

สมบัติการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์^{1*}

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

ณัฏฐ์ มากุล²

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เลขที่ 9 ถ.แจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษามรรณนะการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ 2 ประเภท ได้แก่ บล็อกซีเมนต์ที่มีเถ้าแกลบ (rice husk ash, RHA) เป็นส่วนผสม และบล็อกซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบและติดตั้งร่วมกับฉนวนใยแก้ว โดยเถ้าแกลบเป็นผลพลอยได้จากการกระบวนการเผาเถ้าแกลบเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สัดส่วนผสมของบล็อกซีเมนต์ในการศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ) (w/b) เท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด (ทราย) เท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบสมรรถนะการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ดังกล่าวกับบล็อกซีเมนต์อ้างอิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

ผลจากการศึกษา พบว่า การใช้เถ้าแกลบเป็นส่วนผสมส่งผลให้บล็อกซีเมนต์มีประสิทธิภาพการดูดซับเสียงที่ดีขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (sound absorption coefficient) ของบล็อกมีค่าสูงกว่าบล็อกซีเมนต์อ้างอิงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงความถี่สูงกว่า 6000 เฮิร์ต (Hz) นอกจากนั้นการติดตั้งฉนวนใยแก้วส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงขึ้นโดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำจนถึงความถี่ 4000 เฮิร์ต (Hz) โดยสรุป การใช้เถ้าแกลบบดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถใช้เป็นวัสดุในการผลิตบล็อกซีเมนต์ที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้งานในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเสียง

คำสำคัญ : การดูดซับเสียง / บล็อกซีเมนต์ / เถ้าแกลบ / ฉนวนใยแก้ว

* Corresponding author : lertwatt@tu.ac.th

¹ รองศาสตราจารย์ ดร., คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง

² อาจารย์ ดร., สาขาเทคโนโลยีอาคาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

Sound Absorption Property of Cement Block Containing Rice Husk Ash

Pusit Lertwattanakul^{1*}

Thammasat University, Rangsit Center, Khlong Luang, Pathum Thani, 12121

Natt Makul²

Phranakhon Rajabhat University, 9 Changwattana Road, Bangkhen Bangkok 10220

Abstract

This paper presents the study of sound absorption properties of two types of cement blocks, i.e., the cement block containing rice husk ash (RHA) and the RHA cement block when installed with glass wool insulation. Rice husk ash is a by-product of the process of burning rice husk to generate electricity. RHA was mixed with Portland cement Type 1 at 20% by weight of binder. The water-to-binder ratio was 0.6, and the binder-to-fine aggregate (sand) ratio was 1:2.75 by weight. The sound absorption properties of the RHA cement blocks was then compared with the reference cement blocks widely used in the construction industry.

It was found that RHA can effectively enhance the sound absorption performance of cement blocks. The sound absorption coefficients of RHA-based cement blocks were significantly higher than those of the reference cement blocks, especially at frequencies higher than 6,000 Hz. Furthermore, installation of glass wool insulator could also increase the sound absorption coefficient, in particular at lower frequency range up to 4,000 Hz. In summary, the use of RHA to replace Portland cement at 20% by weight of binder is applicable for the manufacture of cement blocks and helps improve the sound absorption property of the blocks.

Keywords : Sound Absorption / Cement Block / Rice Husk Ash / Glass Wool Insulator

* Corresponding author : lertwatt@tu.ac.th

¹ Associate Professor, Faculty of Architecture and Planning.

² Lecturer, Department of Building Technology, Faculty of Industrial Technology.

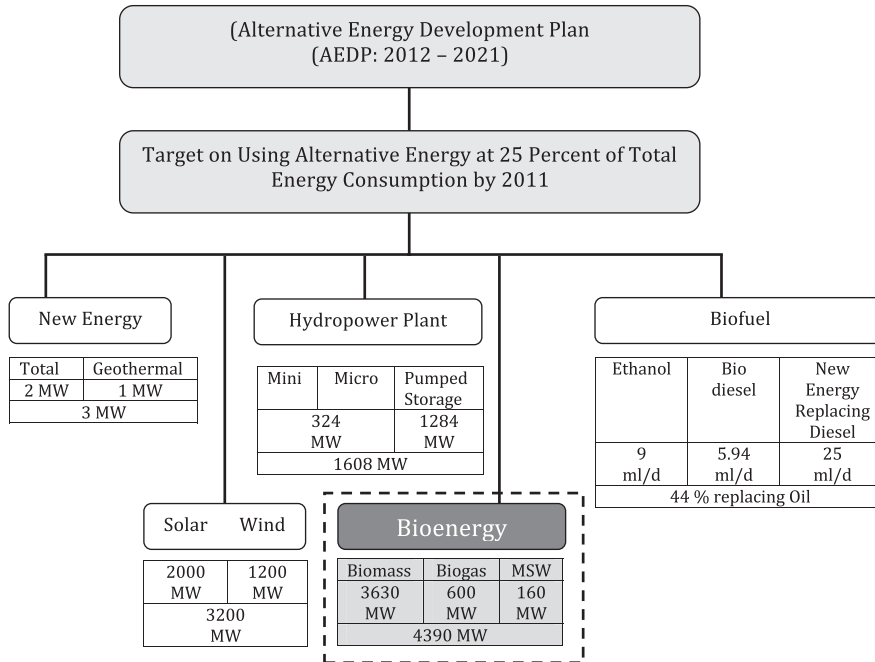
1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกษตร ดังนั้นจึงมีผลผลิตพร้อมทั้งเศษวัสดุเหลือทิ้งอยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางเศรษฐกิจหรือการแปรรูปให้เป็นพลังงานเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิลซึ่งส่วนใหญ่ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมาจากแหล่งภายในประเทศที่กำลังจะหมดไป ส่วนพลังงานชีวมวลถือได้ว่าเป็นพลังงานทดแทน (renewable energy) ชนิดหนึ่งที่ต้องการการจัดการที่มีประสิทธิภาพที่ดีจึงจะสามารถศักยภาพในการใช้เป็นพลังงานได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืนต่อไปในอนาคต โดยจากแผนการพัฒนาพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan (AEDP : 2012–2021) [1] ของประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายของพลังงานทางเลือกไว้ที่จะต้องมีสัดส่วนร้อยละ 25 ของพลังงานรวมที่ใช้ในประเทศ โดยเฉพาะพลังงานชีวมวล (bioenergy) ที่ต้องมีสัดส่วนสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1 หนึ่งในพลังงานชีวมวลหนึ่งคือ แอ้วกลบ แอ้วชยอ้อย เป็นต้น

