทำให้เสียงที่ผู้ฟังได้ยินจะมาจากพลังงานเสียงที่เคลื่อนที่ข้ามแผงกั้นเสียงมาเท่านั้น ตัวอย่างเช่น ถ้าให้ระดับเสียงที่มาจากแหล่งกำเนิด A และ B มีค่าเท่ากับ 70 dB (A) และ 60 dB (A) ตามลำดับ ระดับเสียงรวมที่ผู้ฟังจะได้ยิน ( $L_{A+B}$ ) จะมีค่าเท่ากับโดยมีการคำนวณดังนี้

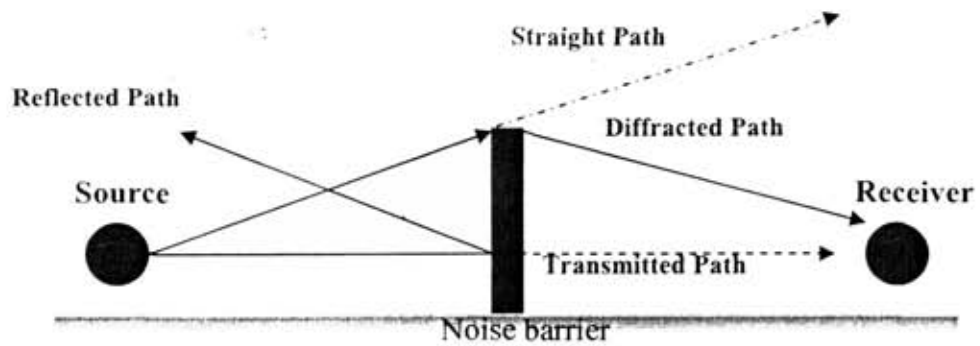
$$\begin{aligned}
 L_{A+B} &= 10 \log [ \text{Antilog} (70/10) + \text{Antilog} (60/10) ] \\
 &= 70.4 \text{ dB}
 \end{aligned}$$



ดังนั้นสำหรับวัสดุต่างๆที่จะนำมาใช้ในการสร้างแผงกั้นเสียงจะต้องเป็นวัสดุจะให้ค่าการลดทอนของเสียงทะลุผ่านอย่างน้อย 20-25 dB (A) ในตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงค่าการลดทอนของเสียงทะลุผ่านของวัสดุชนิดต่างๆ

ตารางที่ 5.1 ความสามารถในการลดทอนระดับเสียงที่ทะลุผ่าน (Transmitted Loss) ของวัสดุชนิดต่างๆ [FHWA, 2000]

วัสดุ	ความหนา (inches)	น้ำหนัก/ พื้นที่	Transmission Loss
		kg/m <sup>2</sup> (lbs/ft <sup>2</sup> )	dB(A)
Concrete Block light weight 200 mm x 200 mm x 405 mm (8**8**16") light weight	200mm(8")	151(31)	34
Dense Concrete	100mm(4")	244(50)	40
Light Concrete	150mm(6")	244(50)	39
Light Concrete	100mm(4")	161(33)	36
Steel,18ga	1.27mm(0.050")	10(2.00)	25
Steel,20ga	0.95mm(0.0375")	7.3(1.50)	22
Steel,222ga	0.79mm(0.0312")	6.1(1.25)	20
Steel,24ga	0.64mm(0.025")	4.9(1.00)	18
Aluminum, Sheet	1.59mm(0.0625")	4.4(1.00)	23
Aluminum, Sheet	3.18mm(0.125")	8.8(1.8)	25
Aluminum, Sheet	6.35mm(0.25")	17.1(3.5)	27
Wood, Fir	25mm(1.0")	16.1(3.3)	21
Wood, Fir	50mm(2.0")	32.7(6.7)	24
Plywood	12mm(0.5")	8.3(1.7)	20
Plywood	25mm(1.0")	16.1(3.3)	23
Glass, Safety	3.18mm(0.125")	7.8(1.6)	22
Plexiglas	6mm(0.25")	7.3(1.5)	22



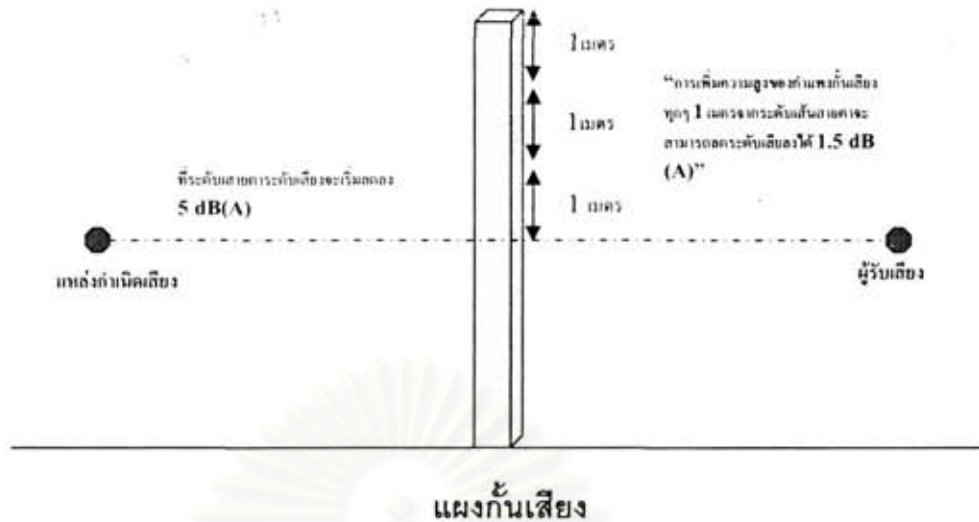
รูปที่ 5.4 แนวการเดินทางของเสียงจากรถยนต์ที่อยู่บนถนนไปสู่ผู้ฟัง โดยมีแผงกั้นเสียง มาคั่นกลาง

FHWA คาดว่าแผงกั้นเสียงแบบแผ่นบาง (Wall) สามารถลดระดับเสียงได้สูงสุด 20 dB(A) ในขณะที่เนินดิน (Bern) สามารถลดได้สูงสุด 23 dB(A) ดังนั้นวัสดุที่มีความสามารถลดระดับเสียงที่ทะลุผ่าน (Transmitted Noise) ลงได้ 33 dB(A) จะสามารถลดระดับเสียงลงได้ในทุกกรณี

### 5.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพของแผงกั้นเสียง

#### (ก) ความสูงของแผงกั้นเสียง

ขั้นตอนแรกในการออกแบบแผงกั้นเสียง คือ ต้องกำหนดวัตถุประสงค์ของแผงกั้นเสียง โดยไม่ใช่เพื่อลดระดับเสียงเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงข้อจำกัดเรื่องความปลอดภัยและระดับเสียงที่ผู้รับที่ต้องการลดลง หรือ Insertion Loss (IL) โดยปกติเมื่อใดก็ตามถ้าเส้นสายตา (Line of Sight) ถูกบดบังโดยแผงกั้นเสียง การลดลงของระดับเสียงที่ผู้รับผลกระทบจะเริ่มลดลงที่ 5 dB (A) และเมื่อพิจารณาความสูงของแผงกั้นเสียงที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1 เมตร จากระดับเส้นสายตา พบว่าจะสามารถลดระดับเสียงลงได้ประมาณ 1.5 dB (A) [Simpson and Myles A., 1976] ดังแสดงในรูป 5.5



รูปที่ 5.5 การลดระดับเสียงโดยแผงกันเสียง

ดังนั้นการออกแบบแผงกันเสียงที่ถูกต้องอย่างน้อยควรจะลดระดับเสียงได้ถึง 10 dB (A) ถ้าจุดรับเสียงอยู่หลังแนวแผงกันเสียงโดยตรง แต่ในกรณีที่มีอาคารปลูกสร้างหลายแถวและขนานกับทางเดินรถ สิ่งปลูกสร้างแถวแรกจะสามารถลดระดับเสียงได้ประมาณ 10 dB (A) ถ้าอยู่นอกแนวแผงกันเสียงจะลดลงได้เพิ่มขึ้นอีก 3 ถึง 5 dB (A) ซึ่งความเป็นไปได้ของการลดระดับเสียงโดยแผงกันเสียงแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ระดับความเป็นไปได้ของการลดระดับเสียงโดยแผงกันเสียง

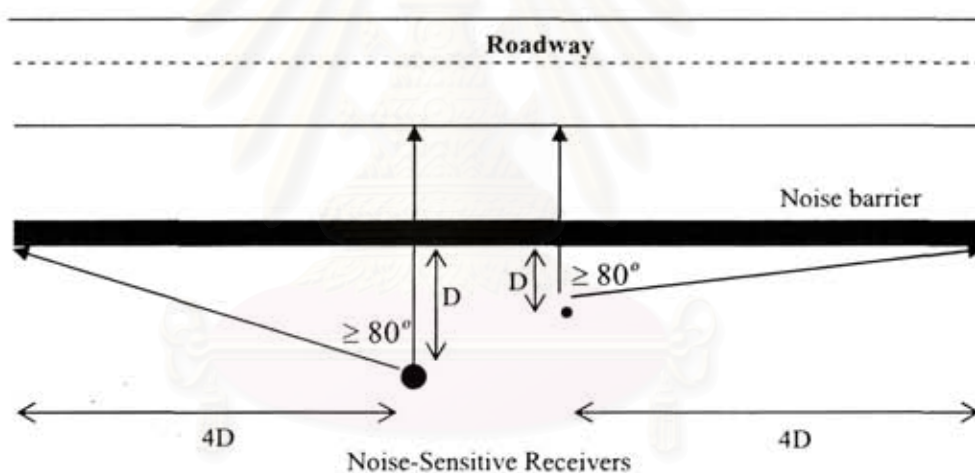
อัตราการลดลงของระดับเสียง	ความเป็นไปได้ในการลดเสียง	การลดลงของพลังงานเสียง	เปรียบเทียบการลดลงของเสียง
5 dB (A)	ง่าย	68%	สังเกตได้
10 dB (A)	เป็นไปได้	90%	ลดลงครึ่งหนึ่ง
15 dB (A)	ยาก	97%	ลดลงเหลือ 1 ใน 3
20 dB (A)	แทบเป็นไปได้ไม่ได้	99%	ลดลงเหลือ 1 ใน 4



### (ข) ความยาวของแผงกั้นเสียง

การติดตั้งแผงกั้นเสียงจะต้องมีความยาวเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้ระดับเสียงที่มีการเลี้ยวเบนอ้อมด้านข้างของแผงกั้นเสียงไปสู่ผู้รับ โดยในบางกรณีถ้าความยาวไม่เพียงพอ ระดับเสียงที่ผู้รับได้รับอาจจะมากกว่าระดับเสียงที่คาดไว้เมื่อติดตั้งแผงกั้นเสียงถึง 5 dB (A) ซึ่งหลักการโดยทั่วไปในการกำหนดความยาวของแผงกั้นเสียง คือ จะต้องมีความยาวอย่างน้อย 4 เท่าของระยะระหว่างแผงกั้นเสียงกับผู้รับผลกระทบ (D) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งวัดตั้งฉากจากจุดรับผลกระทบมายังแผงกั้นเสียง ซึ่งเมื่อมองจากจุดรับผลกระทบ (Noise-Sensitive Receiver) ไปยังขอบแผงกั้นเสียงด้านข้างจะต้องเห็นมุมอย่างน้อย 15 องศา

อีกเกณฑ์หนึ่งซึ่ง FHWA แนะนำ คือ ความยาวของแผงกั้นเสียงที่จะไม่ทำให้ระดับเสียงที่ผู้รับมีผลจากการเลี้ยวเบนทางด้านข้างของแผงกั้นเสียงที่จุดที่ต้องการลดระดับเสียง คือ เมื่อติดตั้งแล้วมุมจากจุดที่มองไปยังปลายของแนวแผงกั้นเสียงด้านข้างจะต้องทำมุมอย่างน้อย 80 องศา กับเส้นที่ลากตั้งฉากจากจุดรับผลกระทบมายังแผงกั้นเสียง

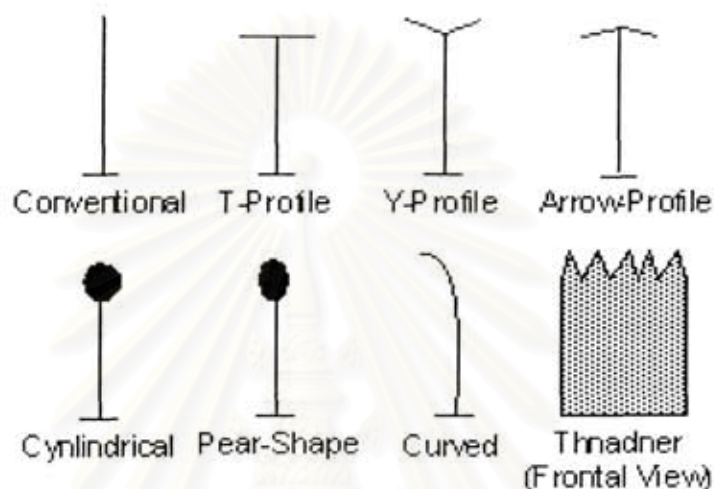


รูปที่ 5.6 ความยาวของแผงกั้นเสียง

### (ค) ขอบบนของแผงกั้นเสียง

การดัดแปลงรูปร่างด้านบนของแผงกั้นเสียงคาดว่าจะมีผลต่อการช่วยลดระดับเสียงเพิ่มขึ้น ที่ความสูงของแผงกั้นเสียงเท่าเดิม นอกจากนี้ยังทำให้มุมมองของแผงกั้นเสียงดูดีขึ้น จากการศึกษาพบว่าแผงกั้นเสียงรูปตัว T (T-Profile) จะทำให้ประสิทธิภาพการลดของระดับเสียงเพิ่มขึ้น 2.5 dB (A) ที่ความสูงและความยาวเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับแผงกั้นเสียงที่ไม่มีการดัดแปลงรูปร่างด้านบนของแผงกั้นเสียง

จากรูปที่ 5.7 ซึ่งแสดงรูปร่างของขอบบนแผงกั้นเสียงพบว่า สำหรับกำแพงกั้นเสียงรูปตัว Y (Y Profile) และรูปลูกศร (Arrow-Profile) จะให้ประสิทธิภาพการลดลงของระดับเสียงดีกว่ากำแพงตรง (Conventional) แต่ไม่ดีเท่ากับกำแพงกั้นเสียงรูปตัว T และสำหรับรูปร่างแบบอื่นอันได้แก่ Cylindrical, Pear-Shape, Curved และ Thnadner ไม่พบว่าประสิทธิภาพในการลดระดับเสียงดีขึ้น

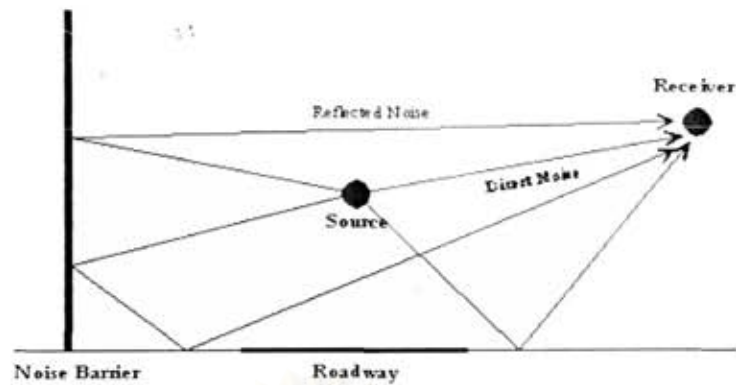


รูปที่ 5.7 รูปร่างของขอบบนแผงกั้นเสียงแบบต่างๆ

#### 5.1.4 ประเภทของแผงกั้นเสียง

(ก) แผงกั้นเสียงแบบสะท้อนเสียงกับแบบดูดกลืนเสียง (Reflective Versus Absorptive)

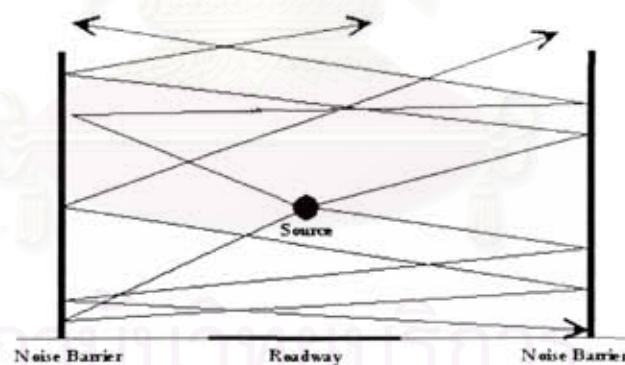
แผงกั้นเสียงที่ไม่ใช้วัสดุดูดกลืนเสียงมาทำเป็นแผงกั้นเสียงทั้งหมดถือว่าเป็นแผงกั้นเสียงแบบสะท้อนเสียง (Reflective) ซึ่งระดับเสียงที่สะท้อน (Reflected Noise) จะไปเพิ่มระดับเสียงให้กับผู้รับด้านฝั่งตรงข้าม ดังนั้นในทางทฤษฎีจึงถือว่าการใช้แผงกั้นเสียงแบบสะท้อนเสียงและดูดกลืนเสียงจะมีผลเฉพาะเมื่อพิจารณาสำหรับผู้รับเสียงด้านตรงข้ามเท่านั้น โดยจากการสำรวจแผงกั้นเสียงที่ติดตั้งจริงพบว่าผู้รับผลกระทบฝั่งตรงข้ามกำแพงกั้นเสียงอาจจะได้รับระดับเสียงเพิ่มขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของระดับเสียงที่ฝั่งตรงข้าม  
เมื่อใช้กำแพงกันเสียงแบบสะท้อนเสียง

(ข) แผงกันเสียงแบบขนานทั้ง 2 ด้าน

การมีแผงกันเสียงขนานกันบนถนน ถ้าเป็นแผงกันเสียงแบบสะท้อนเสียงอาจเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาของระดับเสียง ทำให้การลดระดับเสียงของแผงกันเสียงมีประสิทธิภาพลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.9 เช่นถ้าคาดว่าจะการใช้แผงกันเสียงด้านเดียวจะลดระดับเสียงลงได้ 10 dB (A) แต่เมื่อติดตั้งทั้งสองด้านอาจจะลดระดับเสียงลงได้เพียง 4 ถึง 8 dB (A)



รูปที่ 5.9 การสะท้อนเสียงบนถนนในแผงกันเสียงแบบขนาน

อย่างไรก็ตามในแผงกันเสียงที่ติดตั้งขนานกันไปแบบนี้ถ้าสัดส่วนระยะระหว่างความกว้างของแผงต่อความสูงของแผงกันเสียง (width-to-height, w/h) เกินกว่า 10/1 จะทำให้การสะท้อนไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดระดับเสียงของแผงกันเสียงดัง ตารางที่ 5.3



ตารางที่ 5. 3 การพิจารณาสัดส่วนความกว้างต่อความสูงของแผงกันเสียงแบบขนาน

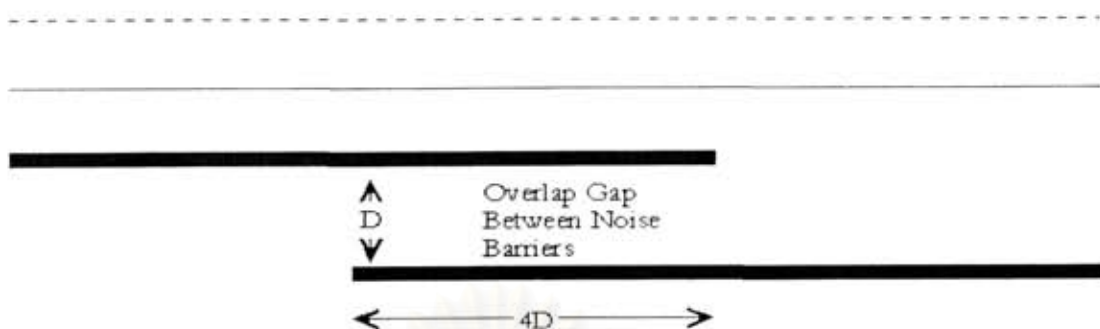
สัดส่วน w/h	การลดลงของประสิทธิภาพ การลดระดับเสียงสูงสุด, dB(A)	ข้อเสนอแนะ
น้อยกว่า 10:1	3 หรือมากกว่า	ต้องมีมาตรการแก้ไข
10:1 ถึง 20:1	0 ถึง 3	โดยมากแล้วผลของมันไม่สามารถสังเกตได้
มากกว่า 20:1	ไม่ลดลง	ไม่ต้องมีมาตรการเพิ่มเติม

(ค) แผงกันเสียงรูปแบบเฉพาะอื่นๆ

ในบางกรณีแผงกันเสียงอาจติดตั้งในลักษณะแบบเหลี่ยมซ้อน การออกแบบแผงกันเสียงแบบมีช่องว่างระหว่างแผงนี้มีไว้เพื่อประโยชน์ในการเข้าไปซ่อมบำรุง และบางครั้งเป็นตำแหน่งของทางข้ามถนน

โดยการติดตั้งแผงกันเสียงในลักษณะนี้จะทำให้ประสิทธิภาพการลดระดับเสียงน้อยลง ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาประสิทธิภาพของแผงกันเสียงที่ลดลงเนื่องจากการเดินทางของระดับเสียงที่อ้อมช่องว่างระหว่างแผงที่เหลี่ยมซ้อนกัน จะต้องทำให้มีระยะที่เหลี่ยมซ้อนกันเกินกว่า 4 เท่าของช่องว่างระหว่างแผงที่เหลี่ยมซ้อนรูปที่ 5.10 ซึ่งถ้าสามารถกำหนดระยะเหลี่ยมซ้อนให้มีสัดส่วนได้ตามนี้ปัญหาจะหมดไป แต่ถ้าทำไม่ได้จะต้องพิจารณาใช้แผงกันเสียงแบบดุดกลืนเสียง

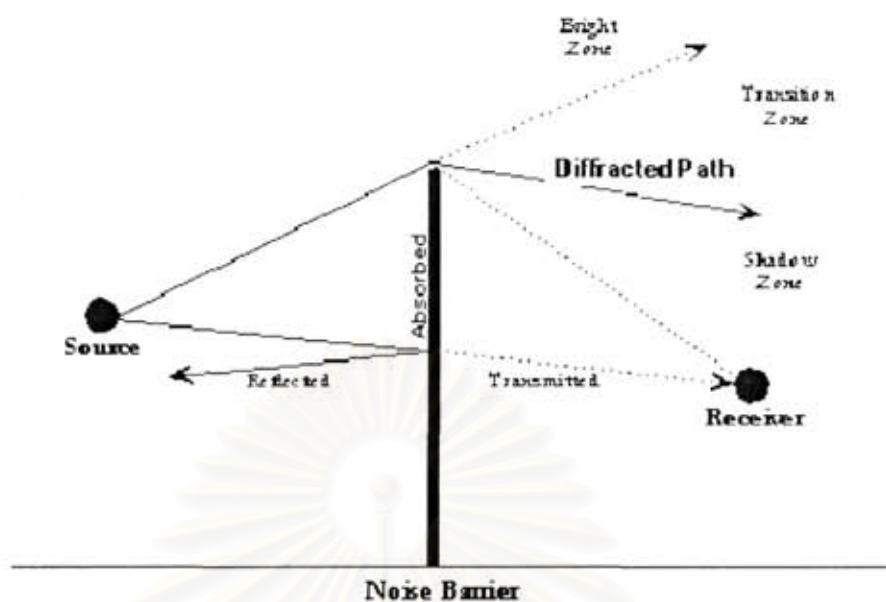
รูปแบบแผงกันเสียงอีกแบบหนึ่ง คือ แบบ ซิกแซก ("Zig - Zag - Like" หรือ "Trapezoidal") มีข้อดี คือ โครงสร้างรับแรงได้มากขึ้น ความต้องการระบบฐานรากน้อยลง ทำให้ผู้รับที่ไม่เบื่อบน เนื่องจากมีการเปลี่ยนรูปทรงตลอด แต่การลดระดับเสียงไม่ได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด



รูปที่ 5.10 แผงกันเสียงแบบเหลื่อมซ้อน

### 5.1.5 สรุปแนวการออกแบบรูปร่างและขนาดของแผงกันเสียงในเชิงฟิสิกส์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

แผงกันเสียงที่ได้ออกแบบและทำการศึกษาในโครงการนี้ เป็นการผสมผสานกันระหว่าง แบบดูดกลืนเสียงและแบบสะท้อนเสียง โดยโครงสร้างของแผงกันเสียงเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมสูง อีกทั้งวัสดุที่ใช้ซึ่งเป็นมอร์ตาร์ (ซีเมนต์ผสมทราย) เป็นวัสดุที่มีค่าความหนาแน่นสูงซึ่งช่วยให้เกิดประสิทธิภาพในการสะท้อนเสียงและลดทอนเสียงทะลุผ่านได้ดี อีกทั้งยังสามารถหาได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก โดยมีการออกแบบรูปร่างของแผงกันเสียงให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Acoustic Panel) ขนาด 2\*1 ตารางเมตร ตัวแผงกันเสียงมีลักษณะเป็นช่องว่างภายใน ซึ่งภายในบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียง ด้านหน้าของแผงกันเสียงส่วนที่รับเสียงจากการจราจรจะมีฝาปิดโลหะที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (Metal Perforated Cover) โดยหลักการทำงานของแผงกันเสียงจะแบ่งเป็นส่วนผนังทึบของแผงกันเสียงจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนเสียงและลดทอนเสียงทะลุผ่าน ส่วนช่องว่างตรงกลางที่บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงจะทำหน้าที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการ ดูดกลืนเสียงเพื่อไม่ให้เกิดเสียงสะท้อนกลับไปยังฝั่งตรงกันข้ามให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งหลักการทำงานของแผงกันเสียงที่ได้ออกแบบได้แสดงในรูปที่ 5.11, 5.12, 5.13

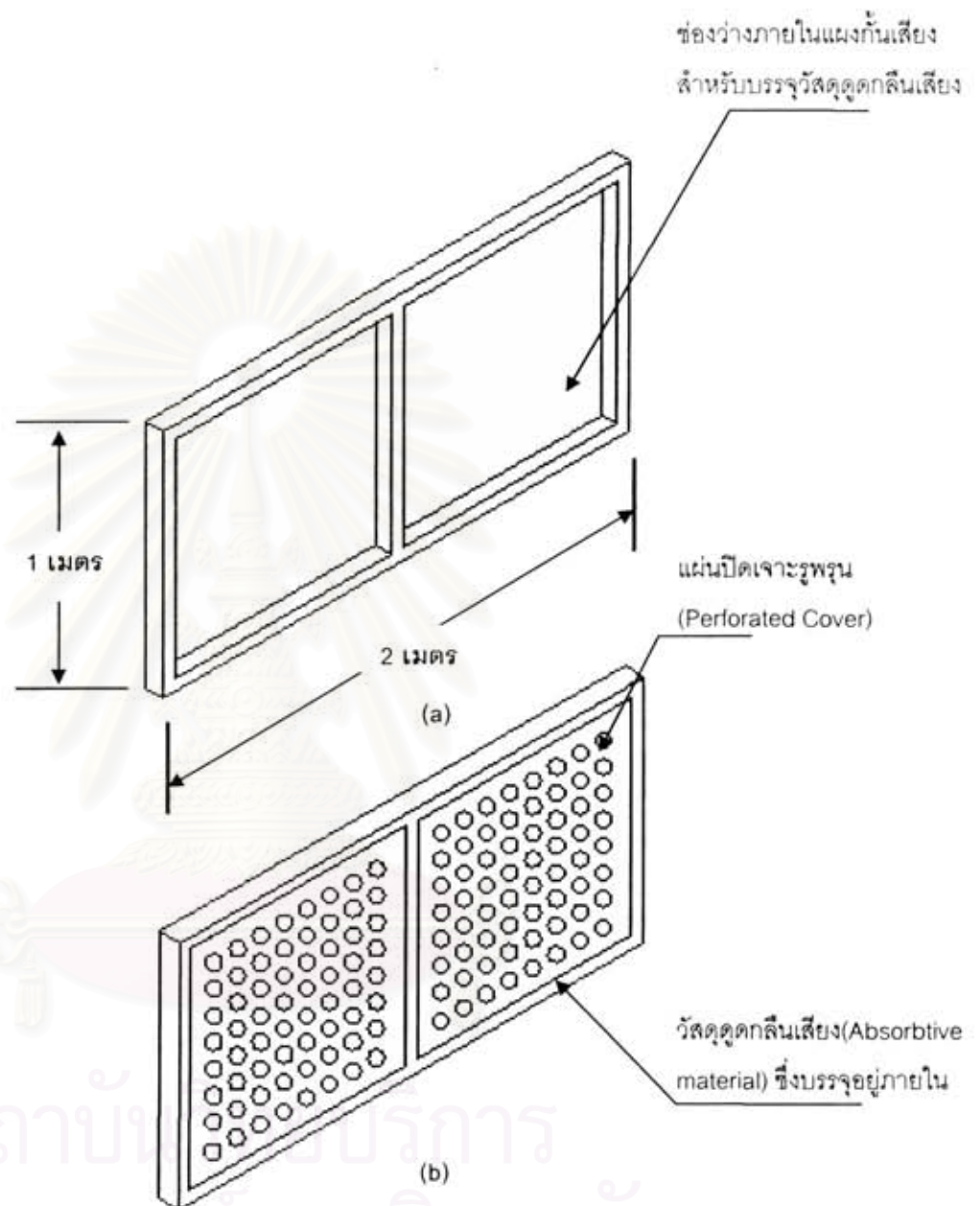


รูปที่ 5.11 รูปแบบการทำงานของแผงกั้นเสียงที่ผสมผสานการทำงานกันระหว่างการสะท้อนเสียงและการลดทอนเสียงทะลุผ่านและการดูดกลืนเสียง

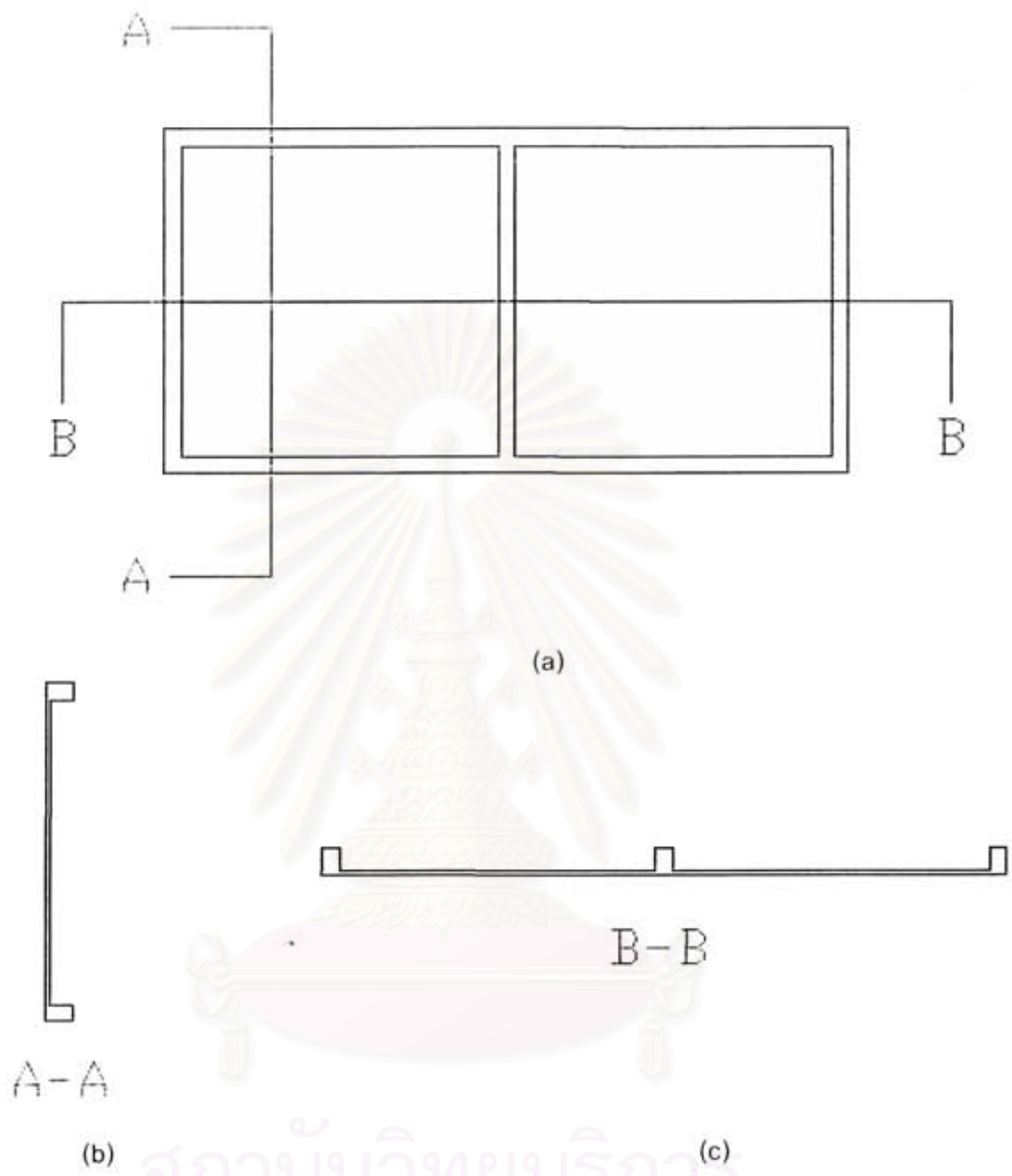
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 5.1.6 รายละเอียดรูปแบบของแผงกั้นเสียงที่ออกแบบเพื่อใช้ในงานวิจัย



- รูปที่ 5.12 (a) รูปแบบและขนาดของแผงกั้นเสียงที่ได้ออกแบบเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้
- (b) แผงกั้นเสียงที่ได้บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงไว้ภายในและทำการปิดด้วยแผ่นปิดแบบเจาะรูพรุน (Perforated Cover)



- รูปที่ 5.13 (a) รายละเอียดรูปแปลนของแผงกันเสียง  
 (b) รายละเอียดของรูปตัดในแนวด้านข้างของแผงกันเสียง  
 (c) รายละเอียดของรูปตัดในแนวด้านยาวของแผงกันเสียง

## 5.2 แนวทางการออกแบบแผงกันเสียงในเชิงวิศวกรรม

จากแนวความคิดในการออกแบบแผงกันเสียงในเชิงฟิสิกส์ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการที่จะพยายามลดระดับของเสียงที่รบกวนบริเวณรอบข้างแต่ยังต้องคำนึงความแข็งแรงในทางโครงสร้างของแผงกันเสียงด้วย ซึ่งในการออกแบบแผงกันเสียงในเชิงวิศวกรรมวิศวกรรมนั้น ความแข็งแรง และน้ำหนักของแผงกันเสียงถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ ซึ่งการออกแบบเพื่อที่จะให้ได้แผงกันเสียงที่มีทั้งความแข็งแรงและน้ำหนักเบา นั้น ก็ยังขึ้นกับปัจจัยอีกหลายปัจจัย คือ ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตแผงกันเสียง, รูปร่างลักษณะทางโครงสร้างของแผงกันเสียง, แรงภายนอกหรือน้ำหนักที่กระทำต่อแผงกันเสียง

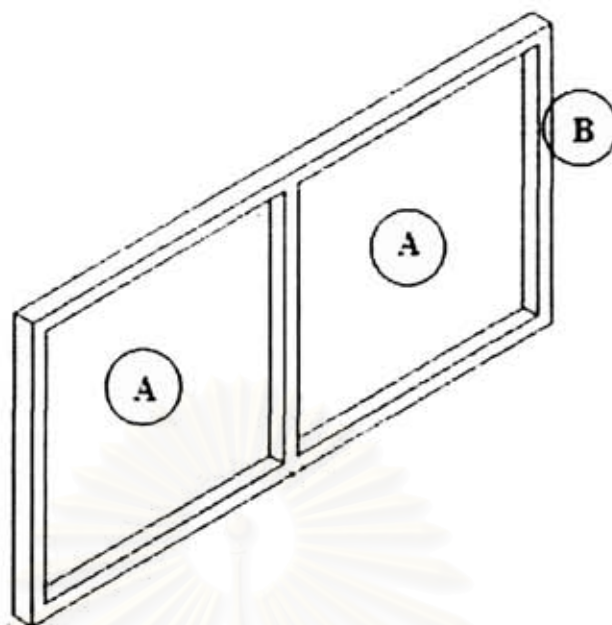
### 5.2.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตแผงกันเสียง

ในการวิจัยครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้มอร์ตาร์ (ปูนซีเมนต์ผสมทราย) เป็นวัสดุหลักในการผลิตแผงกันเสียงโดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยสารผสมเพิ่ม เช่น ซีเมนต์ลอย ซีเมนต์กลบ หรือ การลดปริมาณน้ำในส่วนผสมมอร์ตาร์โดยการเติมสารผสมเพิ่ม เช่น สารลดน้ำพิเศษสาเหตุที่เลือกมอร์ตาร์เป็นวัสดุหลักในการผลิตแผงกันเสียงเพราะมอร์ตาร์ประกอบด้วยมวลรวมขนาดเล็กคือทราย ดังนั้นจึงง่ายต่อการจะหล่อโครงสร้างที่มีลักษณะบางและขนาดของโครงสร้างที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่าคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ผสมทรายและหิน) ซึ่งมีมวลรวมขนาดใหญ่กว่าคือหินเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปในการออกแบบจะถือว่า ความหนาแน่นโดยประมาณของมอร์ตาร์จะอยู่ที่ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

### 5.2.2 รูปร่างและลักษณะทางโครงสร้างของแผงกันเสียง

จากแนวทางการออกแบบแผงกันเสียงในเชิงฟิสิกส์ที่ต้องการให้มีช่องว่างภายในแผงกันเสียงซึ่งมีข้อดีก็คือ เพื่อเป็นช่องว่างสำหรับการบรรจวัสดุดูดกลืนเสียงและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ในเชิงวิศวกรรมการมีช่องว่างตรงกลางก็มีส่วนช่วยให้สามารถลดน้ำหนักของตัวกำแพงกันเสียงเองด้วย ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างของแผงกันเสียงจะใช้การผสมผสานลักษณะโครงสร้าง 2 ชนิด ซึ่งได้แก่ ในส่วน A ดังแสดงในรูปที่ 5.14 จะเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบบาง เพื่อต้องการจะลดน้ำหนักของแผงกันเสียงให้ได้มากที่สุด การออกแบบจึงจำเป็นต้องประยุกต์การออกแบบให้เป็นโครงสร้างมีความบางมากที่สุด ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ เรียกว่า โครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ (Ferro-cement) ซึ่งจัดว่าเป็นโครงสร้างรูปแบบหนึ่งที่ประยุกต์มาจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete) ทั่วไป





รูปที่ 5.14 ลักษณะของแผงกันเสียงที่ออกแบบในการศึกษานี้

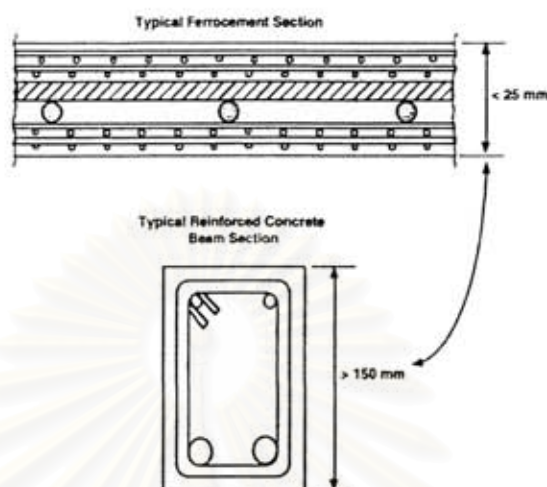
ความหมายของโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ คือโครงสร้างที่ประยุกต์มาจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งประกอบด้วยมอร์ตาร์ (Mortar) หรือปูนซีเมนต์ผสมทราย และโครงลวดตาข่าย (wire mesh) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กซึ่งมีความต่อเนื่องกัน นำมาวางซ้อนกันหลายชั้น โดยโครงตาข่ายอาจจะทำมาจากโลหะหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีความเหมาะสม

American Concrete Institute (ACI) Committee 549 ได้เสนอานิยามของเฟอร์โรซีเมนต์ว่า “เฟอร์โรซีเมนต์เป็นรูปแบบหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบแผ่นบาง ซึ่งโดยปกติจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ที่ถูกเพิ่มความแข็งแรงด้วยชั้นของโครงตาข่ายขนาดเล็กที่มีความต่อเนื่องกัน ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทำโครงตาข่ายอาจจะเป็นโลหะ หรือวัสดุอื่นที่เหมาะสม”

เนื่องจากโครงสร้างของเฟอร์โรซีเมนต์เป็นรูปแบบหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบบางจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆได้มากมาย เช่น การนำโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ไปทำเป็นตัวเรือ ดังเก็บน้ำ ดังเก็บน้ำมัน รางน้ำ ชั้นส่วนประกอบของบ้าน (แผ่นพื้น ผนัง กำแพง) เป็นแบบหล่อคอนกรีตต่างๆ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ในการซ่อมแซมโครงสร้างได้ง่าย เช่น การประยุกต์ใช้ เฟอร์โรซีเมนต์เป็นเปลือกห่อหุ้มเสาของอาคารเพื่อเพิ่มการโอบรัด (Confinement) ให้แก่เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเสามีความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 5.15 แม้ว่าเฟอร์โรซีเมนต์จะเป็นโครงสร้างที่ประยุกต์มาจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ก็มีความแตกต่างกันไม่เฉพาะเพียงแต่ขนาดของหน้าตัดเท่านั้น วัสดุที่ใช้ใน

โครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ ก็มีความแตกต่างจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาด้วย ซึ่งสามารถจำแนกวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.15 ลักษณะหน้าตัดโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์เปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

#### (ก) ซีเมนต์

ซีเมนต์ที่ใช้ควรได้มาตรฐานตาม ASTM C150-85a, ASTM C595-85 หรือที่มีมาตรฐานเทียบเท่า ปูนซีเมนต์ควรจะมีคุณภาพใหม่ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่จับกันเป็นก้อน และปราศจากวัสดุแปลกปลอม การเก็บปูนซีเมนต์ควรเก็บในที่แห้งและระยะเวลาในการเก็บควรจะให้สั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในกรณีของโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากกว่าในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ซึ่งเราอาจจะใช้วัสดุประสานเพื่อช่วยเพื่อความหนาแน่น ลดช่องว่าง และเพิ่มความทนทานให้กับวัสดุได้

