

การหาสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุโดยใช้ท่อแบบคลื่นยืน Evaluation of Acoustic Absorption Coefficient of Materials Using a Standing Wave Tube

มิ่ง โลกิจแสงทอง^{1,2*} และ พงษ์ศักดิ์ คำมูล¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ² สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 *อีเมล์ klming@kmitl.ac.th

Ming Lokitsangtong^{1,2*}, and Pongsak Kummol¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, and ²Research Center for Communications and
Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

Tel: 0-2326-4197, Fax: 0-2326-4198, *E-mail: klming@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีหนึ่งสำหรับวัดความหน่วงเหนี่ยวทางเสียงจำเพาะหรือสัมประสิทธิ์การดูดซับของวัสดุด้านเสียงโดยใช้ท่อคลื่นยืนหรือท่อความหน่วงเหนี่ยว การออกแบบอุปกรณ์และวิธีทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM หมายเลข C384-90a กล่าวคือ ท่อตรงซึ่งมีผนังท่อแข็งพร้อมด้วยตัวลำโพงเสียงและชิ้นงานวัสดุวางอยู่ที่ปลายสุดของท่อ วัสดุที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ แก้ว คอนกรีต และอิฐ ซึ่งมีความหนาต่างๆ โดยทดสอบที่ความถี่ 125, 250, 500, 1000, 2000 และ 4000Hz แล้วค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่วัดได้ก็นำไปเปรียบเทียบกับแหล่งข้อมูลที่มีอยู่ในห้องตลาด เป็นที่มั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาเองนี้อาจสามารถนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสำหรับวัสดุอื่นๆที่หาข้อมูลไม่ได้

Abstract

This paper presents a method for measuring the specific acoustic impedance or absorption coefficient of acoustic material using a standing wave or impedance tube. The design of the apparatus and test method conform with the ASTM standard designation C384-90a – a straight solid-wall tube with a speaker and a material specimen perpendicularly mounted at the terminating end. Three common materials i.e., glass, concrete, and bricks with different thickness were tested at frequency of 125, 250, 500, 1000, 2000, and 4000 Hz. The obtained values for acoustic absorption coefficient are then compared with the data

source available in the market. It has been assured that this in-house designed and constructed apparatus could be employed to evaluate acoustic absorption coefficient for other materials with unavailable data.

1. บทนำ

ในปัจจุบันกลไกของการควบคุมทางเดินของเสียง ที่ใช้กันทั่วไปก็คือ การควบคุมแบบรับสนอง (passive control) โดยใช้ตัวดูดซับเช่น โฟมโพลียูเรเทนอย่างพรุน ผนังกันเสียงยางเนื้อแน่น หรือระบบตัวดูดซับกับผนังกันแบบหลายแผ่นชั้น การบำบัดทางเสียงเหล่านี้สามารถออกแบบให้สลายพลังงานเสียงภายในตัวโครงสร้าง หรือส่งผ่านพลังงานเสียงตกกระทบผ่านตัวโครงสร้าง การสลายพลังงานเสียงภายในตัวโครงสร้างแบบพรุน เรียกว่า การดูดซับเสียง และเกิดขึ้นเพราะเสียงถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่มีปริมาณน้อยๆ เมื่อเสียงถูกขับผ่านจากรูพรุนหนึ่งไปสู่อีกรูพรุนหนึ่ง การดูดซับเสียงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากอันหนึ่ง เมื่อต้องการออกแบบระบบบำบัดเสียงที่ต้องอาศัยวัสดุพรุน สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงตามคำนิยามคือ อัตราส่วนของปริมาณพลังงานเสียงดูดซับภายในและส่งผ่านวัสดุต่อด้วยปริมาณของพลังงานเสียงตกกระทบบนวัสดุนั้น ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 0 และ 1

วิธีทดลองหาสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่นิยมใช้กันอยู่มีสองวิธีคือ การใช้ห้องกังวาน (reverberation chamber) และการใช้ไมโครโฟนสองตัว [1] แต่ทั้งสองวิธีดังกล่าวจะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง วิธีท่อแบบคลื่นยืน (standing wave) หรือ วิธีท่อความหน่วงเหนี่ยว (impedance)