จากนิยามของ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงานที่ได้กำหนดคำนิยามของชีวมวล (biomass) ที่ประกอบด้วยพิน แกลบ กากอ้อย และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ดังนั้นในปัจจุบันวัสดุดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน โรงสีข้าว และโรงงานน้ำตาล ซึ่งแกลบและชานอ้อยเมื่อผ่านกระบวนการแล้วจะได้ผลพลอยได้หรือของเหลือทิ้งเป็นแอ้วกลบ (rice husk

ash, RHA) และแอ้วชานอ้อย (sugar-cane bagasse ash) ที่มีสีดำเหลือทิ้งไว้โดยไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาในส่วนของการนำแอ้วเหล่านี้มาเป็นวัสดุบางส่วนทดแทนปูนซีเมนต์และคอนกรีต [2-8] ขึ้น ซึ่งการนำกลับมาใช้ใหม่ในระดับอุตสาหกรรม เป็นการลดต้นทุนในส่วนของการผลิตผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ ทั้งยังเป็นการช่วยลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและรักษาสภาพแวดล้อมซึ่งสอดคล้องกับนโยบายของภาครัฐในการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาสร้างมูลค่าเพิ่มและช่วยสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้อีกทางหนึ่งด้วย

ผลจากการศึกษาการใช้ประโยชน์ของแอ้วต่างๆ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตรดังกล่าวเพื่อใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่า แอ้วกลบสามารถใช้ในการผลิตคอนกรีตที่มีคุณภาพสูงตามมาตรฐานและมีความทนทาน [9] และยังเป็น การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม [10,11] โดยแกลบที่เหลือใช้จากกระบวนการสีข้าว จะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าวและโรงไฟฟ้าผลิตไฟฟ้า และก่อให้เกิดแอ้วกลบเป็นปริมาณมาก การเผาไหม้แกลบที่อุณหภูมิควบคุมประมาณ 500-700 °C จะทำให้แอ้วกลบมีองค์ประกอบของซิลิกาซึ่งอยู่ในสภาพอสัณฐานและสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมกับไฮดรอกไซด์ [12-14] สำหรับการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงชัน องค์ประกอบของซิลิกาที่อยู่ในสภาพอสัณฐานจะมีปริมาณน้อยลง ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ด้วย การอบ [15,16] ในปัจจุบัน มีการประยุกต์ใช้แอ้วกลบเป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์และคอนกรีตอย่างแพร่หลาย [3-9,12,17]



รูปที่ 1 แผนการพัฒนาพลังงานทางเลือก (AEDP: 2012-2021) [1]

โดยอาศัยแนวทางการพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งให้สามารถนำกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ถ้าหากเป็นวัสดุทางเลือกที่ดีตัวเลือกหนึ่ง ซึ่งจากลักษณะทางกายภาพที่มีความพรุนสูง [3] ทำให้มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นวัสดุเติมประกอบในการผลิตบล็อกซีเมนต์ที่มีสมบัติในการดูดซับเสียงที่ดี แต่ในปัจจุบัน ยังไม่มีงานวิจัยที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพดังกล่าวได้อย่างชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่มีถ้ากลายเป็นส่วนผสมและวิเคราะห์เปรียบเทียบกับบล็อกซีเมนต์ที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด

2. วิธีการศึกษา

การวิจัยเชิงการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และสมบัติการดูดซับเสียงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1. ถ้าจากโรงไฟฟ้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่ง

ผ่านการบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 35.8 ไมครอน

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
3. ทราายแม่น้ำซึ่งมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [18]
4. น้ำประปา
5. ฉนวนใยแก้วตามมาตรฐาน มอก. 486 และ 487 มีความหนาแน่น 32 กก./ม.³

2.2 วิธีการทดสอบตัวอย่างบล็อกซีเมนต์

2.2.1 การขึ้นรูป

การขึ้นรูปบล็อกซีเมนต์มีขั้นตอนในการทดสอบ ดังนี้

1. ส่วนผสมของบล็อกซีเมนต์ ซึ่งทำการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และถ้าจาก) (w/b) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด (ในที่นี้ใช้ทราายแม่น้ำ) เท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนักแสดงในตารางที่ 1

2. ทำการผสมตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C305 [19] และเทลงแบบหล่อขนาดเท่ากับ 30 ซม. × 30 ซม. × 20 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2

3. เก็บตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบ แล้วนำไปป่นในน้ำ จนถึงอายุที่ทำการทดสอบ

หมายเหตุ สำหรับการทดสอบซีเมนต์บล็อกซึ่ง

ใส่แผ่นฉนวนดูดซับเสียงฉนวนใยแก้วหุ้มด้วยแผ่นผ้าสีด้าสอดไว้ในช่อง ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของบล็อกซีเมนต์

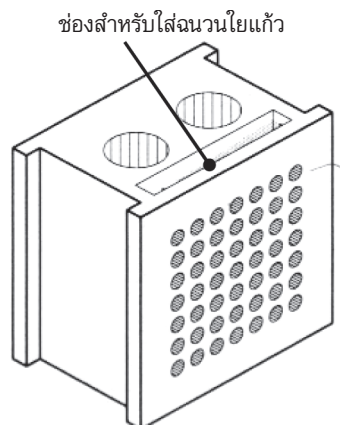
สัดส่วนผสม	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบ	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ทราย (กรัม)	ปริมาณเถ้าแกลบ (กรัม)
OPC ^[1]	0.6	0	309	185	850	0
RHA20 ^[2]	0.6	20	247	185	850	2

หมายเหตุ ^[1]OPC คือ มอร์ตาร์ควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.6

^[2]RHA20 คือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2 แบบหล่อซีเมนต์บล็อก



รูปที่ 3 บล็อกซีเมนต์ดูดซับเสียงและช่องใส่ฉนวนใยแก้ว

2.2.2 วิธีการทดสอบ

ประสิทธิภาพของการดูดซับเสียงถูกบ่งชี้ด้วยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (sound absorption coefficient)

2.2.2.1 ห้องทดสอบ เครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบ

ห้องทดสอบประสิทธิภาพของการดูดซับเสียงประกอบด้วยเครื่องมือ และอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1. ห้องทดสอบเสียง ดังแสดงในรูปที่ 4
2. ไมโครโฟน แบบ Diffuse-field microphone ดังแสดงในรูปที่ 5