(ข) สารผสมเพิ่ม (Admixture) จุดประสงค์ในการใช้สารผสมเพิ่มในโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ ได้แก่

- ลดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมอร์ตาร์ (เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดและลดการซึมผ่านของมอร์ตาร์)
- กักกระจายฟองอากาศในเนื้อมอร์ตาร์ (เพื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศในเนื้อมอร์ตาร์เพื่อป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากการแข็งตัวและละลายของน้ำในเนื้อมอร์ตาร์)
- ยับยั้งปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีกับปูนซีเมนต์ (ในกรณีที่ลวดตาข่ายชุบสังกะสี)

(ค) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

ในโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์โดยปกติมวลรวมละเอียดที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือ ทราย โดยทรายที่ใช้ควรจะสะอาด มีความแข็งแกร่ง ปราศจากสารอินทรีย์เจือปน และสารที่เป็นอันตรายต่อมอร์ตาร์ รวมทั้งตะกอนและดินเหนียว ทรายจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุอื่นที่ผสมในมอร์ตาร์ ขนาดผละของทรายที่เหมาะสมเป็นปัจจัยที่ช่วยให้มอร์ตาร์มีความสม่ำเสมอ ทำให้มีความหนาแน่นสูงและมีความสามารถในการเทได้ดี มอร์ตาร์ไม่มีการแยกตัว และช่วยลดปริมาณน้ำในมอร์ตาร์ ขนาดของทรายที่เล็กที่สุดต้องผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ได้หมด ซึ่งขนาดผละที่เหมาะสมของทรายดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เปอร์เซนต์ที่ลอดผ่านตะแกรงของทรายในตะแกรงแต่ละขนาด

เบอร์ตะแกรง	เปอร์เซนต์ที่ลอดผ่านตะแกรง
No. 8	80-100
No. 16	50-85
No. 30	25-60
No. 50	10-30
No. 100	2-10

(ง) น้ำ

น้ำที่ใช้ในส่วนผสมของมอร์ตาร์ ต้องเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากสารอินทรีย์เจือปน และสารละลายที่เป็นอันตราย ซึ่งจะนำไปสู่การสูญเสียคุณสมบัติของมอร์ตาร์ น้ำทะเลไม่สามารถนำมาผสมมอร์ตาร์ได้ น้ำที่เหมาะสมแก่การผสมมอร์ตาร์คือน้ำประปา หรือน้ำดื่ม อีกทั้งน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตยังเป็นน้ำที่เหมาะสมแก่การบ่มคอนกรีตด้วย

(จ) สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์และทำให้เกิดการแข็งตัว อัตราส่วนผสมโดยปกติของมอร์ตาร์ที่ใช้ในโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์จะประกอบด้วยอัตราส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์อยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อยู่ระหว่าง 0.35 ถึง 0.5 อัตราส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่เหมาะสมทำให้มอร์ตาร์สามารถห่อหุ้มโครงตาข่ายและพัฒนาความแข็งแรงและความหนาแน่นของชิ้นส่วน

สารลดน้ำอาจถูกใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเทได้และระยะเวลาการก่อตัว (ระยะเวลาที่คอนกรีตใช้ในการก่อตัวเพื่อให้สามารถรับแรงได้) ซึ่งพฤติกรรมของมอร์ตาร์จะมี



ลักษณะคล้ายกับคอนกรีตปกติแต่ความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดคือ ขนาดของมวลรวมที่ใช้ ซึ่งมอร์ตาร์ที่มีคุณภาพดีจะมีกำลังและความทนทานกว่าคอนกรีตที่มีคุณภาพดี เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน

#### (ข) โครงตาข่ายเสริมในเฟอร์โรซีเมนต์ (Reinforcing Mesh)

หนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญของเฟอร์โรซีเมนต์คือ โครงตาข่าย ซึ่งในแต่ละห้องที่จะมีการผลิตโครงตาข่ายที่ผลิตซึ่งมีคุณภาพแตกต่างกัน แต่โดยทั่วไปจะประกอบด้วยลวดเส้นเล็ก ซึ่งนำมาสานหรือนำมาเชื่อมกันเป็นโครงตาข่าย แต่สิ่งที่สำคัญคือโครงตาข่ายต้องสามารถตัดได้ง่ายด้วยมือดังแสดงในรูปที่ 5.16 หรือในบางกรณีโครงตาข่ายอาจจะต้องมีความอ่อนตัวพอที่จะตัดให้เป็นมุมแหลม ซึ่งการทำงานของโครงตาข่ายในช่วงแรก มอร์ตาร์ที่ยังไม่เกิดการแข็งตัวจะอาศัยโครงตาข่ายเป็นตัวยึดเกาะในระหว่างการก่อสร้าง เมื่อมาถึงขั้นตอนที่มอร์ตาร์เริ่มแข็งตัว โครงตาข่ายจะทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงดึงของโครงสร้าง ซึ่งจะถือว่ามอร์ตาร์ไม่สามารถรับแรงดึงได้เลย

เมื่อโครงสร้างเกิดการกระแทก การบิดและ การตัด ระหว่างช่วงที่โครงสร้างรับแรง เป็นผลให้เกิดรอยร้าวและแตกออกได้ ถ้าปริมาณโครงตาข่ายมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะรับแรงเหล่านี้

ปัจจัยที่จะช่วยลดโอกาสการแตกร้าวลงนั้นขึ้นกับความหนาแน่นและขนาดของลวดตาข่ายที่ฝังอยู่ในโครงสร้างของเฟอร์โรซีเมนต์ พฤติกรรมเชิงกลของเฟอร์โรซีเมนต์ขึ้นอยู่กับ ชนิดคุณภาพ การวางตัว และกำลังของโครงตาข่าย

The American Concrete Institute (ACI) committee 549 ได้นิยามว่า โครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ ไม่สามารถจำกัดว่าต้องใช้โครงตาข่ายที่ทำจากโลหะเท่านั้น ซึ่ง ACI กล่าวว่า "โครงตาข่ายอาจจะทำมาจากโลหะ หรือวัสดุที่เหมาะสม ซึ่งจากนิยามนี้จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ โครงตาข่ายที่ทำมาจากไม้ไผ่หรือวัสดุอื่นๆ"



รูปที่ 5.16 การตัดโครงตาข่ายเป็นรูปทรงที่ต้องการและทำการจามมอร์ด้าริให้ยึดเกาะกับโครงตาข่ายที่ตัดให้เป็นรูปร่างที่ต้องการไว้

จากรูปที่ 5.14 จะเห็นว่าโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ถือเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับโครงสร้างในส่วน A ของแผงกันเสียง แต่แผงกันเสียงที่ใช้โครงสร้างเป็นเฟอร์โรซีเมนต์เพียงอย่างเดียวนั้นจะไม่มี ความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานสภาพแวดล้อมเมื่อทำการติดตั้งบนทางพิเศษ อีกทั้งต้องทำการประยุกต์แผงกันเสียงเพื่อให้เกิดช่องว่างในแผงกันเสียง ดังนั้นจึงประยุกต์โดยการออกแบบขอบของแผงกันเสียงให้มีขนาดหน้าตัดใหญ่กว่าแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ซึ่งแสดงในส่วน ของโครงสร้างส่วน B ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ซึ่งขอบของแผงกันเสียงนี้จะทำการออกแบบให้มีโครงสร้างเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 5.2.3 แรงภายนอกที่กระทำต่อแผงกันเสียง

แรงหรือน้ำหนักภายนอกต่างๆที่กระทำที่ต่อแผงกันเสียงที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบแผงกันเสียงนั้นประกอบด้วยแรงต่างๆ ดังนี้

#### (ก) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)

น้ำหนักของแผงกันเสียงเป็นน้ำหนักที่จะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบทุกครั้ง เนื่องจากการออกแบบต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างซึ่งในงานวิจัยนี้คือ คันขอบสะพานบนทางด่วน (Parapet) ที่รองรับแผงกันเสียง ซึ่งน้ำหนักบรรทุกคงที่ของแผงกันเสียงนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุในการผลิตแผงกันเสียง ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุในการผลิตแผงกันเสียง ซึ่งในการออกแบบโดยทั่วไป หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่า 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



**(ข) แรงลม (Wind Load)**

แรงลมสามารถแปรเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิประเทศและความสูงของโครงสร้างที่ต้องปะทะกับลม ซึ่ง ตามข้อบัญญัติ กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522 กำหนดให้ใช้ค่าแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารไม่น้อยกว่าค่าดังต่อไปนี้

ที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ที่สูงกว่า 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	80 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ที่สูงกว่า 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	120 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ที่สูงกว่า 40 เมตร	160 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

**(ค) แรงกระทบ (Impact Load)**

แรงกระทบสามารถแบ่งเป็นแรงที่เกิดจากการชนหรือกระทบจากยานพาหนะหรือวัตถุที่ลอยมากกระทบกับแผงกันเสียง FHWA ได้กล่าวว่า "การออกแบบแผงกันเสียงไม่มีทางเป็นไปได้ที่จะออกแบบให้สามารถทนแรงชนหรือแรงกระทบจากยานพาหนะอย่างเต็มที่ จึงมีการป้องกันโดยอาจจะทำการติดตั้งรั้วเพื่อป้องกันไม่ให้อานพาหนะเข้าชนหรือกระทบกับแผงกันเสียงโดยตรง" ซึ่งอย่างไรก็ตามปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงชนหรือแรงกระทบ โดยเฉพาะพื้นผิวของแผงกันเสียง โดยผนังกันเสียงที่ทำมาจากวัสดุมวลเบาจะมีความทนทานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีมวลมากกว่า

**5.2.4 วิธีการออกแบบแผงกันเสียง**

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวความคิดในการออกแบบได้หลายวิธี ได้แก่ USD (Ultimate strength design), LSD (Limit state design), LRFD (Load and resistance factor design), WSD (Working stress design), ASD (Allowable stress design)

ซึ่งการออกแบบโดยวิธี WSD หรือ ASD บางครั้งเราเรียกว่าวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ โดยพิจารณาออกแบบให้ส่วนโครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานภายใต้หลักเกณฑ์ว่าหน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นภายในส่วนของโครงสร้างต้องมีค่าไม่เกินกว่าหน่วยแรงใช้งานที่ยอมให้ที่ได้จากการลดทอนหน่วยแรงสูงสุด (ประลัย) ด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor Safety) ที่เหมาะสม

ส่วนการออกแบบโดยวิธี USD, LSD, LRFD เป็นวิธีการออกแบบโดยพิจารณาหาขนาดของส่วนโครงสร้างคอนกรีตและปริมาณของเหล็กเสริมที่สภาวะก่อนที่ส่วนของโครงสร้างนั้น จะเกิดการวิบัติ น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบได้จากการคูณน้ำหนักบรรทุกใช้งานด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก



ซึ่งในการออกแบบแมงกั้นเสียงในการวิจัยครั้งนี้จะใช้การออกแบบโดยวิธี WSD ซึ่งมีแนวความคิดในการออกแบบก็คือ

$$\text{หน่วยแรงใช้งานจริง} \leq \text{หน่วยแรงที่ยอมให้}$$

ซึ่งค่าหน่วยแรงที่ยอมให้สามารถหาได้จาก

หน่วยแรงที่ยอมให้ = กำลังของวัสดุ / ตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor)

หน่วยแรงเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำต่อโครงสร้างซึ่งยังไม่มีรอยแตกร้าว ไม่ว่าจะ เป็น แรงดึง แรงดัด หรือแรงเฉือน สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{หน่วยแรงที่เกิดจากแรงดึง} = \frac{N}{A_c} \quad (5.3)$$

$$\text{หน่วยแรงที่เกิดจากแรงดัด} = \frac{M}{S} \quad (5.4)$$

$$\text{หน่วยแรงที่เกิดจากแรงเฉือน} = \frac{VQ}{Ib} \quad (5.5)$$

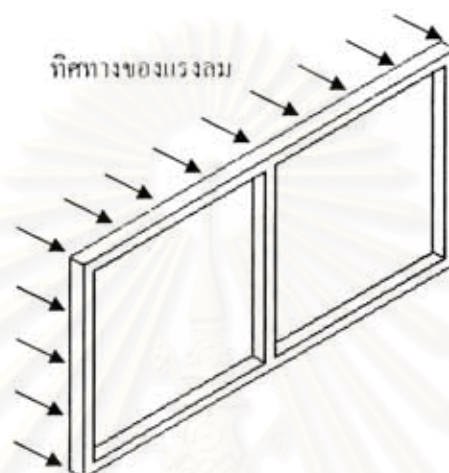
- โดย
- $N$  คือ แรงดึงตามแนวแกนภายในโครงสร้าง
  - $M$  คือ โมเมนต์ดัดภายในโครงสร้าง
  - $V$  คือ แรงเฉือนภายในที่กระทำต่อโครงสร้าง
  - $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้าง
  - $S$  คือ โมดูลัสของหน้าตัด
  - $Q$  คือ โมเมนต์ของพื้นที่เหนือระนาบแรงเฉือน
  - $I$  คือ โมเมนต์ที่สองของหน้าตัด
  - $b$  คือ ความกว้างของระนาบแรงเฉือน

### 5.3 รายละเอียดการออกแบบแมงกั้นเสียงที่ใช้ในการศึกษานี้

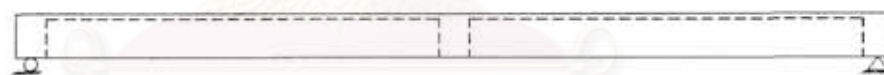
#### 5.3.1 การวิเคราะห์แรงภายนอกที่มากระทำต่อแมงกั้นเสียง

เนื่องจากแรงภายนอกหลักที่มากระทำต่อแมงกั้นเสียงโดยตรงนั้น คือแรงลมที่มาปะทะในแนวตั้งจากกับแมงกั้นเสียงดังแสดงในรูปที่ 5.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแมงกั้นเสียงอยู่ในแนวตั้ง

และรับแรงลมซึ่งเป็นแรงที่กระทำด้านข้างต่อแผงกันเสียง ดังนั้นในการวิเคราะห์แรงภายนอกเพื่อออกแบบแผงกันเสียงจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงน้ำหนักของตัวแผงกันเสียงเอง แต่การวิเคราะห์ในกรณีที่จะต้องคำนึงถึงน้ำหนักของตัวแผงกันเสียง ก็คือกรณีที่มีการวางแผงกันเสียงในแนวราบดังแสดงในรูป 5.18 โดยในการวิเคราะห์แรงภายนอกที่มากระทำต่อแผงกันเสียงเราจะทำการวิเคราะห์ใน 2 กรณี คือ (ก) กรณีที่ทำการติดตั้งและรับแรงลมที่มาปะทะในด้านข้าง (ข) กรณีที่มีการวางแผงกันเสียงบนพื้นราบ



รูปที่ 5.17 ทิศทางของแรงลมที่กระทำต่อกำแพงกันเสียง

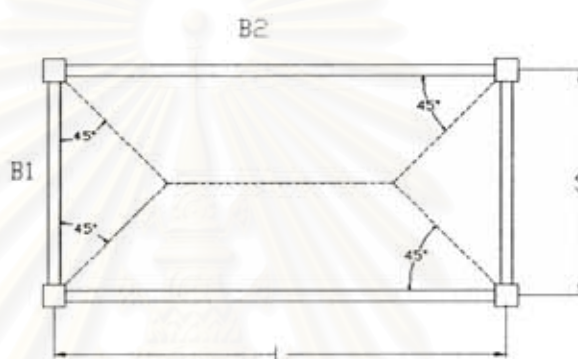


รูปที่ 5.18 การวางแผงกันเสียงบนพื้นราบ

ในการวิเคราะห์เริ่มแรกจะทำการวิเคราะห์ในกรณีที่แผงกันเสียงรับแรงลมที่มากระทำในทิศทางด้านข้างของแผงกันเสียงดังแสดงในรูปที่ 5.17 ซึ่งแรงลมที่กระทำต่อด้านข้างของแผงกันเสียงจะเป็นกรณีที่ได้นำแผงกันเสียงไปติดตั้งยังสถานที่จริง ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่ต้องพิจารณาน้ำหนักของตัวแผงกันเสียงเองและหลังจากวิเคราะห์ผลจากแรงลมที่กระทำด้านข้างของแผงกันเสียงแล้ว จึงทำการออกแบบหน้าตัดของชิ้นส่วนแผงกันเสียงแล้วจึงนำหน้าตัดที่ออกแบบมาทำการวิเคราะห์น้ำหนักของตัวเองและทำการวิเคราะห์ว่าแผงกันเสียงที่ออกแบบขนาดหน้าตัดเพื่อต้านทานแรงลมสามารถรับน้ำหนักของตัวเองได้หรือไม่ในกรณีที่วางแผงกันเสียงบนพื้นราบ

## (ก) การวิเคราะห์แรงลมที่กระทำต่อแผงกันเสียง

- กำหนดให้แรงลมที่กระทำต่อแผงกันเสียงตามมาตรฐาน กทม. ที่สูงกว่า 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร มีค่าเท่ากับ 120 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
- จากมาตรฐาน ว.ส.ท. พิจารณารูปที่ 5.19 เป็นแผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง S ยาว L ถ้าน้ำหนักบรรทุกสม่ำเสมอจนแตกแล้วแนวแตกจะประมาณตามแนวเส้นประซึ่งเกิดจากลากเส้นทำมุม 45 องศากับขอบจากมุมทั้งสี่ไปตัดกับเส้นกึ่งกลางที่ขนานกับด้านยาว คาน B1 จะรับน้ำหนักจากแผ่นพื้นเป็นรูปสามเหลี่ยม และคาน B2 จะรับน้ำหนักจากแผ่นพื้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.19 การกระจายน้ำหนักจากพื้นลงบนคาน

ดังนั้นเมื่อต้องการที่จะถ่ายน้ำหนักหรือแรงภายนอกที่กระทำต่อแผ่นพื้นในหน่วย กิโลกรัมต่อตารางเมตร ให้เป็นแรงที่กระทำต่อคานแต่ละด้านในหน่วย กิโลกรัมต่อเมตร ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{น้ำหนักจากพื้นลงบนคานด้านสั้น} \quad w_s = \frac{wS}{3} \quad (5.6)$$

$$\text{น้ำหนักจากพื้นลงบนคานด้านยาว} \quad w_L = \frac{wS}{3} \cdot \frac{(3-m^2)}{2} \quad (5.7)$$

เมื่อ  $w$  คือ น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดของแผ่นพื้น ,กิโลกรัมต่อตารางเมตร  
 $m$  คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวด้านสั้นของแผ่นพื้นต่อความยาวด้านยาวของแผ่นพื้น ( $\frac{S}{L}$ )



- ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ที่กระทำต่อแผ่นพื้นจากมาตรฐาน  
ว.ส.ท. ดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 สัมประสิทธิ์โมเมนต์คัตของแผ่นพื้น [คณะกรรมการวิศวกรรมสถาน  
แห่งประเทศไทย, 2517]

โมเมนต์	ช่วงสั้น						ช่วงยาว สำหรับ m ทุกค่า
	ค่าต่างๆ ของ m						
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5 และ ต่ำกว่า	
กรณีที่ 1 ช่วงพื้นภายใน โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน - ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.033 - 0.025	0.040 - 0.030	0.048 - 0.036	0.055 - 0.041	0.063 - 0.047	0.083 - 0.062	0.033 - 0.025
กรณีที่ 2 ไม่ต่อเนื่องกันด้านเดียว โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน - ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.041 0.021 0.031	0.048 0.024 0.036	0.055 0.027 0.041	0.062 0.031 0.047	0.069 0.035 0.052	0.085 0.042 0.064	0.041 0.021 0.031
กรณีที่ 3 ไม่ต่อเนื่องกันสองด้าน โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน - ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.049 0.025 0.037	0.057 0.028 0.043	0.064 0.032 0.048	0.071 0.036 0.054	0.078 0.039 0.059	0.090 0.045 0.068	0.049 0.025 0.037
กรณีที่ 4 ไม่ต่อเนื่องกันสามด้าน โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน - ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.058 0.029 0.044	0.066 0.033 0.050	0.074 0.037 0.056	0.082 0.041 0.062	0.090 0.045 0.068	0.098 0.049 0.074	0.058 0.029 0.044
กรณีที่ 5 ไม่ต่อเนื่องกันทั้งสี่ด้าน โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน - ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	- 0.033 0.050	- 0.038 0.057	- 0.043 0.064	- 0.047 0.072	- 0.053 0.080	- 0.055 0.083	- 0.033 0.050

เมื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์จากตารางที่ 5.5 แล้วก็ทำการหาค่าโมเมนต์จากสมการ

$$M = CwS^2 \quad (5.8)$$

ดังนั้นการถ่ายแรงซึ่งในกรณีนี้ที่ศึกษาคือแรงลม (120 กิโลกรัมต่อตารางเมตร) จากแผ่นเพอร์โพรซีเมนต์ลงไปสู่ขอบของแผงกันเสียงนั้นทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- อัตราส่วนของความยาวด้านสั้นต่อความยาวด้านยาว

$$m = \left( \frac{86}{89.5} \right) = 0.96$$

- น้ำหนักจากแผ่นเพอร์โพรซีเมนต์ถ่ายลงสู่ของด้านสั้นของขอบแผงกันเสียง

$$w_s = \frac{(120)(0.86)}{3} = 34.4 \text{ กิโลกรัมต่อเมตร}$$

- น้ำหนักจากแผ่นเพอร์โพรซีเมนต์ถ่ายลงสู่ของด้านยาวของขอบแผงกันเสียง

$$w_L = \frac{(120)(0.86) * (3 - 0.96^2)}{3 * 2} = 35.75 \text{ กิโลกรัมต่อเมตร}$$

- โมเมนต์ลบของแผ่นเพอร์โพรซีเมนต์ในด้านสั้น

$$M_s = (0.033)(120)(0.86)^2 = 2.93 \text{ กิโลกรัม - เมตร}$$

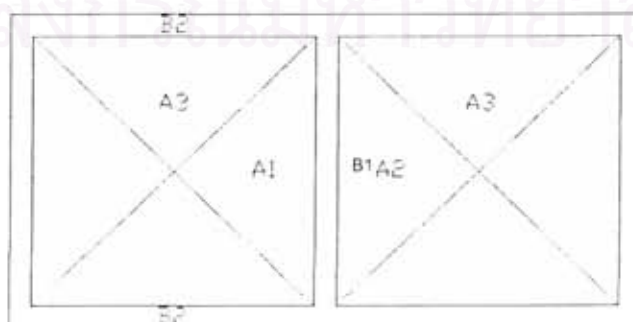
- โมเมนต์ลบของแผ่นเพอร์โพรซีเมนต์ในด้านยาว

$$M_L = (0.033)(120)(0.895)^2 = 3.17 \text{ กิโลกรัม - เมตร}$$

- โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วงของแผ่นเพอร์โพรซีเมนต์

$$M_L = (0.025)(120)(0.86)^2 = 2.22 \text{ กิโลกรัม - เมตร}$$

พิจารณาน้ำหนักที่ถ่ายลงขอบของแผงกันเสียงตัวกลาง (B1) ดังแสดงในรูปที่ 5.20



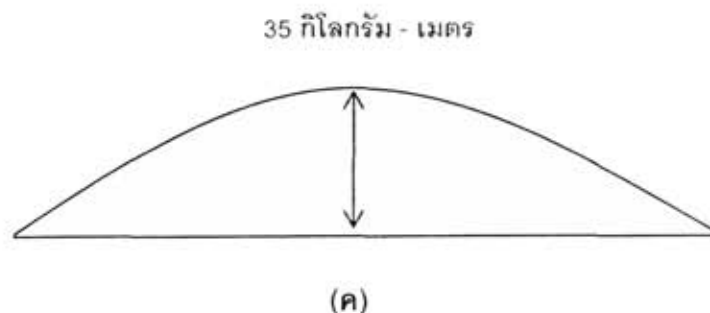
รูปที่ 5.20 การแบ่งพื้นที่เพื่อถ่ายน้ำหนักลงขอบของแผงกันเสียง

- จะเห็นว่าคาน B1 จะรับน้ำหนักที่ถ่ายจากพื้นที่ A1 และ A2 เป็นซึ่งเป็น น้ำหนักจากแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ที่ถ่ายลงสู่ของด้านสั้นของขอบแผงกัน เสี่ยง ดังนั้น
- น้ำหนักของคาน B1 จะต้องรับมีน้ำหนักของพื้นที่  $A1+A2 = 34.4+34.4 = 68.8$  กิโลกรัม/เมตร
- น้ำหนักที่ถูกถ่ายลงสู่คาน B1 จะถูกแบ่งครึ่งเพื่อถ่ายลงสู่คาน B2 และ B3 ซึ่งน้ำหนักจากคาน B1 จะกลายเป็นแรงที่กระทำแบบจุด (point load) ต่อคาน B2 และ B3 โดยน้ำหนักจากคาน B1 ที่ถูกถ่ายลงคาน B2 และ B3 คือ  $(68.8)(1)/2 = 34.4$  กิโลกรัม
- น้ำหนักจากแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ที่ถ่ายลงสู่คาน B2 และ B3 โดยตรง ซึ่ง ได้มาจากน้ำหนักจากพื้นที่ A3 คือ 35.75 กิโลกรัม/เมตร



(ข)





- รูปที่ 5.21 (ก) รูปแบบและขนาดของแรงที่กระทำต่อ คาน B2 และ B3  
(เนื่องจากแรงลม)
- (ข) แผนภาพแรงเฉือน (Shear Force Diagram) ของคาน B2 และ B3
- (ค) แผนภาพโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) ของคาน B2 และ B3

จากการคำนวณพบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่กระทำต่อคาน B2 และ B3 มีค่าเท่ากับ 35 กิโลกรัม - เมตร ซึ่งเป็นค่าโมเมนต์ที่จะนำไปใช้ในการออกแบบเพื่อหาขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมสำหรับแผงกันเสียง

ส่วนในกรณีที่สอง คือกรณีที่วางแผงกันเสียงลงบนพื้นราบนั้นจะทำการวิเคราะห์หลังจากทำการออกแบบขนาดขอบของแผงกันเสียงและขึ้นส่วนแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ที่มีขนาดเหมาะสมเพื่อจะใช้ขนาดที่ได้ออกแบบมาคำนวณหาหน้าทับบรรทุกคงที่ของแผงกันเสียงต่อไป

### 5.3.2 รายละเอียดการคำนวณการออกแบบหาขนาดขอบของแผงกันเสียง

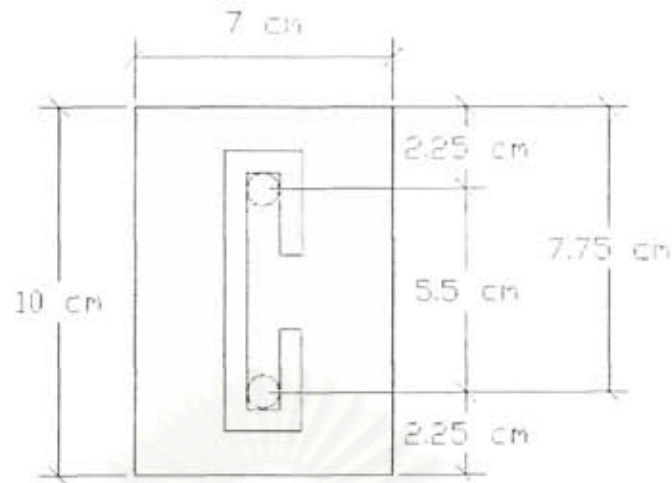
- (ก) ข้อมูลเริ่มต้นในการออกแบบ (อ้างอิงจากผลการทดสอบวัสดุในบทที่ 4)
- หน่วยแรงอัดสูงสุดของมอร์ต้าร์ 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
  - กำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม (Reinforcing steel) 2400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
  - กำลังรับแรงดึงสูงสุดของลวดโครงตาข่าย 4600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
  - ค่า Modulus of Elasticity ของมอร์ต้าร์ประมาณ  $2 \times 10^5$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

- ค่า Modulus of Elasticity ของลวดตาข่าย (wire mesh)  $2 \times 10^6$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- ค่า Modulus of Elasticity ของเหล็กเสริม (Reinforcing steel)  $2 \times 10^6$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

### (ข) รายการคำนวณออกแบบขอบของแผงกันเสียง

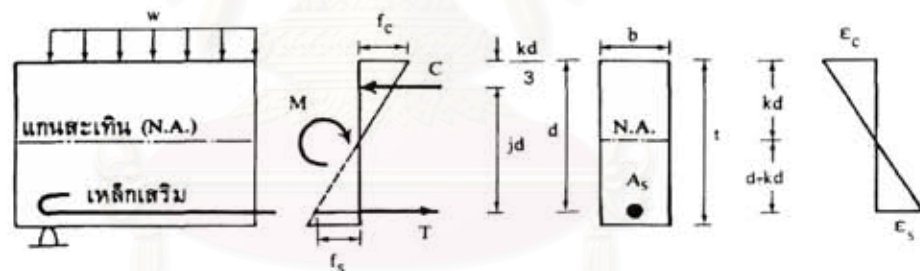
จากรูปที่ 5.14 ขอบของตัวแผงกันเสียงจะถือว่าเป็นโครงสร้างหลักที่เป็นตัวต้านทานน้ำหนักหรือแรงภายนอกที่กระทำต่อกำแพงกันเสียงมากที่สุด จึงต้องออกแบบให้มีความแข็งแรง ซึ่งดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อข้างต้นนั้น ได้ทำการออกแบบแผงกันเสียงด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working stress Design) ซึ่งหลังจากทำการวิเคราะห์แรงภายนอกที่กระทำต่อขอบของแผงกันเสียงแล้วจึงทำการออกแบบหาขนาดหน้าตัดของแผงกันเสียงที่เหมาะสมซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- หน่วยแรงอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ ( $f_c'$ ) เท่ากับ 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- หน่วยแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม ( $f_y$ ) เท่ากับ 2400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของมอร์ตาร์ ( $f_c$ ) เท่ากับ  $0.45 \cdot f_c' = 0.45 \cdot 180 = 81$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- อัตราส่วนระหว่าง ค่า Modulus of Elasticity ( $n$ ) ของลวดตาข่ายกับ ค่า Modulus of Elasticity ของมอร์ตาร์เท่ากับ 10
- กำหนดขนาดหน้าตัดของขอบแผงกันเสียงให้มีขนาด  $7 \cdot 10$  เซนติเมตร โดยกำหนดให้ความหนาของมอร์ตาร์ที่หุ้มเหล็กเสริม (Covering) เท่ากับ 2.25 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.22
- เลือกใช้เหล็กกลมขนาด 9 มิลลิเมตร มีกำลังดึงสูงสุด 2400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเหล็กเสริมที่มีพื้นที่หน้าตัด ( $A_s$ ) เท่ากับ  $0.636$  ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.22
- ระยะจากผิวบนของคานถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมล่าง ( $d$ ) มีค่าเท่ากับ  $7 + 1.5 = 8.5$  เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 รายละเอียดหน้าตัดของแฉกกันเสียงที่ใช้ในการออกแบบ

จากรูปที่ 5.23 เป็นพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งในการออกแบบเราต้องหาค่าต่างๆดังที่แสดงในรูปที่ 5.23 เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดของคานที่ทำการออกแบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.23 พฤติกรรมในการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

- อัตราส่วนพื้นที่เหล็กเสริมต่อพื้นที่มอร์ตาร์

$$(p) = \frac{A_s}{bd} = \frac{0.636}{(7)(7.75)} = 0.0117$$

- คำนวณหาค่า k จากสมการ

$$k = \sqrt{2np + (np)^2} - np = 0.38$$

- คำนวณหาค่า j จากสมการ

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.38}{3} = 0.873$$



- คำนวณหาค่า R จากสมการ  $R = \frac{1}{2} * f_c * k * j$

$$R = (0.5) (81) (0.38) (0.873)$$

$$R = 13.43 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

พิจารณาหาโมเมนต์ดัดสูงสุดขณะหน่วยแรงในเหล็กขึ้นถึงจุดสูงสุด และอีกค่าขณะหน่วยแรงในมอร์ตาร์ขึ้นถึงจุดสูงสุด

- โมเมนต์สูงสุดขณะหน่วยแรงในเหล็กถึงจุดสูงสุด

$$(M_s) = f_s * A_s * j * d$$

$$= (1200) (0.636) (0.873) (0.0775)$$

$$= 51.6 \text{ กิโลกรัม - เมตร}$$

- โมเมนต์สูงสุดขณะหน่วยอัดในมอร์ตาร์ถึงจุดสูงสุด

$$(M_s) = Rbd^2$$

$$= (13.43)(0.07)(7.75)^2$$

$$= 56.5 \text{ กิโลกรัม - เมตร}$$

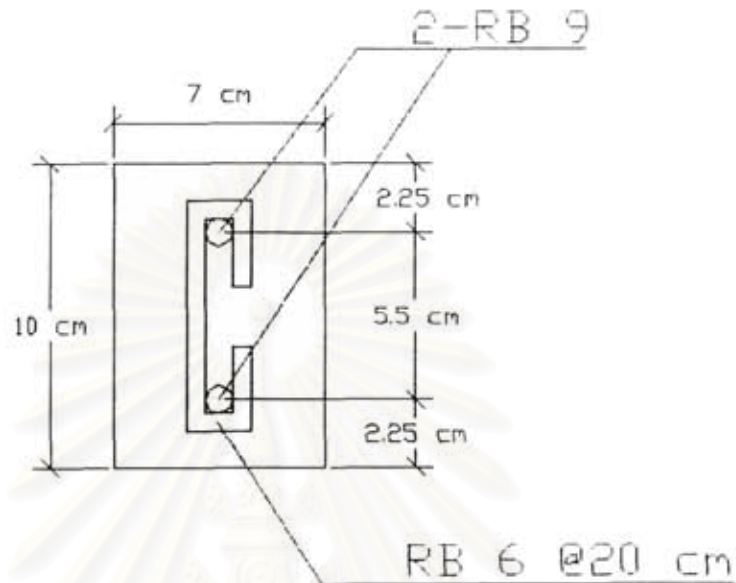
ดังนั้นจากการคำนวณจึงสามารถสรุปได้ว่า โมเมนต์ดัดสูงสุดที่คาน B2 และ B3 สามารถรับได้มีค่าเท่ากับ 57 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมเมื่อรับโมเมนต์ดัดไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมและทำการตรวจสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนของของแผงกันเสียง จากในรูปที่ 5.21 (ข) จะพบว่าเกิดแรงเฉือนสูงสุดขึ้นในคาน B2 และ B3 มีค่าเท่ากับ 52.95 กิโลกรัม ซึ่งตามมาตรฐาน ว.ส.ท กำหนดให้ มอร์ตาร์สามารถรับหน่วยแรงเฉือนได้  $0.29\sqrt{f_c}$  แต่รับได้ไม่เกิน  $1.32\sqrt{f_c}$  ซึ่งค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการออกแบบมีค่าเท่ากับ 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรดังนั้น หน้าตัดคานที่เป็นมอร์ตาร์จะสามารถรับแรงเฉือนได้ดังสมการต่อไปนี้

แรงเฉือนสูงสุดที่หน้าตัดสามารถรับได้

$$= 0.29\sqrt{f_c} * b * d = 0.29 * \sqrt{180} * 7 * 7.75 = 211 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า คาน B2 และ B3 สามารถรับแรงเฉือนที่มากกระทำต่อแผงกันเสียงได้โดยไม่จำเป็นต้องใส่เหล็กปลอกเพื่อรับแรงเฉือนแต่จะใส่เหล็กปลอกที่มีขนาดเล็กและมี

ระยะห่างมากที่สุด (ใช้เหล็กปลอกขนาด RB-6 @ 20 เซนติเมตร) เพื่อเป็นตัวยึดเหล็กบนและเหล็กล่างที่รับแรงดึงของคาน ดังแสดงรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 5.24

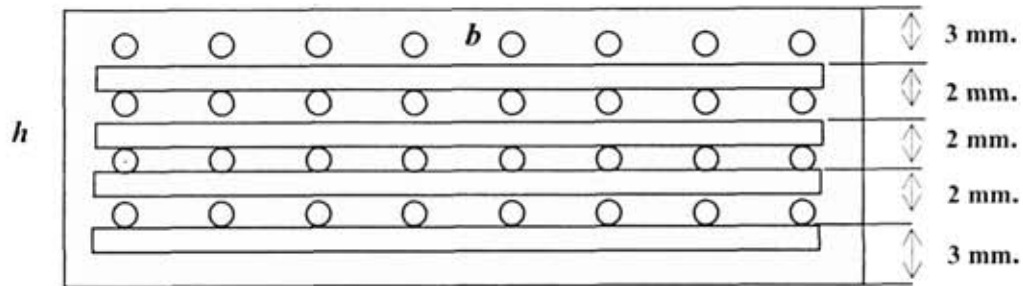


รูปที่ 5.24 รายละเอียดของหน้าตัดขอบแมงกัันเสียดและรายละเอียดของเหล็กเสริม

### 5.3.3 รายละเอียดการคำนวณการออกแบบหาขนาดของแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์

Antoine E. Naaman ได้เสนอวิธีการออกแบบหน้าตัดรับแรงดัดของแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ดังต่อไปนี้ พิจารณาหน้าตัดของเฟอร์โรซีเมนต์ที่สมมุติให้หน้าตัดมีขนาดความกว้าง 1 เมตร โดยทำการหาขนาดของลวดตาข่าย ความหนาของหน้าตัดเฟอร์โรซีเมนต์และ จำนวนชั้นของลวดตาข่ายที่ใช้ซึ่งจะกำหนดขนาดดังต่อไปนี้

ความกว้าง (b)	1	เมตร
ความหนาของหน้าตัด (h)	12	มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตาข่าย	1	มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างเส้นลวดในโครงตาข่าย	19	มิลลิเมตร
จำนวนชั้นของลวดตาข่ายที่ใช้	4	ชั้น



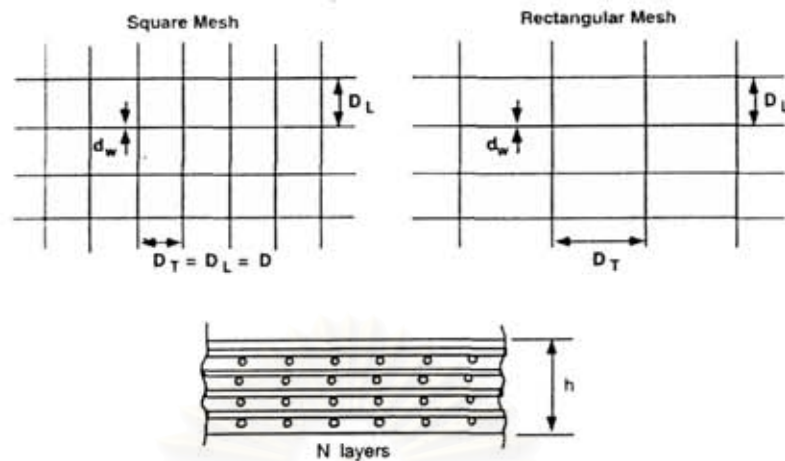
รูปที่ 5.25 แสดงภาพหน้าตัดของเฟอร์โรซีเมนต์และรายละเอียดของลวดตาข่ายภายในหน้าตัดของชั้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์

ซึ่งจากรูป 5.25 สามารถกำหนดตำแหน่งของแนวโครงตาข่ายดังต่อไปนี้

$d1 = 3$  มิลลิเมตร,  $d2 = 5$  มิลลิเมตร,  $d3 = 7$  มิลลิเมตร,  $d4 = 9$  มิลลิเมตร

- หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของมอร์ตาร์ท ( $\sigma_{mu}$ ) = 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ซึ่งได้จากหน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต = 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
- หน่วยแรงที่ยอมให้ของลวดโครงตาข่าย = 2100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (จากหน่วยแรงดึงประลัยของลวดโครงตาข่าย 4500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
- ค่า Modulus of Elasticity ของลวดตาข่าย =  $2 \times 10^5$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- ค่า Modulus of Elasticity ของมอร์ตาร์ท =  $2 \times 10^5$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- อัตราส่วนระหว่าง ค่า Modulus of Elasticity ( $n$ ) ของลวดตาข่ายกับ ค่า Modulus of Elasticity ของมอร์ตาร์ท = 10
- พื้นที่หน้าตัดของลวดโครงตาข่าย =  $\frac{\pi}{4}(1^2) = 0.785$  ตารางมิลลิเมตร
- ระยะห่างของลวดบนโครงตาข่าย = 19 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ความกว้างของโครงตาข่าย 1 เมตร จำนวนเส้น ลวดเท่ากับ  $1000/19 = 53$  เส้น
- พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดใน 1 ชั้นซึ่งมีความกว้าง 1 เมตร = 41.6 ตารางมิลลิเมตร
- อัตราส่วนระหว่างปริมาตรเหล็กเสริมต่อปริมาตรทั้งหมด,  $V_s$  (ในกรณีนี้ที่โครงตาข่ายมีลักษณะเป็น รูปสี่เหลี่ยม) ดังแสดงในรูปที่ 5.26





รูปที่ 5.26 แสดงรูปร่างของโครงตาข่ายทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ซึ่ง

$$V_r \quad \text{สามารถหาได้จากสูตร} \quad V_r = \frac{N \cdot \pi \cdot d \cdot w^2}{4 \cdot h} \left[ \frac{1}{D_L} + \frac{1}{D_T} \right]$$

$N$  คือ จำนวนชั้นของโครงตาข่าย

$d_w$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นลวดในโครงตาข่าย

$D_L$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางของเส้นลวดในแนวตามยาว

$D_T$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางของเส้นลวดในแนวตามขวาง