เป็นอีกวิธีเลือกหนึ่งซึ่งไม่ยุ่งยากและลงทุนไม่มาก ในการศึกษานี้จะได้นำเสนอแนวทางการออกแบบ สร้าง และทดลองโดยวิธีนี้ตามมาตรฐานสากล [2] ที่ใช้กันอยู่

2. วิธีท่อแบบคลื่นยืน

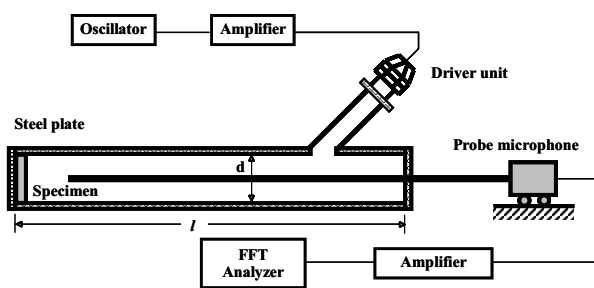
2.1 อุปกรณ์ทดลอง

ท่อแบบคลื่นยืนประกอบด้วยท่อทำจากพลาสติกแข็งหนา 5 มม ภาดัดขวางภายในเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40 มม x 40 มม ความยาวรวมของท่อ 2250 มม มาตรฐาน [2] ได้กำหนดความถี่ขีดบนและขีดล่างดังสมการ (1) และ (2) ตามลำดับดังนี้

$$f < 0.500 c/d \quad (1)$$

$$3 c/4f < l - d \quad (2)$$

เมื่อ d คือ ขนาดที่ใหญ่กว่าของภาดัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าของท่อ (เมตร) c คือ ความเร็วของเสียง (340 เมตรต่อวินาที) และ l คือ ความยาวท่อ (เมตร) เพราะฉะนั้นในที่นี้ ความถี่ขีดบนและขีดล่างของท่อแบบคลื่นยืนที่ออกแบบไว้เป็น 4250 Hz (>4000Hz) และ 115 Hz (<125Hz)

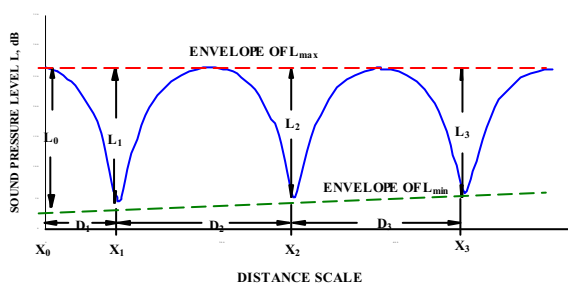


รูปที่ 1 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ท่อแบบคลื่นยืน

ตามลำดับ เสียงถูกส่งผ่านเข้าไปในท่อทางท่อเอียงที่ปลายหนึ่ง ส่วนปลายอีกด้านหนึ่ง จะวางขึ้นทดสอบไว้ โดยมีแผ่นเหล็กหนาติดตั้งอยู่ด้านหลัง สัญญาณของคลื่นยืนภายในท่อสามารถจับได้จากท่อตรวจวัด (probe tube) ซึ่งมีไมโครโฟนอยู่ภายนอกท่อ ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 หลักการของวิธี

เมื่อนำเสียงบริสุทธิ์ (pure tone) แผ่กระจายไปในท่อ ซึ่งปลายของท่อมีวัสดุที่มีความหนาแน่นหรือค่าหนึ่งปิดกันไว้ จะเกิดคลื่นเสียงไป



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงระดับความดันเสียงของคลื่นยืน

ตามท่ออยู่ในรูปคลื่นที่มีค่าระดับความดันเสียงสูงสุดและต่ำสุด วางห่างกันอย่างปรกติ ดังแสดงในรูปที่ 2 [2] ค่าสูงสุด L_{max} จะมีระดับคงที่ แต่ค่าต่ำสุดจะมีระดับเพิ่มขึ้น เมื่อห่างออกไปจากผิวชิ้นงาน โดยอาศัยการเปรียบเทียบจากค่าต่ำสุดสองอันแรก ระดับความดันเสียงต่ำสุด L_{min} ที่ผิวชิ้นทดสอบก็สามารถหาได้ อัตราส่วนคลื่นยืน (standing wave ratio) L_0 จะคำนวณได้จากสมการ

$$L_0 = L_{max} - L_{min} \quad (3)$$

ซึ่งค่านี้จะนำไปใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงและอัตราส่วนความหน่วงเหนี่ยวต่อไป

3. การวัดและการคำนวณ

3.1 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

สนามของเสียงภายในท่อ วัดได้ด้วยท่อตรวจวัดติดตั้งกับไมโครโฟน ซึ่งวางอยู่ข้างนอกท่อ ตำแหน่งของท่อตรวจวัดใช้ไม้บรรทัดวางอยู่ด้านนอกท่อเป็นตัววัด เนื่องจากสนามเสียงจะถูกบีบคั้นไปเพราะตัวท่อตรวจวัด เพื่อหาตำแหน่งจริงของปลายท่อตรวจวัดจากผิวชิ้นทดสอบ จะต้องนำเอาโลหะท่อนั้น มาวางให้ผิวโลหะอยู่ที่ตำแหน่งของผิวชิ้นทดสอบ ค่าต่ำสุดอันแรกจะอยู่ห่างจากผิวโลหะเป็นระยะเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นและค่าต่ำสุดตัวถัดไปจะอยู่ห่างกันเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น หรือคำนวณจากสมการ

$$X_0 = X_1 - (X_2 - X_1) / 2 \quad (4)$$

เมื่อ X_0 คือ ตำแหน่งของผิวชิ้นทดสอบ X_1 และ X_2 คือตำแหน่งของค่าต่ำสุดตัวที่หนึ่งและสองตามลำดับตามรูปที่ 2

ถ้าให้จุดเริ่มต้นของพิกัด x อยู่ที่ผิวชิ้นทดสอบและมีทิศทางบวกไปในแนวของคลื่นตกกระทบ ถ้าความต่างเฟสของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน เท่ากับ θ ที่ $x = 0$ ความดันของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน เขียนได้เป็น [3]

$$p_i = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad \text{และ} \quad p_r = Be^{j(\omega t - kx + \theta)} \quad (5)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$, k คือตัวเลขคลื่น (wave number) ความดันเสียงรวม จะเขียนได้เป็น

$$p_t = p_i + p_r \quad (6)$$

ความดันสูงสุดอันแรก จะเกิดขึ้นเมื่อ $\theta = -2kx$ และค่าต่ำสุดแรกจะเกิดเมื่อ $\theta = -2kx + \pi$ ดังนั้น $p_{max} = e^{-jkx}(A+B)$ และ

$p_{min} = e^{-jkx}(A-B)$ อัตราส่วนของความดันสูงสุดต่อด้วยความดันต่ำสุด คือ $(A+B)/(A-B)$ อัตราส่วนคลื่นยืน L_0 คือ ผลต่างในหน่วย dB ระหว่างความดันเสียงสูงสุดและต่ำสุดในคลื่นยืนซึ่งเขียนได้เป็น

$$10^{L_0/20} = \frac{A+B}{A-B} \quad (7)$$

และ แอมพลิจูด ของสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนความดัน (pressure reflection coefficient) ยกกำลังสอง เขียนได้เป็น

$$|R_p|^2 = \left(\frac{B}{A}\right)^2 = \left[\frac{10^{L_0/20} - 1}{10^{L_0/20} + 1}\right]^2 \quad (8)$$

$$\frac{X}{\rho c} = \frac{R}{\rho c} N \sin \phi \quad (20)$$

สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

$$\alpha_0 = 1 - |R_p|^2 \quad (9)$$

3.2 อัตราส่วนความหน่วงเหนี่ยว

ความเร็วรวมของอนุภาค (total particle velocity) เขียนได้เป็น

$$u_t = \frac{1}{\rho c} (p_i - p_r) \quad (10)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