3. ไมโครโฟน แบบ Range microphone pre-amplifier

4. เครื่องวิเคราะห์ความถี่ของเสียง แบบ Dual channel real-time frequency analyzer

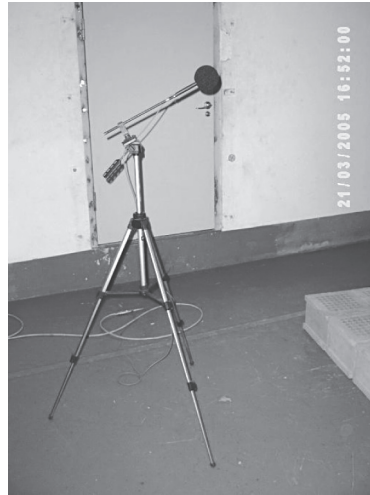
5. เครื่องกำเนิดเสียง แบบ Sound source ดังแสดงในรูปที่ 6

6. เครื่องกำเนิดเสียง แบบ Omni power-sound source

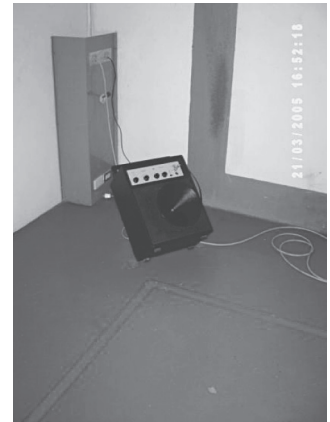
7. เครื่องทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือ



รูปที่ 4 ห้องทดสอบเสียง



รูปที่ 5 ไมโครโฟน (Field microphone)



รูปที่ 6 เครื่องกำเนิดเสียง

2.2.2.2 การสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์

ทดสอบ

1. นำไมโครโฟนติดไว้ที่เครื่องกำเนิดเสียงที่มีความถี่ 125 เฮิรต (Hz) ที่ระดับความดังเสียง 123.9 เดซิเบล (dB)
2. ต่อไมโครโฟนเข้าเครื่องวัดเสียงเพื่อหาความแตกต่างระหว่างเสียงจากแหล่งกำเนิด และเสียงที่วัดได้
3. ทำการปรับค่าเสียง (เพิ่ม/ลด) ให้มีค่าเสียงที่วัดได้ตรงกันกับเครื่องกำเนิดเสียง
4. ทำการสอบเทียบตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 จำนวน 3 รอบ

2.2.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนในการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับเสียง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การเตรียมสถานที่ทดสอบ
 - 1) นำคอนกรีตบล็อกที่เหลือมาวางเรียงกันเป็นพื้นที่ 15 ตารางเมตร ในห้องทดสอบเสียง
 - 2) ติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ ดังรูปที่ 7 และ 8 โดยมีข้อกำหนดในการติดตั้งดังต่อไปนี้
 - ตำแหน่งของชิ้นงานที่วางในห้องทดสอบเสียงต้องไม่ขนานกับห้องทดสอบ
 - ลำโพงและไมโครโฟน ต้องห่างกันอย่างน้อย 1.2 เมตร

- ไมโครโฟนต้องสูงจากพื้นอย่างน้อย 1.2 เมตร

- 3) เริ่มทดสอบโดยวางลำโพงที่ตำแหน่งในการวัดเสียงจุดที่ 1
- 4) ปล่อยเสียงออกมาที่ระดับความดัง 123.9 เดซิเบล (dB) เป็นเวลา 4 วินาที เพื่อให้เสียงเกิดการอิมตัวภายในห้องทดสอบ
2. การทดสอบหาสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (sound absorption coefficient)
 - 1) นำชิ้นงานที่ต้องการจะทดสอบมาวางเรียงกันในห้องรับเสียง
 - 2) ให้ลำโพงปล่อยเสียงออกมามาตั้งอยู่ช่วงหนึ่ง
 - 3) เมื่อลำโพงหยุดก็เริ่มวัดความดังของเสียงที่หายไป
 - 4) ทำซ้ำกับข้อ 3 ไปเรื่อยๆ เป็นจำนวน 16 ครั้ง
 - 5) จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและคำนวณจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง
 - 6) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (sound absorption coefficient (SAC)) (สัดส่วนของพลังงานเสียงที่ถูกดูดซับไปเมื่อชนกระทบเปรียบเทียบกับพลังงานเสียงจากแหล่งกำเนิด ยกตัวอย่าง เช่น ซีเมนต์บล็อกมีหนึ่งมีค่า SAC เท่ากับ 0.75 นั่นก็หมายความว่าพลังงานเสียง

ร้อยละ 75 ได้ถูกดูดซับไว้เมื่อเคลื่อนที่ไปชนกับวัสดุนี้ และ ร้อยละ 25 ของพลังงานที่เทียบกับแหล่งกำเนิดจะสะท้อนออกมา ค่าการดูดซับเสียงของทุกวัสดุจะแปรผันกับความถี่ของเสียงที่เข้าไปกระทบ) ซึ่งทำการวัดที่ความถี่ 250, 500,



รูปที่ 7 การจัดเรียงซีเมนต์บล็อกในห้องทดสอบเสียง

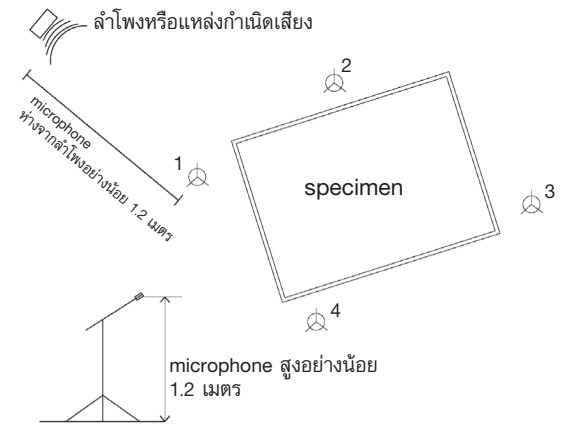
3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