$h$  คือ ความหนาของชั้นส่วนของเฟอร์โรซีเมนต์

โดยค่า  $V_r$  สามารถแบ่งเป็นสองแบบคือ ค่า  $V_{rl}$  ที่คิดเฉพาะปริมาตรเหล็กในแนวยาว หรือคิดเฉพาะปริมาตรเหล็กในแนวขวาง ดังนั้น

$$V_r = V_{rl} + V_{rt}$$

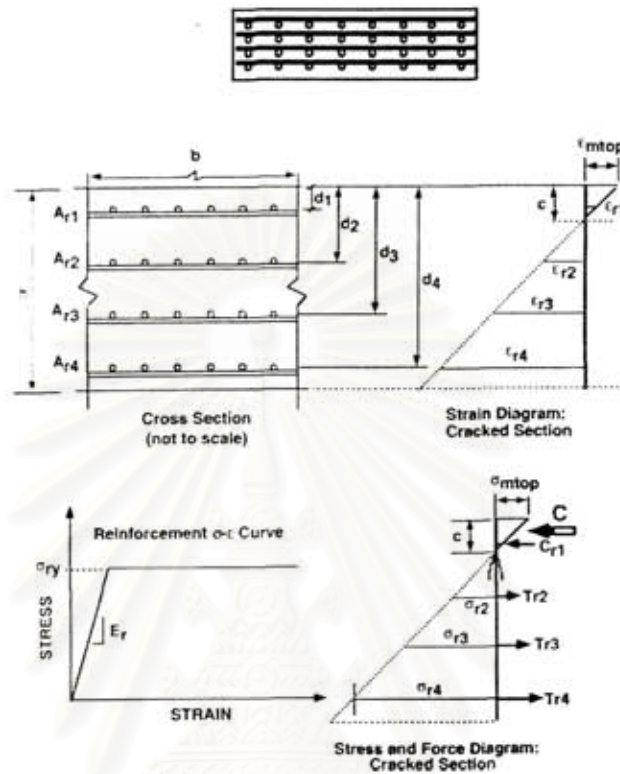
$$V_{rl} = \frac{N \cdot \pi \cdot d_w^2}{4 \cdot h} \left[ \frac{1}{D_L} \right]$$

$$V_{rt} = \frac{N \cdot \pi \cdot d_w^2}{4 \cdot h} \left[ \frac{1}{D_T} \right]$$

ในกรณีที่โครงตาข่ายมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะทำให้ได้สมการดังนี้

$$V_r = \frac{N \cdot \pi \cdot d_w^2}{2 \cdot h \cdot D}$$

ฉะนั้นเมื่อทำการแทนค่ากับลักษณะของโครงตาข่ายที่ใช้ในงานวิจัยและขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์ที่ต้องการจะได้ค่า  $V_r = 0.017$  และ  $V_{rc} = 0.033$



รูปที่ 5.27 ลักษณะหน้าตัดของชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์, การวางลวดโครงตาข่าย, และแผนภาพของ ความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ของหน้าตัด

(ก) ทำการหาแรงดัดที่ทำให้เกิดการแตกร้าว (Cracking Moment),  $M_{cr}$  และ ความโค้ง (Curvature),  $\phi$  ที่เหมาะสม

- ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) ของหน้าตัดชิ้นส่วน เฟอร์โรซีเมนต์,  $I_r$  หาได้จากสมการ

$$(I_r)_{uncracked} = \frac{bh^3}{12} + (n-1) \cdot \sum A_{r,i} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_i\right)^2$$

$$(I_r)_{uncracked} = 90,774 \text{ เซนติเมตร}^4$$

- โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน ( $I_r$ ) = 83,334 เซนติเมตร<sup>4</sup>

- ค่า Modulus of Elasticity ของ ชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์หาได้จาก

$$E_c = E_m V_m + E_r V_{rL}$$

$$= 2.264 \times 10^6 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

ดังนั้น ค่าแรงดัดที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแก่หน้าตัด (Cracking Moment) หาได้จาก

$$M_{cr} = \frac{2 \cdot \sigma_{mu} \cdot (I_{tr})_{uncracked}}{h} = 4.45 \text{ กิโลกรัม - เมตร}$$

$$\text{ค่าความโค้ง } (\phi) \text{ ที่สอดคล้องกับ } M_{cr} = \frac{M}{E_c \cdot (I_{tr})_{uncracked}} = 0.022 \text{ เมตร}^{-1}$$

(ข) ทำการหาค่าโมเมนต์ภายนอกสูงสุด (Maximum Service Moment),  $M_{service}$  ที่ชิ้นส่วนรับได้และค่าความโค้งที่เหมาะสม ( $\phi$ )

ทำการหาแนวแกนสะเทิน (Neutral Axis) ของแรงดัดบนหน้าตัดของชิ้นส่วน โดยสมมติให้แนวแกนสะเทินอยู่ระหว่างชั้นของโครงตาข่ายชั้นแรกกับชั้นที่สอง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$(bc) \cdot \frac{c}{2} + (n-1) \cdot A_{r1} \cdot (c-d_1) = n \cdot A_{r2} \cdot (d_2-c) + n \cdot A_{r3} \cdot (d_3-c) + n \cdot A_{r4} \cdot (d_4-c) \quad (5.22)$$

ซึ่งทำการหาค่า  $c$  ที่เหมาะสมจะได้ ค่า  $c$  ซึ่งเป็นระยะของแนวแกนสะเทินที่วัดจากผิวบนสุดของหน้าตัด = 2.74 มิลลิเมตร

ทำการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดใหม่ (Transform Section) จากสูตร

$$(I_{tr})_{cracked} = \frac{bc^3}{3} + (n-1) \cdot A_{r1} \cdot (c-d_1)^2 + n \cdot A_{r2} \cdot (d_2-c)^2 + n \cdot A_{r3} \cdot (7.5-c)^2 + n \cdot A_{r4} \cdot (10.5-c)^2$$

$$(I_{tr})_{cracked} = 23,546.9 \text{ มิลลิเมตร}^4$$

จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถหาค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ลวดในโครงตาข่ายรับได้ คือ 2100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นค่าแรงดัดภายนอกสูงสุดที่ชิ้นส่วนสามารถรับได้คือ



$$M_{service} = \frac{(\sigma_r)_{all} \cdot I_{tr}}{n \cdot (d_i - c)} = 25.1 \text{ กิโลกรัม - เมตร}$$

ค่าความโค้งของหน้าตัดที่เกิดการแตกร้าว (Cracked Section) มีค่าดังนี้

- ค่าความโค้งจากโมเมนต์ที่ทำให้เกิดการแตกร้าว (Cracked Moment)

$$= \frac{M_{cr}}{E_c \cdot (I_{tr})_{cracked}} = 0.09 \text{ เมตร}^{-1}$$

- ค่าความโค้งจากโมเมนต์ภายนอกสูงสุด (Maximum Service Moment)

$$= \frac{M_{service}}{E_c \cdot (I_{tr})_{cracked}} = 0.35 \text{ เมตร}^{-1}$$

(ค) หน่วยแรงอัดสูงสุดที่เกิดจากแรงดัดภายนอกสูงสุด,  $\sigma_{m,top}$  ที่กระทำต่อ  
ชั้นส่วน ได้จาก

$$\sigma_{m,top} = \frac{M \cdot c}{I_{tr}} = 242 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

ทำการหาหน่วยแรงของโครงตาข่ายในแต่ละชั้นในหน้าตัดของชั้นส่วนที่ได้รับค่าแรง  
ดัดภายนอกสูงสุดชั้นส่วนสามารถรับได้

$$\sigma_{r,1} = -35.1 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

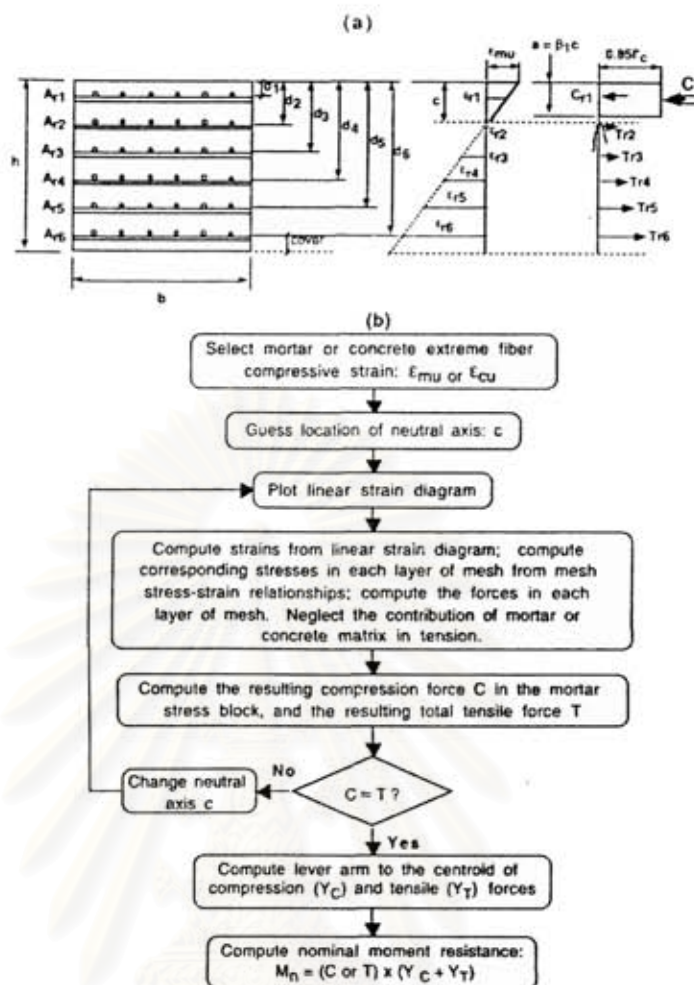
$$\sigma_{r,2} = 677 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$\sigma_{r,3} = 1388 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$\sigma_{r,4} = 2100 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

(ซึ่งหน่วยแรงสูงสุดไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม)

(ง) ทำการหาค่าความต้านทานดัดต่อโมเมนต์ประลัย (Nominal Bending  
Resistance) ที่กระทำต่อชั้นส่วน ซึ่งดำเนินการตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 5.28 (a) และ 5.28  
(b)



- รูปที่ 5.28 a) แสดงแบบจำลอง (model) ของหน้าตัดชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์ เพื่อใช้ในวิเคราะห์หาความต้านทานประลัยของชิ้นส่วน  
b) แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์เพื่อหาความต้านทานประลัยของชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์ [Antonie, 2000]

ค่า Modulus of Elasticity ของลวด  $E_s$  คือ  $2 \times 10^6$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความเครียดของลวดเมื่อรับหน่วยแรงดึงประลัย,  $\epsilon_s$  คือ  $4500/2 \times 10^6 = 2.25 \times 10^{-3}$  และ ความเครียดประลัยของคอนกรีตซึ่งกำหนดโดย ACI,  $\epsilon_{mu} = 0.003$  และทำการสมมุติระยะแกนละเทินของหน้าตัดที่รับแรงดัดประลัย = 2.72 มิลลิเมตร

ความเครียดในโครงตาข่ายได้มาจากความสัมพันธ์

$$\varepsilon_{r1} = \left( \frac{d_1 - c}{c} \right) \cdot \varepsilon_{mu}$$

ถ้า  $\varepsilon_{r1} \leq \varepsilon_{r0} = 2.25 \times 10^{-3}$  ดังนั้น  $\sigma_{r1} = E_r \cdot \varepsilon_{r1}$

ถ้า  $\varepsilon_{r1} \geq \varepsilon_{r0} = 2.25 \times 10^{-3}$  ดังนั้น  $\sigma_{r1} = \sigma_{r0} = 4500$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สำหรับโครงตาข่ายในชั้นแรก

$$\varepsilon_{r1} = \frac{d_1 - c}{c} \cdot \varepsilon_{mu} = -1.43 \times 10^{-4}$$

$$\sigma_{r1} = E_r \cdot \varepsilon_{r1} = -286.89 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$C_{r1} = (\sigma_{r1} - \beta_1 \cdot f'_c) \cdot A_{r1} = 34.26 \text{ กิโลกรัม}$$

สำหรับโครงตาข่ายในชั้นสอง

$$\varepsilon_{r2} = \frac{d_2 - c}{c} \cdot \varepsilon_{mu} = 1.76 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{r2} = E_r \cdot \varepsilon_{r2} = 3.52 \times 10^3 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$T_{r2} = (\sigma_{r2} - \beta_1 \cdot f'_c) \cdot A_{r2} = 1455.82 \text{ กิโลกรัม}$$

สำหรับโครงตาข่ายในชั้นสาม

$$\varepsilon_{r3} = \frac{d_3 - c}{c} \cdot \varepsilon_{mu} = 3.67 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{r3} = E_r \cdot \varepsilon_{r3} = 4.50 \times 10^3 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$T_{r3} = (\sigma_{r3} - \beta_1 \cdot f'_c) \cdot A_{r3} = 1860.15 \text{ กิโลกรัม}$$

สำหรับโครงตาข่ายในชั้นสี่

$$\varepsilon_{r4} = \frac{d_4 - c}{c} \cdot \varepsilon_{mu} = 5.57 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{r4} = E_r \cdot \varepsilon_{r4} = 4.50 \times 10^3 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$T_{r4} = (\sigma_{r4} - \beta_1 \cdot f'_c) \cdot A_{r4} = 1860.15 \text{ กิโลกรัม}$$



ค่าแรงอัดในคอนกรีต มีค่าดังต่อไปนี้

$$C_c = 0.85 * f'_c * b * \beta_1 * c = 5141.86 \text{ กิโลกรัม}$$

จากแรงความสมดุลย์ของสมการ  $\sum T - \sum C = 0$

แต่ถ้าผลรวมของสมการมีค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์ จะต้องทำการ Trial and Error ตำแหน่งของ Neutral Axis ใหม่เพื่อให้ผลรวมของแรงในหน้าตัดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

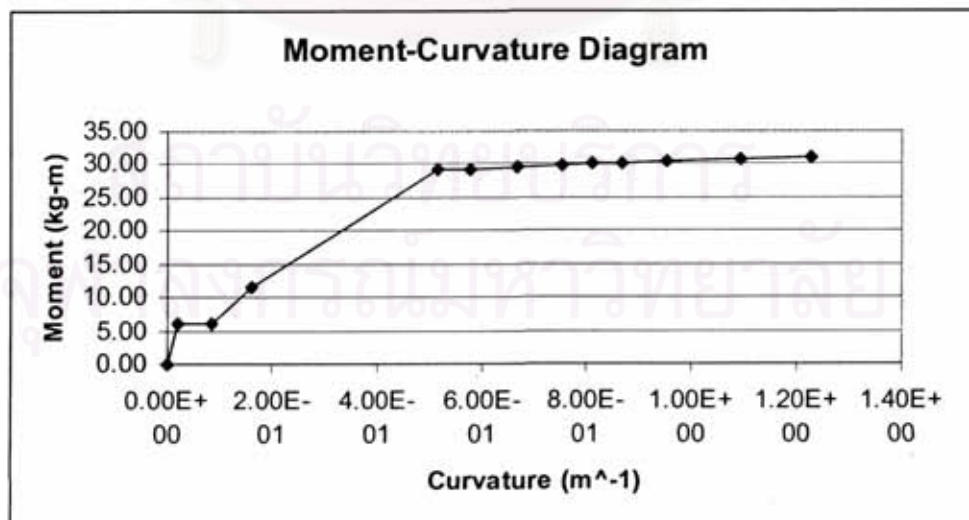
ซึ่งตำแหน่งของแนวแกนสะเทินของหน้าตัดของชิ้นส่วนที่เกิดการประลัยคือ 3.15 มิลลิเมตร

เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของชิ้นส่วนจากสูตรต่อไปนี้

$$M_n = T_{r2} * (d_2 - \frac{\beta_1 * c}{2}) + T_{r3} * (d_3 - \frac{\beta_1 * c}{2}) + T_{r4} * (d_4 - \frac{\beta_1 * c}{2}) - C_{r3} * (d_3 - \frac{\beta_1 * c}{2})$$

$$M_n = 30.46 \text{ kg-m}$$

หลังจากทำการวิเคราะห์ความต้านทานของชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์แล้วจึงทำค่าความต้านทานในสถานะต่างๆมา สร้างเป็นแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับความโค้งของชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับความโค้งที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเฟอร์โรซีเมนต์

จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่แผ่นเพอร์โรซีเมนต์สามารถรับได้ก่อนเกิดการแตกร้าวมีค่าเท่ากับ 4.45 กิโลกรัม – เมตร ซึ่งแรงลมที่มาปะทะกับด้านข้างของแผงกันเสียงนั้นทำให้เกิดโมเมนต์สูงสุดเท่ากับ 2.93 กิโลกรัม – เมตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชั้นส่วนแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ที่ทำการออกแบบสามารถรับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดจากแรงลมได้

ทำการตรวจสอบความต้านทานในการรับแรงเฉือนของแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ ซึ่งค่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นกับแผ่นเพอร์โรซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 35.75 กิโลกรัมต่อเมตร ดังนั้นแรงเฉือนสูงสุดที่แผ่นเพอร์โรซีเมนต์สามารถรับได้มีค่าเท่ากับ

$$0.29 * \sqrt{f_c} * b * d = (0.29)(\sqrt{180})(100)(1.2) = 467 \text{ กิโลกรัมต่อเมตร}$$

หลังจากทำการวิเคราะห์ขนาดของแผงกันเสียงแล้วจึงทำการวาดรายละเอียดของรูปร่าง, ขนาด และการวางเหล็กเสริมของแผงกันเสียงดังแสดงในหน้าที่ 5-44 ถึง 5-51

#### 5.3.4 การวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบแผงกันเสียงเมื่อวางแผงกันเสียงบนพื้นราบ

หลังจากทำการออกแบบแผงกันเสียงเพื่อรับแรงลมบนทางด่วนก็จะทำการหาน้ำหนักโดยประมาณของตัวแผงกันเสียงซึ่งหาได้จากปริมาตรมอร์ตาร์ทั้งหมดของแผงกันเสียงคูณด้วยหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ (2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งมีน้ำหนักของแผงกันเสียง 1 แผ่น มีน้ำหนักประมาณ

$$\text{น้ำหนักของแผงกันเสียง} = ((2 * 1 * 0.1) - (2 * 0.895 * 0.86 * 0.088)) * 2400 = 155 \text{ กิโลกรัม}$$

ซึ่งน้ำหนักจากของตัวแผงกันเสียงเองที่จะถ่ายลงสู่คาน B2 และ B3 ดังแสดงในรูป 5.18 มีดังนี้

$$\text{น้ำหนักของแผ่นเพอร์โรซีเมนต์} = (2400)(0.012) = 2.88 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเมตร}$$

$$\text{น้ำหนักของคาน} = (2400)(0.07)(0.1) = 16.8 \text{ กิโลกรัมต่อเมตร}$$

ทำการถ่ายน้ำหนักลงคาน B1 และทำการวิเคราะห์เหมือนกับในหัวข้อ 5.3.1 (ก) โดยใช้น้ำหนักของตัวแผงกันเสียงเป็นแรงภายนอกที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

$$\text{น้ำหนักจากแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ถ่ายลงสู่ของด้านบนของขอบแผงกันเสียง}$$

$$w_s = \frac{(2.88)(0.86)}{3} = 0.83 \text{ กิโลกรัมต่อเมตร}$$

- น้ำหนักจากแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ถ่ายลงสู่ของต้านยาวของขอบแผงกันเสียง

$$w_L = \frac{(2.88)(0.86)}{3} * \frac{(3 - 0.96^2)}{2} = 0.858 \text{ กิโลกรัมต่อเมตร}$$

- โมเมนต์ลบของแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ในด้านสั้น

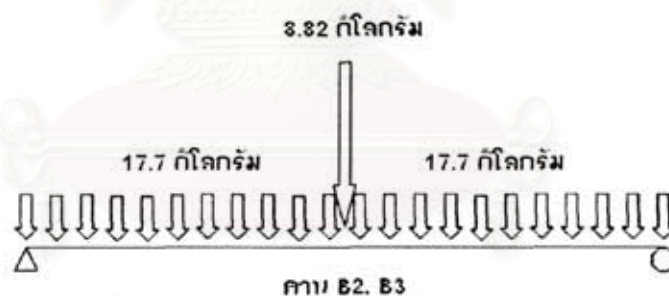
$$M_s = (0.033)(2.88)(0.86)^2 = 0.07 \text{ กิโลกรัม-เมตร}$$

- โมเมนต์บวกของแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ในด้านยาว

$$M_L = (0.025)(2.88)(0.86)^2 = 0.053 \text{ กิโลกรัม-เมตร}$$

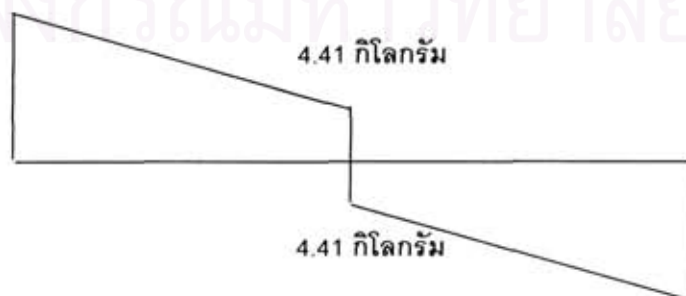
- น้ำหนักที่ถูกถ่ายลงสู่คาน B1 จะถูกแบ่งครึ่งเพื่อถ่ายลงสู่คาน B2 และ B3 ซึ่งน้ำหนักจากคาน B1 จะกลายเป็นแรงที่กระทำแบบจุด (point load) ต่อคาน B2 และ B3 โดยน้ำหนัก จากคาน B1 ที่ถูกถ่ายลงคาน B2 และ B3 คือ  $(0.83)(1)/2 = 0.415$  กิโลกรัม และน้ำหนักของคาน B1 มีค่าเท่ากับ 16.8 กิโลกรัมต่อเมตร ดังนั้นน้ำหนักที่จะถ่ายลงสู่คาน B2 และ B3 คือ  $0.415 + (16.8/2) = 8.82$  กิโลกรัม

- น้ำหนักจากแผ่นเพอร์โรซีเมนต์ที่ถ่ายลงสู่คาน B2 และ B3 โดยตรงนั้นมาจากน้ำหนักจากพื้นที่ A3 คือ 0.858 กิโลกรัมต่อเมตร และน้ำหนักของตัวคาน B2 และ B3 คือ 16.8 กิโลกรัม ดังนั้นน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่คาน B2 และ B3 โดยตรงคือ  $16.8 + 0.858 = 17.7$  กิโลกรัมต่อเมตร



(ก)

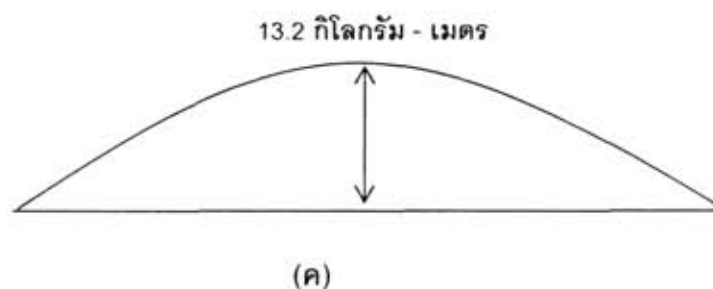
22.1 กิโลกรัม



(ข)

22.1 กิโลกรัม



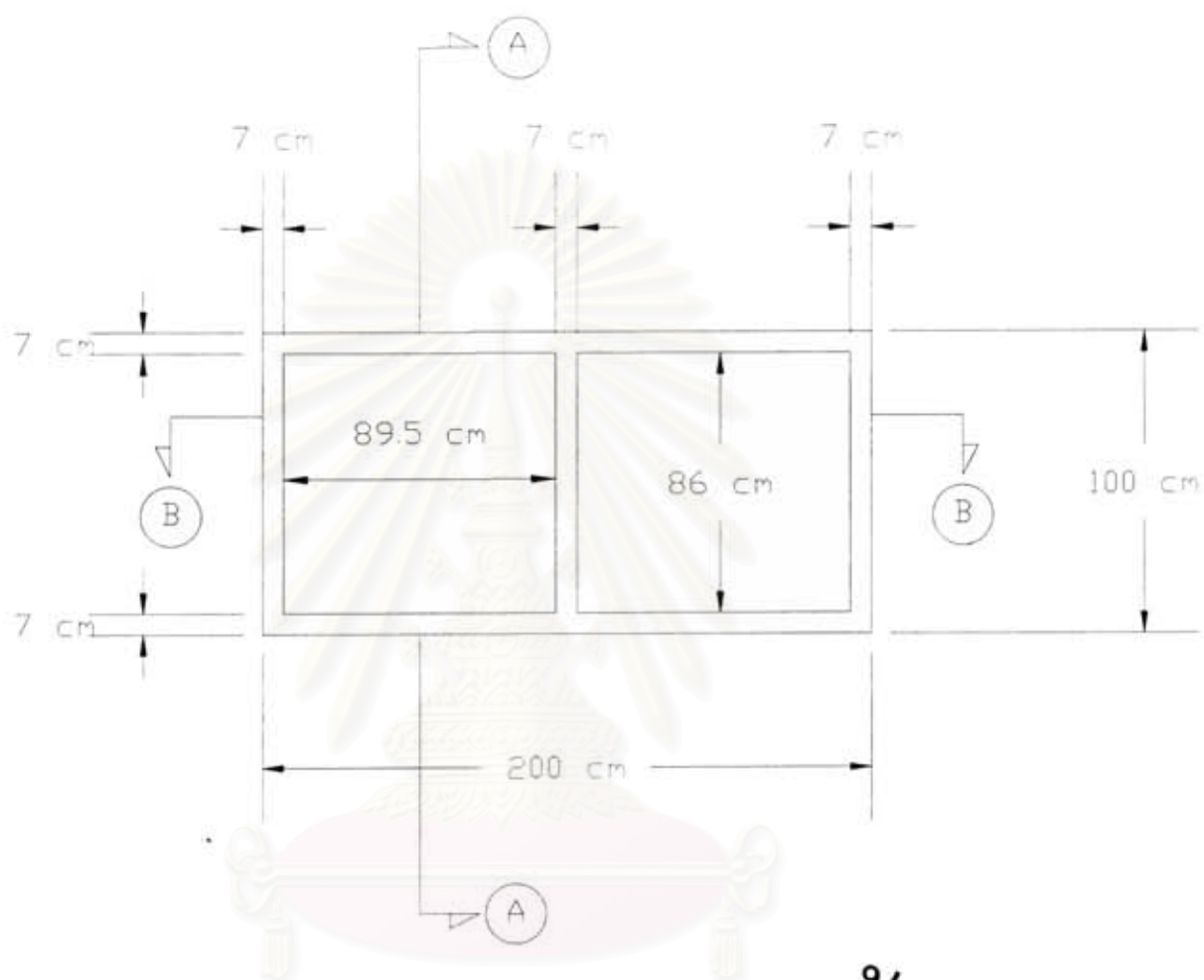


- รูปที่ 5.30 (ก) รูปแบบและขนาดของแรงที่กระทำต่อ คาน B2 และ B3 (เนื่องจากน้ำหนักของแผงกันเสียงเอง)
- (ข) แผนภาพแรงเฉือน (Shear Force Diagram) ของคาน B2 และ B3
- (ค) แผนภาพโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) ของคาน B2 และ B3

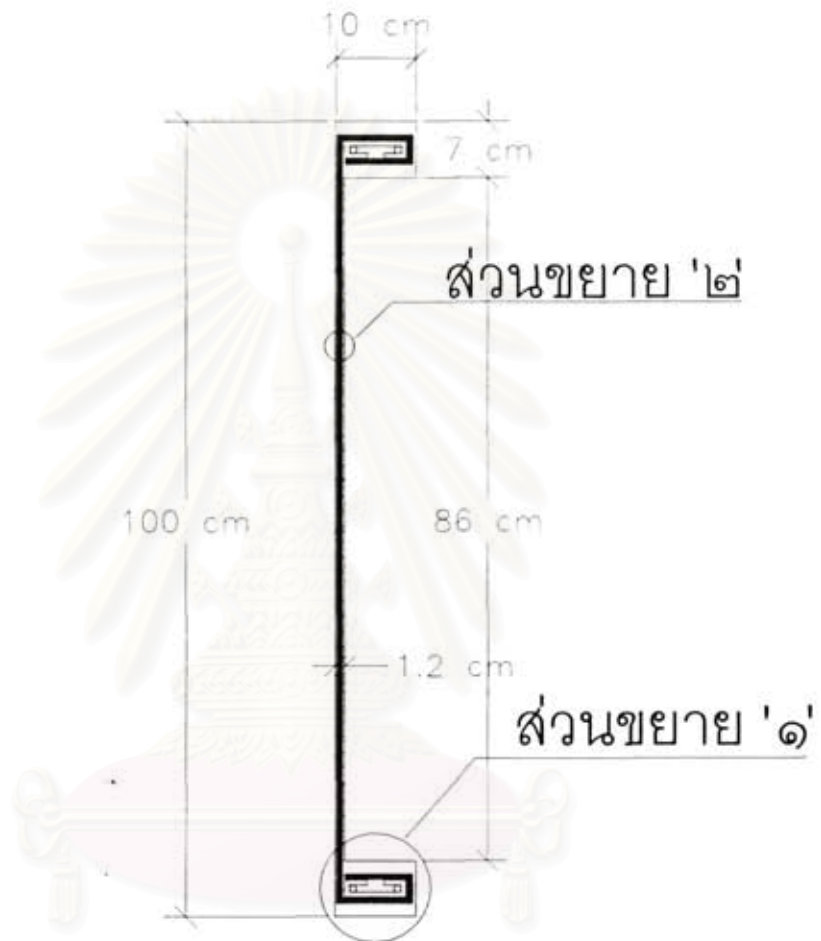
จะเห็นว่าค่าโมเมนต์และค่าแรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักของแผงกันเสียงเองนั้นซึ่งกระทำต่อคาน B2 และ B3 นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดจากการแรงลมที่มาปะทะต่อแผงกันเสียงเอง ดังนั้นจึงสามารถใช้ขนาดของแผงกันเสียงที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2 และ 5.3.3

#### 5.4 แบบรายละเอียดของแผงกันเสียง

รายละเอียดของแผงกันเสียงที่ออกแบบ สามารถสรุปได้ว่าเป็นแผงกันเสียงคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งใช้มอร์ตาร์แทนคอนกรีตมีการเสริมเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแก่โครงสร้าง โดยแผงกันเสียงมีขนาด  $2 \times 1$  ตารางเมตร มีช่องว่างตรงกลาง โดยแผงกันเสียงมีการแบ่งลักษณะทางโครงสร้าง 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นแผ่นผนังบาง (แผ่นเฟอร์โรซีเมนต์) ที่มีความหนา 12 มิลลิเมตร และคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด  $7 \times 10$  ตารางเซนติเมตร ซึ่งรายละเอียดการวางเหล็กเสริมและระยะของมอร์ตาร์ที่หล่อหุ้มเหล็กเสริมจะแสดงรายละเอียดของแบบดังต่อไปนี้

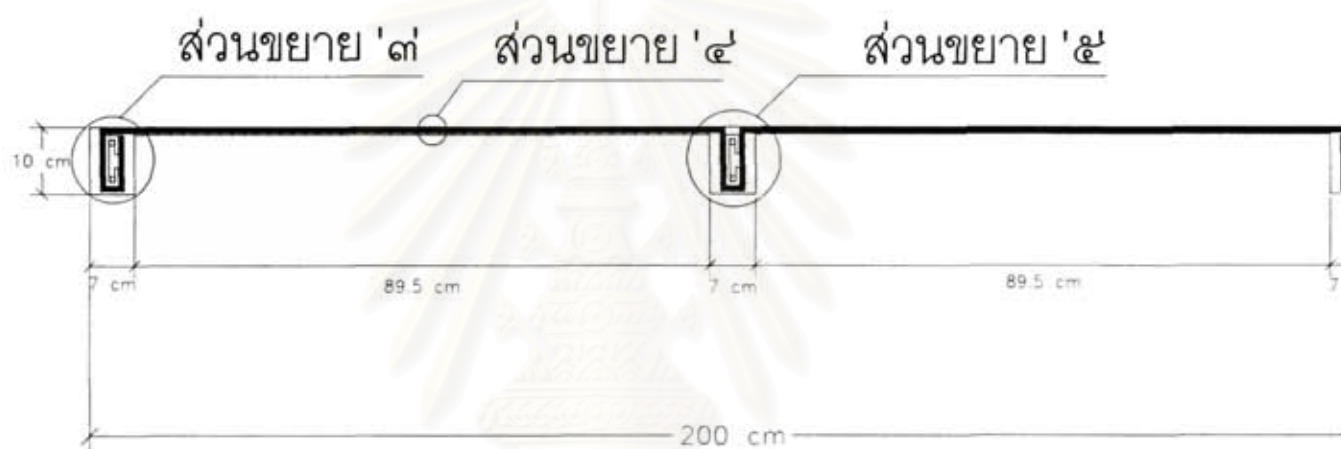


รูปแปลนของแผงกั้นเสียง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



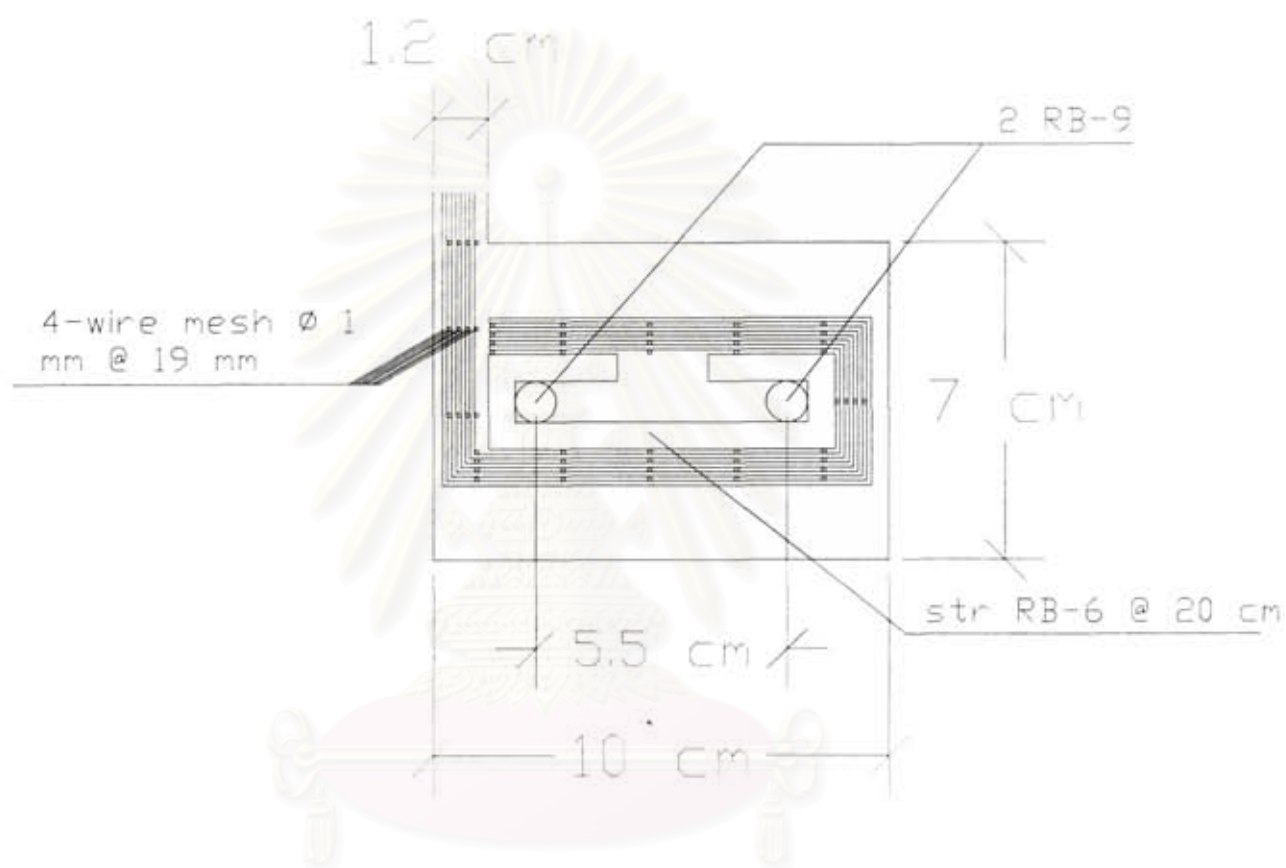
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
หน้าตัด A-A



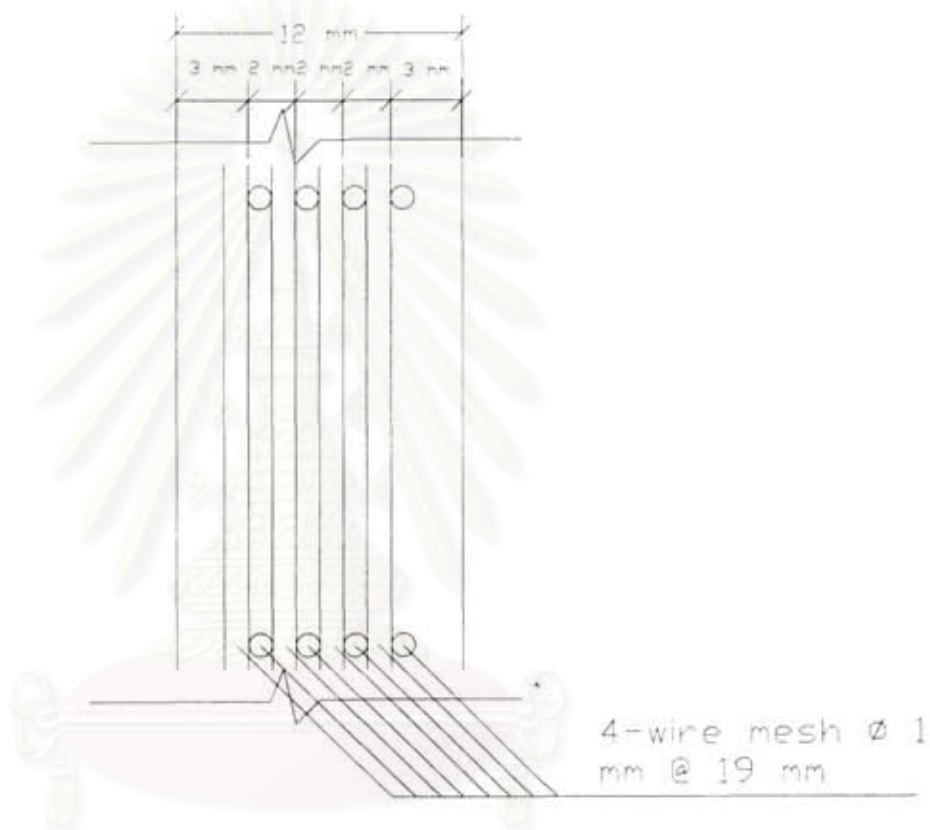


หน้าตัด B-B

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



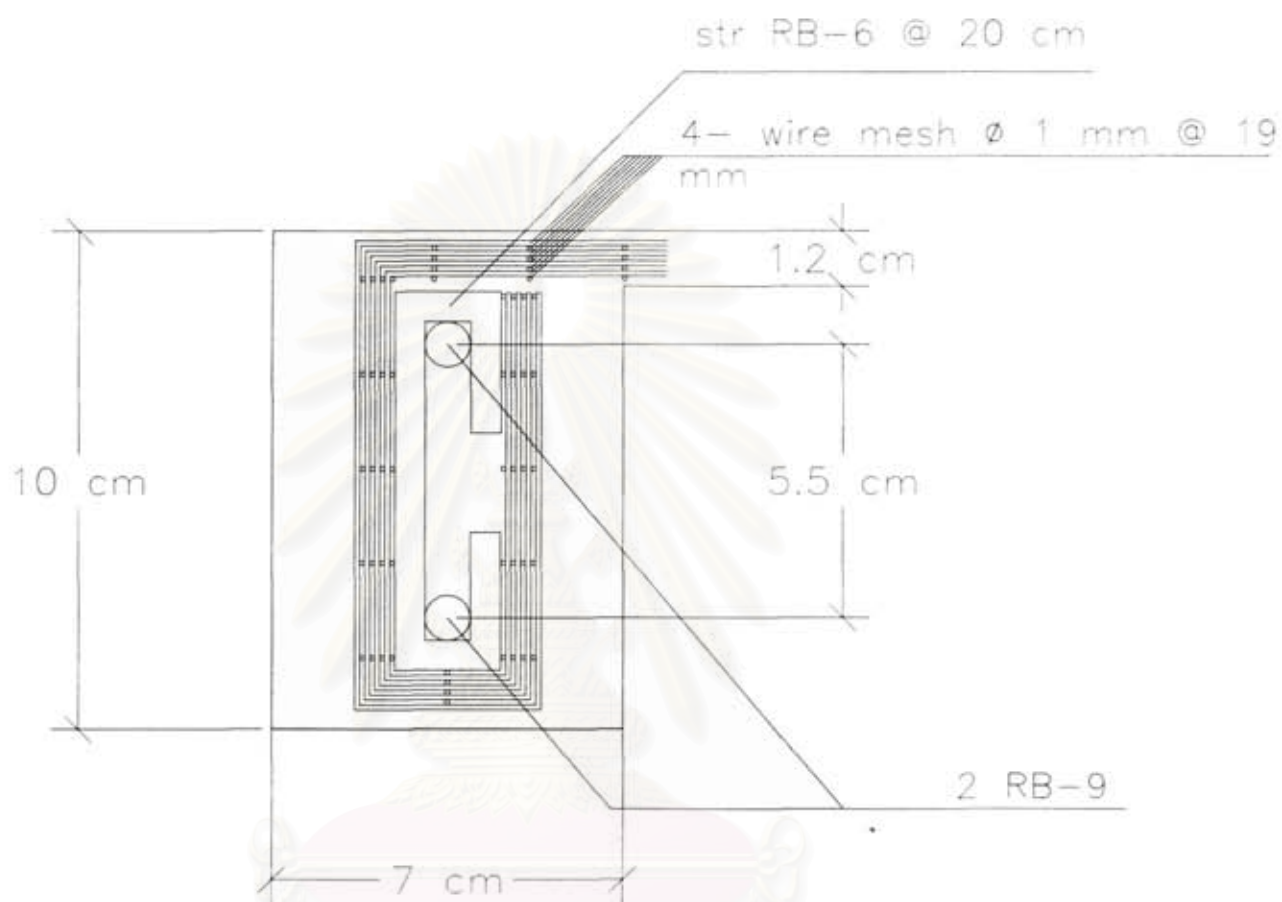
สถาบันส่วนขยาย '๑'  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