ความหน่วงเหนี่ยวทางเสียงจำเพาะ (specific acoustic impedance) ที่จุดใดๆในท่อเขียนได้เป็น

$$Z_S = \frac{p_t}{u_t} = \rho c \frac{A + Be^{j(2kx+\theta)}}{A - Be^{j(2kx+\theta)}} \quad (11)$$

ที่ $x = 0$ ความหน่วงเหนี่ยวจำเพาะที่ผิวชั้นทดสอบ Z_N ในรูปอัตราส่วนความหน่วงเหนี่ยว จะเป็น

$$\frac{Z_N}{\rho c} = \frac{A + Be^{j\theta}}{A - Be^{j\theta}} \quad (12)$$

เมื่อกระจายพจน์ออกไปจะได้

$$\frac{Z_N}{\rho c} = \frac{(A/B)^2 - 1 + (2A/B)j \sin \theta}{(A/B)^2 + 1 - (2A/B) \cos \theta} \quad (13)$$

ในทางปฏิบัติเราจะใช้สมการ [2] ต่อไปนี้

$$K_0 = 10^{L_0/20} \quad (14)$$

$$M = \frac{1}{2} [K_0 + (1/K_0)] \quad (15)$$

$$N = \frac{1}{2} [K_0 - (1/K_0)] \quad (16)$$

$$\phi = 360^\circ \left[\frac{D_1}{D_2} - \frac{1}{2} \right] \quad (17)$$

เมื่อ D_1 คือ ระยะจากผิวชั้นทดสอบ ถึงค่าต่ำสุดที่ใกล้ที่สุดในคลื่นยืน และ D_2 คือ ระยะจากค่าต่ำสุดแรก ถึงค่าต่ำสุดที่สองในคลื่นยืน

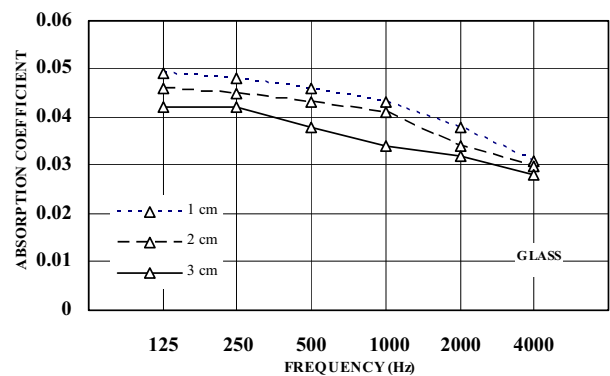
$$\frac{Z_N}{\rho c} = \frac{R}{\rho c} + j \frac{X}{\rho c} \quad (18)$$

$$\frac{R}{\rho c} = \frac{1}{M - N \cos \phi} \quad (19)$$

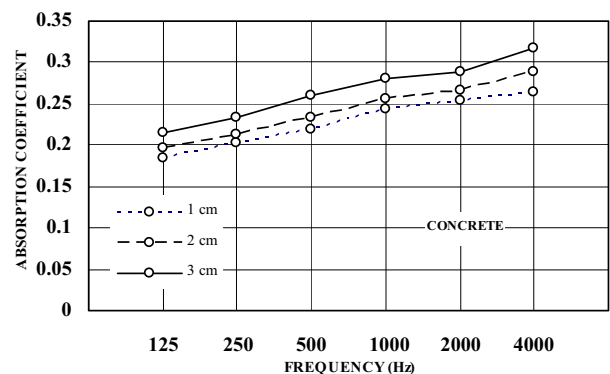
4. ผลการทดลอง

จากชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น ภายหลังติดตั้งชุดเครื่องมือแล้ว ได้ทำการวัดและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง α_0 ตามสมการที่ (9) และอัตราส่วนความหน่วงเหนี่ยว $Z_N/\rho c$ ตามสมการที่ (18) เพื่อทำการเก็บข้อมูลสำหรับชั้นทดสอบที่เลือกไว้ โดยจะพิจารณาค่าทั้งสองสัมพันธ์กับความถี่ octave band center ที่ 125, 250, 500, 1000, 2000, และ 4000 Hz