3.1 บล็อกซีเมนต์ที่มีเก้าแกลบเป็นส่วนประกอบ

บล็อกซีเมนต์ที่มีสัดส่วนของเก้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 นำมาขึ้นรูปเป็นบล็อกขนาดเท่ากับ 30 ซม. × 30 ซม. × 20 ซม. เพื่อให้มีขนาดเท่ากับบล็อกกลวงที่ใช้อ้างอิงชนิดไม่รับน้ำหนัก [20] ซึ่งบล็อกซีเมนต์ที่ใช้ในการอ้างอิงคือ บล็อกซีเมนต์ที่ไม่ผสมเก้าแกลบและมีรูปทรงเหมือนกันกับบล็อกซีเมนต์ที่ทำการศึกษาวิจัยได้ผลการทดลองคือ ที่ระดับความถี่เท่ากับ 50, 63 และ 80 เฮิรต (Hz) มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (sound absorption coefficient (SAC)) เป็นลบ (-) นั่นคือ ที่ช่วงความถี่ดังกล่าวบล็อกซีเมนต์ไม่สามารถดูดซับเสียงได้ ส่วนในช่วงความถี่ที่ 80-125 เฮิรต (Hz) มีค่าต่ำ เช่นเดียวกันคือ มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงใกล้เคียงกับศูนย์

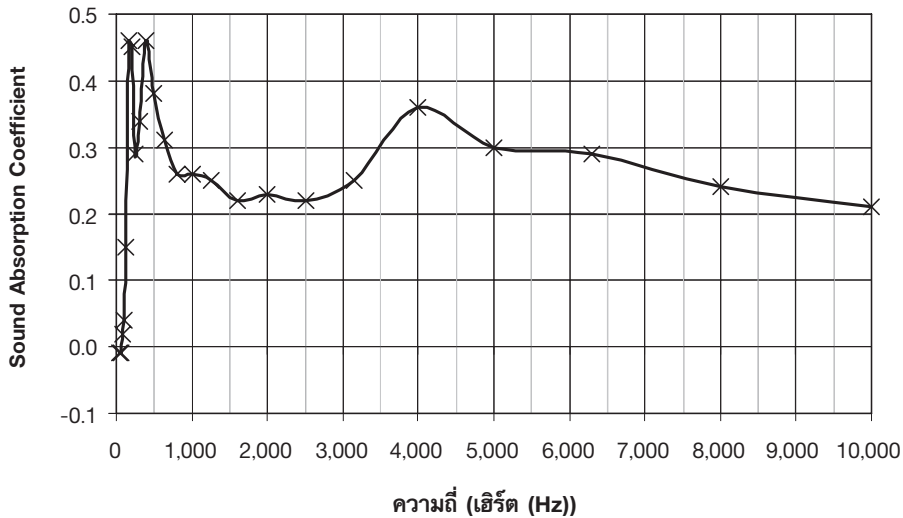
1,000 และ 2,000 เฮิรต (Hz) และปิดเศษให้อยู่ที่ 0.05

หมายเหตุ การทดสอบการดูดซับเสียง จะทดสอบ 2 ครั้ง โดยครั้งแรกเป็นการทดลองโดยใช้ซีเมนต์บล็อกเปล่าและครั้งต่อไปทดลองโดยใส่ฉนวนใยแก้ว



รูปที่ 8 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบเรื่องเสียง

จากรูปที่ 9 พบว่า ในช่วงความถี่ 160 - 200 เฮิรต (Hz) และที่ความถี่ 400 เฮิรต (Hz) ค่า SAC ของบล็อกซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นมาก โดยช่วงที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงที่สุดคืออยู่ในช่วง 0.45-0.46 นั่นคือ ที่ช่วงความถี่ดังกล่าวบล็อกซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงดีที่สุดในช่วงนี้ แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงรบกวน (Noise Reduction Coefficient (NRC)) (คำนวณจากการทดสอบของวัสดุที่มีความถี่ต่างๆ ภายในห้องคอนกรีตที่สามารถแปลเป็นร้อยละของเสียงที่ถูกจับและแปลงโดยพื้นผิวในขณะที่ส่วนที่เหลือจะสะท้อนออกยกตัวอย่างเช่น ค่า NRC เท่ากับ 0.25 หมายถึงวัสดุดังกล่าวดูดซับโดยเฉลี่ยร้อยละ 25 ของเสียงที่ตกกระทบ ในขณะที่เสียงสะท้อนส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 75 ปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้กลับมีค่าต่ำ โดยมีค่าเท่ากับ 0.29 ทั้งนี้เพราะค่า NRC จะเป็นค่าที่ได้จากการเฉลี่ยของ 4 คลื่นความถี่ ได้แก่ 125, 250, 1,000 และ 2,000 เฮิรต (Hz)



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบ

3.2 บล็อกซีเมนต์ที่มีเถ้าแกลบและฉนวนใยแก้วเป็นส่วนประกอบ

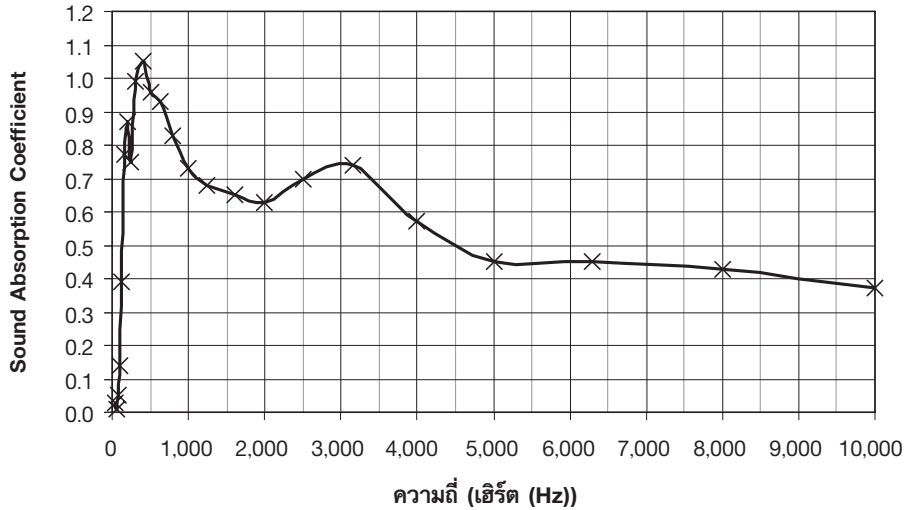
ผลการทดสอบการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ในแต่ละความถี่ที่มีเถ้าแกลบและฉนวนใยแก้ว พบว่าที่ค่าความถี่เท่ากับ 50, 63 และ 80 เฮิร์ต (Hz) บล็อกซีเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงต่ำคือ 0.01, 0.03 และ 0.05 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในขณะที่ความถี่ 100 เฮิร์ต (Hz) มีค่าเท่ากับ 0.14

จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า ที่ความถี่เท่ากับ 400 เฮิร์ต (Hz) บล็อกซีเมนต์เถ้าแกลบและฉนวนใยแก้ว มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงถึง 1.05 แสดงว่าที่ความถี่ดังกล่าว บล็อกซีเมนต์สามารถดูดซับเสียงได้ดีมาก และที่ความถี่เท่ากับ 315 เฮิร์ต (Hz), 500 และ 630 เฮิร์ต (Hz) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นมากคือ อยู่ในช่วงเท่ากับ 0.93-0.99 นั่นคือ ที่ช่วงความถี่ดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงดีที่สุด แสดงว่า ช่วงความถี่ดังกล่าวสามารถดูดซับเสียงได้มีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับความถี่เท่ากับ 100 เฮิร์ต (Hz) แต่เมื่อพิจารณาที่ค่า NRC ปรากฏว่า ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเท่ากับ 0.77 ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้เพราะค่า noise reduction coefficient (NRC) มีค่าที่ได้จากการ

เฉลี่ยของทั้ง 4 คลื่นความถี่ ได้แก่ 125, 250, 1000 และ 2000 เฮิร์ต (Hz)

จากผลการเปรียบเทียบผลทดสอบการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมและมีฉนวนใยแก้ว พบว่าเมื่อเพิ่มใยในวัสดุทดสอบ มีผลทำให้บล็อกซีเมนต์สามารถดูดซับเสียงได้ดีขึ้นมากในทุกคลื่นความถี่ โดยที่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 50-4,000 เฮิร์ต (Hz) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงจะเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงความถี่ 4,000-10,000 เฮิร์ต (Hz) แสดงว่า ฉนวนใยแก้วที่เพิ่มเข้าไปในการทดสอบสามารถดูดซับเสียงได้ดีในช่วงความถี่ต่ำจนถึง 4,000 เฮิร์ต (Hz)

การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบและบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบที่ใส่ฉนวนใยแก้วในรูปที่ 11 พบว่า ในช่วงความถี่ 345-630 เฮิร์ต (Hz) มีผลต่างมากที่สุดคือ 0.58-0.65 แสดงว่าฉนวนใยแก้วที่เพิ่มเข้าไปในการทดสอบ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับเสียงได้มากที่สุดในช่วงความถี่ดังกล่าว รองลงมาจะเป็นช่วงคลื่นความถี่ 2,500-3,150, 1,250-2,000 และ 4,000-10,000 เฮิร์ต (Hz) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงอยู่ที่ 0.48-0.49, 0.41-0.43 และ 0.15-0.21 ตามลำดับ



รูปที่ 10 บล็อกซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ใส่ฉนวนใยแก้ว

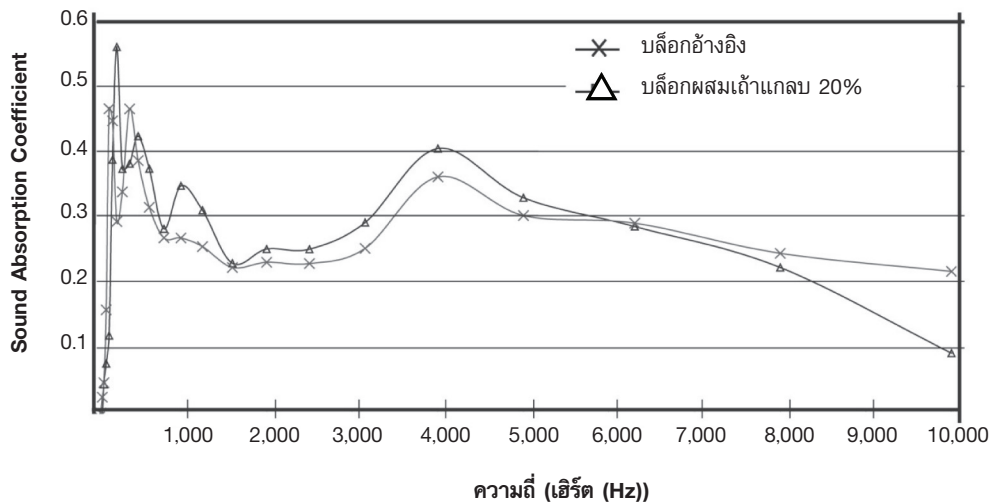
3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ แบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

3.3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบกับบล็อกซีเมนต์อ้างอิง

จากการเปรียบเทียบบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 กับบล็อกซีเมนต์อ้างอิง (ไม่ผสมเถ้าแกลบ)

ที่มีรูปทรงและขนาดเหมือนกันแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ในช่วงคลื่นความถี่ต่ำถึงความถี่ประมาณ 6,000 เฮิร์ต (Hz) บล็อกซีเมนต์ที่ใช้อ้างอิงมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ดีกว่าบล็อกซีเมนต์ที่ศึกษา แต่ในช่วงความถี่สูงหรือที่ 6,000 เฮิร์ต (Hz) ขึ้นไป บล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบมีความสามารถในการดูดซับเสียงได้ดีกว่า

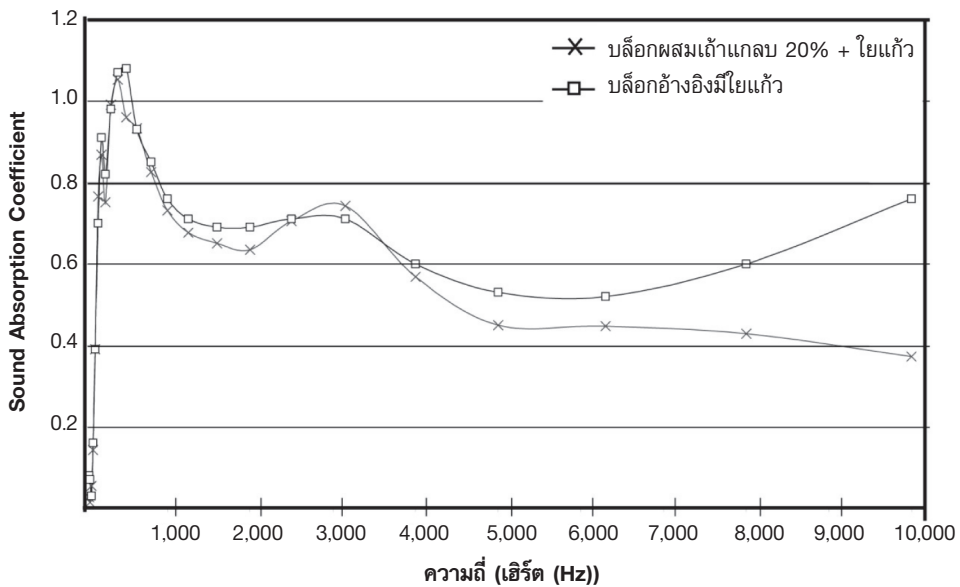


รูปที่ 11 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับบล็อกอ้างอิง

3.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบกับบล็อกซีเมนต์อ้างอิงเมื่อมีฉนวนใยแก้ว

การเปรียบเทียบบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบกับบล็อกซีเมนต์อ้างอิงที่มีรูพรุนเหมือนกัน และมีการใช้ฉนวนใยแก้วแสดงในรูปที่ 12 พบว่า ฉนวนใยแก้วช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงในช่วงความถี่สูงให้กับทั้งบล็อกซีเมนต์ที่ศึกษาวิจัย และบล็อกซีเมนต์อ้างอิง โดยค่าที่

เพิ่มขึ้นนี้ทำให้ทั้งบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบและบล็อกซีเมนต์อ้างอิง [20] มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้ฉนวนใยแก้วร่วมในการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ในช่วงความถี่สูงมีผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ศึกษาวิจัยกับบล็อกซีเมนต์อ้างอิงที่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว



รูปที่ 12 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบและบล็อกซีเมนต์อ้างอิงเมื่อมีฉนวนใยแก้ว

3.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบกับบล็อกซีเมนต์อ้างอิง

ในการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ศึกษากับบล็อกซีเมนต์ทั่วไปตามท้องตลาด ซึ่งจะเปรียบเทียบในช่วงคลื่นความถี่ 125-4,000 เฮิร์ต (Hz) และค่า NRC เท่านั้น เพราะว่าข้อมูลโดยทั่วไป จะแสดงในช่วงคลื่นความถี่ที่ใช้งานทั่วไป ดังนั้น ในการเปรียบเทียบที่เกิดขึ้นจะทำได้ในช่วงความถี่ดังกล่าว

จากรูปที่ 13 เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ศึกษาวิจัยกับบล็อกซีเมนต์ประเภทอื่นๆ แล้ว พบว่า สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

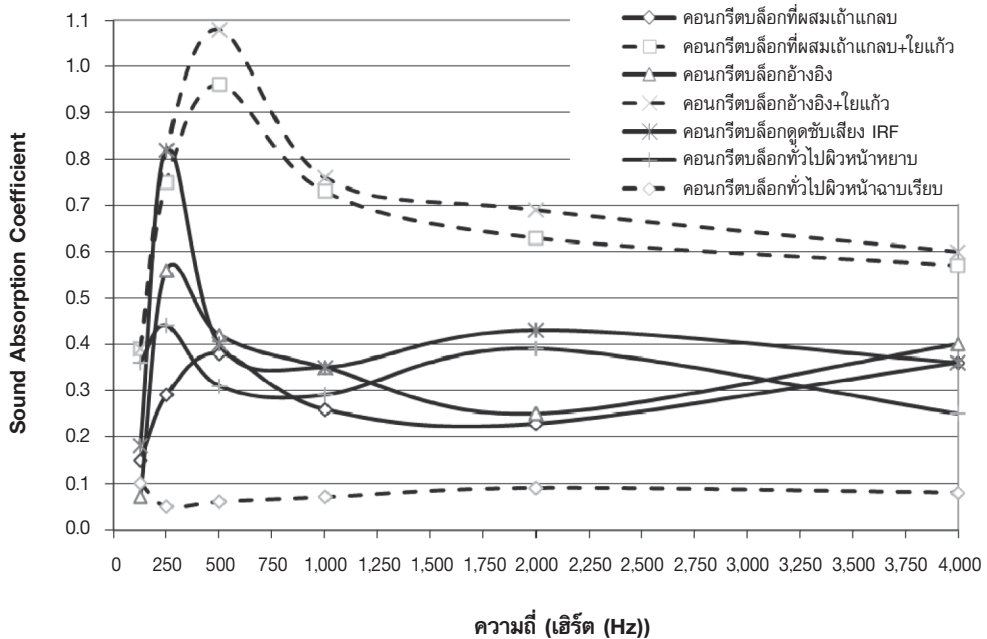
- 1) บล็อกซีเมนต์ทั่วไปผิวหน้าฉาบเรียบมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงต่ำที่สุด ในการเปรียบเทียบ คือ 0.05-0.10 ที่ความถี่ในช่วง 125-4,000 เฮิร์ต (Hz)
- 2) บล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบ และบล็อกซีเมนต์อ้างอิง มีเส้นแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ในช่วงความถี่ต่ำมีค่าสัมประสิทธิ์ดูดซับเสียงที่สูง และมีค่าต่ำลงที่ช่วงความถี่ 2,000 เฮิร์ต (Hz) และสูงขึ้นอีกครั้งที่ช่วงความถี่สูง
- 3) บล็อกซีเมนต์ดูดซับเสียงและบล็อกซีเมนต์ทั่วไปที่ผิวหน้าหยาบมีแนวโน้มของสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ใกล้เคียงกัน ในช่วงความถี่ต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่สูงจนถึงช่วงความถี่ 1,000 เฮิร์ต (Hz) มีค่าลดต่ำลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ความถี่ 2,000 เฮิร์ต (Hz) จนถึงที่ช่วงความถี่สูงจะลดต่ำลง โดยที่ช่วงความถี่ต่ำมีค่า

สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงต่ำกว่าในข้อ 2. และกลับกันใน ช่วงความถี่ 2,000 เฮิร์ต (Hz) มีค่าสูงกว่า

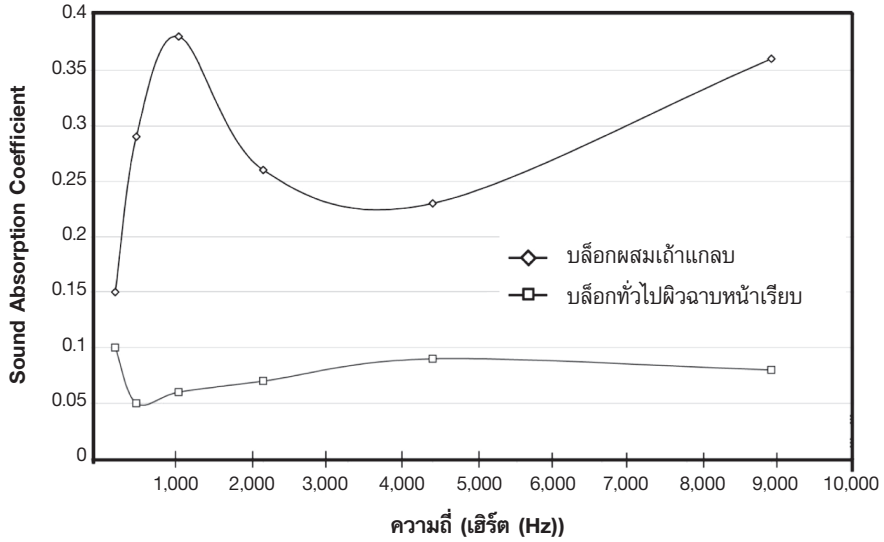
บล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบและบล็อกซีเมนต์ อ่างอิงที่มีการใช้ฉนวนใยแก้วมีค่าสัมประสิทธิ์การ ดูดซับ เสียงสูงกว่าตัวอย่างบล็อกซีเมนต์ประเภทอื่นๆ ที่นำมา เปรียบเทียบ โดยที่แนวโน้มของเส้นกราฟมีลักษณะใกล้เคียงกับบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบและบล็อกซีเมนต์ อ่างอิงที่ไม่ใช้ฉนวนใยแก้ว มีข้อสังเกตคือ บล็อกซีเมนต์ อ่างอิงมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงเกิน 1.0 ที่ความถี่ 500 เฮิร์ต (Hz) แสดงว่า สามารถดูดซับเสียงได้ดีในช่วง ความถี่ดังกล่าว

จากรูปที่ 14 แสดงเปรียบเทียบบล็อกซีเมนต์ที่ ศึกษาวิจัย กับบล็อกซีเมนต์ทั่วไปผิวหน้าฉาบเรียบ พบว่า บล็อกซีเมนต์ที่ศึกษานี้มีสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่สูง กว่าบล็อกซีเมนต์ทั่วไป ในทุกๆ ช่วงความถี่ โดยที่ความถี่ ต่ำและความถี่สูง (500 เฮิร์ต (Hz) และ 4,000 เฮิร์ต (Hz) ตามลำดับ) มีค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวสูงชันอย่างชัดเจน

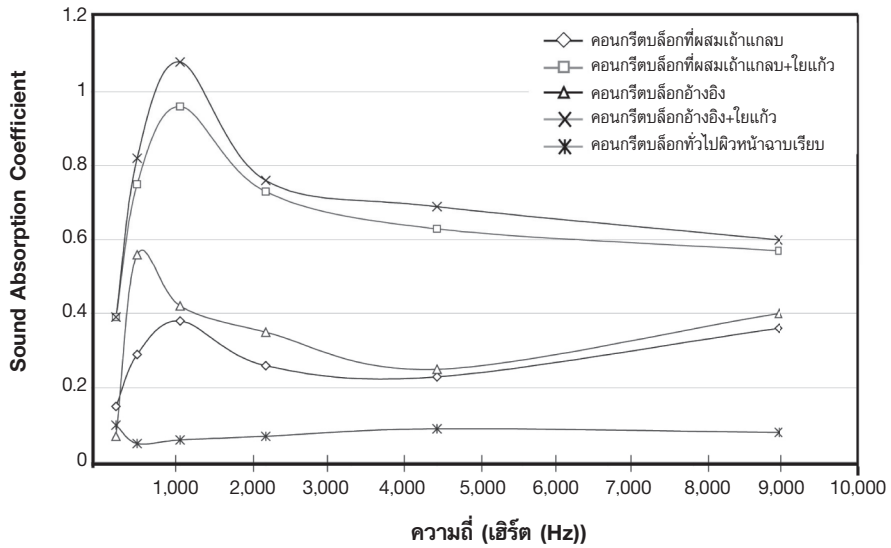
จากรูปที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การ ดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ศึกษากับบล็อกซีเมนต์ที่ ใช้อ่างอิงทั้งที่มีและไม่ใช้ฉนวนใยแก้ว และบล็อกซีเมนต์ ทั่วไป พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น



รูปที่ 13 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 14 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยแก้วกับบล็อกซีเมนต์ทั่วไปผิวหน้าเรียบ



รูปที่ 15 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยแก้วกับบล็อกซีเมนต์ทั่วไปตามท้องตลาด

4. วิจารณ์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์ที่มีแก้วเคลบเป็นส่วนผสม งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สัดส่วนผสมที่มีการแทนที่ของแก้วเคลบในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ในการผลิตต้นแบบบล็อกซีเมนต์ดูดซับเสียง ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงพบว่า บล็อกซีเมนต์ที่ศึกษาวิจัยนี้สามารถดูดซับเสียงได้ดีในช่วงความถี่ต่ำและสูง โดยที่ความถี่ที่เหมาะสมในการดูดซับเสียงพูดจะอยู่ที่ช่วงความถี่ 500-1,000 เฮิร์ต (Hz) ดังนั้น บล็อกซีเมนต์ที่ศึกษาวิจัยนี้ จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในช่วงคลื่นความถี่ดังกล่าว แต่ในช่วงความถี่ปานกลาง (Middle Frequency) ซึ่งมีความถี่ในช่วง 500 ถึง 5,000 Hz นี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับบล็อกซีเมนต์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด จะเห็นได้ว่า บล็อกซีเมนต์ผสมแก้วเคลบไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีแหล่งกำเนิดเสียงในช่วงความถี่ที่ต่ำตั้งแต่ 50-125 เฮิร์ต (Hz) ในขณะที่บล็อกซีเมนต์ผสมแก้วเคลบที่มีการติดตั้งฉนวนใยแก้วไม่เหมาะกับช่วงความถี่ที่ต่ำตั้งแต่ 50-100 เฮิร์ต (Hz)

การทดสอบในห้องปฏิบัติการทางเสียงตามมาตรฐานทำให้ผลการทดสอบไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [21-23] โดยเฉพาะในเรื่องสมรรถนะในการลดระดับความดังเสียงของวัตถุพรุณ ที่ว่าเมื่อใช้วัตถุพรุณเป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุดูดซับเสียงทำให้ความถี่ต่ำและสูง สามารถดูดซับเสียงได้ดี ในขณะที่ในช่วงความถี่กลางไม่สามารถดูดซับเสียงได้ แต่จากการทดสอบพบว่า ในช่วงความถี่กลางบล็อกซีเมนต์ผสมแก้วเคลบและฉนวนใยแก้วมีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงได้ค่อนข้างดี ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ที่บล็อกดังกล่าว โดยเฉพาะแก้วเคลบสามารถดูดซับเสียงในช่วงความถี่ปานกลางได้ดี