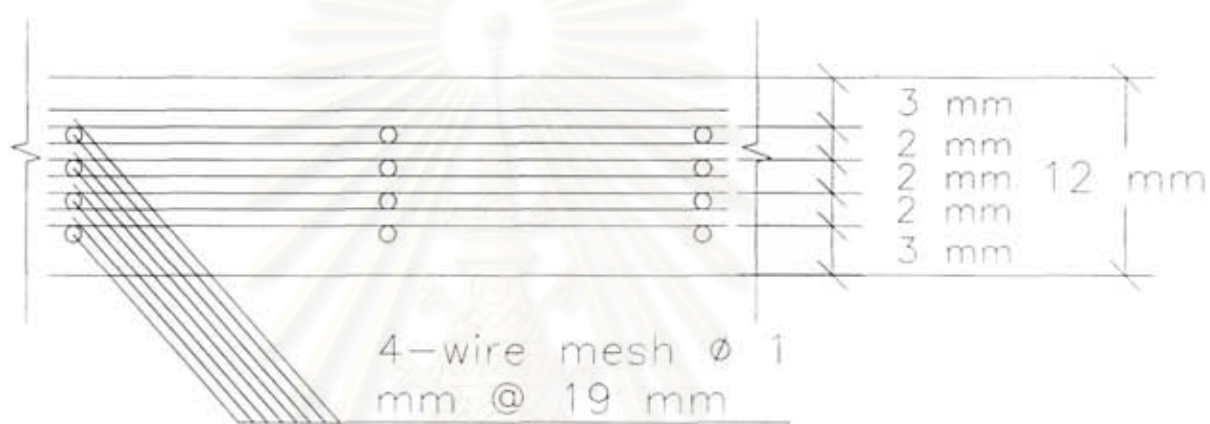
## ส่วนขยาย '๒'

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



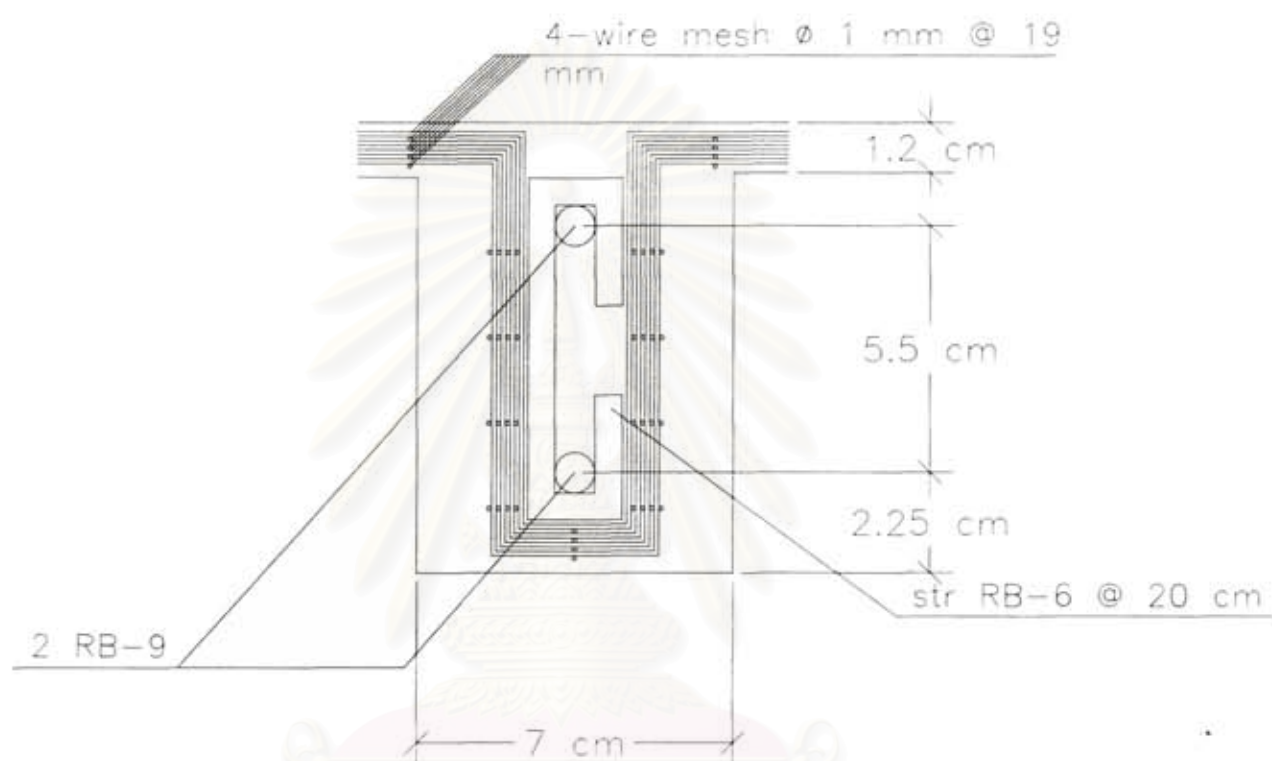


ส่วนขยาย '๓'  
 สถาบันวิจัยดาราศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ส่วนขยาย '๔'

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ส่วนขยาย '๕'

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 5.5 รายละเอียดการประเมินราคาของแผงกันเสียง

การประเมินราคาของแผงกันเสียงเพื่อให้สามารถทราบถึงต้นทุนในการผลิตแผงกันเสียงเบื้องต้นได้ ซึ่งราคาค่าต้นทุนของแผงกันเสียงจะเปลี่ยนแปลงตามราคาวัสดุในแต่ละท้องถิ่นและช่วงเวลาที่ทำการซื้อวัสดุ ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงทำการประเมินราคาค่าต้นทุนของแผงกันเสียงซึ่งอยู่ในช่วงที่ทำการหล่อตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.6 การประเมินราคาค่าวัสดุในการผลิตแผงกันเสียง 1 แผง

รายการวัสดุ	ประเภทส่วนผสมของแผงกันเสียง						
	หน่วย	FA	FA	RHA	RHA	BL	BL
	ละ (บาท)	20%, W/C 0.5	20%, W/C 0.6	20%, W/C 0.5	20%, W/C 0.6	20%, W/C 0.35	25%, W/C 0.35
ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ TYPE 1 (กิโลกรัม)	2.8	30	30	30	30	30	28
เหล็ก RB 9 (เมตร)	13.0	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1
เหล็ก RB 6 (เมตร)	6.5	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
ลวดตาข่าย (ตารางเมตร)	35.7	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
ทราย (กิโลกรัม)	1.0	103	103	103	103	103	103
รวมราคาแผงกันเสียง (บาท)		924.3	924.3	924.3	924.3	924.3	918.7

เนื่องจากวัสดุที่เหลือจากภาคอุตสาหกรรมและการเกษตรสามารถขอความอนุเคราะห์จากเกษตรกรและโรงงานอุตสาหกรรมโดยไม่เสียค่าใช้จ่าย แต่จะมีค่าขนส่งที่ขึ้นกับ ระยะ ทาง ระหว่างแหล่งวัตถุดิบและสถานที่ผลิตแผงกันเสียง จะเห็นได้ว่าราคาวัสดุที่ใช้ในการผลิตแผงกันเสียงแต่ละประเภทมีราคาใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเมื่อเมื่อรวมค่าแรงงานที่ใช้การกรหล่อแผงกันเสียงซึ่งเป็นการเหมาจ่ายโดยคิดค่าแรงงาน แผงละ 400 บาท รวมทั้งแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated Cover Steel) ขนาด 1.54 ตารางเมตร และวัสดุอุดกั้นเสียง ขนาด 1.54 ตารางเมตร หนา 5 เซนติเมตร ซึ่งมีราคา 1,100 บาท ซึ่งเมื่อรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด จะมีต้นทุนการผลิตแผงกันเสียง จะมีราคาประมาณ 2,500 ต่อแผง ซึ่งเป็นราคาที่ไม่วมค่าติดตั้งบนสถานที่จริง ซึ่งจากการสำรวจราคาแผงกันเสียงแบบคอนกรีตเสริมใยแก้ว (Glass Reinforced Concrete, GRC) ซึ่งเป็น

ผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ในประเทศไทยพบว่า มีราคาประมาณ 3500 บาทต่อตารางเมตร ดังนั้นแสงกัน  
เลียงที่ผลิตในภาคนี้นี้จึงราคาถูกว่าค่อนข้างมาก



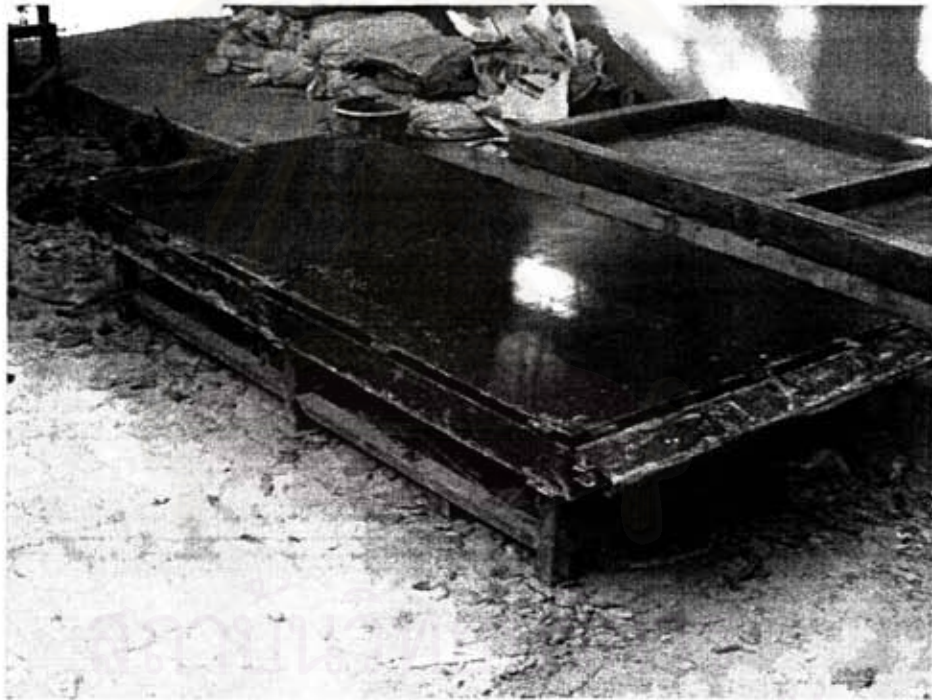
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### การผลิตและทดสอบประสิทธิภาพของแผงกันเสียง ในห้องปฏิบัติการ

#### 6.1 ขั้นตอนการผลิตแผงกันเสียง

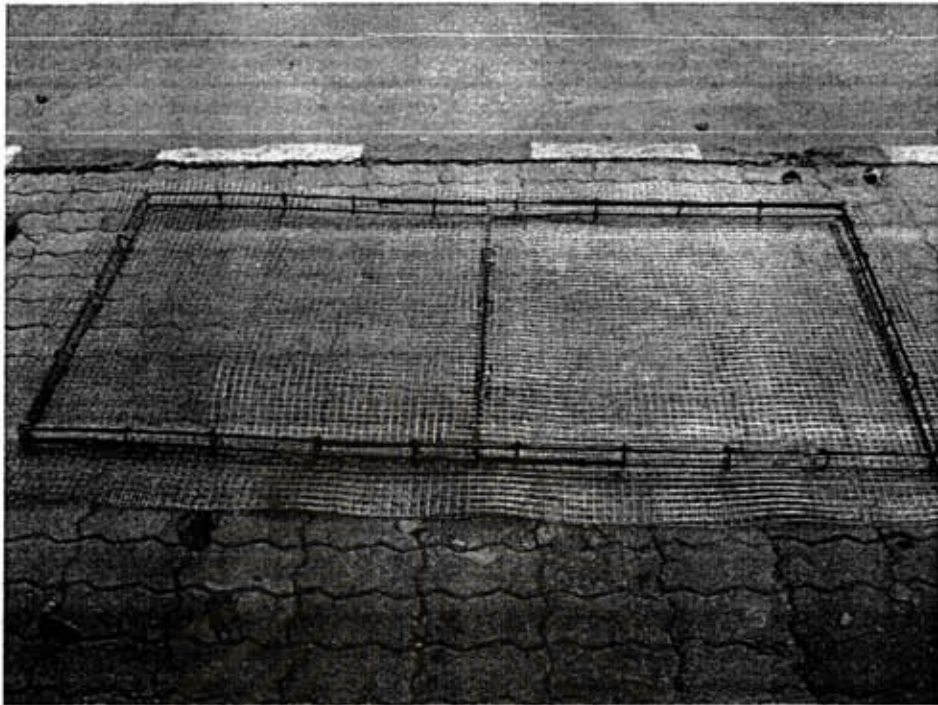
(ก) ทำการเตรียมแบบหล่อแผงกันเสียงโดยใช้แบบหล่อเหล็กทาน้ำมันบนผิวแบบหล่อเพื่อช่วยให้สามารถถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อได้ง่าย ซึ่งประโยชน์ของแบบหล่อเหล็กก็เพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของแผงกันเสียงที่แน่นอนและผิวของแผงกันเสียงมีความเรียบสวยงาม ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แบบหล่อเหล็กที่ใช้หล่อแผงกันเสียงในการศึกษาครั้งนี้

(ข) ลักษณะการผูกเหล็กเสริมในส่วนของขอบแผงกันเสียงดังแสดงในรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และการวางโครงตาข่ายที่ทำจากลวดเหล็กซึ่งทำการวางในส่วนที่เป็นผนังบางและให้ตัวโครงตาข่ายหุ้มทับกับเหล็กเสริมเพื่อเพิ่มการยึดเกาะกันระหว่างแผ่นผนังบางกับขอบของแผงกันเสียงดังแสดงในรูปที่ 6.2 (a) และ 6.2 (b)





(a)



(b)

- รูปที่ 6.2 (a) ลักษณะของเหล็กเสริมก่อนการหุ้มตัวโครงตาข่าย  
(b) ลักษณะของเหล็กเสริมหลังจากห่อหุ้มโครงตาข่ายเพื่อเตรียมจะ  
วางลงในแบบหล่อ

(ค) ทำการผสมมอร์ตาร์ในอัตราส่วนผสมต่างๆที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งแม่ก้นเสียงที่หล่อมีทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยแม่ก้นเสียงทั้ง 6 ตัวอย่างมีอัตราส่วนผสมของแม่ตัวอย่างที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 อัตราส่วนผสมของแม่ก้นเสียงทั้ง 6 ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

วัสดุ	น้ำหนัก (สำหรับแม่ก้นเสียง 1 แม่)					
	ปูนซีเมนต์ (กิโลกรัม)	ซีเมนต์ลอย (กิโลกรัม)	ซีเมนต์ แกลบ (กิโลกรัม)	น้ำยา Black Liquor (กิโลกรัม)	ทราย (กิโลกรัม)	น้ำ (กิโลกรัม)
FA 20%, 0.5	30	7.5	-	-	103	18.7
FA 20%, 0.6	30	7.5	-	-	103	22.5
RHA 20%,0.5	30	-	7.5	-	103	18.7
RHA 20%,0.6	30	-	7.5	-	103	22.5
BL 20%, 0.35	30	-	-	1.2	103	10.5
BL 25%, 0.35	28	-	-	1.12	103	9.8



รูปที่ 6.3 การผสมมอร์ตาร์ตามอัตราส่วนที่ต้องการ



(ง) วางเหล็กเสริมและโครงตาข่ายบนแบบหล่อที่ได้ทำการปูแผ่นพลาสติกและทาน้ำมัน เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวมอร์ตาร์ติดกับแบบหล่อ ทำการวางแบบหล่อตัวที่สองซึ่งเป็นแบบหล่อสำหรับขอบของกำแพงกันเสียงและทำการฉาบมอร์ตาร์บนโครงตาข่ายก่อนเป็นส่วนแรกดังแสดงในรูปที่ 6.4

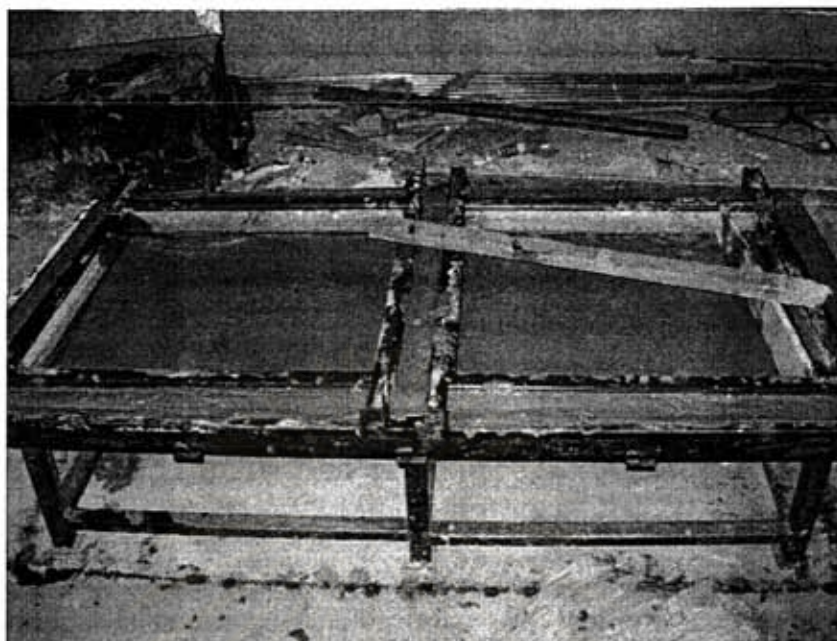


รูปที่ 6.4 การจัดวางเหล็กเสริมบนแบบหล่อ และการฉาบมอร์ตาร์บนโครงตาข่าย

(จ) ทำการใช้มอร์ตาร์ฉาบผิวที่เป็นผนังบางก่อนเป็นส่วนแรกให้เต็มแบบก่อน หลังจากนั้นทำการเทมอร์ตาร์ลงในส่วนที่เป็นขอบของแผงกันเสียงเพื่อให้ทั้งส่วนที่เป็นผนังบางและส่วนที่เป็นขอบของแผงกันเสียงเป็นเนื้อเดียวกัน

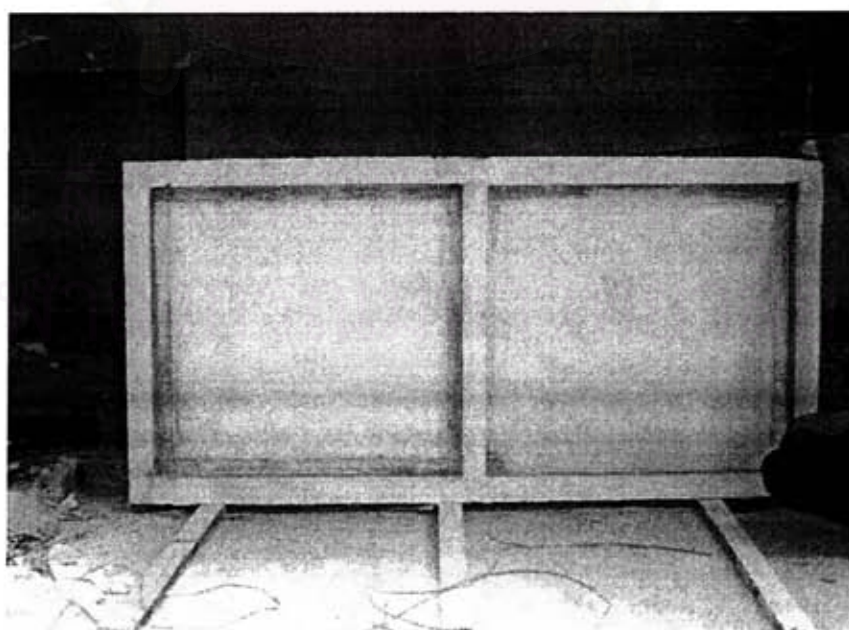
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 6.5 การหล่อขอบของแผงกันเสียงหลังจากการฉาบส่วนที่เป็น  
แผ่นผนังบางจนเต็มทั่วทั้งแผงแล้ว

(จ) หลังจากเทมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อปล่อยให้ให้มอร์ตาร์แข็งตัวประมาณ 1 วัน จะทำการถอดแบบหล่อเพื่อนำแผงกันเสียงไปป่น ซึ่งลักษณะของแผงกันเสียงหลังจากถอดแบบดังแสดง  
ในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 แผงกันเสียงหลังถอดแบบที่อายุ 1 วัน

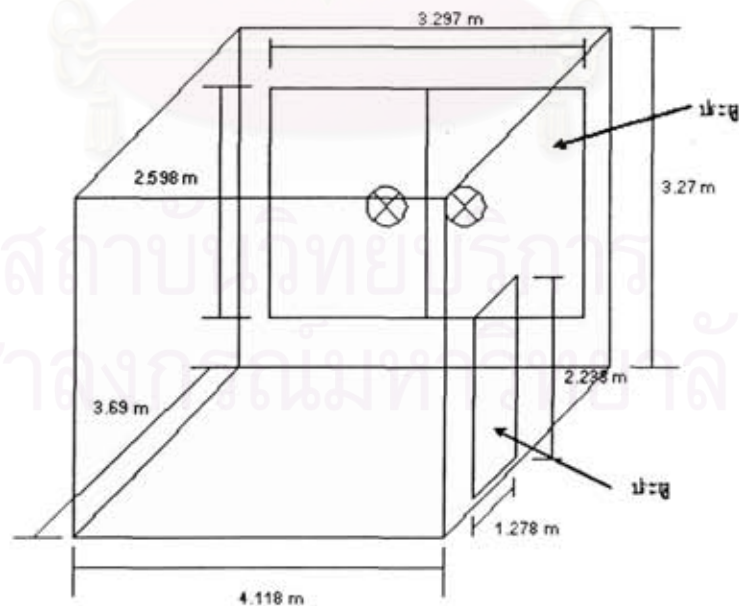
## 6.2 การทดสอบประสิทธิภาพของแผงกั้นเสียงในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของแผงกั้นเสียงในห้องปฏิบัติการนั้น จะทำการทดสอบคุณสมบัติของแผงกั้นเสียง 2 อย่าง คือ ประสิทธิภาพการดูดกลืนเสียง (Sound Absorption) และความสามารถในการกั้นเสียง (Transmission Loss) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 141, ISO 143

### 6.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดกลืนเสียงในห้องปฏิบัติการ

#### (ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ระบบวิเคราะห์เสียงอาคาร Brüel & Kjaer รุ่น 4418
2. ไมโครโฟน Brüel & Kjaer รุ่น 4165 1 ตัว
3. คอมพิวเตอร์
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. ขาดังไมโครโฟน
6. ลำโพง Brüel & Kjaer รุ่น 4224 จำนวน 1 ตัว
7. ห้องกังวานขนาด 4.118x3.69x3.27 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.7

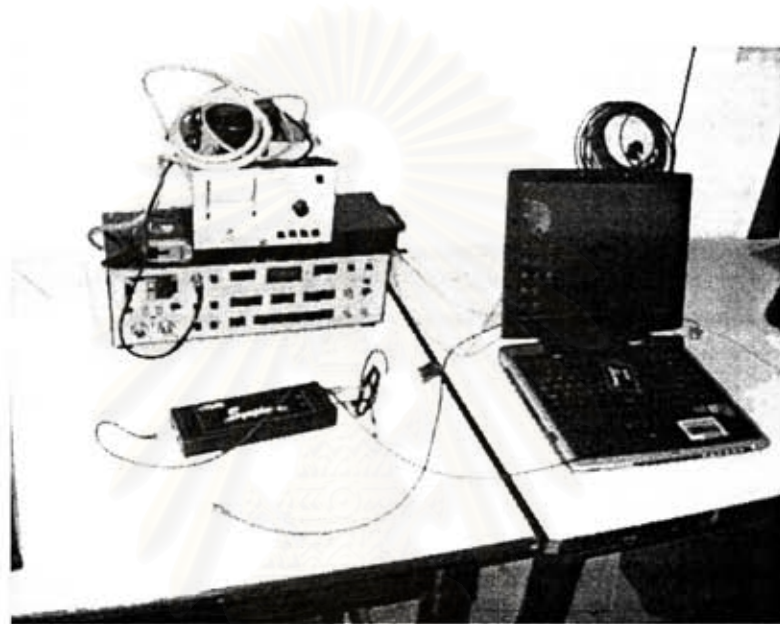


รูปที่ 6.7 ขนาดของห้องกังวานที่ใช้ในการทดสอบ

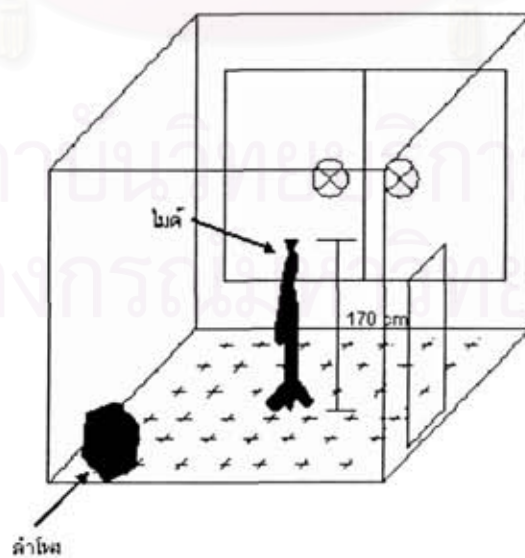
## (ข) ขั้นตอนการทดสอบ

การตรวจวัดและรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง (Absorption Coefficient,  $\alpha$ ) ของแผ่นวัสดุโดยติดตั้งเครื่องมือต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.8 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการติดตั้งลำโพงและไมโครโฟนในห้องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.9 และต่อสายสัญญาณระหว่างลำโพงกับระบบวิเคราะห์เสียงดังแสดงในรูปที่ 6.10

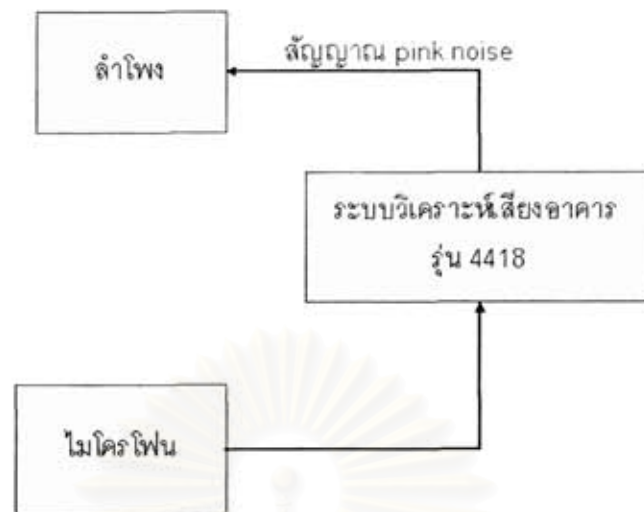


รูปที่ 6.8 อุปกรณ์กำเนิดคลื่นเสียงและวิเคราะห์เสียง



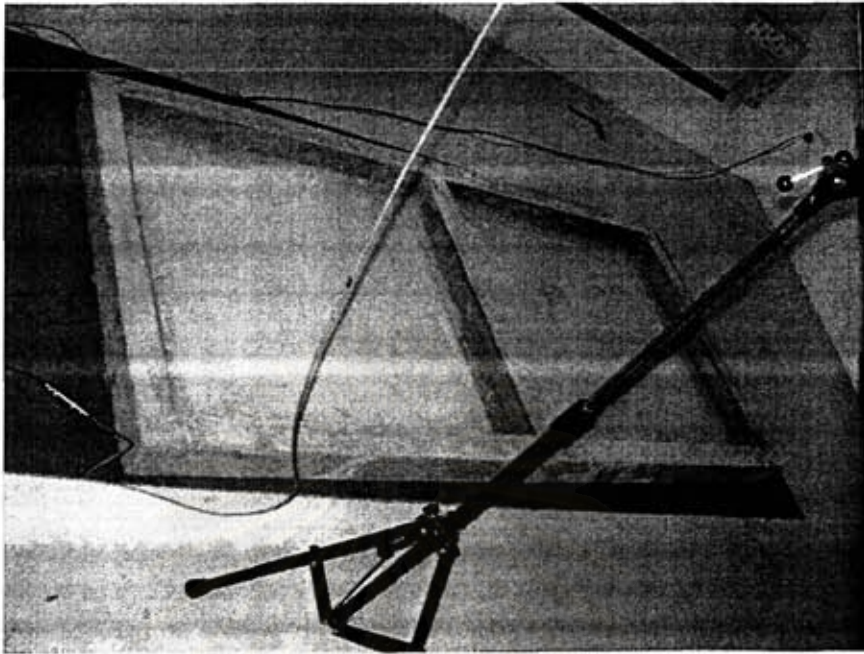
รูปที่ 6.9 ลักษณะการติดตั้งลำโพงและไมโครโฟนในห้องทดสอบ



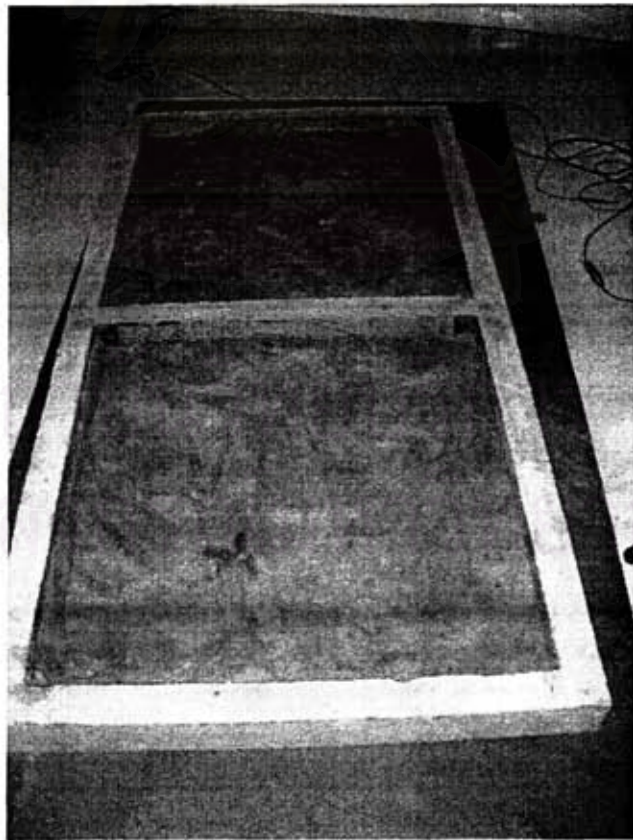


รูปที่ 6.10 การรับ-ส่งสัญญาณของระบบวิเคราะห์เสียง

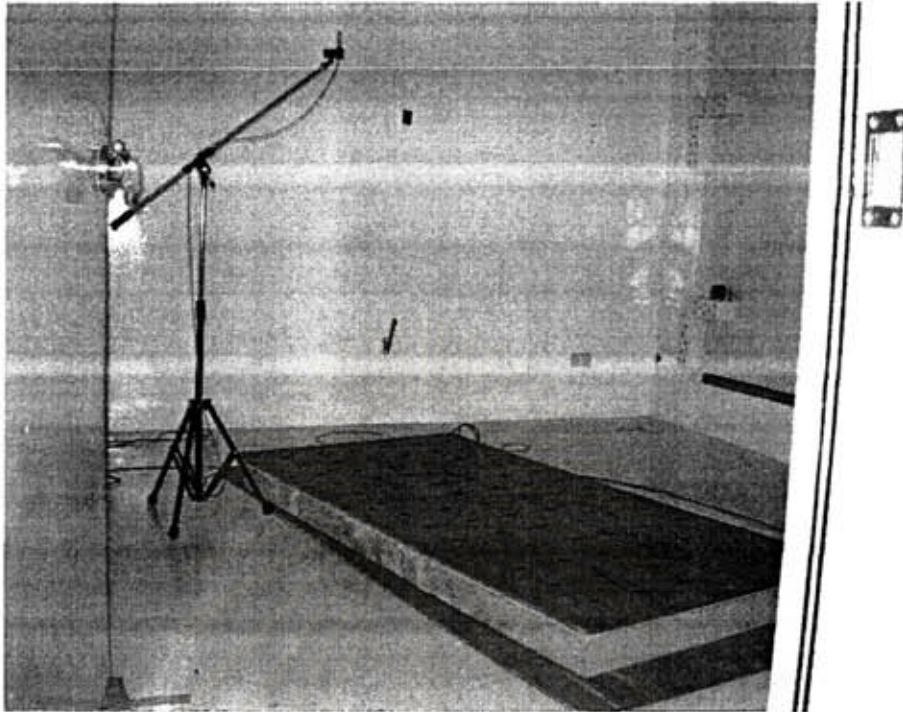
2. ทำการปรับแก้สัญญาณ (Calibration) ของไมโครโฟนโดยใช้ตัวเปรียบเทียบสัญญาณ (Calibrator 01dB รุ่น CAL 21) โดยติดตั้งที่ปลายไมโครโฟนและทำการวัดระดับความเข้มของเสียงให้ได้ค่าตรงกับค่ามาตรฐานของตัวเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งมีค่าอยู่ที่ 94 dB ที่ความถี่ 100 Hz
3. ทำการบันทึกอุณหภูมิห้อง ( $^{\circ}\text{C}$ ) และ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ภายในห้องทดสอบ
4. ทำการวัดเวลากังวาน (Reverberation Time) ของห้องเปล่าโดยวัดค่าเวลากังวานที่ค่าความถี่ต่างๆกันคือ 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 3150, 4000
5. นำแผงกั้นเสียงตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มาวางบนพื้นห้องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.11 ซึ่งในลำดับของตัวอย่างที่ทำการทดสอบนี้จะเริ่มจาก
  - การหาค่าเวลากังวานในห้องเปล่า
  - การหาค่าเวลากังวานในห้องที่มีแผงกั้นเสียงดังแสดงในรูปที่ 6.11
  - การหาค่าเวลากังวานในห้องที่มีแผงกั้นเสียงและบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงลงในช่องว่างของแผงกั้นเสียงดังแสดงในรูปที่ 6.12
  - การหาค่าเวลากังวานในห้องที่มีแผงกั้นเสียงซึ่งบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงลงในช่องว่างของแผงกั้นเสียงและแผ่นปิดหน้าเจาะรู (Perforated Cover) ดังแสดงในรูปที่ 6.13
6. ทำการวัดค่าเวลากังวานของแผงกั้นเสียงตามลำดับซึ่งกล่าวในข้อที่ 5 โดยทำการวางไมโครโฟนที่ตำแหน่งต่างๆ 6 ตำแหน่ง เพื่อนำค่ามาเฉลี่ยในการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง (Absorption Coefficient,  $\alpha$ ) ตามทฤษฎีซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.8



รูปที่ 6.11 แผงกันเสียงเปล่าที่วางบนพื้นห้องทดสอบ



รูปที่ 6.12 แผงกันเสียงที่บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงภายใน

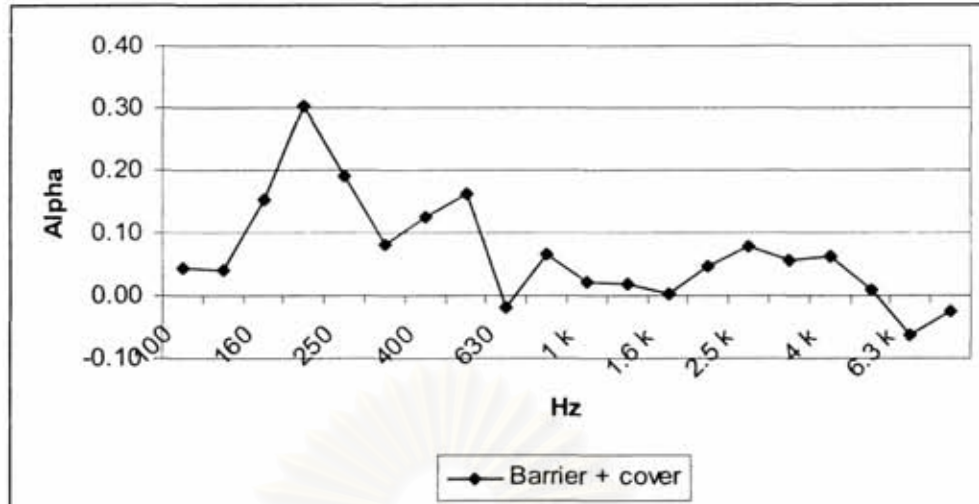


รูปที่ 6.13 แผงกันเสียงที่บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงภายในและปิดด้วยฝาปิดเจาะรู

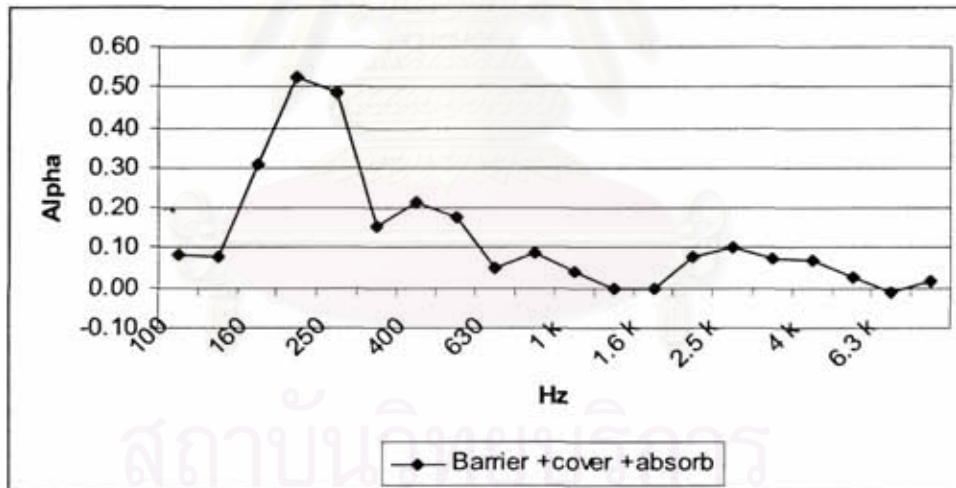
(ค) ผลการทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง (Absorption Coefficient,  $\alpha$ )

จากการทดสอบโดยนำแผงกันเสียงเปล่าซึ่งไม่ได้บรรจุทั้งวัสดุดูดกลืนเสียงและฝาปิดเจาะรู (Perforated Cover) ไว้ภายในแผงกันเสียงมาทำการหาค่าเวลากังวาน (Reverberation Time) ในห้องทดสอบ จะพบว่าแผงกันเสียงเปล่ามีค่าเวลากังวานใกล้เคียงกับค่าเวลากังวานของห้องทดสอบเปล่า ซึ่งค่าเวลากังวานในห้องทดสอบที่มีการวางแผงกันเสียงเปล่าจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาค่า Absorption Coefficient ตามสมการที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งหลังจากทำการติดตั้งแผ่นปิดฝาเจาะรูซึ่งทำมาจากไม้อัดที่มีความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรู 15 เซนติเมตร โดยยังไม่ได้บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงลงในตัวแผงกันเสียง แล้วทำการคำนวณหาค่า Absorption Coefficient ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6.14 หลังจากทำการทดลองเสร็จสิ้น ในขั้นตอนต่อไปจึงทำการบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงประเภทเส้นใย ซึ่งได้ใช้แผ่นใยแก้วที่มีความหนา 5 เซนติเมตร บรรจุไว้ภายในแผงกันเสียงและปิดด้วยฝาปิดเจาะรู แล้วทำการวัดค่าเวลากังวานเพื่อนำมาคำนวณหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6.15

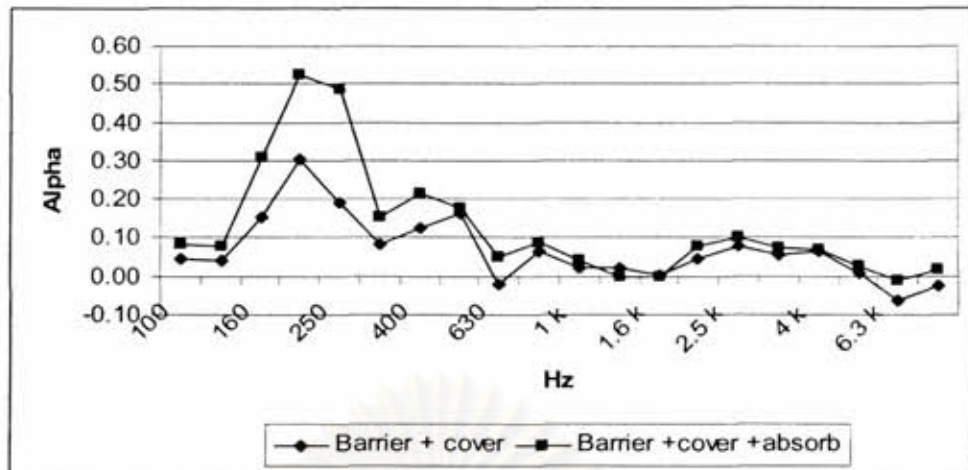




รูปที่ 6.14 ค่าการทดสอบเพื่อหา Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งทำการปิดด้วยฝาปิดเจาะรู (Perforated Cover) ซึ่งทำมาจากไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ 3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรู 15 เซนติเมตร (ไม่ได้บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงลงในแผงกันเสียง)



รูปที่ 6.15 ค่าการทดสอบเพื่อหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงโดยมีการ ใส่ วัสดุดูดกลืนเสียงลงในแผงกันเสียง คือ แผ่นใยแก้ว หนา 5 เซนติเมตร และทำการ ปิดด้วยฝาปิดเจาะรู (Perforated cover) ทำมาจาก ไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ 3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรู 15 เซนติเมตร



รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงระหว่างแผงกันเสียงที่ไม่ได้บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงและแผงกันเสียงที่มีการบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียง (แผ่นใยแก้ว หนา 5 เซนติเมตร) ภายในแผงกันเสียง โดยแผงกันเสียงทั้งสองรูปแบบใช้ฝาปิดทำมาจากไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ 3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรู 15 เซนติเมตร

ซึ่งจากผลการทดสอบข้างต้นและนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 6.16 พบว่าการการติดตั้งฝาปิดเจาะรูบนแผงกันเสียงมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงกันเสียงให้ดีขึ้น แต่การบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงประเภทเส้นใยซึ่งในการทดสอบได้ใช้แผ่นใยแก้วที่มีความหนา 5 เซนติเมตร จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงของแผงกันเสียงมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

แต่เนื่องจากผลการวัดค่าความถี่ของยานยนต์พาหนะบนทางด่วน ซึ่งมีค่าความถี่อยู่ในช่วง 1k Hz ถึง 2.5k Hz ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้น แผงกันเสียงจะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงที่ดีอยู่ในช่วงความถี่ 200 – 300 Hz จึงได้ทำการเปลี่ยนฝาปิดเจาะรู (Perforate Cover) โดยทำการคำนวณหาขนาดความหนาของแผ่นเหล็ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรู และ ระยะห่างของรู เพื่อให้แผ่น Perforated Cover ดูดกลืนเสียงในช่วงค่าความถี่ ที่ต้องการซึ่งผลการคำนวณได้แสดงให้ดูดังต่อไปนี้

## (ง) การคำนวณขนาดของแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated Cover)

การคำนวณหาค่าความถี่ที่ แผ่น Perforate สามารถดูดกลืนเสียงได้ดีที่สุดนั้น จะใช้แผนภาพเพื่อช่วยในการคำนวณซึ่งจะต้องรู้ ค่าของตัวแปรที่เป็นปัจจัยเพื่อใช้ในการคำนวณค่าดังนี้

$f_R$  = ค่าความถี่ที่ต้องการให้ตัวแปร (Hz)

$h$  = ระยะระหว่างแผ่น Perforated กับ กำแพงหรือผนังที่ทึบ (นิ้ว)

$e$  = Effective Throat Length ของรูเจาะ

$e = t + 0.8d$

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (นิ้ว)

$P$  = เปอร์เซ็นต์พื้นที่ของรูเจาะ

$P = 0.9 (d/b)^2 \times 100\%$  (สำหรับรูเจาะเยื้องแบบ Staggered)

$P = 0.8 (d/b)^2 \times 100\%$  (สำหรับรูเจาะในแนวตรง)

$b$  = ระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรู

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ตัวอย่างการคำนวณแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated Cover)

เราต้องการหาขนาดของแผ่น Perforate ที่มีค่า  $f_r = 1$  kHz ซึ่ง ค่า  $h = 8$  cm หรือ 3.15 นิ้ว

ตารางที่ 6.2 แสดงการคำนวณหาค่า Percent of open area และ Effective throat length ของแผ่นปิด Perforated ที่มีขายในท้องตลาด

รูเบอร์	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (นิ้ว)	พื้นที่ของรู (ตารางนิ้ว)	จำนวนรู/ตารางนิ้ว	$P$ (%)	$e$
5.00	1.10	0.0433	0.0015	123	18.10	0.05433
5.1/4	1.15	0.0453	0.0016	123	19.80	0.05590
5.1/2	1.25	0.0492	0.0019	115	21.87	0.0590
5.3/4	1.35	0.0531	0.0022	115	25.51	0.0622
6.00	1.40	0.0551	0.0024	104	24.81	0.06377
6.1/4	1.45	0.0571	0.0026	97	24.82	0.06535
6.2/4	1.60	0.0630	0.0031	87	27.11	0.07007
6.3/4	1.70	0.0669	0.0035	87	30.60	0.07322
7.00	1.75	0.0689	0.0037	79	29.45	0.07480
7.1/4	1.83	0.0720	0.0041	74	30.16	0.07732
7.2/4	1.90	0.0748	0.0044	70	30.76	0.07952
7.3/4	2.05	0.0807	0.0051	63	32.23	0.08425
8.00	2.15	0.0846	0.0056	65	36.57	0.08740
8.1/4	2.25	0.0886	0.0062	56	34.51	0.09055
8.2/4	2.35	0.0925	0.0067	56	37.64	0.09370
8.3/4	2.40	0.0945	0.0070	57	39.96	0.09527
<b>9.00</b>	<b>2.50</b>	<b>0.0984</b>	<b>0.0076</b>	<b>49</b>	<b>37.28</b>	<b>0.09842</b>
9.1/4	2.70	0.1063	0.0089	44	39.04	0.1047
9.2/4	2.85	0.1122	0.0099	40	39.55	0.1094
9.3/4	3.10	0.1220	0.0117	34	39.77	0.1173
10.00	3.30	0.1299	0.0133	31	41.09	0.1236
13.00	6.75	0.2657	0.0555	8	44.37	0.2322
14	8.5	0.3346	0.08795	5.25	46.17	0.2874

จากผลการคำนวณ ถ้าเราใช้แผ่น Perforated ที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร นำมาใช้ในการคำนวณกับแผนภูมิ Nomogram ดังแสดงในรูปที่ 6.17

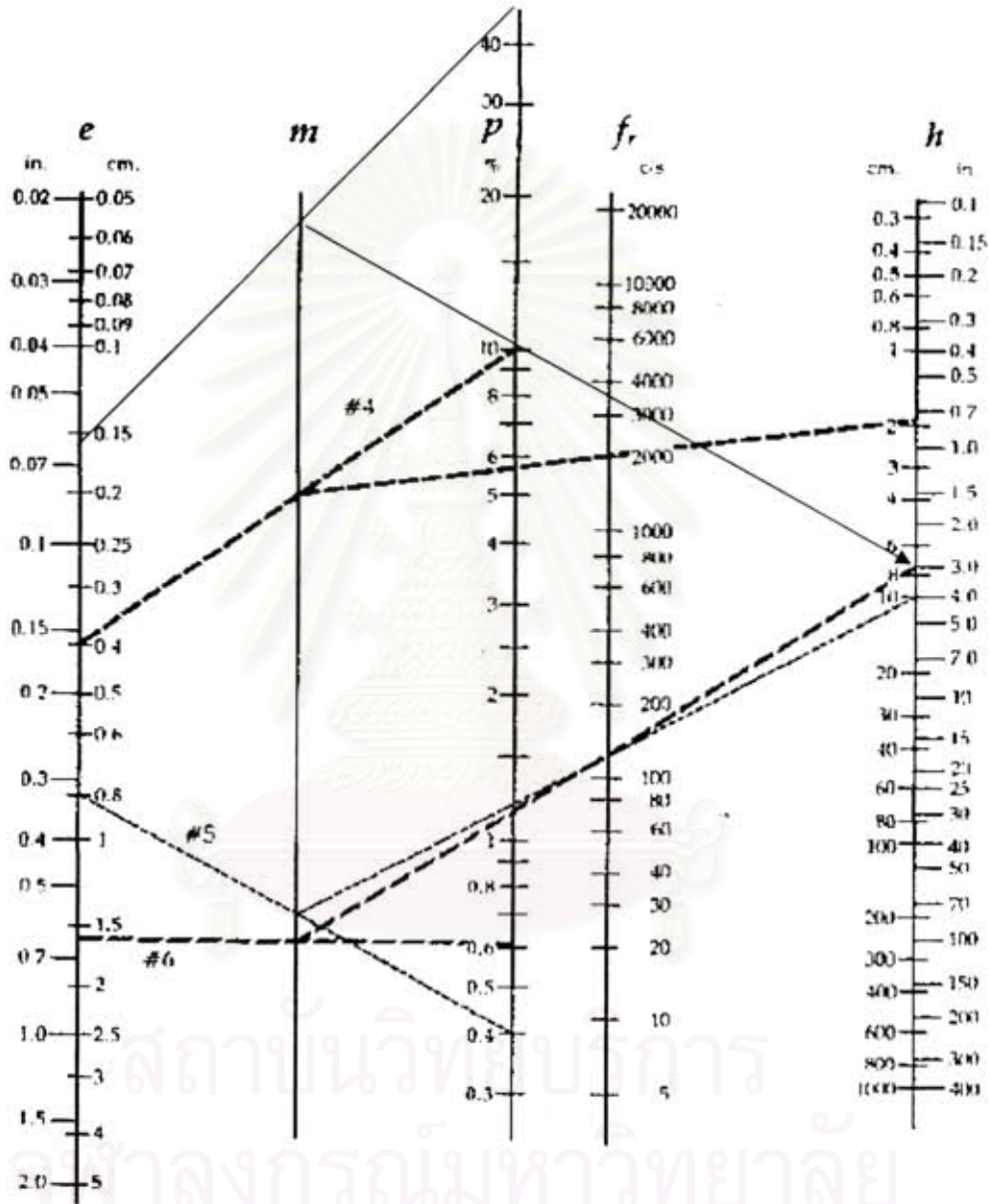
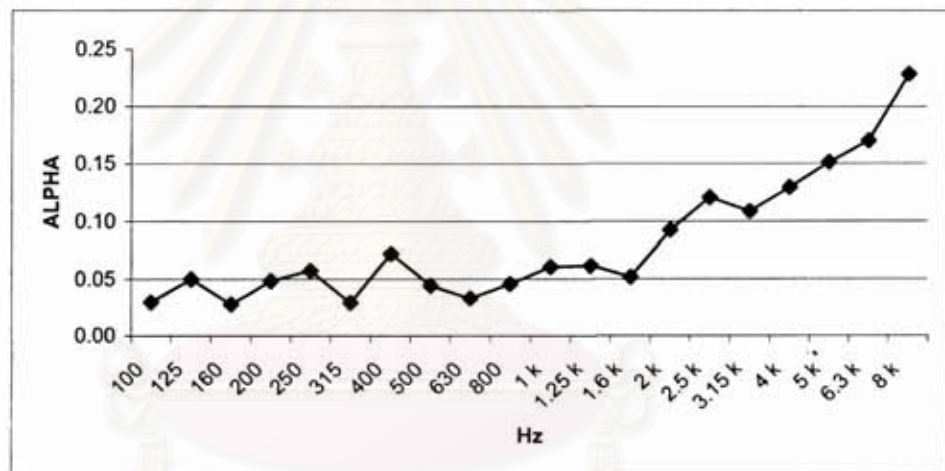


Figure 17. Nomogram for calculating the resonance frequency, with the graphical constructions for Examples 4, 5 and 6. A "clean" version of this Nomogram is included at the back of this booklet, to be copied and used as a worksheet for future design problems.

รูปที่ 6.17 แผนภูมิซึ่งช่วยในการคำนวณค่าความถี่ที่แผ่นปิดเจาะรูสามารถดูดกลืนเสียงได้ดี

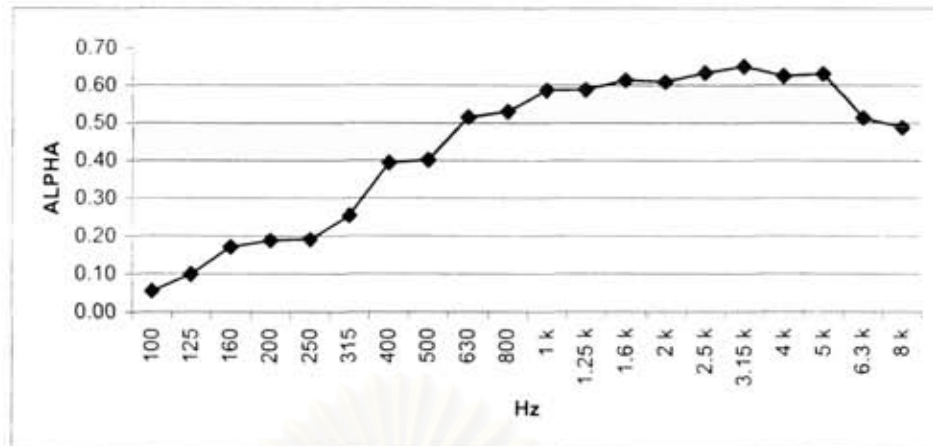
เหตุผลที่เลือกขนาดของแผ่น Perforate นี้ เพราะมีค่าความถี่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ที่ต้องการมากที่สุด และมี Percent of open area (P), ร้อยละของพื้นที่รูเจาะ ที่มาก ซึ่งจะช่วยให้แผ่น Perforated มีความสามารถดูดกลืนเสียงดีกว่า แผ่น Perforated ที่มี Percent of open area น้อย

ซึ่งหลังจากทำการออกแบบขนาดของฝาปิดเจาะรู (Perforated Cover) แล้ว จึงทำการติดตั้งฝาปิดเจาะรูที่ทำการออกแบบบนแผงกันเสียง และทำการวัดหาค่าเวลากังวานของห้องทดสอบ เพื่อนำไปคำนวณหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6.18 ซึ่งพบว่าค่า Absorption Coefficient ได้มีการเปลี่ยนแปลงโดยแผงกันเสียงซึ่งติดตั้งฝาปิดเจาะรูที่ได้ทำการออกแบบไว้นั้นมีแนวโน้มที่จะดูดกลืนเสียงที่ความถี่สูงได้ดีขึ้น หลังจากนั้นจึงทำการบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงประเภทเส้นใย ซึ่งได้ใช้แผ่นใยแก้วที่มีความหนา 5 เซนติเมตร ลงไปในแผงกันเสียง ทำการวัดหาค่าเวลากังวานในห้องทดสอบ และคำนวณหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6.19

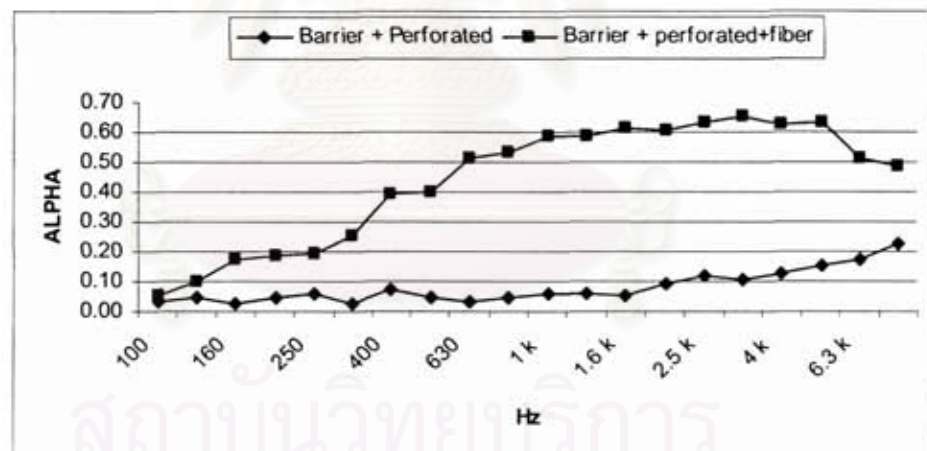


รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกันเสียงโดยไม่มีการใส่วัสดุดูดกลืนเสียงลงในแผงกันเสียงและทำการปิดด้วยฝาปิดเจาะรู (Perforated cover) ทำมาจากแผ่นเหล็กหนา 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งทำการ เจาะ รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร และมีจำนวนรู 49 รูต่อ พื้นที่ 1 ตารางนิ้ว





รูปที่ 6.19 ผลการทดสอบเพื่อหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกั้นเสียงโดยมีการใส่วัสดุดูดกลืนเสียง คือ แผ่นใยแก้วหนา 5 เซนติเมตร ลงในแผงกั้นเสียงและทำการปิดด้วยฝาปิดเจาะรู (Perforated cover) ทำมาจากแผ่นเหล็กหนา 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และมีจำนวนรู 49 รูต่อ พื้นที่ 1 ตารางนิ้ว



รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่า Absorption Coefficient ของแผงกั้นเสียง ระหว่างแผงกั้นเสียงที่ไม่ได้บรรจุวัสดุดูดซับเสียงและแผงกั้นเสียงที่มีการบรรจุวัสดุดูดซับเสียง (แผ่นใยแก้ว หนา 5 เซนติเมตร) ภายในแผงกั้นเสียง โดยแผงกั้นเสียงทั้งสองรูปแบบใช้ฝาปิด ซึ่งทำมาจากแผ่นเหล็กเจาะรูหนา 0.5 มิลลิเมตร ขนาดของรูและระยะห่างระหว่างรู ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และมีจำนวนรู 49 รูต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว

ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้ฝาปิดเจาะรูที่ทำการออกแบบมาติดตั้งบนแผงกันเสียงพบว่าประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงของแผงกันเสียงจะมีแนวโน้มที่จะดูดกลืนเสียงที่ความถี่สูงได้ดีขึ้น และเมื่อทำการบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงประเภทเส้นใยซึ่งใช้ใยแก้วหนา 5 เซนติเมตร ลงในแผงกันเสียงพบว่าแผงกันเสียงจะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงที่ดีในช่วงความถี่ 1-2.5 kHz ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับช่วงความถี่ที่เกิดจากการจราจรบนทางพิเศษ

## 6.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการลดทอนของเสียงทะลุผ่านในห้องปฏิบัติการ

### (ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ระบบวิเคราะห์เสียงอาคาร Brüel & Kjær รุ่น 4418
2. ไมโครโฟน Brüel & Kjær รุ่น 4165 จำนวน 1 ตัว และไมโครโฟน Brüel & Kjær รุ่น 2619 จำนวน 1 ตัว
3. คอมพิวเตอร์
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. ขาดังไมโครโฟน 2 ตัว
6. ลำโพง Brüel & Kjær รุ่น 4224 จำนวน 1 ตัว
7. ห้องกังวานคู่ที่เชื่อมต่อกัน โดยห้องส่งเสียงมีขนาด 4.12x3.69x3.27 ลูกบาศก์เมตรและห้องรับเสียงมีขนาด 3.15 x 2.95 x 4.11 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.21

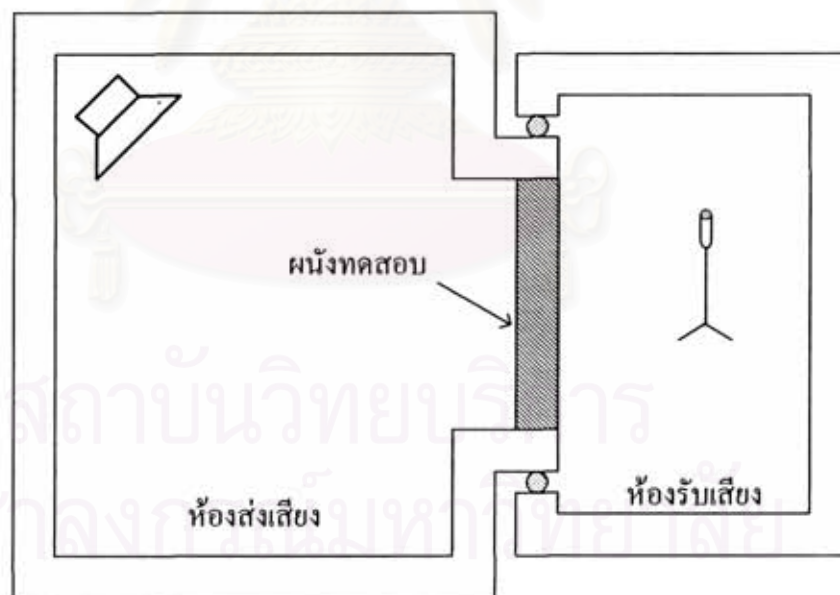
### (ข) ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบประสิทธิภาพการลดทอนของเสียงทะลุผ่านในห้องปฏิบัติการได้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 40-1, 140-3 ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ทำการก่อกำแพงด้วยอิฐมวลเบาที่มีความหนา 20 เซนติเมตร จนเต็มผนัง ซึ่งเป็นจุดที่แบ่งระหว่างห้องส่งเสียงและห้องรับเสียงเพื่อทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.22
2. ทำการติดตั้งลำโพงในห้องปล่อยเสียงและไมโครโฟนในห้องกังวานคู่ทั้ง 2 ห้อง ทั้งในห้องปล่อยเสียงและห้องรับเสียงและต่อสายสัญญาณระหว่างลำโพงกับระบบวิเคราะห์เสียงดังในรูปที่ 6.10
3. ทำการปรับแก้สัญญาณ (Calibration) ของไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว โดยใช้ตัวเปรียบเทียบสัญญาณ (Calibrator 01dB รุ่น CAL 21) โดยติดตั้งที่ปลายไมโครโฟนและทำการวัดระดับ

ความเข้มของเสียงให้ได้ค่าตรงกับค่ามาตรฐานของตัวเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งมีค่าอยู่ที่ 94 dB ที่ความถี่ 1000 Hz ดังแสดงในรูปที่ 6.23

4. ทำการบันทึกอุณหภูมิห้อง ( $^{\circ}\text{C}$ ) และ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ภายในห้องทดสอบทั้งสองห้อง
5. ทำการวัดระดับความดันเสียงภายในห้องส่งเสียง ( $L_1$ ) และทำการวัดระดับความดันเสียงภายในห้องรับเสียง ( $L_2$ )
6. ทำการวัดเวลากังวาน (Reverberation Time) ของห้องรับเสียงโดยวัดค่าเวลากังวานที่ค่าความถี่ต่างๆกันคือ 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 3150, 4000, 5000
7. หลังจากทำการวัดผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบาตามขั้นตอนในข้อที่ 1 ถึง 6 แล้ว จึงทำการเจาะผนังให้มีขนาด  $2 \times 1$  เมตร เพื่อติดตั้งแผงกันเสียงที่มีส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่แตกต่างกัน 6 แผงซึ่งมีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 6.25
8. ทำการวัดแต่ละแผงกันเสียงตามขั้นตอนที่ 2-7 เพื่อคำนวณหาค่าความสามารถในการลดทอนเสียงทะลุผ่าน (Sound Transmission Loss)

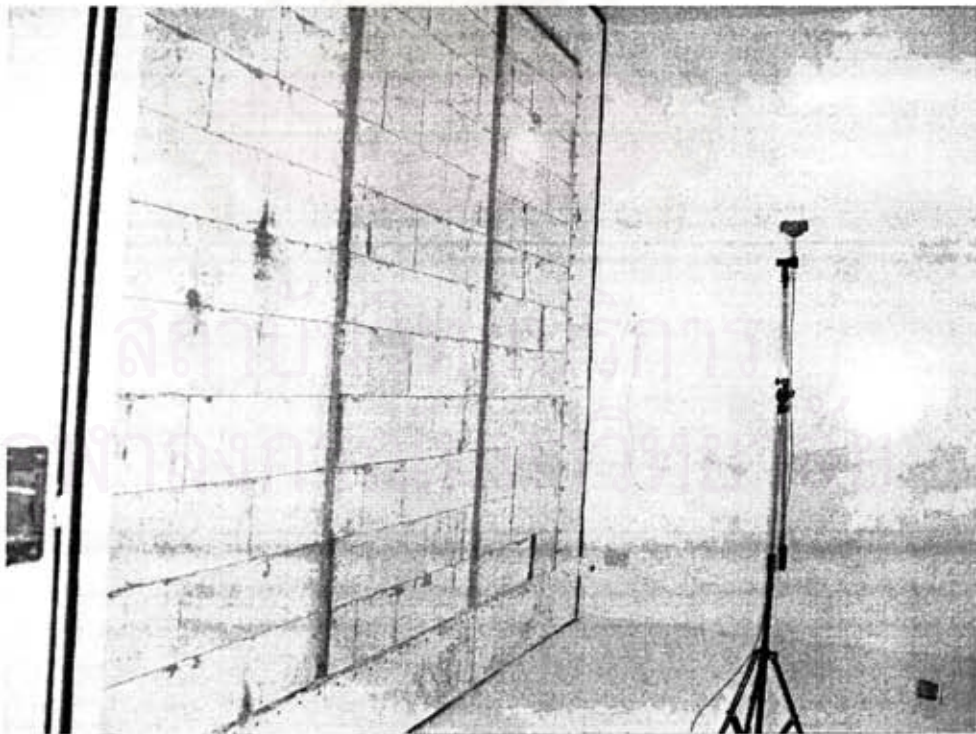


รูปที่ 6.21 แผนผังของห้องกังวานคู่และการติดตั้งแผงกันเสียง (ไม่ได้แสดงตามมาตราส่วนจริง)

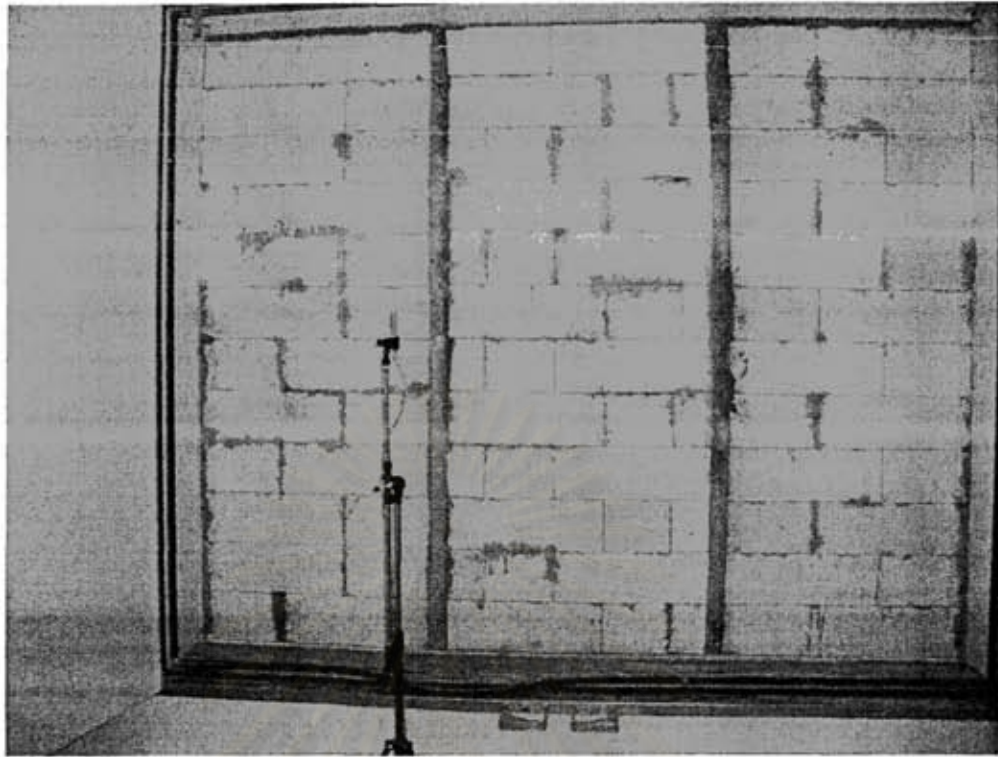




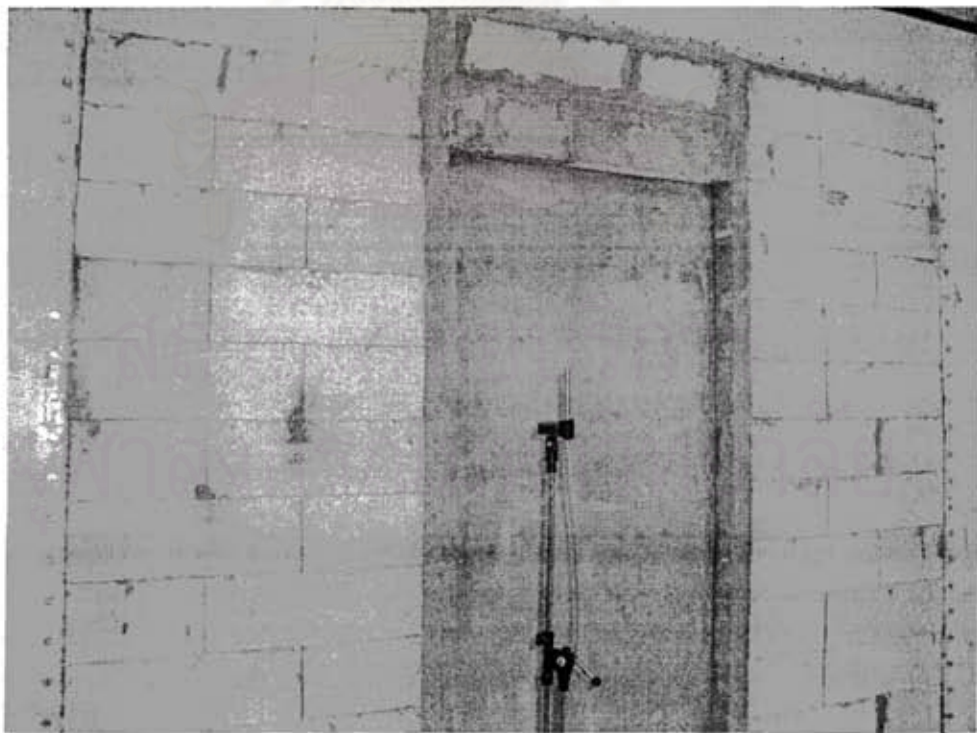
รูปที่ 6.22 การก่อผนังอิฐมวลเบาเพื่อเตรียมทดสอบ



รูปที่ 6.23 การปรับแก้สัญญาณ (Calibration) ของไมโครโฟน

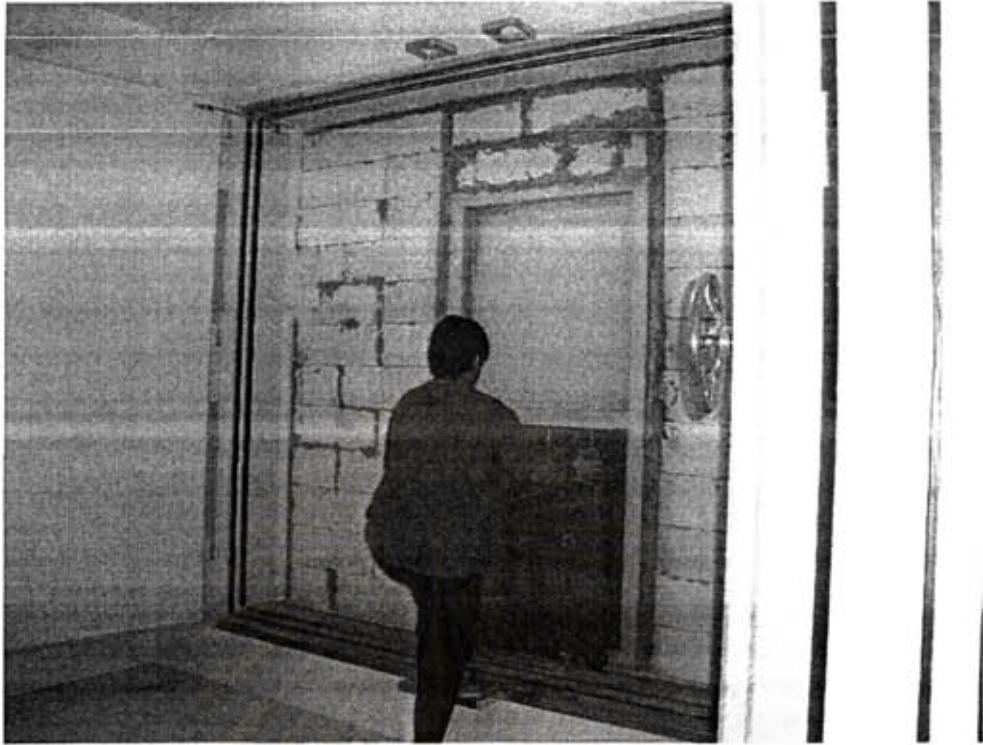


รูปที่ 6.24 การทดสอบการลดทอนเสียงทะลุผ่านของผนังอิฐมวลเบา

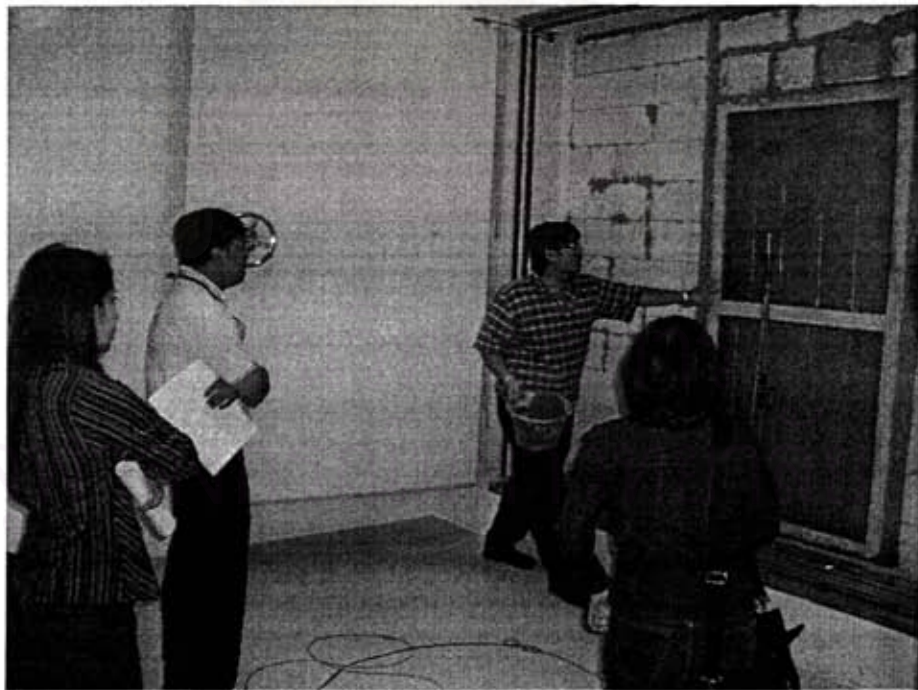


รูปที่ 6.25 การทดสอบการลดทอนเสียงทะลุผ่านของแผงกันเสียงที่ทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว





รูปที่ 6.26 การติดตั้งแผ่นปิดเจาะรู (Perforated Cover) ซึ่งภายในบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียง



รูปที่ 6.27 การติดตั้งแผงกันเสียงและแผ่นเจาะรู (Perforated Cover) พร้อมทั้งจะทำการทดสอบ

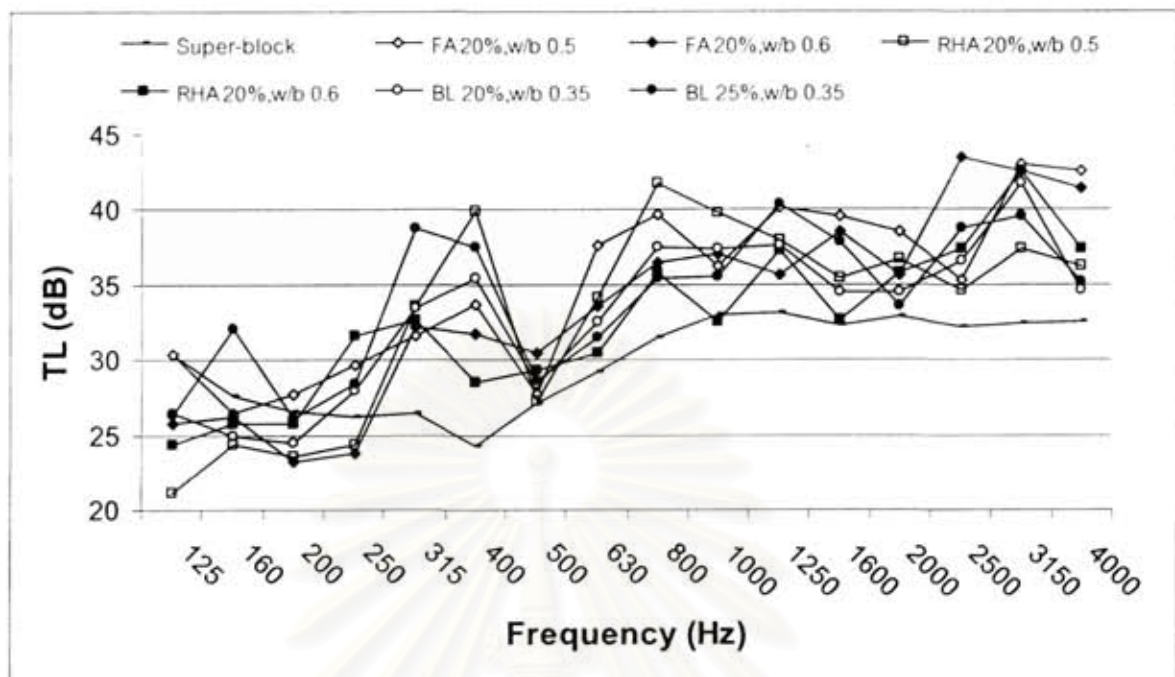


(ค) ผลการทดสอบการหาค่าการลดทอนเสียงทะลุผ่าน (Sound Transmission Loss) ในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบเพื่อหาค่า Transmission Loss ซึ่งได้กล่าวถึงทฤษฎีเพื่อการคำนวณหาค่า Transmission Loss ไว้ในบทที่ 2 ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการหล่อแผงกันเสียงที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน 6 แผง โดยมีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 6.1 เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า Transmission Loss ระหว่างแผงกันเสียงที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบค่า Transmission Loss ของแผงกันเสียงแต่ละชนิด

ค่าความถี่	ชนิดของแผงกันเสียง						
	Super-block	FA	FA	RHA	RHA	BL	BL
		20%,w/b 0.5	20%,w/b 0.6	20%,w/b 0.5	20%,w/b 0.6	20%,w/b 0.35	25%,w/b 0.35
125 Hz	30.35	30.33	25.74	21.11	24.39	26.42	26.39
160 Hz	27.63	26.46	26.27	24.40	25.75	24.92	32.04
200 Hz	26.60	27.71	23.17	23.55	25.76	24.52	26.10
250 Hz	26.25	29.65	23.81	24.43	31.62	28.00	28.36
315 Hz	26.50	31.65	32.26	33.54	32.65	33.53	38.84
400 Hz	24.31	33.73	31.73	39.93	28.56	35.43	37.54
500 Hz	27.12	27.71	30.51	27.25	29.37	28.44	28.68
630 Hz	29.21	37.67	33.62	34.16	30.51	32.60	31.54
800 Hz	31.53	39.75	36.43	41.74	35.76	37.54	35.47
1 k Hz	32.99	36.23	37.00	39.76	32.54	37.45	35.53
1.25 k Hz	33.14	40.17	35.67	38.01	37.29	37.63	40.39
1.6 k Hz	32.35	39.54	38.54	35.48	32.69	34.54	37.87
2 k Hz	32.94	38.56	35.67	36.76	35.76	34.52	33.58
2.5 k Hz	32.19	35.36	43.45	34.64	37.42	36.56	38.75
3.15 k Hz	32.48	43.00	42.54	37.34	42.55	41.77	39.56
4 k Hz	32.59	42.60	41.46	36.20	37.40	34.65	35.22



รูปที่ 6.28 แสดงการเปรียบเทียบค่า Transmission Loss ของแผงกันเสียงแต่ละชนิด

ซึ่งจากรูปที่ 6.28 จะสังเกตได้ว่าแผงกันเสียงซึ่งหล่อด้วยมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันทั้ง 6 ตัวอย่าง มีค่า Transmission Loss ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยค่า Transmission Loss ของกำแพงอิฐมวลเบา มีค่าใกล้เคียงกับ ค่า Transmission Loss ของแผงกันเสียง (ซึ่งได้ทำการคำนวณค่า Transmission Loss ของตัวแผงกันเสียงแล้ว) โดยค่า Transmission Loss ของตัวแผงกันเสียงส่วนใหญ่มีค่าเกินกว่า 25 เดซิเบล โดยจากความรู้เรื่องปรากฏการณ์เสียงกลบ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 นั้น เป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อเสียงที่มีความดังมากกว่า 10 dB จะกลบเสียงอื่นๆ ซึ่งมีความดังน้อยกว่าเสียงกลบ และจากข้อมูลในตารางที่ 2.2 ซึ่งพบว่าระดับความเป็นไปได้ของการลดระดับเสียงโดยแผงกันเสียงนั้น อัตราการลดลงของระดับเสียง 15 dB มีความเป็นไปได้ในการลดเสียงถือว่ายาก และที่อัตราการลดลงของระดับเสียง 20 dB นั้น ความเป็นไปได้ในการลดเสียงแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ดังนั้นถ้าแผงกันเสียงที่พัฒนาขึ้นนั้นมีความสามารถในการลดทอนเสียงทะลุผ่านได้ถึง 25 dB จะทำให้ผู้สังเกตซึ่งอยู่หลังแผงกันเสียง จะได้ยินเฉพาะเสียงที่เกิดจากการเลี้ยวเบนอ้อมแผงกันเสียงเพียงอย่างเดียว ซึ่งผู้สังเกตจะไม่ได้ยินเสียงซึ่งเกิดมาจากการทะลุผ่านแผงกันเสียงเลย จึงสามารถสรุปได้ว่า แผงกันเสียงที่พัฒนานี้มีประสิทธิภาพในการลดทอนเสียงทะลุผ่านตามวัตถุประสงค์ซึ่งทางผู้วิจัยต้องการ

### 6.3 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผงกันเสียง

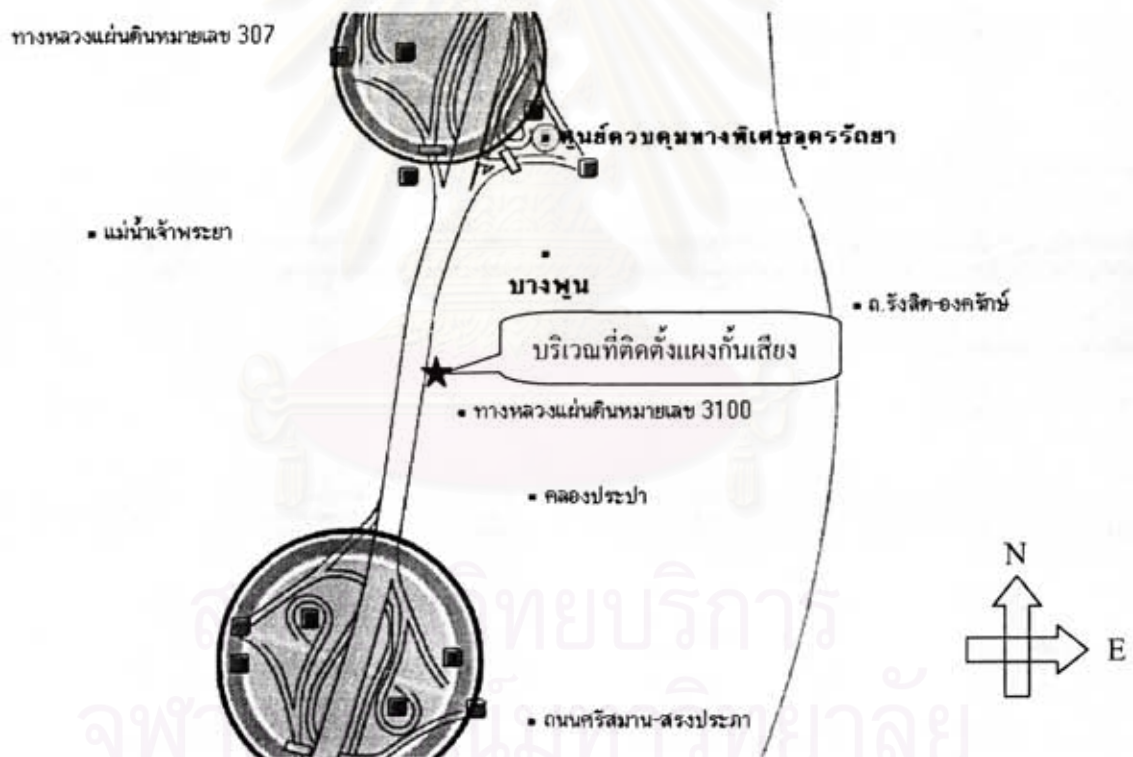
จากการศึกษารายงานวิจัยชั้นกลางเรื่อง "โครงการศึกษาการลดผลกระทบของโครงสร้างทางยกระดับต่อค่าระดับเสียงในเขตเมือง" ทำให้สามารถสรุปผลการวิจัยดังต่อไปนี้คือ (1) อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการหล่อแผงกันเสียงคือ มอร์ตาร์ซึ่งมีส่วนผสมโดยการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 20% ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 พบว่าเป็นอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังและความคงทนเหมาะสมที่สุด (2) การใช้วัสดุดูดกลืนเสียงซึ่งในการศึกษาผู้วิจัยได้เลือกใช้ใยแก้วที่มีความหนา 5 เซนติเมตร และฝาปิดเจาะรูพุนซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะขนาด 2.5 มิลลิเมตร โดยมีจำนวนของรูเจาะ 49 รู ต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว ซึ่งการติดตั้งฝาปิดเจาะรูพุนจะช่วยป้องกันตัวใยแก้วซึ่งเป็นวัสดุที่บอบบาง อีกทั้งยังช่วยให้ใยแก้วสามารถดูดกลืนเสียงที่ความถี่ที่ต้องการได้ดีขึ้นซึ่งจะช่วยลดระดับเสียงบนทางพิเศษได้ดี และจากผลการวัดระดับเสียงบนทางด่วนนั้นพบว่า เสียงของยานพาหนะบนทางด่วนจะมีระดับที่มีความดังมากในช่วงความถี่ 1-2.5 kHz ซึ่งจากการผลการทดสอบแผงกันเสียงที่ใช้ใยแก้วที่มีความหนา 5 เซนติเมตร และฝาปิดเจาะรูพุนซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะขนาด 2.5 มิลลิเมตร โดยมีจำนวนของรูเจาะ 49 รู ต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว จะช่วยลดซับเสียงในช่วงความถี่ 1-2.5 kHz ได้ดี (3) จากผลการทดสอบหาค่าการลดทอนเสียงทะลุผ่าน พบว่า ส่วนผสมที่แตกต่างกันของมอร์ตาร์มีผลน้อยมากต่อค่าการลดทอนเสียงทะลุผ่านของแผงกันเสียง ซึ่งแผงกันเสียงที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้มีค่าการลดทอนเสียงทะลุผ่าน Transmission Loss ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 25 dB ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพดีในการลดทอนเสียงทะลุผ่าน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