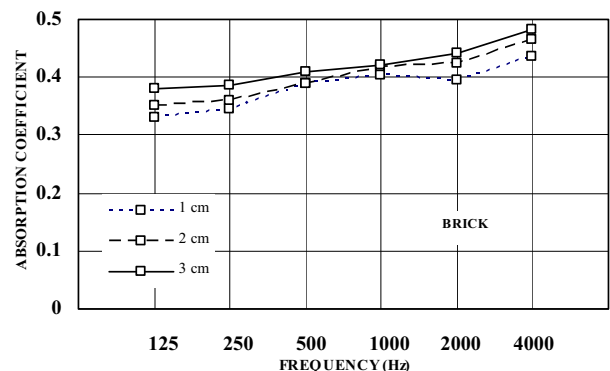
รูปที่ 3, 4, และ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูด



รูปที่ 3 ความสามารถดูดซับเสียงของแก้วที่ความหนาต่างๆ

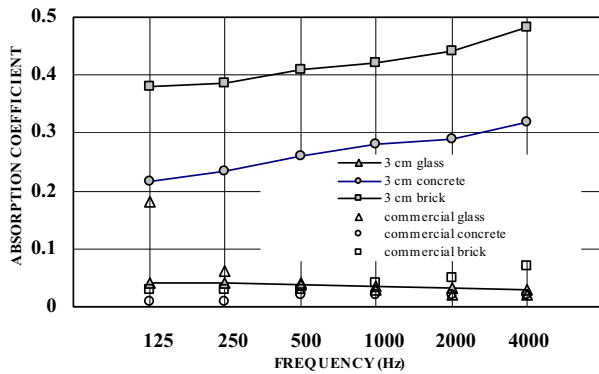


รูปที่ 4 ความสามารถดูดซับเสียงของคอนกรีตที่ความหนาต่างๆ



รูปที่ 5 ความสามารถดูดซับเสียงของอิฐที่ความหนาต่างๆ

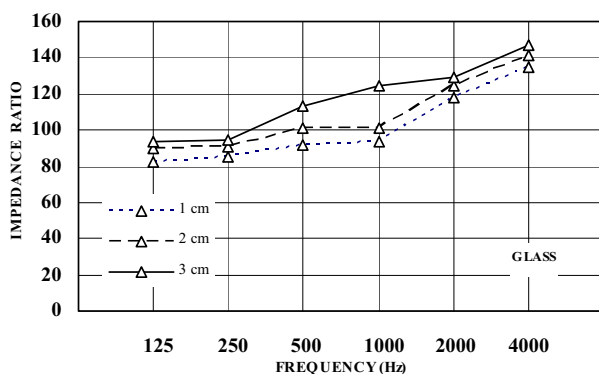
ชั้นเสียงกับความถี่ สำหรับ แก้ว คอนกรีต และ อิฐ ที่ความหนา 1, 2, และ 3 ซม. ตามลำดับ ปรากฏว่า อิฐจะมีความสามารถในการดูดซับเสียงดีที่สุดใน เนื่องจากมีรูพรุนมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับแก้วตามตารางที่ 1 คอนกรีตและอิฐจะดูดซับได้ดีเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเกือบจะเป็นเส้นตรงที่ความถี่เดียวกัน ยิ่งความหนามากจะดูดซับได้ดีมากกว่า



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความสามารถดูดซับเสียง

สำหรับแก้วการดูดซับเสียงจะค่อยๆน้อยลงเมื่อเพิ่มความถี่ เนื่องจากแก้วจะสะท้อนเสียงได้มากขึ้น ในทำนองเดียวกัน ที่ความถี่เดียวกันแก้วบางจะดูดซับได้มากกว่า เพราะสะท้อนกลับได้น้อย รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงระหว่างวัสดุที่ทดลองและวัสดุที่ได้จากแหล่งข้อมูลในห้องตลาด ปรากฏว่าวัสดุชนิดเดียวกันจะมีแนวโน้มคล้ายกัน เนื่องจากส่วนผสมของอิฐและคอนกรีตที่นำมาเปรียบเทียบกันไม่เป็นที่ชัดเจน ผลที่ได้จึงแตกต่างกันมาก แต่แก้วซึ่งส่วนผสมไม่แตกต่างกันมากจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