ในการออกแบบรูปทรงของบล็อกซีเมนต์ มีส่วนช่วยให้เกิดการดูดซับเสียงได้ดีในช่วงความถี่ต่ำสอดคล้องกับทฤษฎีเรื่อง Helmholtz Resonator [20] โดยรูปทรงของบล็อกซีเมนต์ที่ศึกษาเหมาะสำหรับช่วงความถี่ต่ำ แต่ในช่วงความถี่สูงตั้งแต่ 6,000 เฮิร์ต (Hz) ขึ้นไป มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงขึ้น เป็นเพราะความชื้นที่คงค้างอยู่ในตัวบล็อกซีเมนต์จากการที่ตากไม่แห้งสนิทพอ ดังนั้น ตัวแปรที่ควรคำนึงถึงคือความชื้นคงค้างภายในวัสดุ (residual moisture content)

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบของการใช้แก้วเคลบเป็นส่วนผสมต่อประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงของบล็อกซีเมนต์สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) บล็อกซีเมนต์ที่ผลิตจากมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้วเคลบในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.6 เป็นสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับเสียง

2) การใช้แก้วเคลบแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมในการผลิตบล็อกซีเมนต์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงดีขึ้น อย่างไรก็ตาม บล็อกซีเมนต์ผสมแก้วเคลบที่ได้จากงานวิจัยนี้ ไม่เหมาะกับการใช้งานในช่วงความถี่ที่ต่ำมากตั้งแต่ 50-125 เฮิร์ต (Hz) ในขณะที่บล็อกซีเมนต์ผสมแก้วเคลบที่มีการติดตั้งฉนวนใยแก้วไม่เหมาะกับช่วงความถี่ที่ต่ำตั้งแต่ 50-100 เฮิร์ต (Hz) เช่นกัน

3) การติดตั้งแผ่นฉนวนใยแก้วเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนดูดซับเสียงเพิ่มเติมในบล็อกซีเมนต์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงดีขึ้น และสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงมีค่าสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำจนถึง 4,000 เฮิร์ต (Hz)

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย คุณเชาวรินทร์ ฐานะวัฒนา สำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลการวิจัยในห้องปฏิบัติการ บริษัท เมสัน อะคูสติคส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และห้องทดสอบเสียง และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการวัสดุ

7. เอกสารอ้างอิง

1. Alternative Energy and Efficiency Information Center, Department of Alternative Energy Development and Efficiency, *Ministry of Energy, 2012, Energy in Thailand: Facts & Figures 2012*, pp. 1-12. (In Thai)

2. Jaturapitakkul, C., Wongpa, J. and Sukuntapree, S., 2002, "Development of Rice Husk Ash - Wood in Concrete", *8th National Convention on Civil Engineering*, pp. 163-172. (In Thai)
3. Chatveera, B. and Lertwattanakul, P., 2011, "Durability of Conventional Concretes containing Black Rice Husk Ash", *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, No. 1, pp. 59-66.
4. Chindaprasirt, P. and Rukzon, S., 2008, "Strength, Porosity and Corrosion Resistance of Ternary Blend Portland Cement, Rice Husk Ash and Fly Ash Mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 8, pp. 1601-1606.
5. Chatveera, B. and Wongkamjan, W., 2001, "Mechanical Behavior of Fine RHA Concrete", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 327-342. (In Thai)
6. Chatveera, B. and Kongsub, T., 2002, "Durability of Concrete containing Black RHA from Rice Mill". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 373-389. (In Thai)
7. Chatveera, B., Makul, N. and Rodanan, A., 2006, "Durability of Cement Mortar containing Black Rice Husk Ash under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attack", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 29, No. 1, pp. 55-71. (In Thai)
8. Chatveera, B. and Makul, N., 2004, "Effect of Curing Temperature on Mechanical Properties of Cement Mixed with White Rice Husk Ash Paste", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 49-61. (In Thai)
9. Ganesan, K., Rajagopal, K. and Thangavel, K., 2008, "Rice Husk Ash Blended Cement: Assessment of Optimal Level of Replacement for Strength and Permeability Properties of Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 8, pp. 1675-1683.
10. Coutinho, J. S., 2005, "The Combined Benefits of CPF and RHA in Improving the Durability of Concrete Structures", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1, pp. 51-59.
11. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. and Saeting, T., 2007, "Evaluation of the Sulfate Resistance of Concrete containing Palm Oil Fuel Ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1399-1405.
12. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C., 2007, "Strength and Water Permeability of Concrete containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1492-1499.
13. Sensale, G. R., 2006, "Strength Development of Concrete with Rice-Husk Ash", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 2, pp. 158-160.
14. Nair, D. G., Fraaij, A., Klaassen, A. and Kentgens, A., 2008, "A Structural Investigation Relating to the Pozzolanic Activity of Rice Husk Ashes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 861-869.
15. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., Mahachai, R., 2009, "Effect of Grinding on Chemical and Physical Properties of Rice Husk Ash", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 16 No. 2, pp. 242-247.
16. Rodriguez-Camacho, R.E., 2002, "Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 12, pp. 1851-1858.
17. Chatveera, B., 2002, "Properties of Rice Husk Ash Brick", *Journal of the National Research Council of Thailand*, Vol. 34, No. 4, Bangkok, Thailand, pp. 95-111. (In Thai)
18. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTM C33/C33M-11 Standard Specification for Concrete Aggregate", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02*, Philadelphia, PA, USA.

19. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTM C305 - 12 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.
20. Ministry of Industry of Thailand, 2007, "Standard for Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Units" *TIS 58-2530*. (In Thai)
21. Mitrit N., 2001, *The capability of noise reduction of lightweight concrete*, Master of Science (Environmental Science), Interdisciplinary Graduate Program (Environmental Science), Kasetsart University, Bangkok Thailand. (in Thai)
22. Witit-Anun, N., 1992, *Noise reduction capability of porous materials*, Master of Science (Environmental Science), Interdisciplinary Graduate Program (Environmental Science), Kasetsart University, Bangkok, Thailand. (In Thai)
23. Helmholtz Resonator Diagram- <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html> (Access on February 23rd, 2013)