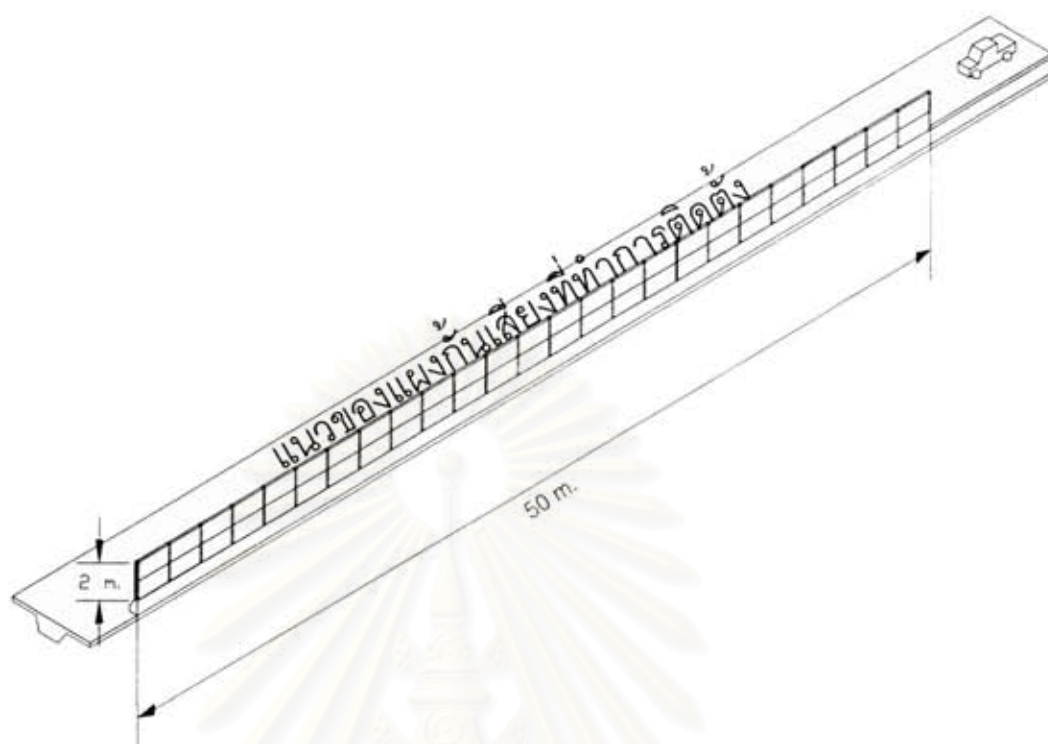


ขั้นตอนการติดตั้งแผงกันเสียงในบริเวณสถานที่ติดตั้งจริง

หลังจากทำการผลิตแผงกันเสียงโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรและอุตสาหกรรม ซึ่งได้ทดสอบประสิทธิภาพของแผงกันเสียงในห้องปฏิบัติการทั้งด้านความแข็งแรงคงทนและ ความสามารถในการลดทอนเสียงเสร็จสิ้นแล้ว ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการนำแผงกันเสียงที่ได้ออกแบบ นี้ไปติดตั้งยังสถานที่ติดตั้งจริง ซึ่งก็คือบริเวณริมทางยกระดับสายอุตราวิทยา ฝั่งขาเข้า ระหว่างด่าน เก็บเงิน ศรีสมาน-บางพูน กิโลเมตรที่ 6+800A ดังแสดงในรูปที่ 7.1 ซึ่งขนาดของแผงกันเสียงที่ ติดตั้งมีความยาว 50 เมตร สูง 2 เมตร (จากขอบข้างทางยกระดับ) ดังแสดงในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.1 แผนที่แสดงสถานที่ติดตั้งแผงกันเสียงในการวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 7.2 ลักษณะการติดตั้งแผงกั้นเสียงบนขอบข้างทางยกระดับ  
(ขนาดรูปไม่ตรงตามสเกล)

### 7.1 สถานที่ติดตั้ง

จากรูปที่ 7.1 ซึ่งเป็นแผนที่ของบริเวณทางยกระดับที่จะทำการติดตั้งแผงกั้นเสียงนั้น จะพบว่าทางยกระดับมีลักษณะเป็นแนวตรง ซึ่งจากการสอบถามจากเจ้าหน้าที่ของบริษัททางด่วน กรุงเทพฯ จำกัด (มหาชน) พบว่าบริเวณนี้มีการเกิดอุบัติเหตุค่อนข้างน้อย เนื่องจากทางยกระดับเป็นทางตรงและมีปริมาณการจราจรไม่มาก โดยทางเจ้าหน้าที่ของบริษัททางด่วนกรุงเทพฯ จำกัด (มหาชน) กล่าวว่าบริเวณทางยกระดับที่จะเกิดอุบัติเหตุบ่อยครั้ง โดยเฉพาะประเภทของรถบรรทุกขนาดใหญ่ที่เกี่ยวพันกับแผงกั้นเสียงริมทางจะเกิดในบริเวณที่ทางยกระดับมีลักษณะเป็นทางโค้ง ซึ่งรถบรรทุกขนาดใหญ่ได้วิ่งมาด้วยความเร็วสูงและมีการหักหัวของรถบรรทุกเพื่อเลี้ยว ซึ่งเป็นสาเหตุให้ส่วนของตัวรถเกิดการเกี่ยวพันกับแผงกั้นเสียงริมทาง และกรณีที่เป็นไปได้คือคนขับเกิดการหลับใหล แล้วตัวรถเกิดการเบี่ยงเข้าไปเกี่ยวพันกับขอบข้างทางที่มีการติดตั้งแผงกั้นเสียง เพราะฉะนั้นเหตุผลหลักๆ ที่เลือกทำการติดตั้งแผงกั้นเสียงในบริเวณนี้ มีดังต่อไปนี้

- บริเวณที่ติดตั้งแผงกันเสียงเป็นทางยกระดับที่เป็นทางตรงซึ่งเป็นจุดที่แทบจะไม่เกิดอุบัติเหตุโดยเฉพาะกรณีที่เกิดเฉี่ยวชนกับขอบข้างทาง
- บริเวณที่ติดตั้งแผงกันเสียงมีการจราจรไม่มากจึงสามารถทำการติดตั้งได้สะดวก
- ได้ทางยกระดับที่มีการติดตั้งแผงกันเสียงมีลักษณะเป็นทุ่งโล่งปราศจากที่อยู่อาศัยจึงค่อนข้างมีความปลอดภัย อีกทั้งสะดวกแก่การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดเสียงเพื่อทำการตรวจวัดเสียงหลังจากการติดตั้งแผงกันเสียง
- บริเวณที่ติดตั้งแผงกันเสียงได้เคยมีหน่วยงานของรัฐ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม) มาทำการตรวจวัดระดับเสียงตรงบริเวณจุดนี้มาก่อน จึงเป็นประโยชน์สำหรับการจะนำข้อมูลที่ได้เคยทำการตรวจวัดมาเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดระดับเสียงหลังจากติดตั้งแผงกันเสียงในงานวิจัยครั้งนี้

## 7.2 ขั้นตอนการติดตั้งแผงกันเสียง

แผงกันเสียงที่จะทำการการติดตั้งจะตั้งอยู่บนแผงกันรถริมทางยกระดับที่มีอยู่เดิม ดังรูปที่ 7.3 ซึ่งขั้นตอนในการติดตั้งมีดังนี้



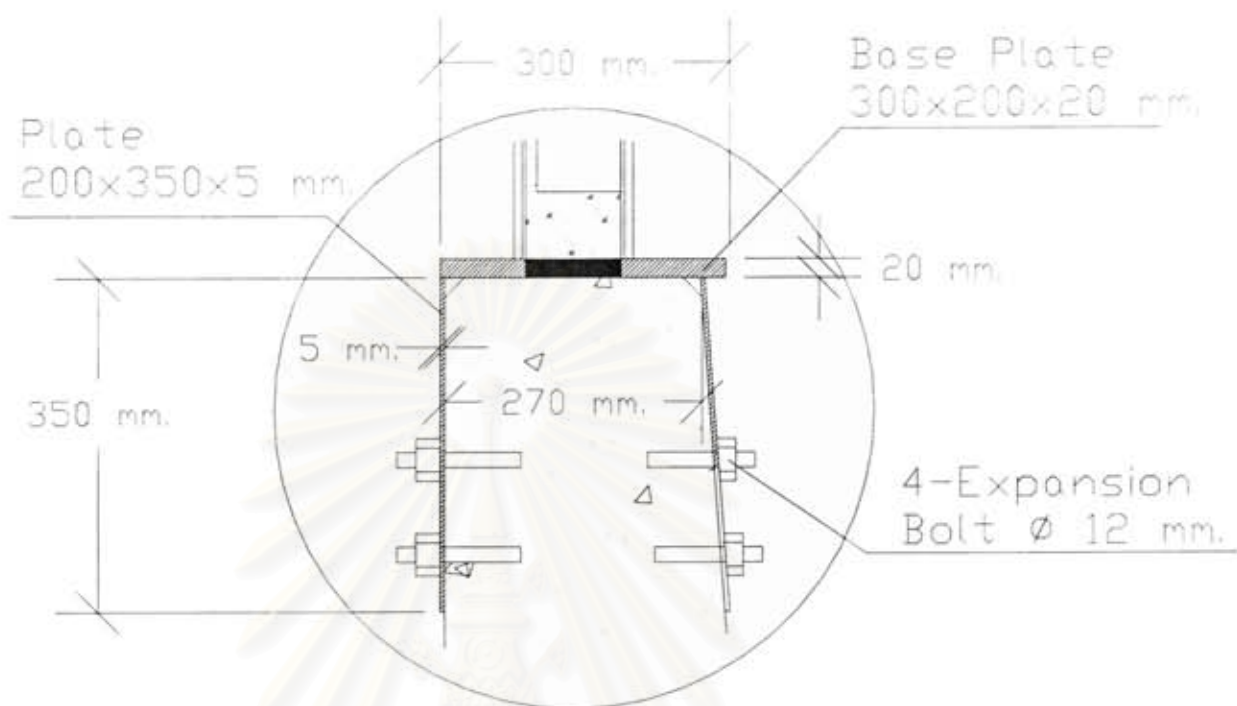
รูปที่ 7.3 ลักษณะการติดตั้งแผงกันเสียงบริเวณริมทางยกระดับ  
(ขนาดของรูปไม่ตรงตามสเกล)



(ก) ทำการตรวจสอบหาตำแหน่งเหล็กเสริมและระยะฝังเหล็กเสริมจากผิวของแผงกันรถริมทางยกระดับด้วยเครื่องตรวจหาเหล็กเสริมในคอนกรีต (Profometer 5) เพื่อให้เป็นข้อมูลในการช่วยออกแบบลักษณะของฐานรองรับแผงกันเสียง ดังแสดงในรูปที่ 7.4 โดยการออกแบบแผงกันเสียงจะคำนึงถึงความสามารถในการต้านทานแรงลมเป็นหลัก ซึ่งจากการตรวจสอบหาตำแหน่งของเหล็กเสริมพบว่าระยะฝังของเหล็กเสริมในแผงกันรถริมทางยกระดับ มีระยะฝังประมาณ 5 เซนติเมตรจากผิวของแผงกันรถริมทางยกระดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการออกแบบลักษณะของฐานรองรับแผงกันเสียงซึ่งจะต้องติดตั้งบนแผงกันรถดังแสดงในรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.4 การตรวจสอบหาตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 7.5 รูปขยายด้านข้างของบริเวณฐานรองรับแผ่นกันเสียง

(ข) ทำการติดตั้งแผ่นกันเสียงบนทางยกระดับ โดยเริ่มแรกจะทำการร้อยถอนราวเหล็กซึ่งได้ติดตั้งไว้อยู่เดิมบนแผ่นกันรถดังแสดงในรูปที่ 7.6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

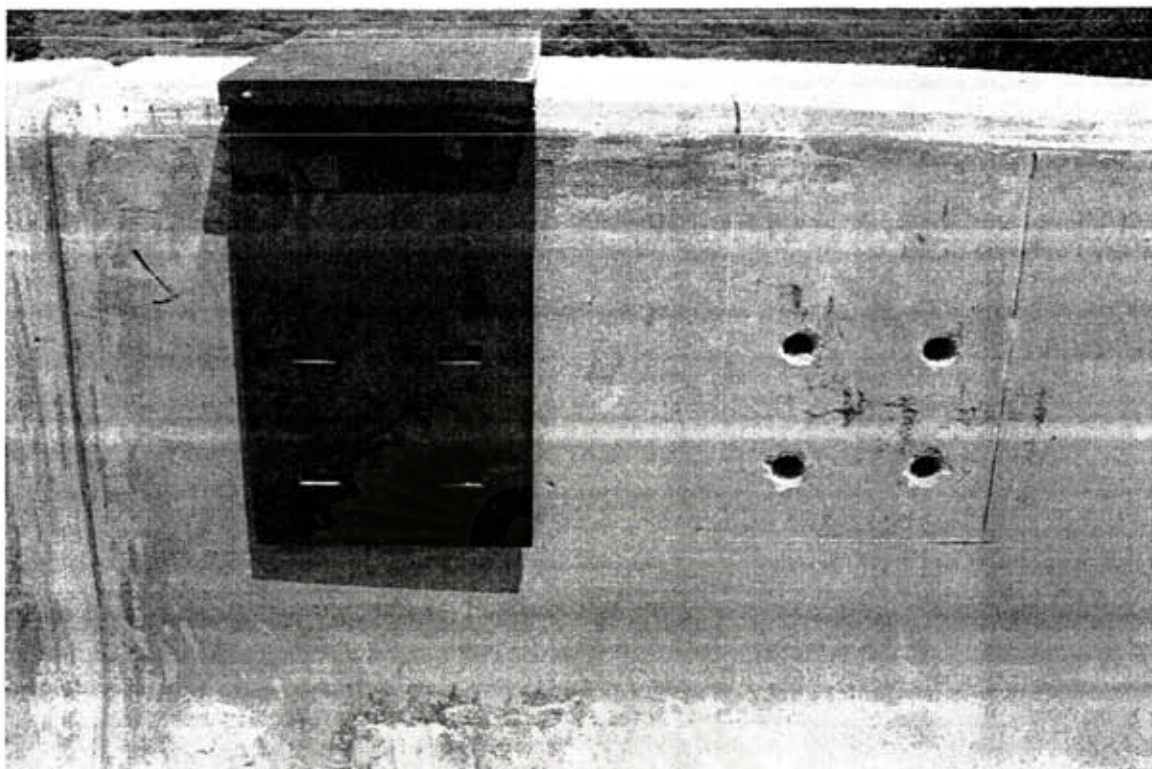


รูปที่ 7.6 ราวเหล็กเดิมที่ติดตั้งอยู่บนขอบข้างทางยกระดับ

(ค) ทำการเจาะรูบริเวณด้านข้างของแผงกันรถริมทางยกระดับเพื่อเตรียมการฝังปลั๊กคอนกรีต (Expansion Bolts) ดังแสดงในรูปที่ 7.7 และติดตั้งแผ่นเหล็กซึ่งเป็นฐานรองรับแผงกันเสียงดังแสดงในรูปที่ 7.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 7.7 การเจาะรูเพื่อเตรียมติดตั้งปลั๊กคอนกรีตบริเวณขอบข้างทางยกระดับ



รูปที่ 7.8 การติดตั้งแผ่นเหล็กซึ่งเป็นฐานรองรับแผงกันเสียง

(ง) ทำการเชื่อมเสา H-Beam ขนาด 5 x 5 นิ้ว ความสูง 2 เมตร กับ แผ่นเหล็กซึ่งเป็นฐานรองรับแผงกันเสียง (Base Plate) เพื่อให้ เสา H-Beam ทำหน้าที่เป็นตัวยึดแผงกันเสียง ดังแสดงในรูปที่ 7.9 รวมทั้งทาสีกันสนิม ซึ่งวิธีการติดตั้งแผงกันเสียงจะทำการสอดแผงกันเสียงลงไประหว่างช่องว่างของเสา H-Beam ด้วยรถยก (HIBB) ดังแสดงในรูปที่ 7.10 และรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.9 การติดตั้งเสา H-Beam เพื่อใช้ในการยึดแผงกันเสียงบริเวณริมทางด่วน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



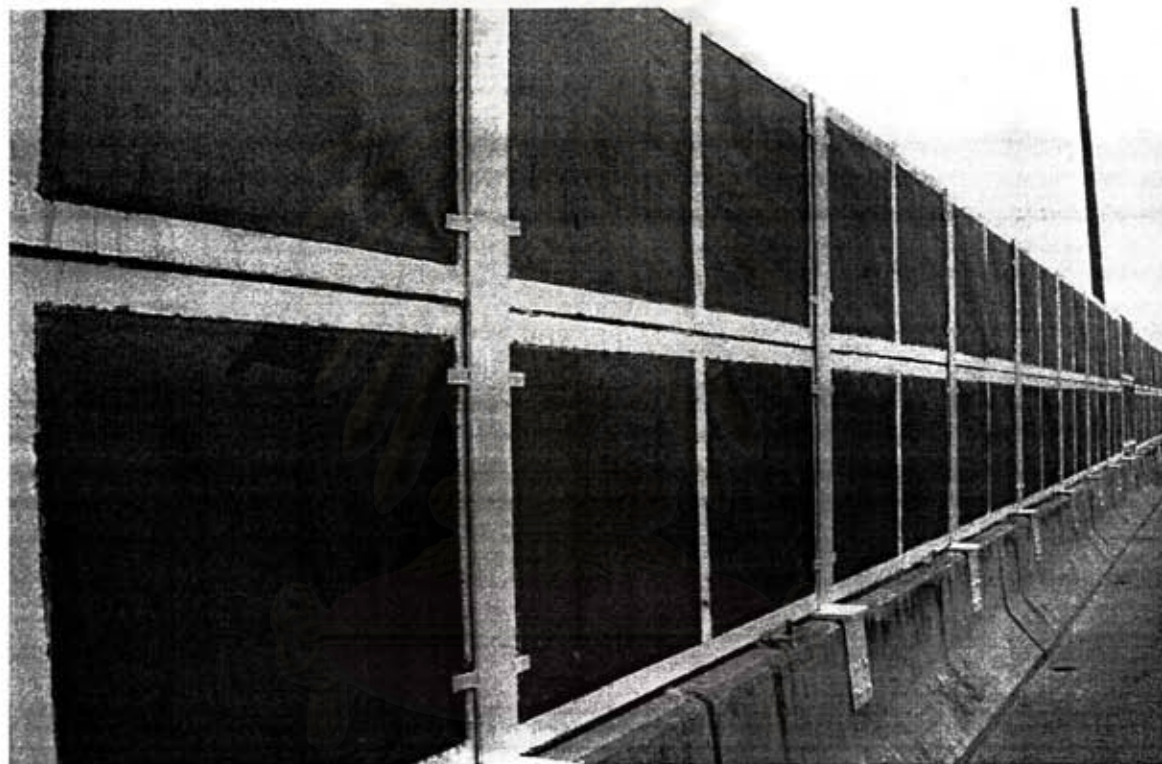
รูปที่ 7.10 วิธีการติดตั้งแผงกันเสียงกับเสา H-Beam



รูปที่ 7.11 การติดตั้งแผงกันเสียงโดยใช้เครนยกขึ้นสอดกับเสาเหล็ก



(๑) หลังจากทำการติดตั้งแผงกันเสียงทั้งหมดมีความยาว 50 เมตร และสูง 2 เมตร แล้วจึงทำการติดตั้งวัสดุดูดกลืนเสียง (ใยแก้วความหนา 5 เซนติเมตร) ไว้ภายใน พร้อมทั้งติดตั้งฝาปิดเจาะรูเพื่อป้องกันวัสดุดูดกลืนเสียงภายในและช่วยในการดูดกลืนเสียงที่ความถี่ที่ต้องการ หลังจากติดตั้งฝาปิดเจาะรูแล้วจึงทำการทาน้ำมันกันสนิมบริเวณฝาปิดเจาะรู ดังแสดงในรูปที่ 7.12 และ 7.13



รูปที่ 7.12 การติดตั้งฝาปิดเจาะรูกับแผงกันเสียงซึ่งภายในบรรจุวัสดุดูดซับเสียงไว้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.13 แนวของแผงกันเสียงหลังจากการติดตั้งแผงกันเสียงแล้วเสร็จ

### 7.3 ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นขณะทำการติดตั้งแผงกันเสียง

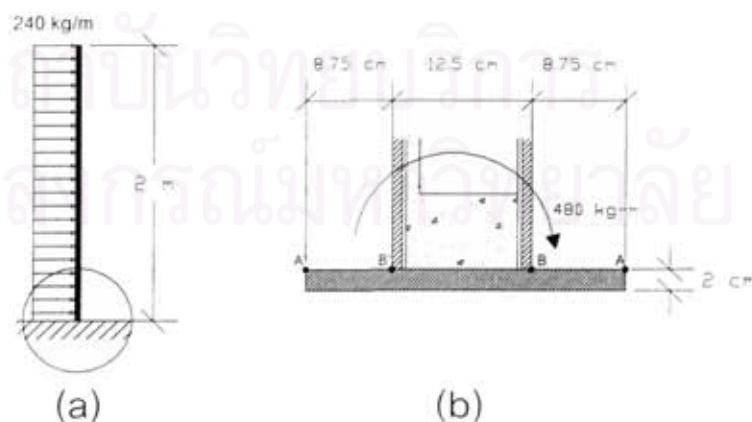
อุปสรรคที่สำคัญในการติดตั้งแผงกันเสียงบนทางยกระดับคือ ความปลอดภัย เพราะการทำงานบนทางยกระดับ รถที่แล่นไปมาบนทางยกระดับจะวิ่งด้วยความเร็วสูง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่ายกว่าทางราบเพราะรถในทางราบสามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ไม่สูงมากนัก อีกทั้งในการขึ้นไปติดตั้งต้องได้รับความเห็นชอบ จากทั้งการทางพิเศษแห่งประเทศไทย และบริษัท ทางด่วนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) และระหว่างการติดตั้งจะต้องมีรถคุ้มกันเพื่อป้องกันอันตรายจากยานพาหนะบนทางยกระดับ รวมทั้งถ้าในระหว่างการติดตั้งมีฝนตกจะต้องทำการหยุดการทำงาน และลงจากทางยกระดับในทันที ซึ่งอุปสรรคเหล่านี้ก็เป็นเหตุผลให้การทำงานบนทางยกระดับจะล่าช้ากว่าการติดตั้งบนทางราบซึ่งจะต้องคำนึงถึงเรื่องความปลอดภัยเป็นอันดับแรก

#### 7.4 รายการคำนวณเพื่อออกแบบโครงสร้างรองรับแผงกันเสียงบนขอบข้างทางยกระดับ

แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับแผงกันเสียงบนขอบข้างทางยกระดับนั้น จะเป็นการออกแบบโดยกำหนดขนาดชิ้นส่วนของโครงสร้างให้สอดคล้องกับรูปร่างและขนาดของขอบข้างทางยกระดับ จากนั้นก็ทำการตรวจสอบเพื่อหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างเมื่อทำการรับแรงภายนอกที่มากกระทำโดยรายละเอียดในการออกแบบมีดังต่อไปนี้

(ก) การออกแบบเสาเหล็ก จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้นเราจะทำการติดตั้งแผงกันเสียงกับเสาเหล็กรูปตัว H ซึ่งจะทำการติดตั้งโดยการสอดแผงกันเสียงลงไประหว่างช่องว่างของเสาเหล็กดังแสดงในรูปที่ 7.10 อีกทั้งเมื่อทำการติดตั้งแผงกันเสียงบนขอบข้างทางแล้วนั้น แรงภายนอกซึ่งมากกระทำต่อด้านข้างของแผงกันเสียงซึ่งก็คือแรงลมที่ขนาด 120 กิโลกรัมต่อตารางเมตร จะถูกถ่ายลงมายังเสาเหล็กทั้งสองข้างโดยวิธีการคำนวณมีดังต่อไปนี้

- กำหนดให้แรงลมที่มากกระทำต่อด้านข้างของกำแพงกันเสียง มีค่าเท่ากับ 120 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
- ในเสาเหล็ก 1 ต้น จะมีการรับแรงลมที่มากกระทำด้านข้างของแผงกันเสียงเป็นพื้นที่ 2 ตารางเมตรต่อ ความยาว 1 เมตร ดังนั้นเราสามารถแปลงหน่วยของแรงต่อพื้นที่ให้เป็นหน่วยของแรงต่อความยาว มีค่าเท่ากับ  $120 \times 2 = 240$  กิโลกรัมต่อเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7.14 (a)



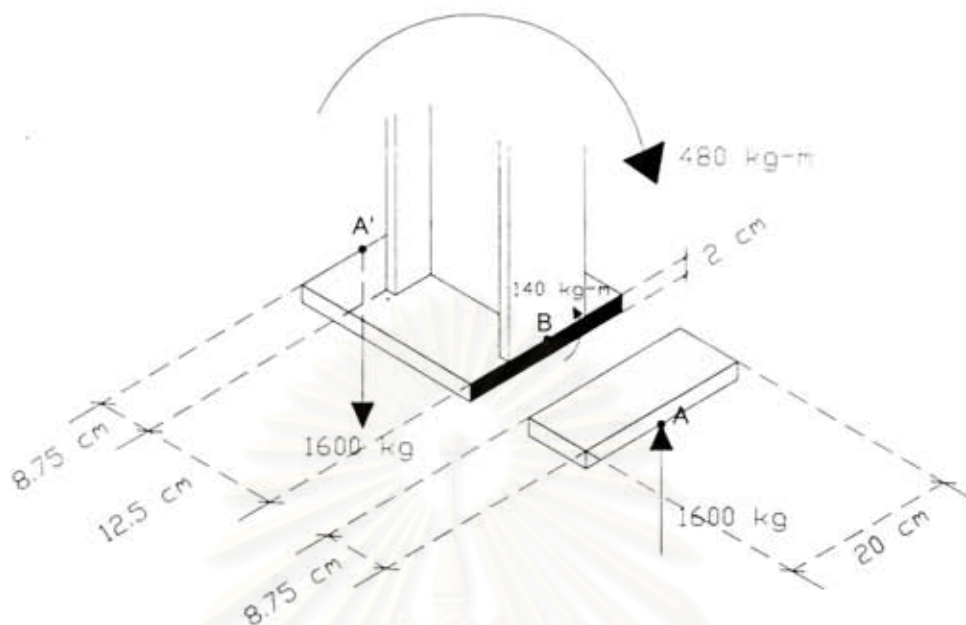
รูปที่ 7.14 (a) แรงต่อความยาวที่กระทำด้านข้างของเสาเหล็ก (b) โมเมนต์ดัดบริเวณโคนเสาเหล็กเนื่องจากแรงต่อความยาวที่กระทำด้านข้างของเสาเหล็ก



- ซึ่งจากแรงต่อความยาวทำให้เกิดโมเมนต์ดัดบริเวณโคนเสาเหล็กซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{(240)(2)^2}{2} = 480$  กิโลกรัม-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 7.14 (b)
- เลือกใช้เสารูปตัว H ที่มีขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติของหน้าตัดคือ พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 30.31 ตารางเซนติเมตร ความหนาของปีกเสาเท่ากับ 9 มิลลิเมตร ความหนาของเวบเสาเท่ากับ 6.5 มิลลิเมตร โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเท่ากับ 847 เซนติเมตร<sup>4</sup>
- หน่วยแรงดัดสูงสุดของหน้าตัดเสาจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{(480)(100)(12.5/2)}{(847)} = 355$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(0.6)(2500) = 1500$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเหล็ก โดยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเหล็กมีค่าเท่ากับ  $(240)(2) = 480$  กิโลกรัม ดังนั้นหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ  $\frac{(480)}{(0.6)(12.5)} = 64$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(0.4)(2500) = 1000$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

(ข) การออกแบบแผ่นเหล็กสำหรับรองรับเสาเหล็ก (Base Plate) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีความสำคัญเพราะเป็นชิ้นส่วนที่ต้องรองรับโมเมนต์ดัดที่ถ่ายมาจากโคนเสาเหล็กอีกทั้งน้ำหนักของตัวแผงกันเสียงแต่ แรงซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมทั้งขนาดและความหนาของแผ่นเหล็กรองรับเสาเหล็กซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

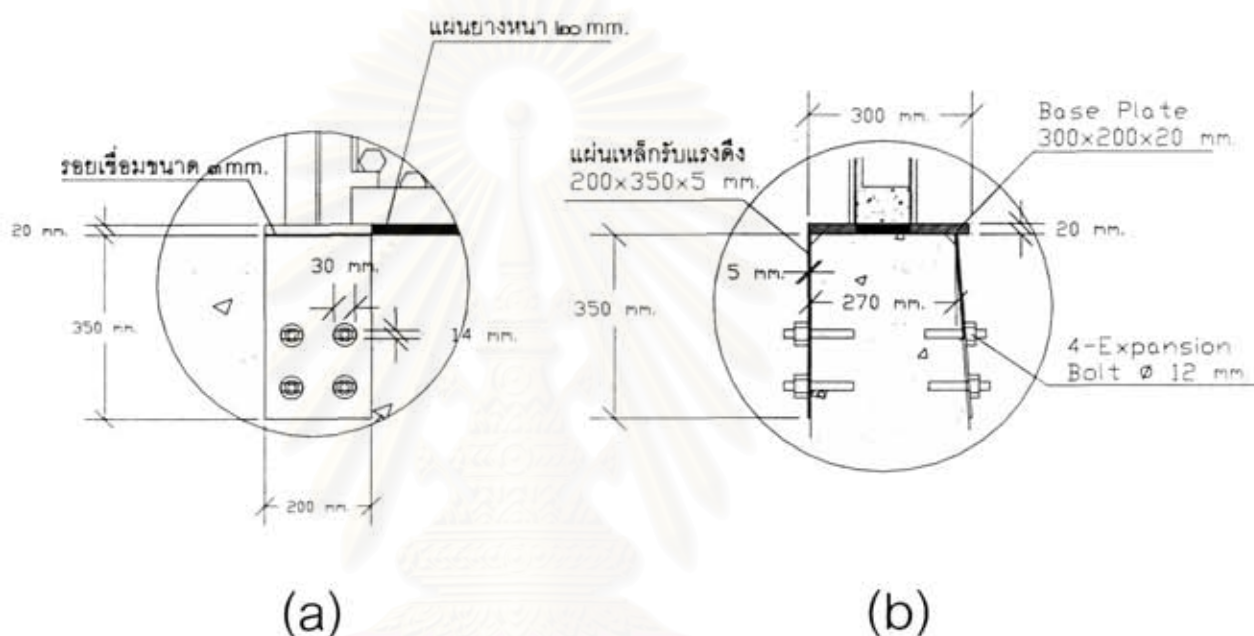
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.15 แรงภายในที่เกิดขึ้นบริเวณโคนเสาเหล็ก

- กำหนดให้ขนาดของแผ่นเหล็กรองรับเสาเหล็กมีขนาด 20x30x2 เซนติเมตร
- โมเมนต์ดัดบริเวณโคนเสา (480 กิโลกรัม-เมตร) นั้นจะทำให้เกิดแรงคู่ควบ ณ จุด A มีค่าเท่ากับ  $\frac{(480)(100)}{30} = 1600$  กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 7.15
- จากแรงคู่ควบซึ่งมีค่า 1600 กิโลกรัม จะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด ณ บริเวณหน้าตัดที่จุด B โดยสามารถเขียนลักษณะของโมเมนต์ดัดของหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 7.15
- จากแรงคู่ควบซึ่งมีค่า 1600 กิโลกรัม จะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด ณ บริเวณหน้าตัดที่จุด B และ B' ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(1600)(0.0875) = 140$  กิโลกรัม-เมตร อีกทั้งค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของแผ่นเหล็กมีค่าเท่ากับ  $\frac{(14000)(1)}{(\frac{1}{12})(2^3)(20)} = 1050$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยสามารถเขียนลักษณะของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของแผ่นเหล็กรองรับเสาเหล็กดังแสดงในรูปที่ 7.15 ซึ่งค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(0.6)(2500) = 1500$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

(ค) การออกแบบแผ่นเหล็กรับแรงดึงซึ่งติดตั้งบริเวณด้านข้างของขอบข้างทางยกระดับ เนื่องจากบริเวณขอบข้างทางยกระดับมีความยากลำบากในการติดตั้งปลั๊กคอนกรีตบริเวณแผ่นเหล็กรองรับเสาเหล็ก จึงทำการประยุกต์โดยติดตั้งแผ่นเหล็กรับแรงดึงบริเวณด้านข้างของขอบข้างทางยกระดับดังแสดงในรูปที่ 7.16 และมีรายการคำนวณเพื่อออกแบบขนาดแผ่นเหล็กรับแรงดึงดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.16 แผ่นเหล็กรับแรงดึงด้านข้างซึ่งติดตั้งบริเวณข้างขอบข้างทางยกระดับ

- กำหนดให้แผ่นเหล็กรับแรงดึงมีขนาด 20 x 35 x 0.5 เซนติเมตร และทำการเจาะรูเพื่อหลบเหล็กเสริมซึ่งอยู่ในขอบของทางยกระดับ โดยรูเจาะมีขนาดกว้าง 30 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7.16 (a)
- จากรูปที่ 7.15 จะพบว่าที่จุด A เกิดแรงคู่ควมมีค่าเท่ากับ 1600 กิโลกรัม ซึ่งแรงคู่ควมนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดขึ้นบนหน้าตัดของแผ่นเหล็กรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ  $\frac{(1600)}{(0.5)(20-3-3)} = 229$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(0.6)(2500) = 1500$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



(ง) การออกแบบขนาดของปลั๊กคอนกรีต แรงภายนอกที่ปลั๊กคอนกรีตต้องรับเป็นหลักคือแรงเฉือนซึ่งเกิดจากแรงคู่ควบที่เกิดจากโมเมนต์บริเวณโคนเสาซึ่งมีค่าเท่ากับ 1600 กิโลกรัม

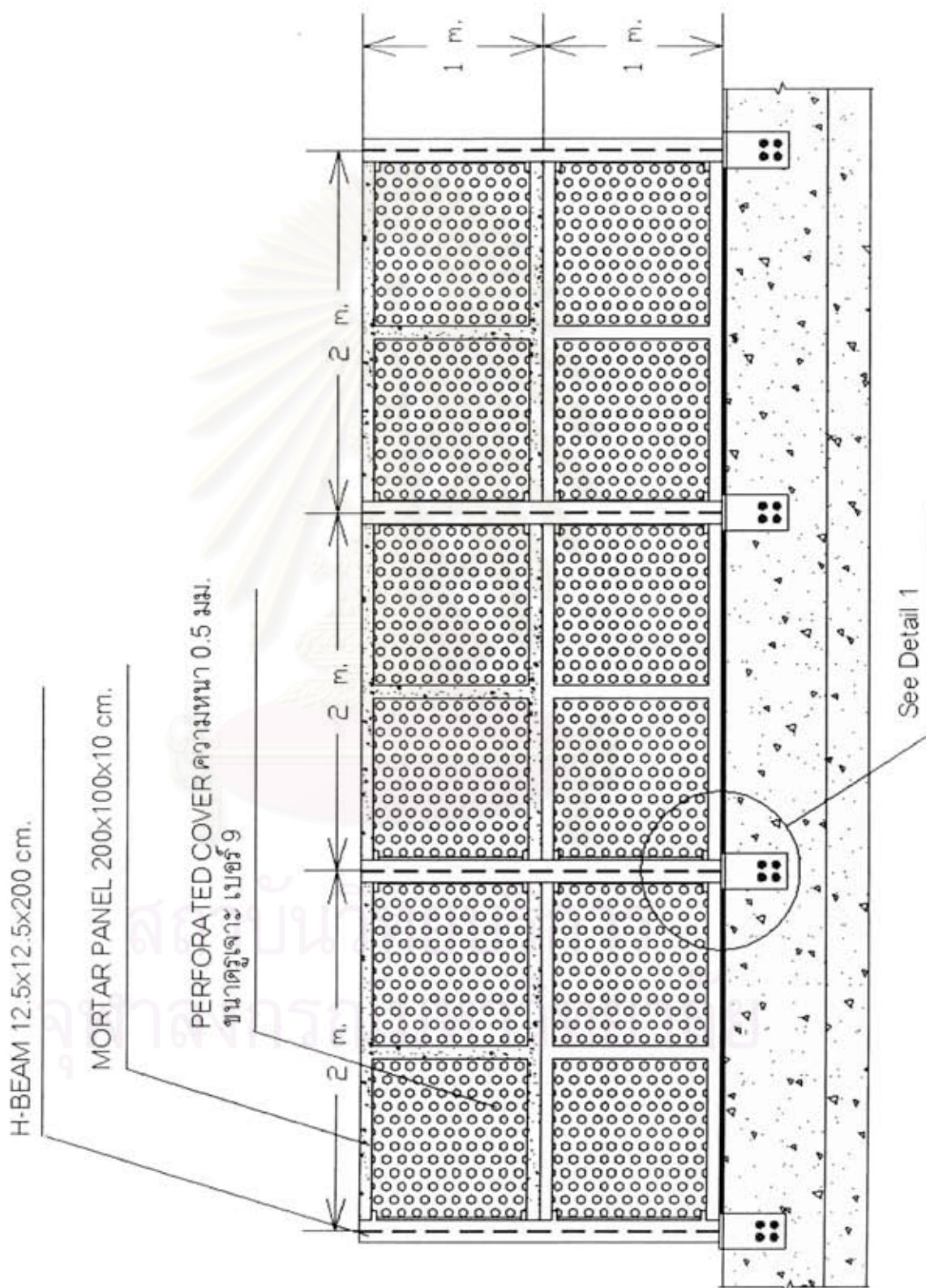
- ใช้ปลั๊กคอนกรีตซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยท่อนเหล็กที่ใช้ในปลั๊กคอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงสูงสุดจนเกิดการครากมีค่าเท่ากับ 2500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- เมื่อมีแรงคู่ควบซึ่งมีค่าเท่ากับ 1600 กิโลกรัม ดังนั้นถ้าเราเลือกใช้ปลั๊กคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ดังนั้นจะต้องใช้ปลั๊กคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน  $\frac{(1600)}{(0.4)(2500)(\frac{\pi}{4})(1.2)^2} \approx 2$  ตัว แต่เลือกใช้ปลั๊กคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัว โดยรายละเอียดของการติดตั้งแสดงในรูปที่ 7.16

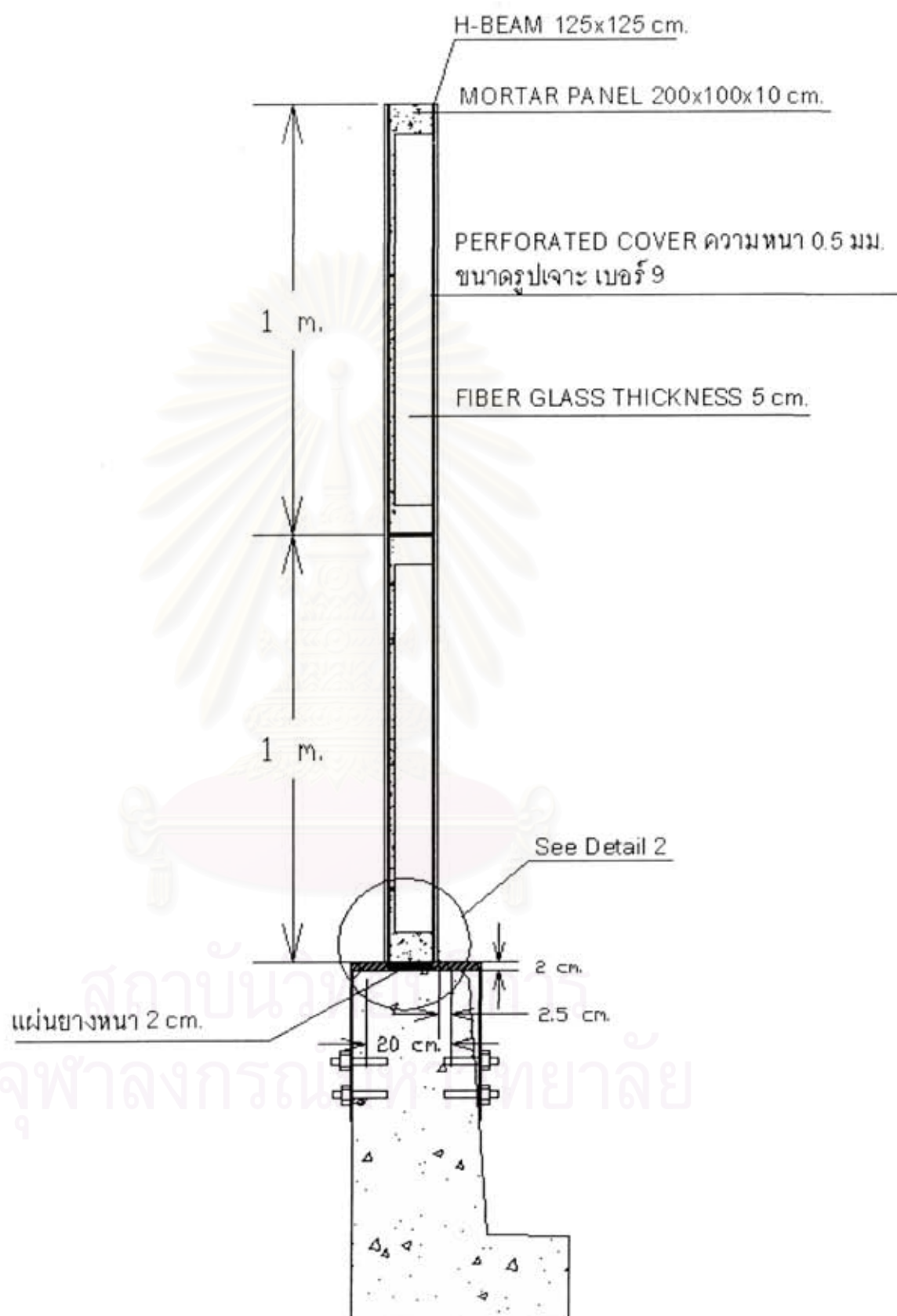
(จ) ทำการออกแบบขนาดและรอยเชื่อมบริเวณรอยต่อระหว่างเสาเหล็กและแผ่นเหล็กรองรับเสาเหล็ก