รูปที่ 7, 8, และ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหน่วง



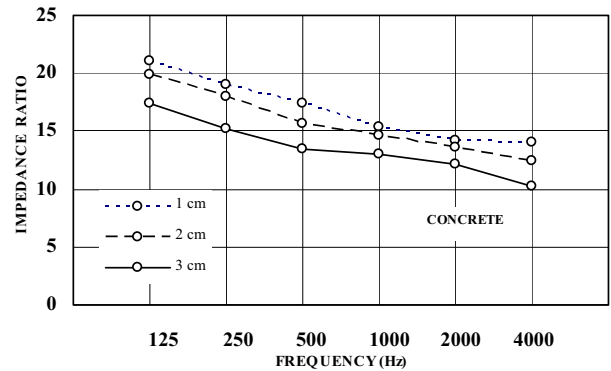
รูปที่ 7 ความหน่วงเหนี่ยวของแก้วที่ความหนาต่างๆ

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติของวัสดุต่างๆ

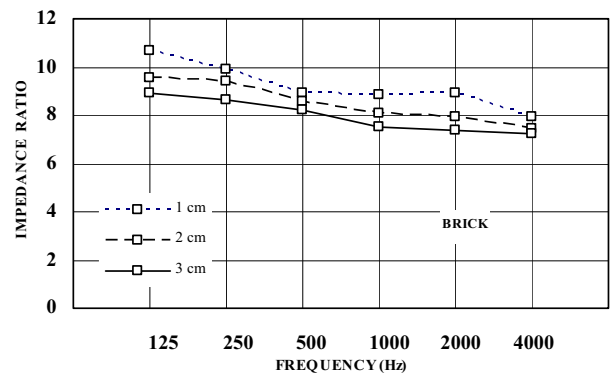
ลักษณะสมบัติ	แก้ว	คอนกรีต	อิฐ
สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง	0.04	0.25	0.4
อัตราส่วนความหน่วงเหนี่ยว	110	15	9

เหนี่ยวกับความถี่ สำหรับ แก้ว คอนกรีต และ อิฐ ที่ความหนา 1, 2, และ 3 ซม. ตามลำดับ ปรากฏว่าแก้วจะกั้นเสียงส่งผ่านได้ดีที่สุด ดู

ตารางที่ 1 ผลที่ได้ในกรณีความหน่วงเหนี่ยวจะกลับกันกับการดูดซับเสียงที่กล่าวไปข้างต้น



รูปที่ 8 ความหน่วงเหนี่ยวของคอนกรีตที่ความหนาต่างๆ



รูปที่ 9 ความหน่วงเหนี่ยวของอิฐที่ความหนาต่างๆ

5. บทสรุป

การหาสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงด้วยวิธีแบบทอคลื่นยืนเป็นวิธีที่ประหยัดและสะดวกวิธีหนึ่ง ถึงแม้คลื่นเสียงที่ตกกระทบจะมีเฉพาะในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุขึ้นทดสอบ ผลที่วัดได้ก็ให้ค่าที่นำไปใช้ได้ ในกรณีที่เราวัสดุที่ไม่ทราบความสามารถดูดซับเสียง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องทำการค้นหาโดยการทดลองเอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Barnard, A.R., and Rao, M.D., 2004. A comparison of acoustic absorption coefficient measurements from the in-situ method with traditional methods. NOISE-CON 2004, Baltimore, Maryland, July 12-14.
- [2] ASTM C384-90a, 1990. Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials by the impedance tube method. The American Society for Testing and Materials, Vol. 04.06, pp. 100-110.
- [3] Bies, D.A., and Hansen, C.H., 2003. Engineering noise control: theory and practice. 3rd ed., Spon Press, London.