- หากพิจารณาจากโมเมนต์ดัดซึ่งกระทำบริเวณโคนเสาซึ่งมีค่าเท่ากับ 480 กิโลกรัม-เมตร จะทำให้เกิดแรงคู่ควบตรงบริเวณขอบของเสาเหล็กซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{(480)(100)}{(12.5)} = 3840$  กิโลกรัม
- เลือกใช้ขนาดของขาเชื่อม 5 มิลลิเมตร ดังนั้นจะต้องเชื่อโดยรอบให้มีความยาวเท่ากับ  $\frac{(3840)}{(0.3)(0.707)(0.6)(4900)} \approx 7$  เซนติเมตร แต่ในการก่อสร้างจริงจะทำการเชื่อมโดยรอบของเสาเหล็กรูปตัว H ซึ่งมีความยาวทั้งหมดเท่ากับ 48.7 เซนติเมตร

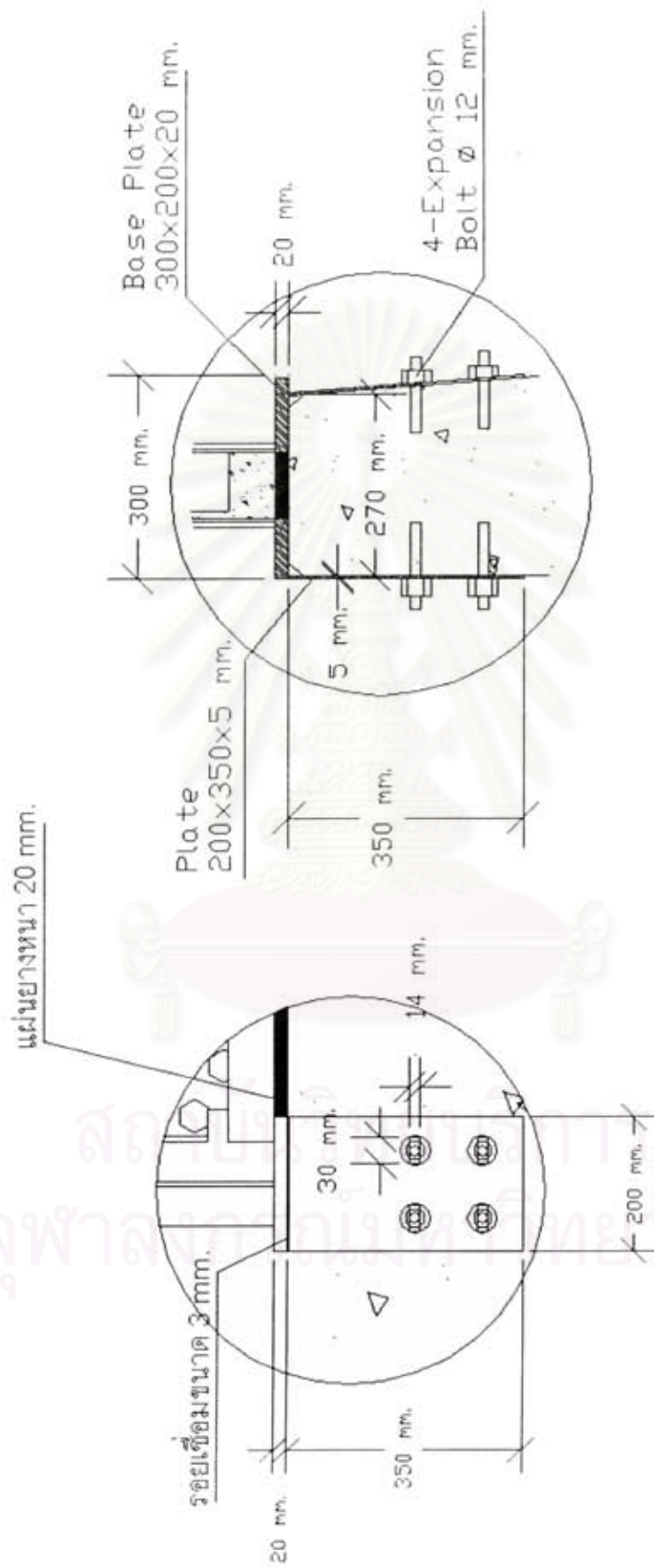
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.5 แบบรายละเอียดการติดตั้งแผงกันเสียงบนทางยกระดับ









Detail 2

Detail 1

## บทที่ 8

### การทดสอบประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียง ณ สถานที่ติดตั้งจริง

#### 8.1 วัตถุประสงค์ในการทดสอบ

เพื่อตรวจวัดระดับเสียงเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆ จากพื้นดิน และระยะทางต่างๆ ที่ห่างจากแนวของกำแพงกันเสียง (เนื่องจากได้ทำการติดตั้งแผงกันเสียงบนขอบข้างทางยกระดับ แล้วจึงทำการเรียกโครงสร้างชุดนี้ใหม่ว่า "กำแพงกันเสียง หรือ Noise Barrier") เปรียบเทียบกับระดับเสียงเฉลี่ยที่ตรวจวัดจากแหล่งกำเนิดเสียง ณ สถานที่ติดตั้งกำแพงกันเสียงบนทางยกระดับจริง เพื่อหาประสิทธิภาพในการป้องกันเสียงของกำแพงกันเสียงและผลกระทบที่เกิดขึ้นหลังจากทำการติดตั้งกำแพงกันเสียงบนทางยกระดับ

#### 8.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการใช้ตรวจวัดค่าระดับเสียง [กรมควบคุมมลพิษ, 2546]

เนื่องจากการตรวจวัดระดับเสียงในสภาพแวดล้อมนั้นจะมีตัวแปรซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าระดับเสียงในสภาพแวดล้อม ซึ่งถ้าเราไม่เข้าใจถึงความหมายของตัวแปรต่างๆ ก็จะทำให้ไม่เข้าใจถึงผลที่ได้มาจากการตรวจวัดระดับเสียง ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความหมายของตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดค่าระดับเสียงรวมทั้งวิธีการคำนวณค่าตัวแปรจากข้อมูลซึ่งได้มาจากการทำการตรวจวัดระดับเสียงจริงดังต่อไปนี้

##### 8.2.1 ระดับเสียง (Sound Level or Noise Level in *dB*)

ระดับเสียง คือ ค่าที่ใช้แทนความหมายของคำว่า ระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level, *SPL* in *dB*)

##### 8.2.2 ระดับความดันเสียงสูงสุด (Maximum Sound Pressure Level, $L_{max}$ in *dB*)

ระดับความดันเสียงสูงสุด คือ ค่าสูงสุดของระดับความดันเสียงที่ซึ่งปรากฏในช่วงเวลาที่กำหนด

### 8.2.3 ระดับความดันเสียงต่ำสุด (Minimum Sound Pressure Level, $L_{min}$ in dB)

ระดับความดันเสียงต่ำสุด คือ ค่าต่ำสุดของระดับความดันเสียงที่ปรากฏในช่วงเวลาที่กำหนด

### 8.2.4 ระดับความดันเสียงแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Sound Pressure Level)

ระดับความดันเสียงแบบถ่วงน้ำหนัก คือ ระดับความดันเสียงที่ได้จากการวัดที่มีการถ่วงน้ำหนักปรับแก้ ณ ความถี่ต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับความรู้สึกรับรู้ในการตอบสนองต่อความดังตามวัตถุประสงค์ซึ่งแตกต่างกัน โดยการถ่วงน้ำหนักมี 3 แบบ คือ A, B และ C แต่ที่สอดคล้องกับความรู้สึกของมนุษย์และนิยมใช้มากที่สุดคือ แบบ A โดยค่าที่ได้มีหน่วยเป็น dB(A) หรือ dBA

### 8.2.5 ระดับเสียงเฉลี่ย (Equivalent Sound Pressure Level, $L_{eq}$ in dB)

ระดับเสียงเฉลี่ย คือ ค่าระดับเสียงในอุดมคติที่บอกการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานเสียงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาใดๆ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8.1 และ 8.2

$$L_{eq,T} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{t_1 - t_2} \int \left( \frac{P_t}{P_0} \right)^2 dt \right] \quad dB(A) \quad (8.1)$$

หรือ

$$L_{eq,T} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right] \quad dB(A) \quad (8.2)$$

เมื่อ

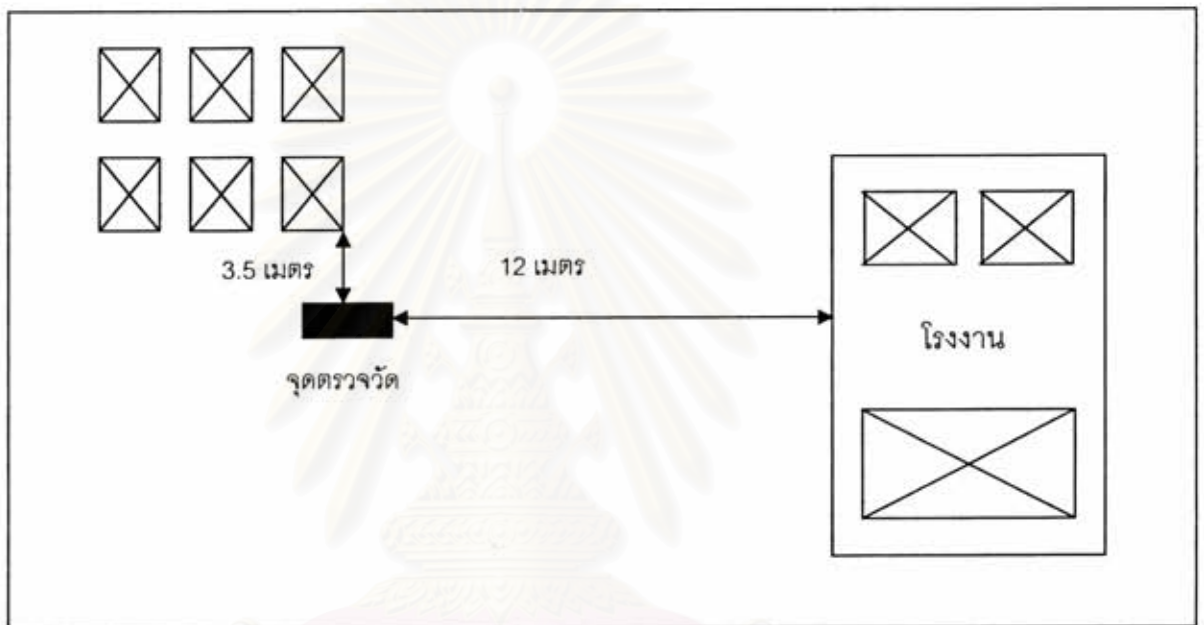
$P_t$	คือ ความดันเสียงที่เปลี่ยนไป (Pa)
$P_0$	คือ ความดันเสียงอ้างอิง, (เท่ากับ $2 \times 10^{-5}$ Pa)
$N$	คือ จำนวนครั้งของการวัด
$L_i$	คือ ระดับเสียงที่ $i$

ซึ่งการวัด  $L_{eq,T}$  นั้น ถ้าใช้ Frequency Weighting แบบใดหน่วยที่ใช้จะเปลี่ยนเป็นแบบนี้ เช่น  $L_{Aeq,T}$  หน่วยเป็น dB(A) และ  $L_{Beq,T}$  หน่วยเป็น dB(B) เป็นต้น



### 8.2.6 ตัวอย่างการคำนวณค่าระดับเสียงเฉลี่ย [กรมควบคุมมลพิษ, 2546]

ทำการตรวจวัดระดับเสียงโดยทั่วไประหว่างบริเวณข้างโรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะและบริเวณหมู่บ้านสุขนิเวศน์ สยามเสนใน พญาไท กรุงเทพมหานคร โดยทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดระดับเสียงบริเวณภายนอกอาคาร ซึ่งบริเวณที่ติดตั้งเครื่องตรวจวัดระดับเสียงอยู่ห่างจากบ้านที่ใกล้ที่สุด 3.5 เมตร ห่างจากริมรั้วด้านนอกของโรงงาน 12 เมตร พื้นโดยรอบเป็นพื้นดินที่มีหญ้าขึ้นเล็กน้อย ไม่มีวัสดุกีดขวางเส้นทางเดินของเสียง ดังแสดงในรูปที่ 8.1



รูปที่ 8.1 แผนผังการติดตั้งเครื่องตรวจวัดระดับเสียง [กรมควบคุมมลพิษ, 2546]

ตารางที่ 8.1 ผลการตรวจวัดระดับเสียง(ระหว่างบริเวณข้างโรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะ และบริเวณหมู่บ้านสุขนิเวศน์) [กรมควบคุมมลพิษ, 2546]

ลำดับที่	ช่วงเวลา	Lmin	Leq	Lmax
1	0.00-1.00	45.6	66.6	79.6
2	1.00-2.00	44.8	58.8	77.8
3	2.00-3.00	44.9	69.5	80.2
4	3.00-4.00	45.2	54.8	73.5
5	4.00-5.00	55	55.5	74.3
6	5.00-6.00	55.3	60.2	75.2
7	6.00-7.00	56.8	63.3	76.9
8	7.00-8.00	57	61.7	78.2
9	8.00-9.00	58	62.2	78.6
10	9.00-10.00	58.2	62.4	69.6
11	10.00-11.00	58.9	60.6	72.1
12	11.00-12.00	59	64	74.5
13	12.00-13.00	57.5	60.4	75
14	13.00-14.00	58.2	60.9	71
15	14.00-15.00	55.6	59.3	77.6
16	15.00-16.00	56.9	58.7	77.3
17	16.00-17.00	57.5	60.2	79.5
18	17.00-18.00	58.6	60.9	77.3
19	18.00-19.00	59.9	65.1	82.7
20	19.00-20.00	55.2	59.5	78.3
21	20.00-21.00	55.6	62.8	74.1
22	21.00-22.00	55.4	58.1	79.2
23	22.00-23.00	50.5	60.2	85.3
24	23.00-24.00	49.5	58.8	79.9

จากข้อมูลในตารางที่ 8.1 เราสามารถคำนวณหาค่าระดับเสียงเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำ การตรวจวัดได้ดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 8.2  $L_{Aeq,T} = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_{p,i}} \right]$  ; แทนค่าสมการ  $L_{Aeq,T} = L_{Aeq,24hr}$ .

$T$  ช่วงเวลาทั้งหมดที่ตรวจวัดคือ 24 ชั่วโมง

$T_1$  เวลาเริ่มต้น 0.00 น

$T_2$  เวลาสิ้นสุดระหว่างการอ่านค่า 1 ชั่วโมง

$\Delta t$  ช่วงเวลาระหว่างการอ่านค่า 1 ชั่วโมง

$N$  จำนวนค่าระดับเสียงที่อ่านได้ทั้งหมด  $N = \frac{T_2 - T_1}{\Delta t} = \frac{00.00 - 24.00}{1} = 24$

$L_{pAt}$  ค่าระดับเสียงที่เก็บมาได้ ในที่นี้ คือค่า  $L_{eq1hr}$ .

$$\begin{aligned} L_{Aeq,24hr} &= 10 \log \frac{1}{24} [10^{0.1(66.6)} + 10^{0.1(58.8)} + 10^{0.1(59.5)} + \dots + 10^{0.1(58.8)}] \\ &= 10 \log \frac{1}{24} [41301005.37] \\ &= 10 \log 1720875.224 \\ &= 10(6.235749382) \\ &= 62.4 \end{aligned}$$

สรุปผลการคำนวณจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดพบว่า ระดับเสียงเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ( $L_{Aeq, 24 hr}$ ) ที่ซึ่งได้จากการตรวจวัดนั้นมีค่าเท่ากับ 62.4 เดซิเบล เอ ซึ่งต่ำกว่า 70 เดซิเบล เอ จึงไม่เกินมาตรฐานระดับเสียงโดยทั่วไป

### 8.3 วิธีการตรวจวัดระดับเสียงและแผนการดำเนินงาน

การตรวจวัดระดับเสียงบริเวณทางยกระดับเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงได้ดำเนินการในระหว่าง วันที่ 11-17 กันยายน พ.ศ.2549 โดยมีวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียง ณ บริเวณสถานที่ติดตั้งจริงบนทางยกระดับ ซึ่งได้ทำการตรวจวัดค่าระดับเสียง ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) สำรวจพื้นที่ ติดตั้งกำแพงกันเสียงบนทางยกระดับสายอุดรรัถยาฝั่งขาเข้าเมือง ช่วงด่านเก็บเงินศรีสมาน - บางพูน กิโลเมตรที่ 8+600A บริเวณที่ต้องการทดสอบประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงเป็นบริเวณพื้นที่โล่งซึ่งสะดวกแก่การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด และมีความ



ปลอดภัยในการตรวจวัดระดับเสียง โดยปัญหาและข้อจำกัดในการตรวจวัดระดับเสียงที่สำคัญคือ พื้นที่ที่ตรวจวัดเป็นลักษณะพื้นที่ลุ่ม ซึ่งเมื่อมีฝนตกจะทำให้เกิดน้ำท่วมขังจึงเป็นอุปสรรคในการติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจวัดระดับเสียง

2) ดำเนินการติดตั้งกำแพงกันเสียงในบริเวณที่มีความเหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียง โดยการตรวจวัดระดับเสียงเฉลี่ยของเสียงจากการจราจรบนทางยกระดับที่ระดับความสูงจากพื้นดินที่ระดับต่างๆ และระยะทางต่างๆ ที่ห่างจากกำแพงกันเสียง รวมทั้งจัดเก็บข้อมูลปริมาณการจราจร และความเร็วยานพาหนะรายชั่วโมงขณะที่มีการตรวจวัดระดับเสียง

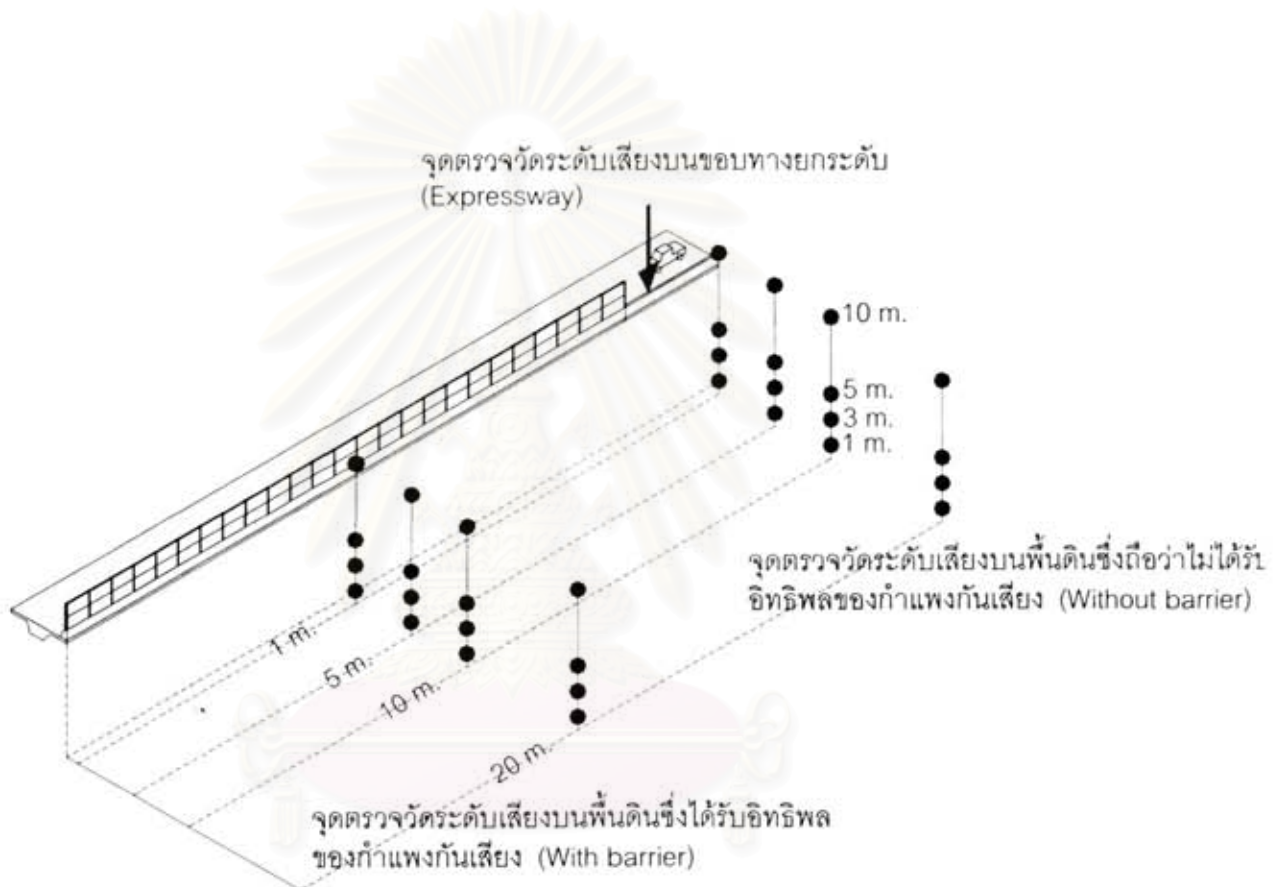
3) การตรวจวัดระดับเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงจากการจราจรภายหลังการติดตั้งกำแพงกันเสียงบนขอบทางยกระดับ ที่ระยะทางต่างๆ ได้แก่ 1 เมตร 5 เมตร 10 เมตร และ 20 เมตร จากแนวขอบทางที่ติดตั้งกำแพงกันเสียง และที่ความสูงต่างๆ ได้แก่ 1.2 เมตร 3.0 เมตร 5.0 เมตร และ 10.0 เมตร จากพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 8.2 โดยจะทำการวัดค่าระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง (Equivalent Continuous Sound Pressure Level,  $L_{eq, 1hr}$ ) ในการทดสอบประสิทธิภาพการลดระดับเสียงจากการจราจรบนทางยกระดับของกำแพงกันเสียง โดยตรวจวัดพร้อมกัน ที่ละสองจุดตรวจวัด กล่าวคือ บริเวณกึ่งกลางกับกำแพงกันเสียงในแนวราบห่างออกมาในแนวตั้งฉากกับกำแพงกันเสียง ซึ่งถือว่าเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของการลดทอนเสียงจากกำแพงกันเสียง (With Barrier) และบริเวณก่อนที่การจราจรจะเข้าเขตกำแพงกันเสียงโดยห่างออกจากของทางในแนวตั้งฉากซึ่งถือว่าเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลของการลดทอนเสียงจากกำแพงกันเสียง (Without Barrier) ดังแสดงในรูปที่ 8.2

4) การตรวจวัดระดับเสียงอ้างอิง เพื่อทราบค่าระดับเสียงที่แหล่งกำเนิดก่อนที่จะถูกลดทอนโดยกำแพงกันเสียง จะใช้วิธีการตรวจวัดระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง บริเวณบนขอบข้างทางยกระดับ (Expressway) ด้านที่ใกล้กับแหล่งกำเนิดเสียงจากการจราจร ดังแสดงในรูปที่ 8.2

5) การบันทึกปริมาณการจราจรแยกตามประเภทยานพาหนะรายชั่วโมง ได้แก่ รถยนต์นั่ง 4 ล้อ รถยนต์นั่ง 6 ล้อ รถยนต์นั่ง 8 ล้อ รถยนต์นั่ง 10 ล้อ และรถยนต์นั่ง 18 ล้อ และความเร็วของยานพาหนะแบบสุ่ม 4 คันต่อชั่วโมงต่อประเภทยานพาหนะ ขณะที่มีการตรวจวัดระดับเสียง

6) ติดตั้งอุปกรณ์ยึดไมโครโฟนของเครื่องวัดระดับเสียงที่ตำแหน่ง และจุดตรวจวัดที่ละสองจุดพร้อมกัน แล้วตรวจวัดระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 8.2 รวมทั้งการ

ตรวจวัดระดับเสียงอ้างอิง พร้อมบันทึกปริมาณการจราจรและความเร็วของยานพาหนะแยกตามประเภทรถยนต์รายชั่วโมงขณะที่ทำการตรวจวัดระดับเสียง และมีการกำหนดการทำงานของเครื่องตรวจวัดระดับเสียงโดย (i) เลือกใช้วงจรถ่วงน้ำหนัก "A" (A-Weighting Networks) ซึ่งเป็นการปรับแก้ให้เครื่องตรวจวัดระดับเสียงมีความใกล้เคียงกับการรับรู้ของหูมนุษย์ (Ear Sensitivity) (ii) เลือกลักษณะความไวตอบรับเสียง "Fast" เพื่อทำการเฉลี่ยค่าระดับเสียงทุกๆ ช่วง 125 มิลลิวินาที



รูปที่ 8.2 ตำแหน่งจุดตรวจวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ บนทางยกระดับ

- 7) วิเคราะห์ผลการตรวจวัดระดับเสียงและข้อมูลประกอบอื่นๆ
- 8) นำเสนอผลการตรวจวัดระดับเสียง และสรุปผลการตรวจวัด เพื่อให้ประโยชน์ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนที่จะมีการติดตั้งกำแพงกันเสียงต่อไป

#### 8.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดระดับเสียง

การตรวจวัดระดับเสียงบนทางยกระดับ จะต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทำการตรวจวัด ดังต่อไปนี้

1) เครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter) ยี่ห้อ 01dB รุ่น SOLO และอุปกรณ์ประกอบจำนวน 3 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.3 เครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter)



- 2) อุปกรณ์ติดตั้งไมโครโฟนที่ระดับความสูงต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเสียง

- 3) โปรแกรมประมวลผลข้อมูลซึ่งมาพร้อมกับเครื่องตรวจวัดระดับเสียง คอมพิวเตอร์ และตารางข้อมูลตรวจวัด
- 4) อุปกรณ์วัดความเร็วและปริมาณยานพาหนะที่วิ่งผ่านจุดตรวจวัด
- 5) อุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็นสำหรับงานภาคสนาม เช่น อุปกรณ์นับจำนวนยานพาหนะ กล้องถ่ายรูปและกล้องถ่ายวิดีโอ คัลิบเมตร สมอบก ลวด เป็นต้น

## 8.5 ผลการตรวจวัดระดับเสียงบนทางยกระดับ

### 8.5.1 สภาวะแวดล้อมทางเสียง ณ สถานที่ตรวจวัดจริง

สถานที่ทดสอบประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียง เลือกบริเวณกิโลเมตรที่ 8+600A เป็นสถานที่ติดตั้งกำแพงกันเสียงบนขอบของทางยกระดับสายอุดรรัถยา โดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ความปลอดภัยของการติดตั้งกำแพงกันเสียง ความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับเสียงบริเวณสถานที่ที่ใช้ในการตรวจวัดระดับเสียงบริเวณด้านหลังของกำแพงกันเสียง เป็นต้น

สถานที่ติดตั้งไมโครโฟนเพื่อตรวจวัดระดับเสียงที่ระยะทางต่างๆ จากกำแพงกันเสียง และระดับความสูงต่างๆ มีลักษณะที่ว่าง โล่ง ค่อนข้างเป็นที่ลุ่ม หากฝนตกจะมีน้ำขังได้ แต่มีพื้นที่ว่างเพียงพอสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.5, 8.6 และ 8.7



รูปที่ 8.5 การติดตั้งเครื่องตรวจวัดเสียงบริเวณริมทางยกระดับ



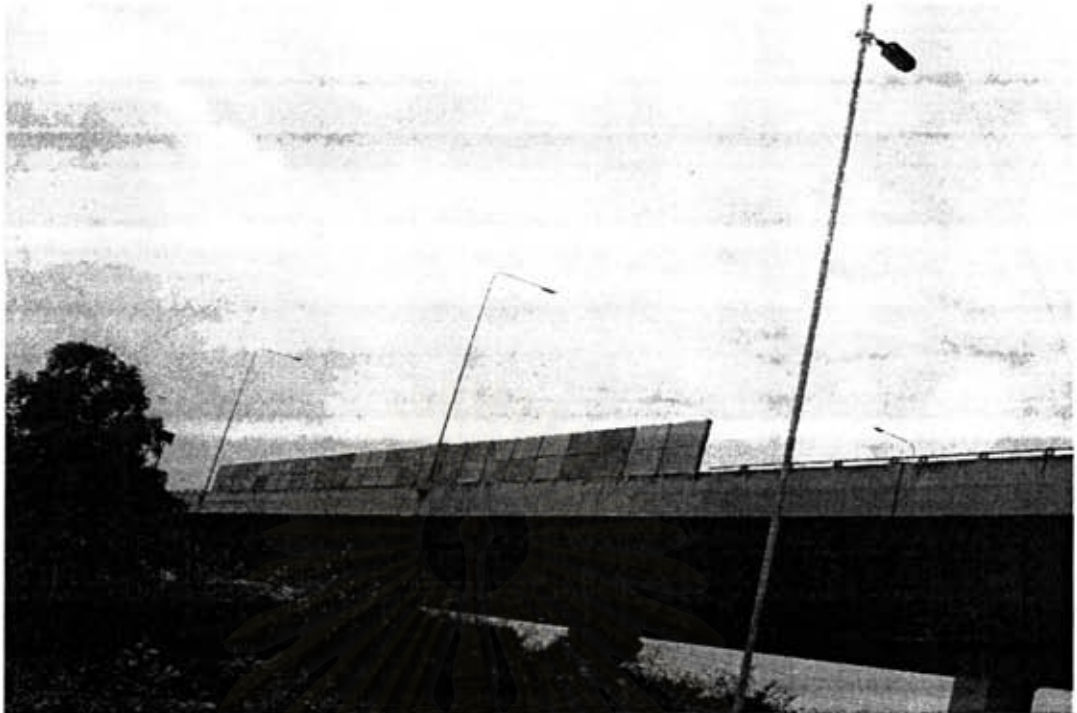
(a)



(b)

รูปที่ 8.6 บริเวณพื้นที่ซึ่งใช้ในการติดตั้งเครื่องตรวจวัดระดับเสียง  
(ถ่ายจากบนทางยกระดับ)





รูปที่ 8.7 บริเวณพื้นที่ซึ่งใช้ในการติดตั้งเครื่องตรวจวัดระดับเสียง  
(ถ่ายจากด้านล่างของทางยกระดับ)

สภาวะแวดล้อมทางเสียงบริเวณที่ติดตั้งไมโครโฟน มีลักษณะเป็นทุ่งโล่ง มีต้นไม้ขึ้นห่างๆ กัน อยู่ใกล้แหล่งน้ำ และคลองประปา มีบ้านพักอาศัยของประชาชนกระจายตัวอยู่ห่างกัน เช่นเดียวกับพื้นที่พักอาศัยในชนบทโดยทั่วไป แหล่งกำเนิดเสียงในสิ่งแวดล้อมนอกจากเสียงจากการสัญจรบนทางยกระดับแล้ว ส่วนใหญ่มาจาก เสียงจากธรรมชาติ ได้แก่ เสียงแมลง เสียงกบ เขียด เป็นต้น เสียงจากกิจกรรมประจำวันทั่วไปของประชาชนในบริเวณนั้น ได้แก่ การสัญจรโดยรถยนต์และจักรยานยนต์บนถนนใต้ทางยกระดับซึ่งไม่ได้มีการลาดยางมะตอยบนพื้นผิวถนน ซึ่งจะมีความถี่มากในช่วงเวลาเร่งด่วน เช่น ไปรับส่งสมาชิกในครอบครัวในเวลาเช้าและเย็น เป็นต้น การประกอบอาชีพหรือพักผ่อนหย่อนใจของประชาชน เช่น ตกปลา เก็บผัก รับจ้าง ทำสวนเกษตร เป็นต้น และได้เกิดอุบัติเหตุซึ่งส่งผลต่อการตรวจวัดระดับเสียงคือ มีกลุ่มเด็กนักเรียนมาจุดประทัด ใกล้เคียงกับบริเวณที่ทำการตรวจวัด ซึ่งอาจจะส่งผลต่อค่าระดับเสียงเฉลี่ย และค่าระดับเสียงสูงสุด ณ ช่วงเวลาที่ทำการวัดขณะเกิดเสียงดังขึ้นได้

โดยสรุปเสียงจากสภาวะแวดล้อมซึ่งก็คือ เสียงจากแมลง กบ และกิจกรรมที่เกิดขึ้นจากชาวบ้านที่อยู่บริเวณใต้ทางยกระดับ จะมีค่าระดับเสียงค่อนข้างสูงซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าระดับเสียงที่มาจากยานพาหนะบนทางยกระดับ โดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด ค่าระดับเสียงซึ่งใกล้กับบริเวณพื้นดิน

### 8.5.2 ข้อมูลการจราจร

ปริมาณการจราจรและความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่สัญจรบนทางยกระดับ มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อระดับเสียงของแหล่งกำเนิดเสียงจากการจราจรที่ใช้ศึกษาในการทดสอบประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงนี้ ในระหว่างการตรวจวัดระดับเสียงมีการเก็บข้อมูลปริมาณการจราจรและความเร็วเฉลี่ยแยกตามประเภทของยานพาหนะ 5 ประเภท ได้แก่ รถยนต์นั่ง 4 ล้อ รถยนต์นั่ง 6 ล้อ รถยนต์นั่ง 8 ล้อ รถยนต์นั่ง 10 ล้อ รถยนต์นั่ง 18 ล้อ ดังแสดงในตารางที่ 8.2



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.2 ปริมาณการจราจรและความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่สัญจรบนทาง  
ยกระดับ

ครั้งที่	วันที่-เวลา	เส้นทาง	ประเภทรถ									
			4 ล้อ		6 ล้อ		8,10 ล้อ		18 ล้อ		อื่นๆ	
			จำนวน (คัน)	ความเร็ว (กม./ชม.)	จำนวน (คัน)	ความเร็ว (กม./ชม.)	จำนวน (คัน)	ความเร็ว (กม./ชม.)	จำนวน (คัน)	ความเร็ว (กม./ชม.)	จำนวน (คัน)	ความเร็ว (กม./ชม.)
1	September 11, 2006	กทม.	730	85.25	21	62.77	25	55.17	3	53.74		
	12.54	บางปะอิน	449	67.01	28	52.34	22	59.99	13	41.78		
2	September 11, 2006	กทม.	863	74.57	34	57.92	17	43.00	5	42.93		
	15.36	บางปะอิน	434	70.29	18	60.96	11	53.95	13	41.41		
3	September 11, 2006	กทม.	1001	91.17	7	78.30	6	40.98	0			
	16.08	บางปะอิน	471	80.37	23	65.53	3	57.00	2	36.49		
4	September 12, 2006	กทม.	811	85.59	18	61.25	12	51.94	19	47.97	1	N/A
	12.05	บางปะอิน	501	80.97	25	55.45	28	52.82	15	47.20		
5	September 12, 2006	กทม.	928	68.55	37	57.17	12	50.11	11	50.04		
	13.55	บางปะอิน	530	87.04	22	61.29	11	57.22	10	59.17		
6	September 12, 2006	กทม.	988	67.92	28	62.07	5	69.75	0	N/A		
	15.19	บางปะอิน	498	80.51	22	61.73	4	53.79	0	N/A		
7	September 12, 2006	กทม.	1269	68.56	9	69.84	0	N/A	0	N/A		
	16.35	บางปะอิน	541	75.41	8	66.76	0	N/A	0	N/A		
8	September 13, 2006	กทม.	691	84.02	30	58.72	13	49.27	14	46.52	1	N/A
	10.53	บางปะอิน	491	71.50	46	51.01	18	54.20	22	43.06		
9	September 13, 2006	กทม.	703	84.86	18	54.53	11	58.12	7	51.38	1	N/A
	12.30	บางปะอิน	522	89.44	29	47.13	19	52.72	15	46.81		
10	September 13, 2006	กทม.	1019	75.03	41	62.86	5	58.01	2	52.20	1	N/A
	13.48	บางปะอิน	584	84.36	29	44.87	9	55.59	7	52.17		
11	September 13, 2006	กทม.	1084	74.22	7	58.22	5	62.30	0	N/A		
	16.00	บางปะอิน	574	80.09	10	56.52	0	N/A	0	N/A		
12	September 13, 2006	กทม.	1403	72.23	11	64.73	10	56.84	1	45.86		
	17.09	บางปะอิน	474	80.37	3	62.79	4	N/A	1	49.54		
13	September 17, 2006	กทม.	483	84.15	1	71.27	1	66.81	0	N/A		
	12.06	บางปะอิน	339	83.23	6	61.63	0	56.65	1	N/A		
15	September 17, 2006	กทม.	942	82.38	11	63.77	2	66.65	0	N/A		
	15.55	บางปะอิน	368	81.62	3	73.23	1	58.70	0	N/A		
16	September 17, 2006	กทม.	1350	88.35	13	88.35	6	74.92	1	N/A		
	17.02	บางปะอิน	503	88.01	15	73.45	2	51.62	1	57.14		
17	September 17, 2006	กทม.	945	83.21	11	85.28	2	83.85	0	N/A		
	17.10	บางปะอิน	300	97.27	16	55.54	1	68.79	0	N/A		



### 8.5.3 ระดับเสียงเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดระดับเสียงบริเวณบนทางยกระดับ

ระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ( $L_{eq, 1hr}$ ) ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการตรวจวัดบริเวณได้ทางยกระดับ โดยมีทั้งตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลจากกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียง ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 ค่าระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมงที่ทำการตรวจวัด ณ ตำแหน่งต่างๆ

Time	Location		Expressway			Without Barrier			With Barrier		
	Distance	Height	Leq	Lmin	Lmax	Leq	Lmin	Lmax	Leq	Lmin	Lmax
	(m)	(m)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)
11/09/2006 14:08	20	1.2	81.0	55.4	93.3	56.8	47.3	67.7	55.3	46.3	63.8
11/09/2006 15:36	20	3	82.0	57.4	101.3	59.3	48.8	78.0	58.6	50.0	76.7
11/09/2006 12:54	20	5	80.1	57.5	96.0	59.0	49.0	76.3	57.6	49.0	70.8
12/09/2006 12:05	20	10	81.3	57.6	96.6	61.7	48.1	74.7	60.2	47.6	71.6
12/09/2006 15:19	10	1.2	80.0 ***	-	-	61.6	52.3	93.1	60.1	52.1	81.2
12/09/2006 16:42	10	3	80.0 ***	-	-	61.1	53.5	69.8	61.8	54.4	69.6
17/09/2006 15:55	10	5	79.1	59.3	99.9	61.7	53.0	75.2	61.3	51.8	76.3
12/09/2006 14:55	10	10	81.4	59.3	95.7	64.9	52.1	78.1	62.5	51.5	71.7
13/09/2006 10:53	5	1.2	78.3	56.5	92.3	60.1	48.9	79.7	60.2	49.3	72.5
13/09/2006 14:48	5	3	80.1	58.8	100.5	62.7	53.2	88.9	64.1	52.4	92.0
13/09/2006 16:00	5	5	79.8	58.6	91.8	61.5	52.6	74.7	61.2	54.0	69.8
13/09/2006 12:30	5	10	78.0	53.9	97.0	65.9	47.2	83.0	62.3	47.4	73.9
17/09/2006 17:02	1	1.2	79.5	60.4	94.3	61.6	55.0	68.8	62.1	55.6	68.4
17/09/2006 19:10	1	3	76.6	55.2	90.5	62.7	58.8	70.8	67.7	62.5	75.0
13/09/2006 17:09	1	5	80.3	59.6	94.1	61.6	53.7	71.0	62.5	55.3	73.4
17/09/2006 12:06	1	10	76.6	55.2	90.5	67.3	47.7	80.8	60.1	48.0	68.7

**หมายเหตุ** \*\*\* คือค่าที่ประมาณเนื่องจากเกิดความขัดข้องของเครื่องวัดระดับเสียงซึ่งติดตั้งบริเวณขอบข้างของทางยกระดับ

#### 8.5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากสถานที่ติดตั้งกำแพงกันเสียง

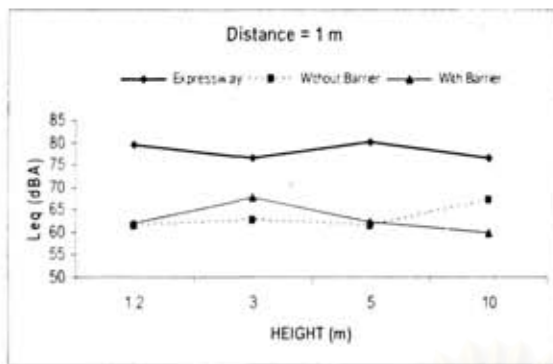
ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากการตรวจวัดระดับเสียงจากสถานที่ติดตั้งกำแพงกันเสียงนั้น จะทำการวิเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ กัน เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและการสังเกตถึงพฤติกรรมของเสียงจากทางยกระดับรวมทั้งประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงเมื่อทำการติดตั้งบนทางยกระดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ทำการสร้างแผนภาพเพื่อเปรียบเทียบค่าระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ( $L_{eq, 1hr}$ ) ซึ่งจะประกอบด้วยข้อมูลซึ่งได้จากการตรวจวัดใน 3 จุดตรวจวัด คือ

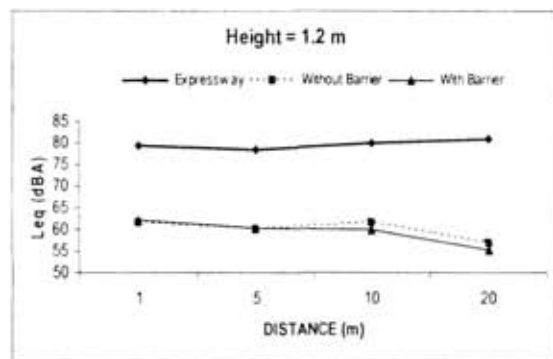
- จุดตรวจวัดระดับเสียงบนขอบทางยกระดับ (Expressway)
- จุดตรวจวัดระดับเสียงบนพื้นดินซึ่งถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียง (Without Barrier)
- จุดตรวจวัดระดับเสียงบนพื้นดินซึ่งได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียง (With Barrier)

ซึ่งในการวิเคราะห์ได้แสดงโดยใช้แผนภาพดังแสดงในรูปที่ 8.8 โดยในรูปที่ 8.8 (a) ถึง 8.8 (d) จะทำการแปรผันตามความสูงของจุดตรวจวัดจากพื้นดินโดยให้ระยะห่างจากแนวของกำแพงกันเสียงคงที่ และ รูปที่ 8.8 (e) ถึง 8.8 (h) จะทำการแปรผันตามระยะห่างของจุดตรวจวัดจากแนวของกำแพงกันเสียงโดยให้ความสูงจากพื้นดินคงที่ เพราะฉะนั้นจึงทำให้ได้แผนภาพในลักษณะต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 8.8

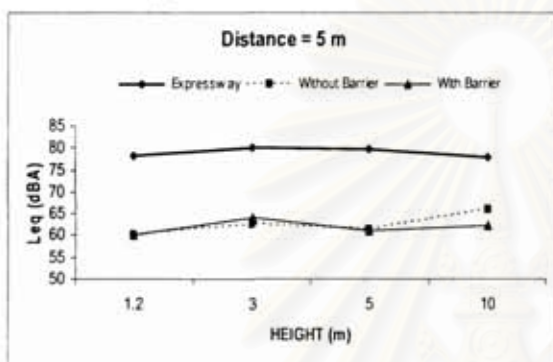
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



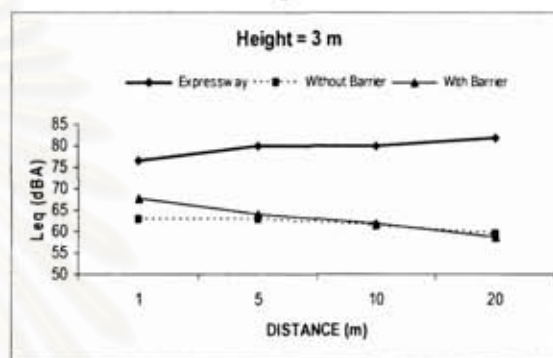
(a) ระยะห่าง 1 เมตร



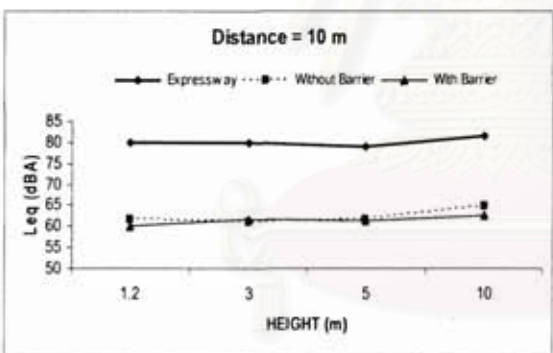
(e) ความสูง 1.2 เมตร



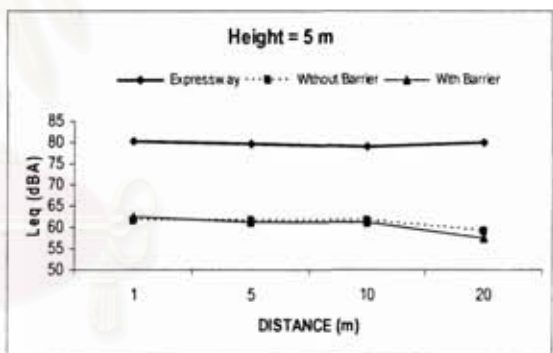
(b) ระยะห่าง 5 เมตร



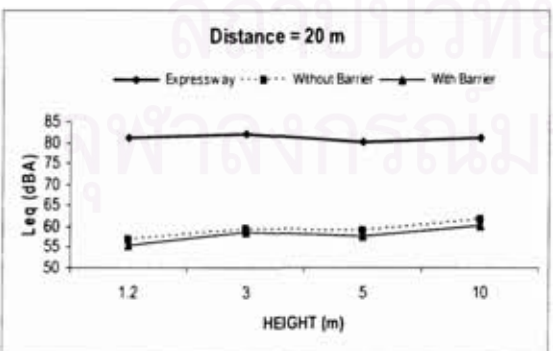
(f) ความสูง 3 เมตร



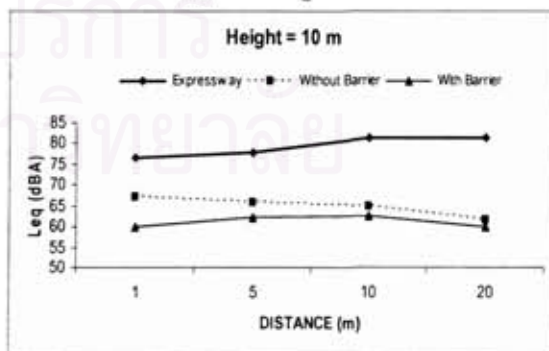
(c) ระยะห่าง 10 เมตร



(g) ความสูง 5 เมตร



(d) ระยะห่าง 20 เมตร



(h) ความสูง 10 เมตร

รูปที่ 8.8 แผนภาพเปรียบเทียบระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ( $L_{eq, 1hr}$ ) ที่ได้จากการตรวจวัดระดับเสียง ณ จุดต่างๆ บนทางยกระดับ

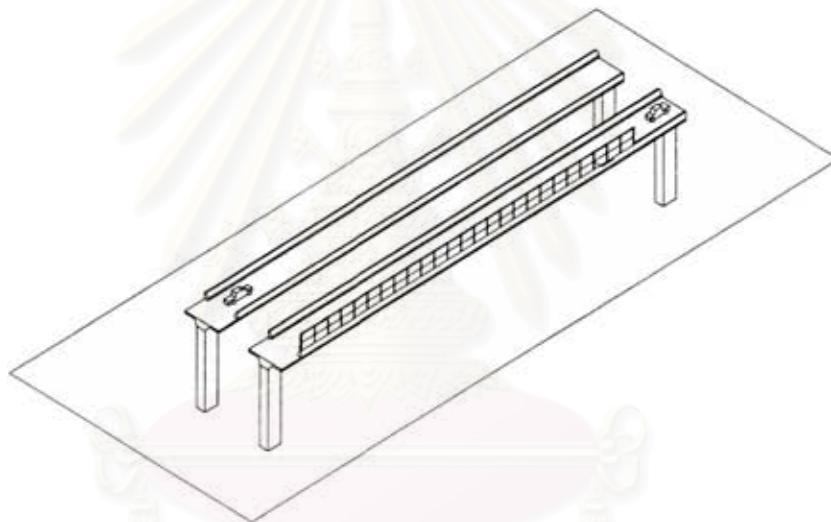


ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 8.8 จะขอกล่าวถึงปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าระดับเสียงเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดตามตำแหน่งต่างๆ บริเวณใต้ทางยกระดับทั้งที่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- จากรูปที่ 8.8 (e) ถึง 8.8 (h) จะพบว่าเมื่อระยะห่างจากแนวของกำแพงกันเสียงเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าระดับเสียงเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดในบริเวณใต้ทางยกระดับทั้งที่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงนั้น ไม่ได้มีแนวโน้มที่ลดลงไปเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากผลของระยะทาง ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนั้นก็เนื่องจาก ในแต่ละจุดตรวจวัดไม่ได้ทำการตรวจวัด ณ เวลาเดียวกันทุกจุดตรวจวัด ซึ่งปริมาณการจราจรในแต่ละช่วงเวลาทำการตรวจวัดก็จะแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ในช่วงเช้าและกลางวัน ปริมาณการจราจรบนทางยกระดับก็จะมีน้อย ซึ่งจะแตกต่างกับในช่วงเย็นที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่นกว่า จึงทำให้ในช่วงเย็นจะมีค่าระดับเสียงเฉลี่ยที่สูงกว่าในช่วงเช้าและกลางวัน เป็นต้น
- จากตารางที่ 8.3 จะพบว่าในแถวที่ 10 ซึ่งเป็นการตรวจวัดระดับเสียงบริเวณใต้ทางยกระดับที่ตำแหน่ง ที่ความสูงจากพื้นดิน 3 เมตร และระยะห่างจากแนวกำแพงกันเสียง 5 เมตร โดยทำการตรวจวัดเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2549 ณ เวลา 14.48- 15.48 จะเห็นได้ว่าค่าระดับเสียงสูงสุด ( $L_{max}$ ) บริเวณใต้ทางยกระดับที่ถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงนั้น มีค่าสูงถึง 92.0 dB(A) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับที่มีเด็กนักเรียนมาจุดประทัด โดยจะเห็นได้ว่ากิจกรรมดังกล่าวได้ส่งผลถึงค่าระดับเสียงสูงสุดและค่าระดับเสียงเฉลี่ยที่ทำการตรวจวัดด้วย

หลังจากทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าระดับเสียงเฉลี่ย, ค่าระดับเสียงสูงสุด ที่ได้จากการตรวจวัดระดับเสียงแล้ว จึงจะทำการอธิบายถึงผลการวิเคราะห์ รวมทั้งพฤติกรรมของเสียงที่มาจากยานพาหนะบนทางยกระดับ ทั้งที่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 8.8 จะพบว่าค่าระดับเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นดินบริเวณใต้ทางยกระดับ ทั้งที่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงนั้น พบว่ามีค่าระดับเสียงเฉลี่ย 1 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกันมากยกเว้นที่ตำแหน่งความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 8.8 (a) ถึง 8.8 (d) โดยที่ความสูง 10 เมตร จะสามารถมองเห็นความแตกต่างของค่าระดับเสียงเฉลี่ยได้ชัดเจนที่สุด ซึ่งในความเป็นจริงระดับเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นดินที่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงควรจะมีค่าระดับเสียงต่ำกว่าตำแหน่งที่ถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียง แต่หากพิจารณาจากสภาพแวดล้อมจริง บริเวณใต้ทางยกระดับจะพบว่า ลักษณะทางโครงสร้างของทางยกระดับจะประกอบด้วยแนวของตัวสะพาน 2 แนวทอดผ่านไป ซึ่งแนวสะพานทั้ง 2 แนวนี้ไม่ได้เชื่อมต่อกันและมีช่องว่างตรงกลางระหว่างแนวของทางยกระดับทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 8.9



รูปที่ 8.9 ลักษณะทางโครงสร้างของทางยกระดับที่ทำการติดตั้งกำแพงกันเสียง

ถ้าลองให้ผู้สังเกตไปยืน ณ บริเวณใต้ทางยกระดับจะได้ยินเสียงของยานพาหนะซึ่งวิ่งผ่านไปมาบนทางยกระดับได้อย่างชัดเจน โดยเสียงที่ได้ยินอย่างชัดเจนนี้เกิดจากการที่เสียงจากบนทางยกระดับได้ลอดผ่านลงมาจากช่องว่างของโครงสร้างทางยกระดับและเกิดการสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและพื้นผิวของถนนซึ่งมีลักษณะเป็นดินแข็งจึงมีการสะท้อนของเสียงได้ดี ทำให้ผลที่ได้จากการตรวจวัดระดับเสียงทั้งที่ ได้รับอิทธิพลมาจากกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพง มีค่าระดับเสียงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถจำลองปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ดังแสดงในรูปที่ 8.10(a) และ 8.10 (b) แต่ถ้าระยะห่างของจุดตรวจวัดระดับเสียงไกล

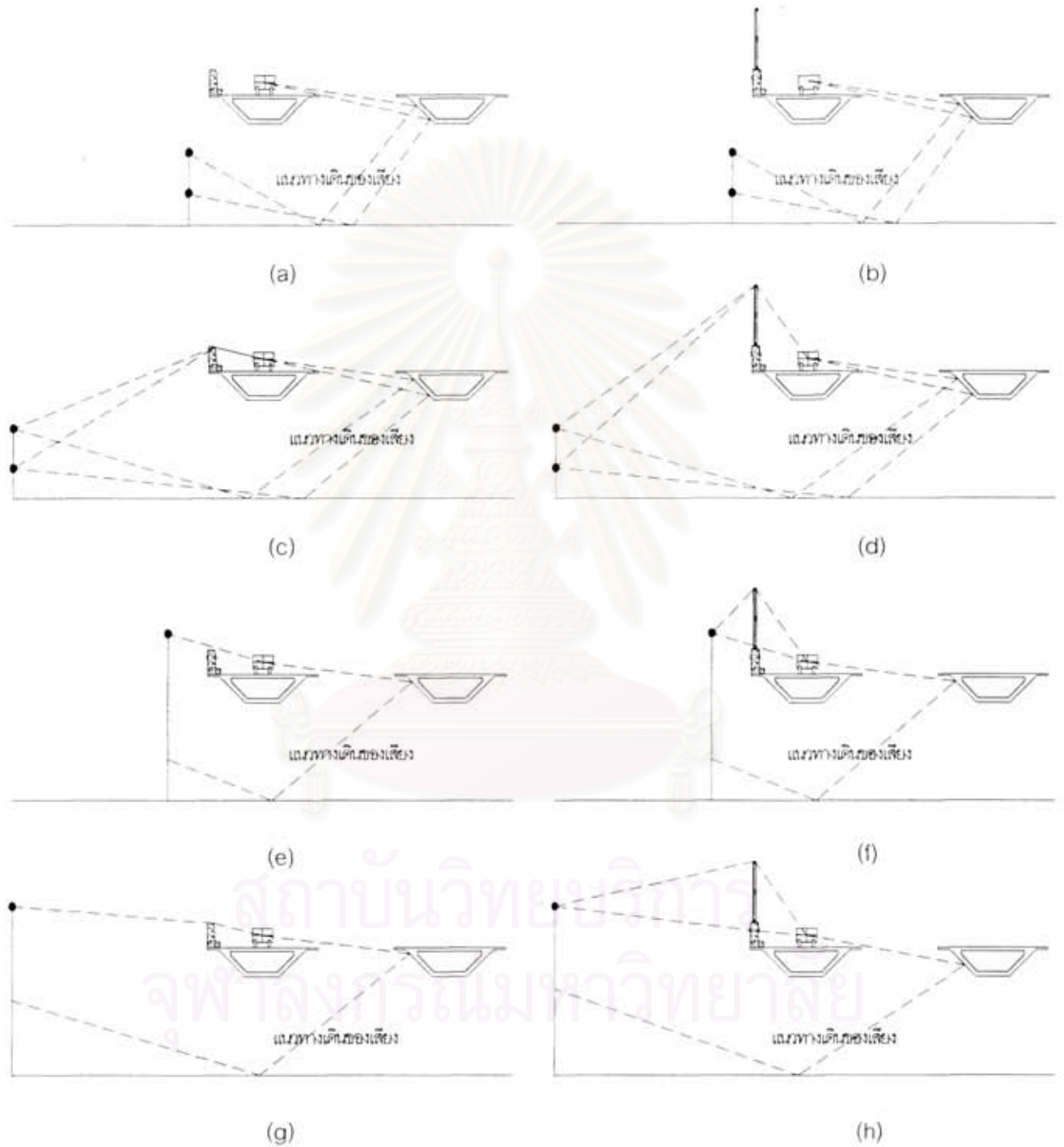


ออกไปจากทางยกระดับผลจากการเลี้ยวเบนรวมทั้งการสะท้อนของเสียงเป็นผลให้ค่าระดับเสียงไม่ว่าจะได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงหรือถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงจะยังคงมีค่าระดับเสียงที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 8.10 (c) และ 8.10 (d) แต่มีข้อที่น่าสังเกตก็คือจากรูปที่ 8.8 (a) ถึง 8.8 (d) จะพบว่าเราสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างค่าระดับ ณ ตำแหน่งของจุดตรวจวัดระดับเสียงซึ่งได้รับอิทธิพลจากกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงได้อย่างชัดเจนที่ระดับความสูง 10 เมตร โดยเหตุผลที่ใช้ในการอธิบายจะมีดังต่อไปนี้

หากลองพิจารณาในรูปที่ 8.8 (h) ซึ่งเป็นแผนภาพแสดงค่าระดับเสียงที่ความสูงคงที่เท่ากับ 10 เมตร จากพื้นดิน โดยแปรผันเฉพาะระยะห่างของตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดระดับเสียง จะพบว่าแผนภาพนี้เป็นแผนภาพที่สามารถอธิบายประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงได้ดีที่สุด โดยจะสังเกตเห็นว่า ณ ตำแหน่งที่ความสูง 10 เมตร ระยะห่าง 1 เมตร จากแนวของกำแพงกันเสียงพบว่าระดับเสียงซึ่งได้รับอิทธิพลจากกำแพงกันเสียงจะลดลงไปประมาณ 7 เดซิเบล เมื่อเปรียบเทียบกับค่าระดับเสียงซึ่งตรวจวัด ณ ตำแหน่งเดียวกันที่ถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงอีกทั้งเมื่อระยะห่างของจุดตรวจวัดระดับเสียงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าระดับเสียงของจุดตรวจวัดทั้งที่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงเริ่มใกล้เคียงกัน ก็เนื่องมาจากที่ความสูงของตำแหน่งจุดตรวจวัดระดับเสียงซึ่งมีความสูงเท่ากับ 10 เมตร จากพื้นดินนั้น มีระดับความสูงเพียงพอที่จะไม่ได้รับผลกระทบจากการสะท้อนของเสียงซึ่งลอดผ่านมาจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับกับพื้นผิวถนนดังแสดงในรูปที่ 8.10 (e) ถึง 8.10 (h) ดังนั้นเมื่อระยะห่างของตำแหน่งที่ตรวจวัดระดับเสียงเพิ่มขึ้นโดยที่มีความสูงเท่าเดิม จึงทำให้มีแต่เฉพาะอิทธิพลของเสียงที่เกิดจากทางยกระดับเท่านั้น และเมื่อระยะห่างของจุดตรวจวัดระดับเสียงห่างออกไปผลของการเลี้ยวเบนของเสียงจึงทำให้ค่าระดับเสียงไม่ว่าจะได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงหรือถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงจะมีค่าระดับเสียงใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 8.10 (g) และ 8.10 (h) จึงเป็นเหตุผลที่อธิบายถึงพฤติกรรมของเสียงที่ได้จากแผนภาพเปรียบเทียบค่าระดับเสียงเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 8.8 (h) และในทำนองเดียวกันก็สามารถใช้อธิบายผลของค่าระดับเสียงในรูปที่ 8.8 (a) ถึง 8.8 (d) ได้ว่าที่ตำแหน่งความสูง 10 เมตร การที่เราเห็นความแตกต่างของค่าระดับได้อย่างชัดเจนนั้นก็เนื่องมาจากการได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงโดยปราศจากผลของการสะท้อนของเสียงซึ่งลอดผ่านมาจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับกับพื้นผิวถนน ทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างค่าระดับเสียงซึ่งได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงและถือว่าไม่ได้รับอิทธิพลของกำแพงกันเสียงแต่ความแตกต่างจะน้อยลงเมื่อ



ระยะห่างของตำแหน่งที่ทำกรตรวจวัดระดับเสียงห่างออกไป เนื่องจากผลของการเลี้ยวเบนของเสียงซึ่งอ้อมผ่านกำแพงกันเสียง



รูปที่ 8.10 แนวทางเดินของเสียงสะท้อนซึ่งมาจากบนทางยกระดับ

## 8.6 สรุปผลการตรวจวัดและการวิเคราะห์ค่าระดับเสียงในการวิจัยครั้งนี้

จากผลการตรวจวัดระดับเสียง ณ สถานที่ติดตั้งกำแพงกันเสียงจริงนั้นพบว่า ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดระดับเสียงบนพื้นดิน ที่ความสูง 10 เมตร และ ระยะห่าง 1 เมตร เป็นจุดที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงได้ดีที่สุด โดยในการตรวจวัดครั้งนี้กำแพงกันเสียงสามารถกันเสียงจากยานพาหนะที่สัญจรอยู่บนทางยกระดับได้ประมาณ 7 เดซิเบล เอ หรือคิดเป็นพลังงานเสียงที่ลดลงประมาณร้อยละ 80 ของพลังงานเสียงจากแหล่งกำเนิดบนทางยกระดับ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของการเลี้ยวเบนของเสียงอ้อมผ่านกำแพงกันเสียงรวมทั้งผลการสะท้อนของเสียงซึ่งลอดผ่านมาจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับกับพื้นผิวถนน ซึ่งผลของกระทบจากอิทธิพลของการสะท้อนของเสียงซึ่งลอดผ่านมาจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับกับพื้นผิวถนนนั้นเป็นผลให้ ระดับเสียงบริเวณพื้นที่ซึ่งอยู่ใกล้กับทางยกระดับได้รับผลกระทบจากมลภาวะทางเสียงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้แม้ว่าจะมีการติดตั้งกำแพงกันเสียงเพื่อลดระดับเสียงลงก็ตาม ดังนั้นจากการตรวจวัดและทำการวิเคราะห์ค่าระดับเสียงที่ได้จากการตรวจวัดในการวิจัยครั้งนี้ได้นำไปสู่ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาการลดระดับเสียงจากโครงสร้างทางยกระดับในเขตเมืองต่อไปในอนาคต โดยผู้วิจัยได้ทำการเสนอความคิดเห็นและแนวทางการวิจัยต่อไปในบทที่ 9

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

### 9.1 บทสรุป

จากการวิจัยซึ่งเริ่มตั้งแต่การค้นคว้าหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง, แนวทางในการออกแบบ, การเลือกวัสดุสำหรับใช้ผลิตตัวอย่างทดสอบ, การผลิตตัวอย่างทดสอบ, การทดสอบในห้องปฏิบัติการ, การติดตั้งตัวอย่าง ณ สถานที่จริง และสุดท้ายคือการทดสอบประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงที่ติดตั้งบนทางยกระดับ ซึ่งจากการดำเนินการวิจัยทั้งหมดสามารถสรุป ได้ดังต่อไปนี้

(1) รูปร่างของแผงกันเสียงในงานวิจัยครั้งนี้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Acoustic Panel) ขนาด 2 x 1 เมตร ตัวแผงกันเสียงมีลักษณะเป็นช่องว่างภายใน ซึ่งภายในบรรจุวัสดุดูดกลืนเสียง ด้านหน้าของแผงกันเสียงส่วนที่รับเสียงจากการจราจรจะมีฝาปิดโลหะที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (Metal Perforated Cover) โดยหลักการทำงานของแผงกันเสียงจะแบ่งเป็น ส่วนผนังทึบของแผงกันเสียงจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนเสียงและลดทอนเสียงทะลุผ่าน ส่วนช่องว่างตรงกลางที่บรรจุวัสดุดูดกลืนเสียงจะทำหน้าที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงเพื่อไม่ให้เกิดเสียงสะท้อนกลับไปยังฝั่งตรงกันข้ามให้ดียิ่งขึ้น

(2) อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการหล่อแผงกันเสียงคือ มอร์ต้าร์ซึ่งมีส่วนผสมโดยการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยแก้วลอย 20% ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 พบว่าเป็นอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังและความคงทนเหมาะสมที่สุด

(3) การใช้วัสดุดูดกลืนเสียงซึ่งในการศึกษาผู้วิจัยได้เลือกใช้ใยแก้วที่มีความหนา 5 เซนติเมตร และฝาปิดเจาะรูพรุนซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะขนาด 2.5 มิลลิเมตร โดยมีจำนวนของรูเจาะ 49 รู ต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว ซึ่งการติดตั้งฝาปิดเจาะรูพรุนจะช่วยป้องกันตัวใยแก้วซึ่งเป็นวัสดุที่บอบบาง อีกทั้งยังช่วยให้ใยแก้วสามารถดูดกลืนเสียงที่ความถี่ที่ต้องการได้ดีขึ้นซึ่งจะช่วยลดระดับเสียงบนทางพิเศษได้ดี และจากผลการวัดระดับเสียงบนทางด่วนนั้นพบว่า เสียงของยานพาหนะบนทางด่วนจะมีระดับที่มีความดังมากในช่วงความถี่ 1-2.5 kHz ซึ่งจากการผลการทดสอบแผงกันเสียงที่ใช้ใยแก้วที่มีความหนา 5 เซนติเมตร และฝาปิดเจาะรูพรุนซึ่ง



มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะขนาด 2.5 มิลลิเมตร โดยมีจำนวนของรูเจาะ 49 รู ต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว จะช่วยลดซับเสียงในช่วงความถี่ 1-2.5 kHz ได้ดี

(4) จากผลการทดสอบหาค่าการลดทอนเสียงทะลุผ่าน พบว่า ส่วนผสมที่แตกต่างกันของมอร์ตาร์มีผลน้อยมากต่อค่าการลดทอนเสียงทะลุผ่านของแผงกันเสียง ซึ่งแผงกันเสียงที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้มีค่าการลดทอนเสียงทะลุผ่าน Transmission Loss ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 25 dB ซึ่งถือว่าแผงกันเสียงที่ผลิตขึ้นมีประสิทธิภาพดีในการลดทอนเสียงทะลุผ่าน

(5) ต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนของแผงกันเสียงที่มีขนาดความกว้าง 2 เมตร, ความสูง 1 เมตร และมีความหนา 10 เซนติเมตร รวมทั้งมีช่องว่างตรงกลาง ซึ่งเมื่อรวมทั้งค่าวัสดุ และค่าแรงในการผลิตแผงกันเสียงทั้งหมดจะมีราคาประมาณ 2,500 บาทต่อ 1 แผง โดยราคาที่ถูกกว่ามาข้างต้นยังไม่รวมค่าติดตั้งในบริเวณบนทางยกระดับจริง

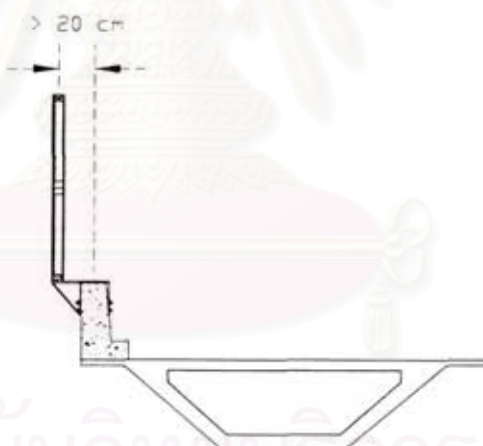
(6) ที่ความสูง 10 เมตร และ ระยะห่าง 1 เมตร เป็นจุดที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงได้ดีที่สุด โดยในการตรวจวัดครั้งนี้กำแพงกันเสียงสามารถกันเสียงจากยานพาหนะที่สัญจรอยู่บนทางยกระดับได้ประมาณ 7 เดซิเบล เอ หรือคิดเป็นพลังงานเสียงที่ลดลงประมาณร้อยละ 80 ของพลังงานเสียงจากแหล่งกำเนิดบนทางยกระดับ (โดยไม่ได้คิดผลการลดลงของระดับเสียงเนื่องจากระยะทาง) โดยสาเหตุสำคัญข้อหนึ่งส่งผลต่อการตรวจวัดระดับเสียง ณ ตำแหน่งต่างๆ และประสิทธิภาพในการกันเสียงของกำแพงกันเสียง ในกรณีนี้ทำการติดตั้งกำแพงกันเสียงบนทางยกระดับก็คือ ผลของกระแทกจากอิทธิพลของการสะท้อนของเสียงซึ่งลอดผ่านมาจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับกับพื้นผิวถนน

## 9.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยในอนาคต

เนื่องจากในการศึกษาเกี่ยวกับกำแพงกันเสียง โดยเฉพาะการลดระดับเสียงด้วยการใช้กำแพงกันเสียงในประเทศไทยถือว่ายังเป็นเรื่องที่มีผู้ให้ความสนใจน้อยมาก ซึ่งจากการศึกษาผลงานวิจัยเก่าที่มีความเกี่ยวข้องกับการศึกษานี้โดยมีข้อมูลพื้นฐานภายในประเทศ จะพบว่ามีเพียงไม่กี่บทความ จึงถือว่ายังเป็นเรื่องที่น่าสนใจและต้องการข้อมูลอีกมากสำหรับประเทศไทย แต่ในต่างประเทศนั้นการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้ถือว่าเป็นเรื่องที่ต่างประเทศให้ความสนใจเป็นเวลานานมาแล้ว จึงเป็นเรื่องที่ดีซึ่งทางภาครัฐเริ่มให้ความสำคัญเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหามลพิษ

ทางเสียงซึ่งถือเป็นเรื่องใกล้ตัวโดยเฉพาะประชากรที่อาศัยอยู่ภายในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีการจราจรที่คับคั่ง แต่ในการศึกษาค้างนี้ยังถือว่าเป็นเพียงจุดเริ่มต้นในการพัฒนากำแพงกันเสียงสำหรับใช้ในประเทศไทยเท่านั้น โดยจากประสบการณ์ที่ทางผู้วิจัยได้พบขณะทำการวิจัยซึ่งสามารถที่จะกล่าวเพื่อเป็นข้อเสนอแนะและแนวทางในการทำวิจัยต่อไปในอนาคต ได้แก่

(1) ปัจจัยที่ต้องคำนึงในการออกแบบกำแพงกันเสียงคือจะต้องทำให้มีน้ำหนักรวมที่สุดเพราะการติดตั้งวัตถุใดๆ ก็ตามบนทางยกระดับ สิ่งที่ต้องคำนึงเป็นอันดับแรกก็คือ ความปลอดภัย ซึ่งถ้ากำแพงกันเสียงที่ผลิตขึ้นนั้นมีน้ำหนักเบา ย่อมจะช่วยลดความรุนแรงของอุบัติเหตุในกรณีที่กำลังกันเสียงเกิดการเฉี่ยวชน แล้วแตกหักร่วงหล่นลงมายังพื้นดินบริเวณด้านใต้ทางยกระดับ และเมื่อกำแพงกันเสียงมีน้ำหนักเบายังสามารถประยุกต์ให้โครงสร้างของกำแพงกันเสียงยื่นออกไปนอกแนวของขอบทางยกระดับซึ่งจะช่วยป้องกันการเฉี่ยวชนจากยานพาหนะที่สัญจรบนทางยกระดับได้ดังแสดงในรูปที่ 9.1 อีกทั้งการที่กำแพงกันเสียงน้ำหนักเบาจะช่วยทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งลดลง รวมทั้งเพิ่มความสะดวกในการติดตั้งกำแพงกันเสียงบนทางยกระดับ



รูปที่ 9.1 กำแพงกันเสียงที่มีการประยุกต์ให้ยื่นออกมาจากแนวขอบทางยกระดับ

(2) ในการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงนั้นควรทำการศึกษาโดยการติดตั้งกำแพงกันเสียงบนทางราบก่อนจะทำการหาประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงบนทางยกระดับ เพราะการติดตั้งกำแพงกันเสียงบนทางยกระดับนั้นเราจะพบว่าผลของการสะท้อนของเสียงซึ่งลอดผ่านมาจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับกับพื้นผิวถนนดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 8 เป็นปัจจัยที่เราไม่สามารถจะควบคุมได้และ

ส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัดระดับเสียงเพื่อหาประสิทธิภาพของกำแพงกันเสียงบนทางยกระดับ อีกทั้งยังสะดวกในการตรวจวัดระดับเสียงอีกด้วย

(3) เนื่องจากการตรวจวัดระดับเสียงในการวิจัยครั้งนี้มีข้อจำกัดทั้งทางด้านเวลาและค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดระดับเสียง จึงไม่สามารถที่จะทำการตรวจวัดตามจุดต่างๆได้อย่างละเอียดมากกว่านี้ ซึ่งถ้าต้องการที่จะเข้าใจพฤติกรรมของเสียงรวมทั้งประสิทธิภาพของแผงกันเสียงอย่างละเอียด ควรจะต้องทำการตรวจวัดให้มีตำแหน่งที่หลากหลายและมีจำนวนจุดตรวจวัดที่มากกว่านี้

(4) ควรจะต้องมีการติดตามผลกระทบที่เกิดจากการสั่นสะเทือนบนทางยกระดับซึ่งเป็นข้อมูลที่ต้องใช้ระยะเวลาในการเฝ้าสังเกตที่นาน ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ไม่สามารถที่จะทำการติดตามผลของการสั่นสะเทือนได้เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาในการทำวิจัย สาเหตุที่ต้องติดตามผลจากการสั่นสะเทือนเพราะผลจากการสั่นสะเทือนอาจจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของกำแพงกันเสียงซึ่งอาจจะก่อให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้

(5) การศึกษาครั้งนี้ยังไม่ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงกันเสียงที่ได้ออกแบบกับแผงกันเสียงที่มีใช้กันโดยทั่วไปบนทางยกระดับ เนื่องจากว่าการจะทดสอบเปรียบเทียบจะต้องทดสอบอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมือนกันจึงจะเป็นผลได้อย่างชัดเจนที่สุด ซึ่งจากจุดนี้ทางผู้วิจัยมีข้อจำกัดทั้งเรื่องเวลาและค่าใช้จ่าย จึงเป็นข้อที่น่าจะนำไปพิจารณาในการวิจัยครั้งต่อไป

(6) ในการวิจัยครั้งนี้การตรวจวัดค่าระดับเสียงในสถานที่ติดตั้งจริงมีปัจจัยหลายๆอย่าง ที่ส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัดระดับเสียง ซึ่งทำให้ผลการตรวจวัดมีค่าที่ไม่สอดคล้องตามทฤษฎี ดังนั้นในการออกแบบการตรวจวัดระดับเสียงจึงควรจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัด เช่น เสียงรบกวนรอบข้างในบริเวณที่ทำการตรวจวัดเสียง และโดยเฉพาะผลของการสะท้อนของเสียงซึ่งลอดผ่านมาจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับกับพื้นผิวถนนและเสียงจากบริเวณรอบข้าง เช่น เสียงกบเขียด หรือกิจกรรมที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์



(7) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วัสดุดูดกลืนเสียงในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารโดยใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรและอุตสาหกรรมภายในประเทศ เนื่องจากในงานควบคุมเสียงรบกวนโดยส่วนใหญ่มักใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติในการดูดกลืนเสียงของวัสดุดูดกลืนเสียง ซึ่งวัสดุดูดกลืนเสียงส่วนใหญ่จะมีลักษณะที่ไม่คงทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร จึงจะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากหากสามารถพัฒนาวัสดุดูดกลืนเสียงที่สามารถคงทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร รวมทั้งใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรและอุตสาหกรรมภายในประเทศได้

(8) ผลของการสะท้อนของเสียงซึ่งลอดผ่านมาจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างทางยกระดับและสะท้อนไปมาระหว่างโครงสร้างทางยกระดับกับพื้นผิวถนน จะก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อผู้อยู่อาศัยบริเวณใต้ทางยกระดับจึงเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง ซึ่งแนวทางในการวิจัยในครั้งต่อไปควรจะต้องศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเสียงสะท้อนบริเวณใต้ทางยกระดับและหาแนวทางแก้ไข รวมทั้งหาวิธีซึ่งสามารถที่จะช่วยลดผลสะท้อนที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ทางยกระดับ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ชัชวาล เศรษฐบุตร์. Concrete Technology. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด มหาชน, 2544.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จีงเกษมโชคชัย และวราภรณ์ คุณาวานากิจ. คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมี และทางกายภาพของเถ้าลอย. ในเอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการเรื่องการใช้เถ้าลอย ในงานคอนกรีต. กุมภาพันธ์ 2542 ณ คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีต และวัสดุ ใน คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร.

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พีรชล สุภัทรธรรม. คุณสมบัติทางกล และความทนทานของปูนซีเมนต์ผสม เถ้าแกลบ. ในรายงานการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 เล่ม 1 (2543): 19-24.

บุรฉัตร วิริยะะ. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเสียงของวัสดุพีชแห้ง และเส้นใยแก้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2544.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. ปูนซีเมนต์เถ้าแกลบดำ. วิศวกรรมสาร มช. 10, 2 (2526): 80-91.

ปริญญา จินดาประเสริฐ, อินทรชัย หอวิจิตร และสมนึก ประภาธนากร. ปูนซีเมนต์เถ้าแกลบ. วารสารที่อยู่อาศัย การเคหะแห่งชาติ 3, 2 (2529): 81-92.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชุมพล จันทรม. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบ และซีเถ้าลอย. ขอนแก่น: สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2530.

ปริญญา จินดาประเสริฐ, สุรเชษฐ์ มังมีศรี, สมศักดิ์ พื้นขมภู และอาภา สอนเสาวภาคย์. การศึกษาสารต้านทานซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปอร์โซลาน, ในเอกสารประกอบการสัมมนา ประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1. 2546 ณ สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย จังหวัด กรุงเทพมหานคร.

มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์. การพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าลอย ลิกไนต์ในไทย. หนังสือนักเทคโนโลยีดีเด่น ประจำปี 2545 (2545): 10-16.

รำพึง มังคละสวัสดิ์. วิศวกรรมระบบเสียง. กรุงเทพมหานคร: ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2530.

- วราภรณ์ คุณาวนาภิจ. คุณสมบัติพื้นฐานของเด้าลอยลิกไนต์. ในเอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการเรื่อง การนำศักยภาพการนำเด้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. เมษายน 2536  
ณ สำนักงานพัฒนาและวิจัย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- สมนึก ประภาธนากร. ปูนซีเมนต์ราคาถูกสำหรับชนบท. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2526.
- สมพงษ์ ใจดี. คลื่น เสียง แสง. กรุงเทพมหานคร: กรุงเทพมหานครพิมพ์, 2530.
- สุพรรณ ศิริวัชรินทร์. การศึกษาคอนกรีตกำลังสูงมาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2538/39, 2539.
- อดิศักดิ์ นัยนาภรณ์. วัสดุเพื่อใช้ทำสิ่งกีดขวางเสียงสำหรับทางด่วนพิเศษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.

## ภาษาอังกฤษ

- Naaman, A.E. Ferro cement and Laminated Cementitious Composites. Michigan: Techno press 3000, 2000.
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichkorn A., and KunChorn, T. Strength Activity Index of single side fly ash mixed with Portland Cement Type I and Type II. Proceeding of the 7<sup>th</sup> East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, August 27<sup>th</sup>-29<sup>th</sup>, 1999. Japan: Kochi, 1999.
- Cook, D.J. Cementitious Materials based on rice husk ash. Workshop on production of Cement-like material from Agro-wastes, Peshawar, 1979, Pakistan: UNIDO/ESCAP/RCTT, 1979.
- Harris, D.A. Noise control manual for residential building. New York: McGraw-Hill, 1997.
- Dolle, L.L., and Arch, M. Environmental Acoustics. New York: McGraw-Hill, 1972.
- The Federal Highway Administration (FHWA). FHWA Highway Noise Barrier Design Handbook, 2000.
- Giancoli, D.C. Physics, Principles with applications. New Jersey: Prentice Hall, 1980.
- Graham, T. GRC Production & Uses. London: Palladian Publications Ltd, 1986.



- Demir, I., Hughes R.E., and Demaris, P.J. Formation and use of coal combustion residues from three types of power plants burning Illinois coals *Fuel* 80, 11 (2001): 1659-1673.
- Ibrahim, D.M., and Helmy, M. Crystal Growth of rice husk ash silica. Thermochemica Acta 45 (1981): 79-85.
- Mehta, M., Johnson, J. and Rocafor, R. Architectural Acoustics: Principles and Design. 1<sup>st</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall; 1st edition, 1998.
- Merkin M. Physical Science with modern application. 4<sup>th</sup> ed. Philadelphia: Saunders College, 1989.
- Michael, R. Acoustics room design and noise control. New York: Chemical Publishing Company, 1968.
- Molcolm, J. C., and Kessler, F.M. Noise and Noise Control Volume 2. Florida: CRC Press, Inc., 1982.
- Nehdi, M., Duquette J., and El Damatty A. Performance of rice husk ash. The American Ceramic Society Bulletin 65, 8 (2003): 1177-1180.
- Olivo, C.T., and Olivo, T.P. Fundamentals of Applied Physics. New York: Delmars Publisher, 1998.
- Chindapasirt, P., Chaiyasena, T., and Sirivivatnanon, V. Influence of fly ash fineness on Strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. Cement and Concrete Research 34 (2004): 1087-1092.
- Chindapasirt, P., Chaiyasena, T., and Sirivivatnanon, V. High strength concrete containing fly ash and block boiler husk ash. Proceeding of 4<sup>th</sup> Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (RSID), pp.363-368. Bangkok, Thailand, 3<sup>rd</sup>-5<sup>th</sup> April, 2003. Thailand: Kasetsart University, Tokyo Institute of Technology and University of the Philippines-Dilimar, 2003.
- Rixon, M.R. Concrete Admixtures: Use and Application. 1<sup>st</sup> ed. USA: The Cement Admixtures Association, 1977.
- Sound Research Laboratories Ltd. Noise control in industry. 3<sup>rd</sup> ed. London: E&FN Spon, 1991.
- Schultz, T.J. Acoustical Uses for Perforated Metals: Principles and Applications. USA: Industrial Perforated Association, 1986.

Thumann, A. and Miller, R.M. Fundamental of noise control engineering. Georgia: Fairmont Press, 1986.

Yerges, L.F. Sound, Noise and Vibration Control. New York : Van Nostrand Reinhold, 1969.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภูมิใจ ประเสริฐกุลวงศ์ เกิดวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 มีภูมิลำเนาอยู่ที่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนแสงทอง จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย