



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

วัสดุดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว

Acoustics Absorbing Material from Coir Reinforced Latex

โดย

ดาริกา จาเอะ

อาปีดิน ตะแซสาเมะ

ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณบำรุงการศึกษาประจำปี 2554

มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

บทคัดย่อ

วัสดุดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าว ในปริมาณ 0, 10 และ 20 ส่วนในยางร้อยละ (per hundred rubber : phr) ถูกเตรียมขึ้นเป็นชิ้นทดสอบที่มีความหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร พบว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลงในลักษณะเชิงเส้น เมื่อปริมาณไยมะพร้าวที่ผสมในแผ่นดูดซับเสียงเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับเสียงของวัสดุ และเมื่อนำมาทดสอบสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ความถี่ต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงขึ้นตามความหนาและปริมาณไยมะพร้าว โดยชิ้นทดสอบที่มีความหนา 1 – 3 เซนติเมตร จะสามารถดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ 2,000 Hz และเมื่อความหนาของชิ้นทดสอบมีขนาดเป็น 4 – 5 เซนติเมตร จะดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ 1,000 Hz แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าวมีความสามารถในการดูดซับเสียงความถี่ต่ำได้น้อยและมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนการผสม แต่สามารถดูดซับเสียงได้ดี ที่ความถี่ ตั้งแต่ 1,000 Hz ขึ้นไป โดยที่ความถี่ 1,000 Hz แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าวในปริมาณ 20 phr ความหนา 5 เซนติเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงสุดเท่ากับ 0.75 ที่ความถี่ 2,000 แผ่นดูดซับเสียงที่ผสมไยมะพร้าวปริมาณ 10 phr ความหนา 1 เซนติเมตร และความถี่ 4,000 Hz แผ่นดูดซับเสียงที่ผสมไยมะพร้าวปริมาณ 20 phr ความหนา 1 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงสุดเท่ากับ 0.77 และ 0.75 ตามลำดับ ทั้งนี้การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

Abstract

Acoustics absorbing material from coir reinforced latex which were varied coir contents of 0, 10 and 20 phr. The samples were prepared in thickness of 1, 2, 3, 4 and 5 cm. The relative density decreased in a linear relation when the coir content increases and then tested for acoustics absorption coefficient at different frequencies. It was showed that the absorption coefficient increased with the thickness and the amount of coir. The optimum absorb at 2,000 Hz and 1,000 Hz, when the thickness were 1-3 cm and 4 - 5 cm respectively. The acoustics absorbing material from coir reinforced latex was not appropriate to absorb at low frequency. It was appropriate at high frequency about 1,000 Hz or above. The acoustics absorption coefficient was 0.75 at 5 cm and frequency is about 2000 Hz, when the sample has 20 phr of coir. The absorbing material from coir reinforced latex at 1 cm and frequency were 2,000 and 4,000 Hz gave α about 0.77 and 0.75, respectively, when the sample has 10 and 20 phr of coir.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดี
ยิ่งจากบุคลากรสาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป ในการให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ตลอด
จนถึงบุคคลซึ่งคอยเป็นกำลังใจจนการวิจัยเสร็จสมบูรณ์ และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน
งบประมาณการวิจัยจากงบบำรุงการศึกษาประจำปีการศึกษา 2554 มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

คาริกา จาเอาะ

อาบีดิน คะแซสาเมาะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญ	(4)
สารบัญภาพ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เสี่ยง	4
2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของคลื่นเสียง	5
2.1.2 การดูดซับเสียง	6
2.2 น้ำยางธรรมชาติ	11
2.2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	11
2.2.2 ส่วนประกอบของคอมปาด์น้ำยางธรรมชาติ	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1 วัสดุและสารเคมี	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย	21
3.3 การดำเนินการวิจัย	22
3.3.1 การเตรียมใยมะพร้าว	22
3.3.2 การเตรียมน้ำยางคอมปาด์	22
3.3.3 การเตรียมชิ้นทดสอบ	23
3.3.4 วิธีการทดสอบ	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	25
4.1 แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติที่ผสมไยมะพร้าว	25
4.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของแผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าว	26
4.3 อิทธิพลของปริมาณไยมะพร้าวต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง	27
4.4 อิทธิพลของความหนาต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง	30
บทที่ 5 สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	32
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก แผนภูมิชนิดของเสียงตามความถี่	37

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะคลื่นเสียงแบบต่าง ๆ	4
2.2 กราฟแสดงการได้ยินเสียงในคนที่มีการได้ยินเป็นปกติ	5
2.3 คลื่นเสียงตกกระทบวัตถุดูดซับเสียงที่ปิดทับผนังคอนกรีต	7
2.4 ลักษณะของท่อคลื่นนิ่งและวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ที่เกิดการตกกระทบตั้งฉากกับผิวขึ้นทดสอบ	8
2.5 การกำหนดระยะภายในท่อคลื่นนิ่ง	8
2.6 ลักษณะคลื่นเสียงที่ตกกระทบวัสดุดูดซับเสียง	9
2.7 ลักษณะอนุภาคทางธรรมชาติ	12
3.1 โยมะพร้าวที่ผ่านตะแกรงร่อนแล้ว	22
3.2 ชุดทดสอบสมบัติการดูดซับเสียง	24
4.1 แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมโยมะพร้าว	25
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับปริมาณโยมะพร้าว	26
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่น ดูดซับเสียงที่ผสมโยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 1 เซนติเมตร	27
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่น ดูดซับเสียงที่ผสมโยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 2 เซนติเมตร	28
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูด ซับเสียงที่ผสมโยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 3 เซนติเมตร	28
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่น ดูดซับเสียงที่ผสมโยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 4 เซนติเมตร	29
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูด ซับเสียงที่ผสมโยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 5 เซนติเมตร	29
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ ของแผ่นดูดซับเสียงผสมโยมะพร้าว 0 phr ที่ความหนาต่างๆ	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงผสมใยมะพร้าว 10 phr ที่ความหนาต่างๆ	31
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงผสมใยมะพร้าว 20 phr ที่ความหนาต่างๆ	31

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด	11
2.2 ส่วนประกอบของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ	12
3.1 สูตรการผลิตน้ำยางคอมปาวด์	23

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ยางธรรมชาติถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญในเกือบทั่วทุกภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะในท้องถิ่นของภาคใต้ การนำวัตถุดิบยางธรรมชาติมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มีข้อดีกว่าวัสดุหลายชนิด เนื่องจากเป็นสารธรรมชาติ ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย มีน้ำหนักเบา เก็บรักษาได้ง่าย ตกไม่แตก เมื่อแข็งตัวจะคงรูปอยู่ได้ ดังนั้น จึงมีการนำยางธรรมชาติมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายชนิด โดยผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติที่ต้องการให้มีโครงสร้างแข็งแรงจำเป็นต้องเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุอื่น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำน้ำยางธรรมชาติมาผสมใยมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ โดยนำมาสังเคราะห์ร่วมกับน้ำยางธรรมชาติ เป็นวัสดุประกอบ เพื่อนำไปประยุกต์เป็นวัสดุดูดซับเสียง การสังเคราะห์วัสดุประกอบนี้สามารถทำได้ง่าย สะดวก โดยทั่วไปวัสดุดูดซับเสียงแบบรูพรุน เป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะสามารถดูดซับเสียงได้ดี ในช่วงความถี่กว้าง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์วัสดุดูดซับเสียงจากเศษวัสดุเหลือใช้ในประเทศไทยยังมีไม่มากนัก จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านเสียงได้ เป็นการเสริมความแข็งแรงของวัสดุและลดต้นทุนในการใช้วัสดุ ตลอดจนเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยเลือกวัสดุจากยางธรรมชาติมาผสมเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมให้ได้ลักษณะตามต้องการ นำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นดูดซับเสียง ที่สามารถใช้งานแทนวัสดุที่ควบคุมและลดระดับเสียงในท้องตลาด เช่น พลาสติกและใยแก้วที่มีราคาสูง

การดูดซับเสียงเป็นสมบัติเฉพาะขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุ และขึ้นกับสัดส่วนของการผสม โดยมีการเปลี่ยนรูปพลังงานเสียงภายในตัวโครงสร้างซึ่งเรียกว่า การดูดซับเสียง และเกิดขึ้นเพราะเสียงถูกเปลี่ยนเป็นปริมาณความร้อนภายในเนื้อวัสดุ สมบัติการดูดซับเสียง คือ อัตราส่วนของปริมาณพลังงานเสียงดูดซับภายในและส่งผ่านวัสดุ ต่อปริมาณพลังงานเสียงที่ตกกระทบบนวัสดุนั้น ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 (มิ่ง โลกิจแสงทอง และพงษ์ศักดิ์ คำมูล, 2549) การปรับการดูดซับเสียงทำได้โดยใช้วัสดุที่โมเลกุลสามารถยับยั้งได้ง่ายขณะเกิดการสะท้อนเสียง เพื่อให้การดูดซับพลังงานเสียงที่มาสะท้อน ทำให้เสียงสะท้อนมีพลังงานลดลง

การใช้แผ่นดูดซับเสียงเป็นวิธีการแก้ปัญหาเสียงรบกวนได้วิธีหนึ่ง ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการดูดซับและลดพลังงานเสียง สมบัติทางกายภาพของยางมีข้อได้เปรียบกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น ใยแก้ว (Fiber glass), โยหิน

(Rock wool fiber) เป็นต้น (Swift, 1998) วัสดุที่เลือกใช้เป็นผนังกันเสียงหรือแผ่นดูดซับเสียงนั้น จะต้องมีความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ โดยเฉพาะทนต่อความชื้นจากฝน ซึ่งการเลือกใช้ยางธรรมชาติช่วยลดปัญหาการดูดซับน้ำและฝุ่นไปได้ อีกทั้งยังสามารถนำมาผสมสีได้ตามความต้องการเพื่อความสวยงามและทำความสะอาดได้ง่าย

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาสมบัติการดูดซับเสียงของแผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว เพื่อหาอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมและความสามารถในการใช้งานเป็นแผ่นดูดซับเสียงในช่วงความถี่ที่ต้องการได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อหาอัตราส่วนการผสมน้ำยางธรรมชาติกับใยมะพร้าวที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นแผ่นดูดซับเสียง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติการดูดซับเสียงและหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (Acoustic Absorption Coefficient : α) ของแผ่นดูดซับเสียง จากน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความหนาแน่นสัมพัทธ์ อิทธิพลของความหนาและปริมาณใยมะพร้าวของแผ่นดูดซับเสียงที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับเสียง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 หาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าวในปริมาณ 0, 10 และ 20 ส่วนในยางร้อยส่วน (part per hundred rubber : phr)
- 1.3.2 ทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงของแผ่นดูดซับเสียงที่ความหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติการดูดซับเสียงโดยการวัดค่าความดันเสียงสูงสุดและค่าความดันเสียงต่ำสุดค่าแรกเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้แนวทางในการผลิตแผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว
- 1.4.2 ทราบสมบัติการดูดซับเสียงและค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว โดยใช้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง
- 1.4.3 ได้แผ่นดูดซับเสียงที่มีสมบัติในการดูดซับเสียงในช่วงความถี่ต่างๆ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับเสียงของน้ำยางธรรมชาติผสมไขมะพร้าว ซึ่งในบทที่ 2 นี้ประกอบด้วย ทฤษฎีของเสียง การดูดซับเสียง น้ำยางธรรมชาติ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

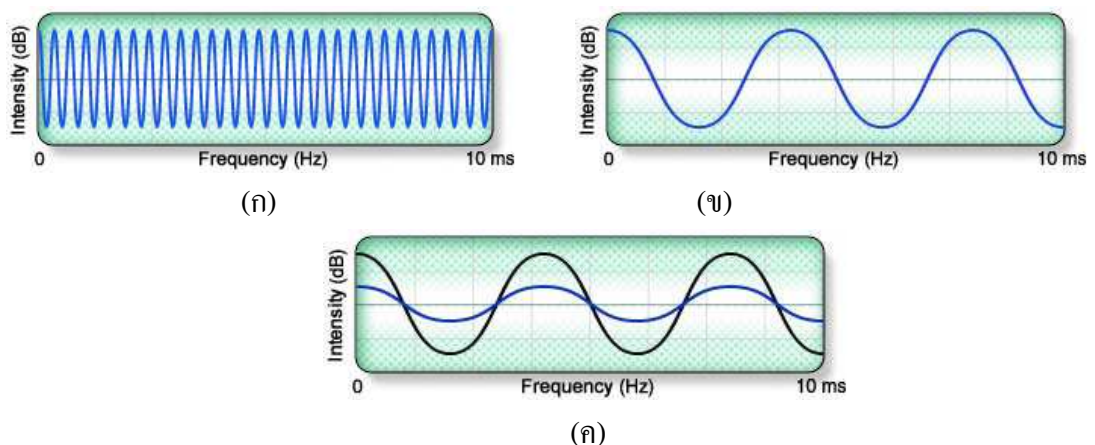
2.1 เสียง

เสียง คือ แล่บความถี่ของคลื่นกลที่เกิดจากการสั่นของตัวกลางที่มีการตอบสนองของประสาทหูแล้วทำให้เกิดการได้ยินขึ้น การได้ยินเสียงนั้นจะขึ้นกับตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบของเสียง 2 ประการ คือ

1) ความถี่เสียง (Frequency) คือ จำนวนคลื่นเสียงต่อหนึ่งวินาที มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz หรือ Hz) ความถี่ของเสียงที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดระดับสูงต่ำของเสียงที่แตกต่างกันโดยคาบเวลาของคลื่น (Period หรือ T) จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความถี่ (f) ดังนี้

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

2) ระดับความดันเสียง มีหน่วยเป็น เดซิเบล (Decibel หรือ dB) ระดับความดันของเสียงที่ต่างกันจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดังของเสียง

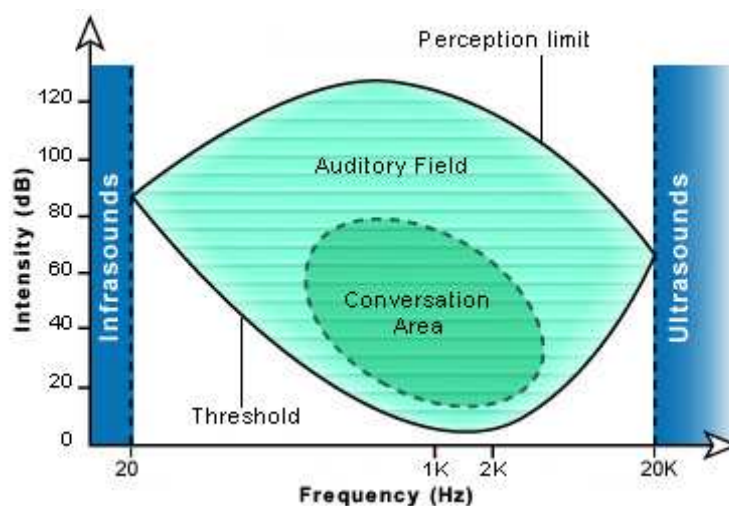


ภาพที่ 2.1 ลักษณะคลื่นเสียงแบบต่าง ๆ (ก) คลื่นเสียงความถี่สูง (High pitch)

(ข) คลื่นเสียงความถี่ต่ำ (Low pitch) (ค) คลื่นเสียงความถี่ต่ำในความดันเสียงต่างๆ

(www.iurc.montp.inserm.fr/cric51/audition/English/sound/sound.htm [January 3,2009])

ประสาทหูของมนุษย์สามารถแยกแยะและจดจำเสียงในช่วงความถี่ระหว่าง 20 - 20,000 เฮิร์ตซ์ เสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิร์ตซ์ เรียกว่า อินฟราซาวด์ (Infrasound) และเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 เฮิร์ตซ์ เรียกว่า อัลตราซาวด์ (Ultrasound)



ภาพที่ 2.2 กราฟแสดงการได้ยินเสียงในคนที่มีการได้ยินเป็นปกติ

(www.iurc.montp.inserm.fr/cric51/audition/English/sound/sound.htm [January 3,2009])

จากภาพที่ 2.2 ความสามารถในการได้ยินเสียงของคนถูกจำกัดโดยขีดจำกัดต่ำสุดของการได้ยิน (Threshold curve) และขีดจำกัดสูงสุดของการได้ยิน (Perception limit) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันในแต่ละความถี่ระหว่าง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 20,000 เฮิร์ตซ์ ความถี่ต่ำสุดที่ได้ยินเสียงอยู่ที่ประมาณ 1-2 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถได้ยินเสียงที่มีความเข้มต่ำสุดใกล้เคียงกับ 0 เดซิเบล และความเข้มเสียงสูงสุดที่สามารถได้ยินคือ 130 เดซิเบล ส่วนบริเวณที่เป็นเสียงของการสนทนา (Conversation area) จะแสดงขอบเขตเสียงปกติที่คนทั่วไปรับรู้ได้ ในกรณีที่มีความบกพร่องในการได้ยิน พื้นที่บริเวณที่เป็นเสียงของการสนทนาจะแตกต่างไปจากภาพที่ 2.2 จึงอาจมีผลต่อการสื่อสารได้

2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของคลื่นเสียง

คลื่นเสียงส่วนใหญ่ที่เราได้ยินนั้นมักจะเป็นเสียงซับซ้อนที่เกิดจากการรวมกันของคลื่นเสียงหลายความถี่และหลายระดับความดัน ซึ่งสามารถอธิบายเป็นสมการคณิตศาสตร์ให้เข้าใจได้ง่ายในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์ เช่น เมื่อเคาะส้อมเสียงจะเกิดการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของโมเลกุลอากาศอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศโดยรอบ มีลักษณะเป็นส่วนอัดส่วนขยาย เรียกว่า ความดันเสียง เคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของตัวกลางไปยังจุดรับเสียง พารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ที่สำคัญที่จะอธิบายธรรมชาติของการสั่นของโมเลกุลอากาศ การเปลี่ยนแปลงความดัน

อากาศหรือการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลางคือ ความถี่เสียง และความยาวคลื่นเสียง ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราเร็วเสียงในอากาศ ทิศทางการแผ่กระจายของเสียง และเวลาที่เสียงเดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังผู้รับเสียง แต่ในการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นเสียง เรานิยามวัดการเปลี่ยนแปลงของความดันอากาศ ซึ่งสะดวกกว่าวัดการกระจัดของอนุภาคอากาศ เมื่อมีคลื่นเสียงเดินทางผ่าน สำหรับคลื่นเสียงที่ 1,000 เฮิรตซ์ ซึ่งทำให้เกิดเสียงดังที่สุดที่หูคนเราจะรับฟังได้ โดยไม่เป็นอันตรายต่อเยื่อแก้วหูนั้น อนุภาคของอากาศมีการกระจัดเพียง 1.1×10^{-5} เมตรเท่านั้น การวัดการเปลี่ยนแปลงการกระจัดของอนุภาคอากาศเมื่อมีคลื่นเสียงเดินทางผ่านนั้นจึงทำได้ยากมาก ดังนั้น สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับคลื่นเสียง จึงนิยมเขียนในรูปของการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศ

คลื่นของความดัน (Pressure wave) ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟังก์ชันของโคไซน์ ดังนั้น สามารถเขียนสมการ ความดันเสียง ได้เป็น

$$P = P_0 \cos(\omega t - kx) \quad (2)$$

- เมื่อ P คือ ความดันของเสียง มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)
 P_0 คือ แอมพลิจูดของความดัน มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)
 ω คือ อัตราเร็วเชิงมุม
 t คือ เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่
 k คือ เลขคลื่น
 x คือ การกระจัดของคลื่น

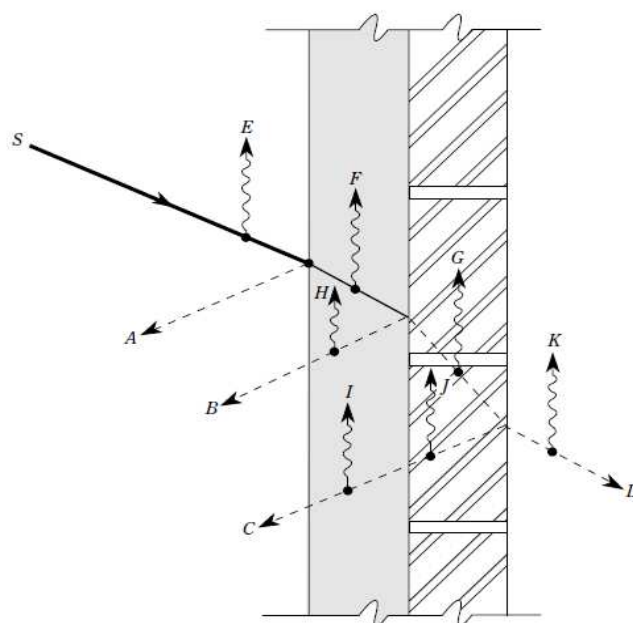
2.1.2 การดูดซับเสียง

ตามกฎการอนุรักษ์พลังงานนั้น พลังงานไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้ แต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ เสียงเป็นพลังงานจากการสั่นของอนุภาคอากาศและสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนหรือพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ

2.1.2.1 การเปลี่ยนรูปของพลังงาน

เมื่อคลื่นเสียง S เดินทางจากอากาศไปตกกระทบผนังคอนกรีตที่ปิดทับด้วยวัสดุดูดซับเสียง ดังภาพ 2.3 จะเกิดการสะท้อนครั้งแรกที่ผิวของวัสดุที่ปิดทับ โดยเสียงส่วนหนึ่ง (A) สะท้อนกลับมาในตัวกลางเดิม และเกิดพลังงานความร้อน (E) ในอากาศจำนวนมากที่ความถี่สูงกว่าความถี่ที่มนุษย์ได้ยิน เสียงบางส่วนเดินทางผ่านวัสดุดูดซับเสียงซึ่งจะเกิดการหักเหลงล่าง เพราะวัสดุดูดซับเสียงมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น (F) เกิดจากแรง

ด้านการเสียดสีของอนุภาคอากาศที่สั่นภายในเนื้อวัสดุดูดซับเสียง เมื่อคลื่นเสียงส่วนที่เหลือกระทบผนังคอนกรีต เสียงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับมาในตัวกลางเดิม (B) คลื่นเสียงส่วนที่เหลือจะเกิดการหักเหลงล่างภายในผนังคอนกรีตซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าแผ่นดูดซับเสียง และเกิดพลังงานความร้อนภายในผนังคอนกรีต (G) ในการตกกระทบครั้งสุดท้ายที่รอยต่อระหว่างผนังคอนกรีตกับอากาศ เกิดเสียงสะท้อนกลับ (C) และบางส่วนหักเหไปยังตัวกลางอากาศ (D) โดยเกิดพลังงานความร้อนขึ้น (I, J และ K) ในทั้งสามตัวกลาง ดังภาพที่ 2.3 คลื่นเสียง S ในรูปเดินทางผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง ทุกครั้งที่เกิดการหักเหและเดินทางผ่านอากาศหรือวัสดุดูดซับเสียงนั้น พลังงานเสียงบางส่วนจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน



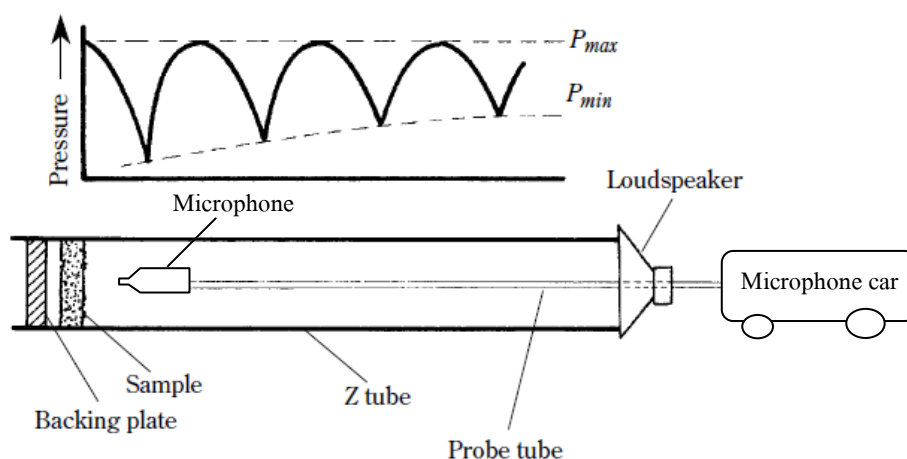
ภาพที่ 2.3 คลื่นเสียงตกกระทบวัสดุดูดซับเสียงที่ปิดทับผนังคอนกรีต (Everest, 2006)

2.1.2.2 วิธีการวัดการดูดซับเสียงโดยใช้ท่อคลื่นนิ่ง (Impedance Tube Method)

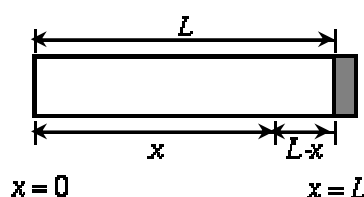
ท่อคลื่นนิ่งประยุกต์ใช้สำหรับวัดสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่ายและวัดได้อย่างแม่นยำ ข้อดีของเครื่องมือนี้คือมีขนาดเล็ก สร้างง่ายและขึ้นทดสอบที่ใช้มีขนาดเล็ก ลักษณะของเครื่องมือและวิธีการวัดแสดงดังภาพที่ 2.4

พื้นที่ภาคตัดขวางของท่อเป็นวงกลมโดยมีผนังแข็ง ขึ้นทดสอบต้องมีขนาดพอดีกับท่อ ถ้าในการใช้งานจริงวัสดุที่ทดสอบนั้นติดตั้งกับพื้นผิวแข็ง ในขณะทดสอบก็จะวางขึ้นทดสอบให้ติดกับผนังแข็ง (Backing plate) แต่ถ้าการใช้งานจริงของวัสดุนั้นต้องการพื้นที่ว่างด้านหลัง ก็จะต้องติดตั้งให้มีระยะห่างจากผนังแข็งในการทดสอบ ตามความเหมาะสม

เสียงถูกส่งจากลำโพงซึ่งอยู่ที่ปลายท่อด้านหนึ่ง ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะวางขึ้นทดสอบไว้ สัญญาณของคลื่นนิ่งภายในท่อสามารถตรวจวัดได้จาก Microphone probe ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของท่อกคลื่นนิ่งและวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ที่เกิดการตกกระทบตั้งฉากกับผิวขึ้นทดสอบ (Everest, 2006)



ภาพที่ 2.5 การกำหนดระยะภายในท่อกคลื่นนิ่ง (Russell, 2006)

กำหนดให้ S คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของท่อ

L คือ ความยาวท่อ

วัดระยะจาก $x = 0$ ถึง $x = L$ ความดันของคลื่นเสียงภายในท่อเป็นดังสมการ

$$P = Ae^{i[\omega t + k(L-x)]} + Be^{i[\omega t - k(L-x)]} \quad (3)$$

เมื่อ A และ B พิจารณาจากเงื่อนไขที่ $x = 0$ และ $x = L$ ตามลำดับ

ใช้ Euler's Equation
$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (4)$$

ความเร็วรวมของอนุภาค (Particle velocity) ภายในท่อจะเขียนได้เป็น

$$\bar{u} = \frac{1}{\rho c} (Ae^{i[\omega t + k(L-x)]} - Be^{i[\omega t - k(L-x)]}) \quad (5)$$

โดย $c = -\frac{1}{k\omega}$

อิมพีแดนซ์ของระนาบคลื่นภายในท่อเป็นดังสมการ

$$Z_A(x) = \frac{P}{\bar{u}S} = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{Ae^{ik(L-x)} + Be^{-ik(L-x)}}{Ae^{ik(L-x)} - Be^{-ik(L-x)}} \right] \quad (6)$$

ที่ตำแหน่ง $x = L$ สามารถเขียนสมการในเทอมของอิมพีแดนซ์ได้เป็น

$$Z_L(x) = S^2 Z_A = \rho c S \left[\frac{A+B}{A-B} \right] = \rho c S \left[\frac{1 + \frac{B}{A}}{1 - \frac{B}{A}} \right] \quad (7)$$

ให้ $A = A$ $B = Be^{i\theta}$ (8)

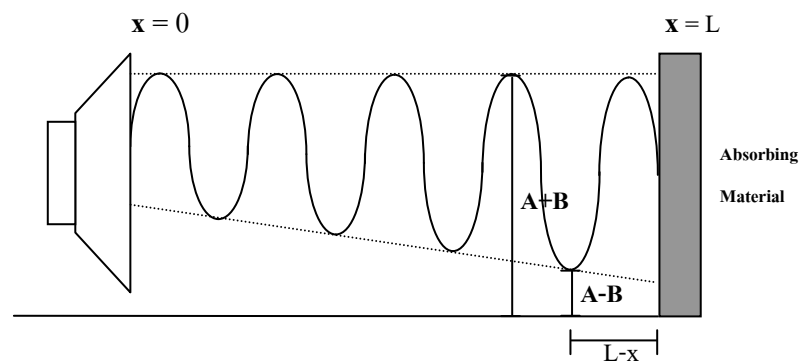
เมื่อ A และ B คือ แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบและแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อน ตามลำดับ

จะได้
$$Z_L(x) = \rho c S \left[\frac{1 + \frac{B}{A} e^{i\theta}}{1 - \frac{B}{A} e^{i\theta}} \right] \quad (9)$$

แทนค่าสมการ (9) ในสมการ (6) และ แอมพลิจูดของความดัน $P = |p|$ เขียนสมการได้เป็น

$$P = |p| = \sqrt{(A+B)^2 \cos^2 \left[k(L-x) - \frac{\theta}{2} \right] + (A-B)^2 \sin^2 \left[k(L-x) - \frac{\theta}{2} \right]} \quad (10)$$

แอมพลิจูดของความดัน ในสมการ (10) แสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะคลื่นเสียงที่ตกกระทบวัสดุดูดซับเสียง

เมื่อปลายท่อข้างหนึ่งติดตั้งวัสดุดูดซับเสียง พลังงานเสียงที่ตกกระทบบางส่วนจะถูกดูดซับโดยวัสดุนั้น ดังนั้นแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนจะมีขนาดไม่เท่ากับขนาดของแอมพลิจูดเดิม ในทำนองเดียวกัน วัสดุดูดซับเสียงนั้นจะทำให้เฟสของคลื่นสะท้อนเลื่อนไปด้วย แอมพลิจูดที่ความดันสูงสุดหรือตำแหน่งปฏิบัพของความดัน มีค่าเป็น $A+B$ และแอมพลิจูดที่ความดันต่ำสุดหรือตำแหน่งบัพของความดัน มีค่าเป็น $A-B$ การวัดค่า A และ B โดยตรงนั้นทำได้ยาก แต่เราสามารถวัดค่า $A+B$ และ $A-B$ ได้จากการใช้ท่อคลื่นนิ่ง ดังนี้

นิยามอัตราส่วนความดันสูงสุดต่อความดันต่ำสุดเป็น Standing Wave Ratio ; SWR

$$SWR = \frac{A+B}{A-B} \quad (11)$$

ซึ่งสามารถจัดสมการอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อนเสียง (Sound Reflection Coefficient ; R) ได้ดังนี้

$$R = \frac{B}{A} = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \quad (12)$$

ความดันต่ำสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\cos\left[k(L-x) - \frac{\theta}{2}\right] = 0 \quad \text{และ} \quad \sin\left[k(L-x) - \frac{\theta}{2}\right] = 1 \quad (13)$$

เมื่อ $k(L-x) - \frac{\theta}{2} = \left(n - \frac{1}{2}\right)\pi \quad (14)$

หรือ $\theta = 2k(L-x) - (2n-1)\pi \quad (15)$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงในการทดสอบเป็นดังสมการ

$$\alpha = 1 - R^2 = 1 - \frac{(SWR - 1)^2}{(SWR + 1)^2} \quad (16)$$

2.2 น้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางสดที่กรีดยจากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 0.975 - 0.98 กรัม/มิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรด - ด่าง 6.5 - 7.0 และขนาดอนุภาคของเม็ดยางอยู่ระหว่าง 400 - 25,000 อังสตรอม โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเกิน 4,000 อังสตรอม และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 10,000 อังสตรอม น้ำยางอยู่ในสถานะแขวนลอยและมีประจุเป็นลบ จึงผลักกันตลอดเวลาทำให้คงสภาพอยู่ได้จนกว่าสถานะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ ที่มารบกวน เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด ซึ่งทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนของน้ำยาง น้ำยางสดประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด

ส่วนประกอบ	% โดยน้ำหนัก
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	27 -48
เนื้อยางแห้ง	25 - 45
สารพวกโปรตีน	1 – 1.5
สารพวกเรซิน	1 – 2.5
จีเล้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

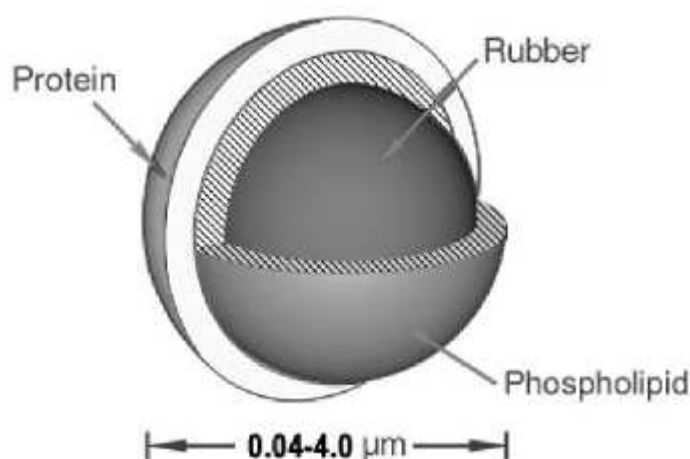
(Blackley, 1997)

2.2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางสดหลังจากปั่นแยก จะประกอบด้วย

2.2.1.1 ส่วนของเนื้อยาง ประกอบด้วย

1) อนุภาคน้ำยาง ถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมันและโปรตีน โดยโปรตีนนี้จะอยู่ชั้นนอก และอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.5 % แสดงลักษณะอนุภาคน้ำยางธรรมชาติได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติ (Blackley, 1997)

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ (Blackley, 1997)

ส่วนประกอบ	% โดยน้ำหนัก
ยางไฮโดรคาร์บอน	86
น้ำ (กระจายอยู่ในไฮโดรคาร์บอน)	10
สารพวกไขมัน	3
สารพวกโปรตีน	1

โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยในน้ำ ประกอบด้วย สารพวกไฮโดรคาร์บอน มีชื่อโครงสร้างทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 Polyisoprene) มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.92 กรัม/มิลลิลิตร ลักษณะอนุภาคยางเป็นรูปค่อนข้างกลม มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมาก คืออยู่ระหว่าง 0.02 ไมครอน จนถึง 2 ไมครอน (200 - 20,000 อังสตรอม) อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีขนาดเกิน 0.4 ไมครอน (4,000 อังสตรอม) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1.2 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูง พบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขึ้นมาอยู่ด้านบนซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นน้ำยางข้น ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับหางน้ำยาง สามารถแยกออกโดยการทำให้จับตัวเป็นก้อนด้วยกรด

2) โปรตีน ส่วนของสารพวกโปรตีนที่ห่อหุ้มตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยาง มีอยู่ประมาณ 25 % ของโปรตีนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำยาง อีก 50 % อยู่ในชั้นน้ำ และอีก 25% จะปะปนในส่วนของสารลูทอยด์ โปรตีนส่วนที่อยู่ในน้ำยางส่วนใหญ่จะเป็นชนิดแอลฟาไกลูบูลินและฮีวิน (α - Globulin and hevein) ส่วนนอกสุดของอนุภาคยาง มีโปรตีนห่อหุ้มอยู่ประมาณ 1 % ของอนุภาคยาง โปรตีนบนผิวอนุภาคยางนี้ มีส่วนประกอบของกำมะถัน (Cystine disulphide linkage)

อยู่ประมาณ 5 % ดังนั้นขณะที่น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพ จะเกิดการบูดเน่า โดยโปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทน (Mercaptan) ทำให้มีกลิ่นเหม็น

3) ไขมัน อยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิด ชนิดแอลฟาเลซิทิน (α -Lecithin) ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง น้ำยางในสถานะที่เป็นคาง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ (ประมาณ 0.6 % ขึ้นไป) ฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์ เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (Long chain fatty acid) ซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ ทำให้น้ำยางมีความเสถียรยิ่งขึ้น แต่ในกรณีที่มีแอมโมเนียปริมาณน้อย (ประมาณ 0.2 % ในน้ำยาง) การไฮโดรไลซ์จะเกิดขึ้นน้อย การเพิ่มความเสถียรของน้ำยางจึงจำเป็นต้องเติมสบู่หรือ สารอื่นที่ช่วยในการเก็บรักษาน้ำยางลงไป

2.2.1.2 ส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง ประกอบด้วย

1) ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม (Serum) ของน้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัม/มิลลิลิตร ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ

ก. คาร์โบไฮเดรต เป็นสารพวกแป้งและน้ำตาลมีอยู่ประมาณ 1 % น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิดคิวบาซินอล มีน้ำตาลชนิด กลูโคส ซูโครส ฟรุกโตส ปริมาณเล็กน้อย

ข. โปรตีนและกรดอะมิโน เป็นส่วนที่อยู่ในเซรัมของน้ำยาง มีค่า Isoelectric point หลายค่า โปรตีนที่มีค่า Isoelectric point สูงสามารถสลายตัวให้ประจุบวกได้ เป็นสาเหตุให้น้ำยางสูญเสียสภาพ โปรตีนที่พบมากในน้ำยางสด ส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประเภท อัลฟาไกลูบูลิน ซึ่งมีสมบัติของสารตรงผิวของโมเลกุลมีความว่องไว (Surface active) ดังนั้นโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างรอยเชื่อมต่อของน้ำ-อากาศ และน้ำมัน-น้ำ

2) ส่วนของลูทอยด์และสารอื่นๆ

ก. ลูทอยด์ เป็นอนุภาคก้อนขำกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-30 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อบางๆ ภายในเนื้อเยื่อจะมีทั้งสารละลายและสารแขวนลอย มีค่า pH เท่ากับ 5.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน โดยมีโปรตีนละลายน้ำอยู่ประมาณ 3 % และมีโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 2 % นอกจากนี้ยังมีสารพวกฟอสโฟไลปิดแขวนลอยอยู่ประมาณ 0.5 % และมีสารโพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีเหลือง หรือสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ลูทอยด์ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียว สามารถเกิดการออสโมซิส (Osmosis) ได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางสดจะทำให้ลูทอยด์บวมและแตกง่าย ขณะที่ลูทอยด์เกิดการพองตัวมีผลทำให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น

ข. อนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey-Wyssling) เป็นสารที่ไม่ใช่ยางมีอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้น มีปริมาณไม่มากนัก ประกอบด้วยสารเมดิคัลพอลิไดออกไซด์ ซึ่งทำให้ยางมีสีเหลืองเข้ม สามารถรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรัม (Blackley, 1997)

2.2.2 ส่วนประกอบของคอมเพาต์น้ำยางธรรมชาติ

หลักการผสมสารเคมีอื่น ๆ ลงในน้ำยางมีลักษณะคล้ายกับการผสมในยางแห้ง แต่จะมีข้อแตกต่างอยู่บ้างเล็กน้อย คือ สารต่างๆ ที่จะผสมลงในน้ำยางต้องผ่านการเตรียมให้เป็นของเหลวหรือให้อยู่ในสถานะเปื่อยก่อน ทั้งนี้เพราะการใช้สารต่างๆ ในสถานะแห้งเติมลงในน้ำยาง จะทำให้เกิดปัญหาการจับตัวของน้ำยางได้ ยกเว้นได้มีการปรับน้ำยางให้สามารถรับสารในสถานะแห้งๆ ได้ สารเคมีที่ใช้ในการผสมกับน้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยสารต่อไปนี้ (วราภรณ์ ขจรไชยกุล, 2525)

2.2.2.1 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) การวัลคาไนซ์คือกระบวนการเปลี่ยนยางที่อยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปร่างได้ ในลักษณะยืดหยุ่น หรือแข็งกระด้าง โดยการใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุล เรียกว่า Crosslink ตรงจุดที่วงไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์ที่ใช้สำหรับยางธรรมชาติคือ กำมะถัน จะต้องใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูง สำหรับยางธรรมชาติ และยางเอสปีอาร์ กำมะถันจะละลายได้ค่อนข้างดีที่อุณหภูมิห้อง (Weng, et al., 2000)

2.2.2.2 สารตัวเร่ง (Accelerator) เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยงเร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันในปริมาณที่น้อยลง ได้แก่ สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดช้า ปานกลาง หรือเร็ว เช่น กัวนิดีน (Guanidine) ไธอาโซล (Thiazole) ซัลฟีนามิด (Sulphenamide) ไธยูเรม (Thauram)

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 กลุ่ม ดังนี้

1) กลุ่มไดไธโอคาร์บารเมต (Dithiocarbamate) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อย คือกลุ่มเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) กลุ่มเกลือโซเดียม (Sodium salt) และกลุ่มเกลือซิงค์ (Zinc salt) สารตัวเร่งกลุ่มนี้จัดอยู่ในพวกสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์สูง จะเร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วมาก โดยกลุ่มเกลือซิงค์มีการใช้งานในทางการค้ามากที่สุด และสารตัวเร่งกลุ่มนี้มักใช้เป็นสารตัวเร่งสำหรับน้ำยาง อุณหภูมิที่ใช้งานในการวัลคาไนซ์ไม่เกิน 125° ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ได้แก่ ZDPC, ZDEC, ZDBC, ZDMC เป็นต้น

2) กลุ่มแซนทาเท (Zanthate) เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ยางได้เร็วมาก (เร็วกว่ากลุ่มเกลือแอมโมเนียมของไดไธโอคาร์บารเมต) ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยางไม่นิยมใช้กับยาง

แห้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ประมาณ $80-110^{\circ}$ เพื่อให้ได้การวัลคาไนซ์แบบพลาโต (Plateau curve) ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ได้แก่ SIX, ZIX, ZBX เป็นต้น

3) กลุ่มซัลฟิनाไมด์ (Sulphenamide) เป็นสารตัวเร่งที่ delay action หรือให้เวลา สก๊อชนานกว่าโซะโซล เพราะเมื่อได้รับความร้อน ซัลฟิनाไมด์จะแตกตัวให้ MBT และเบส ออกมา โดยที่ MBT จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ และเบสเป็นตัวกระตุ้นให้สารตัวเร่งทำงานเร็วขึ้น มอดูลัสสูงขึ้น สารกลุ่มนี้ได้แก่ CBS, TBBS, DCBS, Vulcacit AZ เป็นต้น การใช้ซัลฟิनाไมด์ ร่วมกับไดโซโอคาร์บาร์เมทหรือไธยูเรม จะทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น และจำเป็นต้องมีซิงค์ออกไซด์อย่างน้อย 3.0 phr และกรดไขมันร่วมด้วยเพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่มีซัลฟิनाไมด์เป็น สารตัวเร่งที่ทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงมากและมีสมบัติเชิงกลที่ดี รวมทั้งการวัลคาไนซ์แบบพลาโต แต่ซัลฟิनाไมด์จะเกิดการแตกสลายได้ง่าย เมื่ออยู่ใกล้ความชื้นหรือไอน้ำ ซึ่งจะทําให้ยางเกิดการ สก๊อชได้ง่ายขึ้นและวัลคาไนซ์ได้ช้าลง

4) กลุ่มโซะโซล (Thiazole) เป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์ปาน กลาง ถ้าใช้โซะโซลเป็นสารตัวเร่งเพียงอย่างเดียวที่ได้จะมีความปลอดภัยในการผลิตมากกว่า ใช้สารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงอื่นๆ ตัวอย่างสารกลุ่มโซะโซล ได้แก่ MBTS, MBT, ZMBT เป็นต้น โดย MBTS และ MBT ช่วยใหยางมีลักษณะบดผสมด้วย ส่วน ZMBT มีความเร็วในการวัลคาไนซ์ มากกว่า MBTS จึงนิยมใช้กับน้ำยาง

5) กลุ่มกัวนิดีน (Guanidine) เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ได้ช้า มักใช้เป็นสารตัวเร่ง เสริม เหมาะที่จะใช้กับยางหนา เพราะต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ที่นาน สารกลุ่มนี้เช่น DPG, DOTG , ออกตะโททิลไบกัวนิดีน (o-totyl biguanidine) เป็นต้น

6) กลุ่มไธยูเรม (Thiuram) จัดเป็นกลุ่มของสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงเป็นพิเศษ ยางจะสก๊อชและวัลคาไนซ์ช้ากว่ากลุ่มไดโซโอคาร์บาร์เมท สารกลุ่มนี้สามารถใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นสารตัวเร่งด้วยตัวเองตามคำพ้องโดยไม่ต้องมีกำมะถันก็สามารถวัลคาไนซ์ยางได้เช่นกันที่ เรียกว่า Thiuram vulcanization แต่อย่างที่ไ้จะมีค่ามอดูลัสต่ำ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ประมาณ $125-135^{\circ}$

2.2.2.3 สารกระตุ้น (Activator) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น ยางที่ได้มีค่ามอดูลัส สูงขึ้น ได้แก่ กรดสเตียริก (Stearic acid) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

2.2.2.4 สารตัวเติม (Filler) เป็นสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือเพื่อ ปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น เขม่าดำ (Carbon black) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และซิลิกา (Silica) เป็นต้น

2.2.2.5 สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสารที่ช่วยทำให้ยางนุ่ม ช่วยในการแปรรูปของยาง

2.2.2.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agent) เป็นสารที่ใช้เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง โดยใช้สารพวกแอนติออกซิแดนท์ หรือสารพวกแอนติโอโซแนนท์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้จะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวนานขึ้น (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548)

2.2.2.7 สารพิเศษอื่นๆ (Miscellaneous ingredient) ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใส่สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีความพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Pigment) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) หรือสารหน่วง (Retarder) เป็นต้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Swift *et al.* (1998) ศึกษาการใช้ประโยชน์จากยางรีไซเคิลในการผลิตกำแพงกันเสียง สามารถช่วยแก้ปัญหาที่ประสบกันอยู่ คือ ควบคุมขยะจากยางเสื่อมสภาพและแก้ปัญหามลพิษทางเสียง ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของยางมีข้อได้เปรียบกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเศษยางที่ไม่ได้อัดรวมเป็นแผ่นกับเศษยางที่อัดรวมเป็นแผ่นโดยใช้สารยึดติดสำหรับอนุภาคขนาดแตกต่างกัน ที่ความหนาแตกต่างกัน พบว่า การดูดซับเสียงจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่ออนุภาคที่ใช้มีขนาดเล็กลง และการดูดซับเสียงเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุที่ทดสอบนั้นทำจากอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการไหลและความถี่เรโซแนนซ์ค่าแรก ซึ่งเป็นการช่วยให้ทราบถึงขีดความสามารถสูงสุดในการดูดซับเสียงของวัสดุ และเลือกที่จะดูดซับเสียงในความถี่ที่ต้องการได้

Pfretzschner and Rodriquez (1999) นำเศษยางเก่ามาผลิตเป็นวัสดุดูดซับเสียง ซึ่งสามารถดูดซับเสียงครอบคลุมความถี่กว้าง และได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยตรงจากท่อนั้นๆ พบว่าให้ผลสอดคล้องกัน และสามารถนำแบบจำลองไปใช้ในการออกแบบวัสดุดูดซับเสียงชนิดอื่นให้เหมาะสมสำหรับควบคุมเสียงได้ วัสดุที่เลือกใช้เป็นผนังกันเสียงหรือแผ่นดูดซับเสียงที่ได้มีความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ โดยเฉพาะฝน เนื่องจากเป็นเศษยางรีไซเคิลที่มีข้อได้เปรียบกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น โยแกว โยหิน เป็นต้น เพราะลดปัญหาการดูดซับน้ำและฝุ่นไปได้ อีกทั้งยังสามารถทาสีที่เหมาะสมเพื่อความสวยงามและทำความสะอาดได้ง่าย จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วนั้น สำหรับงานที่ใช้กลางแจ้ง ยางรีไซเคิลถือว่าเป็นตัวเลือกที่ดีในการป้องกันเสียงรบกวนต่าง ๆ ในขณะเดียวกันก็ยังเป็นการกำจัดยางเสื่อมสภาพได้อีกด้วย

เกศ ศรีวัฒนพล และคณะ (2545) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยจากต้นกกมาสร้างเป็นวัสดุดูดกลืนเสียง มีผลการศึกษาดังนี้ วัสดุดูดกลืนเสียงสร้างขึ้นจากเส้นใยกกผสมกาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (อัตราส่วน 1:1) อัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก แรงอัด 1 N/mm^2 อุณหภูมิ 150°C นาน 10 นาที โดยวัสดุดูดกลืนเสียงจากใยกกในงานวิจัยมี ความหนา 2.5 , 5 เซนติเมตร และความหนาแน่น $100 , 150 , 200 \text{ kg/m}^3$ ความสามารถในการดูดกลืนเสียงของวัสดุดูดกลืนเสียงที่สร้างขึ้นพิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง (α) วัดตามหลักการของมาตรฐาน ASTM E 1050-90 และค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง (NRC) ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียงของวัสดุดูดกลืนเสียงจากใยกกที่ความหนาและความหนาแน่นต่างๆ จะเปลี่ยนไปตามความถี่เหมือนกันทั้งหมด โดยมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 500 Hz และ ค่าสุดที่ 1000 Hz หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงพบว่าเมื่อวัสดุดูดกลืนเสียงหนาขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

จุไรรัตน์ ระเบียบพิศม์ (2548) สังเคราะห์โฟมวัสดุประกอบจากน้ำยางข้นและเศษผงหนังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฉนวนดูดซับเสียง วัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงในช่วงความถี่ 250 - 4,000 Hz หาสัมประสิทธิ์การลดระดับเสียง ความหนาแน่นในแต่ละอัตราส่วน พบว่า โฟมวัสดุประกอบทุกอัตราส่วนการผสมของน้ำยางข้นและเศษผงหนังที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงใกล้เคียงกันที่ความหนาเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษผงหนังและขนาดของเศษผงหนังมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงไม่มากนัก แต่การผสมเศษผงหนังลงในยางจะช่วยลดต้นทุนการผลิตและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ โฟมวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถนำมาใช้แทนวัสดุดูดซับเสียงในเชิงพาณิชย์ได้ ควรเป็นวัสดุประกอบของเศษผงหนังลดขนาดที่มีอัตราส่วนการผสมของน้ำยางข้นต่อเศษผงหนังเท่ากับ 1:1.6 และมีความหนา มากกว่า 2 เซนติเมตร

มิ่ง โลกิจแสงทอง และพงษ์ศักดิ์ คำมูล (2549) ศึกษาการวัดความหน่วงเหนี่ยวทางเสียงจำเพาะหรือสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงโดยใช้ท่อคลื่นยืนหรือท่อความหน่วงเหนี่ยว การออกแบบอุปกรณ์และวิธีทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM หมายเลข C384-90a กล่าวคือ ท่อตรงซึ่งมีผนังท่อแข็งพร้อมด้วยตัวลำโพงเสียงและชิ้นงานวัสดุวางอยู่ที่ปลายสุดของท่อ วัสดุที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ แก้ว คอนกรีตและอิฐ ซึ่งมีความหนาต่างๆ โดยทดสอบที่ความถี่ 125, 250, 500, 1000, 2000 และ 4000 Hz แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับแหล่งข้อมูลที่มีอยู่ในท้องตลาด เป็นที่มั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้จะสามารถนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสำหรับวัสดุอื่นๆ ที่หาข้อมูลไม่ได้ การหาสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงด้วยวิธีแบบท่อคลื่นยืนเป็นวิธีที่ประหยัดและสะดวกวิธีหนึ่ง ถึงแม้คลื่นเสียงที่ตกกระทบจะมีเฉพาะในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุขึ้นทดสอบ ผลที่วัดได้ก็ให้ค่าที่นำไปใช้ได้

ในกรณีที่เรามีวัสดุที่ไม่ทราบความสามารถดูดซับเสียง จึงมีความจำเป็นอย่างย้งต้องทำการค้นหาโดยการทดลองเอง

ฤทธิ์ หงส์สาคร และคณะ (2549) นำเสนอโครงการวิจัย “แผ่นดูดซับเสียงจากยางพาราเสริมเส้นใยมะพร้าว” โดยการประยุกต์ใช้ยางพาราภายในประเทศเพื่อใช้ผลิตเป็นแผ่นดูดซับเสียงภายในอาคารในเชิงอุตสาหกรรม ผลการวิจัยสรุปได้ว่า ในการผลิตแผ่นดูดซับเสียงจากยางพาราเสริมเส้นใยมะพร้าวที่สามารถติดตั้งในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีความหนา 15 มิลลิเมตร โดยในการผลิตแผ่นดูดซับเสียง 1 ตารางเมตรจะใช้เส้นใยมะพร้าวและน้ำยางพาราประมาณอย่างละ 1.20 กิโลกรัม เมื่ออบแห้งแล้วจะมีน้ำหนักประมาณ 1.80 กิโลกรัม ในขณะที่ไม้อัดหนา 8 มิลลิเมตร กระเบื้องแผ่นเรียบหนา 6 มิลลิเมตร ยิปซัมหนา 10 มิลลิเมตร และแผ่นดูดซับเสียงขานอ้อยหนา 6 มิลลิเมตร จะมีน้ำหนัก 4.17, 10.69, 5.56 และ 2.78 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ในการทดสอบคุณสมบัติการลดระดับเสียงพบว่าวัสดุที่ป้องกันการส่งผ่านเสียงได้ดีที่สุดคือ กระเบื้องแผ่นเรียบ รองลงไปได้แก่ ไม้อัด ยิปซัม แผ่นดูดซับเสียงขานอ้อย และยางพาราเสริมเส้นใยมะพร้าว ตามลำดับ ในขณะที่วัสดุที่สามารถดูดซับเสียงได้ดีที่สุดคือ ยางพาราเสริมเส้นใยมะพร้าว รองลงไปได้แก่ แผ่นดูดซับเสียงขานอ้อย ไม้อัด ยิปซัม และกระเบื้องแผ่นเรียบ ตามลำดับ

Hong *et al.* (2007) ศึกษาการดูดซับเสียงของวัสดุประกอบจากอนุภาคของยางรีไซเคิลมาทำเป็นชั้นลดพลังงานเสียงนำมาประกบกับแผ่นโฟมพอลิเมอร์ชนิดรูพรุนหรือแผ่นที่มีลักษณะเป็นรูพรุนอื่น ๆ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความต้านทานเสียงต่ำ พบว่าให้ผลดี นอกจากจะมีสมบัติที่น่าสนใจแล้วยังมีราคาถูก สามารถดูดซับเสียงได้ในช่วงความถี่กว้าง มีลักษณะเป็นแผ่นบางและยังสามารถขึ้นรูปได้ง่ายอีกด้วย จึงมีการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์การส่งผ่านของเสียงขึ้นจนสำเร็จและนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าการดูดซับเสียงของตัวดูดซับเสียงเชิงประกอบ

สมบัติ พุทธจักร และคณะ (2551) ศึกษาสมบัติการดูดซับเสียงของยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์และชนิดคาโอไลน์ในปริมาณ 0, 10, 20, 40, 60 และ 80 phr (part per hundred rubber) โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นแผ่นที่มีความหนา 1.5 และ 5 mm นำมาทดสอบสมบัติการสูญเสียพลังงานภายในเนื้อวัสดุ ($\tan \delta = G''/G'$) โดยการวัดสมบัติรีโอโลยีเชิงพลวัตของการบิด (G'' , G') และวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ความถี่ต่าง ๆ ($\alpha(f)$) พบว่าค่า $\tan \delta$ ของยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์จะมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ แบบ e^x ตั้งแต่ปริมาณ 30 phr ขึ้นไป กราฟ $\alpha(f)$ ของยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ที่ความหนา 1.5 mm แสดงจุดสูงสุดของความถี่พ้องของการดูดซับเสียง $\alpha = 0.2$ ที่ $f = 2,000$ Hz แต่ของยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดคาโอไลน์

จะมี $\alpha = 0.07$ เท่านั้น เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ความถี่พ้องของการดูดซับเสียงก็จะเพิ่มขึ้น และค่า α ก็จะเพิ่มขึ้น ส่วนชั้นทดสอบหนา 5 mm ทั้งที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์และผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ ความถี่พ้องจะมากกว่า 4,000 Hz ซึ่ง $\alpha = 0.5$ และ 0.96 ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึง วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย และวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

3.1.1 โยมะพร้าว

3.1.2 น้ำยางธรรมชาติชั้น ชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Natural Rubber Latex, HA Latex) มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ประมาณ 60% ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC) ประมาณ 61– 62 % เก็บรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย 0.7% ผลิตโดยบริษัทปัตตานีอุตสาหกรรม (1971) จำกัด

3.1.3 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) มีลักษณะเป็นแผ่นบางสีขาวขุ่นขนาดเล็ก มีความบริสุทธิ์ 88.5% ใช้เป็นสารเพิ่มความเสถียรในน้ำยางธรรมชาติ เตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายเข้มข้น 10 % โดยน้ำหนัก ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส

3.1.4 โลวิน็อกซ์ ซีพีแอล (Lowinox CPL) เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟินอลเป็นองค์ประกอบ มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อน ใช้เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) ใช้ในรูปของสารคิสเพอร์ชั่น (Dispersion) ที่มีความเข้มข้น 50% มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 132.0 – 136.0 องศาเซลเซียส ผลิตโดยบริษัท Lowi Polymerstabilisers GmbH ประเทศเยอรมัน

3.1.5 กำมะถัน (Sulphur) เป็นกำมะถันเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ผลิตโดยบริษัท Ciech S.A. ประเทศโปแลนด์ ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) สำหรับน้ำยางธรรมชาติ ใช้ในรูปของสารคิสเพอร์ชั่น ที่มีความเข้มข้น 50% มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 117.0 – 119.2 องศาเซลเซียส

3.1.6 กรดโอเลอิก (Oleic acid) มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใส ใช้ในการเตรียมสบู่โพแทสเซียมโอเลอิก ผลิตโดยบริษัท E. Merk Darmstadt Co., Ltd. ประเทศเยอรมัน

3.1.7 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เป็นชนิด White Seal มีลักษณะเป็นผงสีขาว ผลิตโดยบริษัท China National Chemical Construction ประเทศจีน ใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ใช้ในรูปของสารคิสเพอร์ชั่น ที่มีความเข้มข้น 50% มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส

3.1.8 ซิงค์เมอร์แคปโทเบนโซไทอะโซล (Zinc Mercaptobenzothiazole, ZMBT) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ผลิตโดยบริษัท China National Chemical Construction ประเทศจีน ใช้เป็นสารตัวเร่งหลักในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ใช้ในรูปของสารดิสเพอร์ชั่น ที่มีความเข้มข้น 50%

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

3.2.1 เครื่องชั่งไฟฟ้า (Electronic balance) สามารถชั่งได้ละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง น้ำหนักสูงสุดที่ชั่งได้ คือ 3,100 กรัม ผลิตโดย A&D Company Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

3.2.2 ตู้อบอากาศร้อน (Hot Air Oven) สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงสุด 300 องศาเซลเซียส สามารถตั้งเวลาในการปิดได้ และมีระบบพัดลมเพื่อควบคุมความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ ผลิตโดยบริษัท Memmert GmbH ประเทศเยอรมัน

3.2.3 แบบพิมพ์สำหรับเตรียมชิ้นทดสอบ ทำด้วยอะลูมิเนียม มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 30 x 30 x 5 เซนติเมตร

3.2.4 ชุดกวนผสมสารเคมีกับน้ำยาง เป็นอุปกรณ์สำหรับการเตรียมน้ำยางคอมเพาด์ โดยควบคุมความเร็วในการกวนด้วยความเร็วสม่ำเสมอ

3.2.5 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ผลิตโดยบริษัท Mitutoyo Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น สามารถวัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ใช้ในการวัดความหนาของชิ้นทดสอบ

3.2.6 ตะแกรงร่อน ใช้สำหรับร่อนใยมะพร้าว ขนาด 100 mesh

3.2.7 ชุดทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงของวัสดุ โดยออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM หมายเลข C384 – 90a ใช้สำหรับวัดสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ประกอบด้วย

- 1) ตัวเก็บข้อมูลรุ่น EASY SENSE Advance ผลิตโดยบริษัท DATA HARVEST
- 2) หัววัดเสียง Smart Q Sound Sensor ผลิตโดยบริษัท DATA HARVEST
- 3) ชุดแหล่งกำเนิดเสียง
- 4) มอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัววัดเสียง

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมใยมะพร้าว

ปอกเปลือกมะพร้าว แยกเปลือกนอกที่แข็งออก นำเฉพาะกาบมะพร้าวมาแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ง่ายต่อการฉีกเป็นเส้น จากนั้นนำกาบมะพร้าวไปตากแดดให้แห้ง อย่างน้อย 48 ชั่วโมง นำใยมะพร้าวที่แห้งสนิทมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร แล้วนำไปปั่นให้เป็นผงละเอียด ใช้ตะแกรงร่อนผงใยมะพร้าว เพื่อให้ได้อนุภาคขนาดเล็ก



ภาพที่ 3.1 ใยมะพร้าวที่ผ่านตะแกรงร่อนแล้ว

3.3.2 การเตรียมน้ำยางคอมปาด์

- 1) ชั่งน้ำหนักสารเคมีตามสูตรการผสมดังตารางที่ 3.1
- 2) เทน้ำยางขึ้นตามปริมาณที่กำหนดลงในภาชนะสำหรับกวน ควบคุมความเร็วในการกวนให้สม่ำเสมอ ประมาณ 80 รอบ/นาที
- 3) เติมสารเคมีผสมลงในน้ำยางขึ้นตามลำดับดังตารางที่ 3.1 โดยทิ้งช่วงเวลาในการผสมประมาณ 2-3 นาที เพื่อให้สารที่เติมลงไปนั้นผสมเข้ากันก่อน
- 4) กวนสารเคมีเป็นเวลา 15 นาที ความหนืดจะเพิ่มขึ้น ทำการเพิ่มความเร็วในการกวน ประมาณ 100 รอบ/นาที ใช้เวลาในการกวนทั้งหมด 30 นาที จนกระทั่งได้น้ำยางคอมปาด์ที่ผสมเข้ากันดี
- 5) นำใยมะพร้าวเติมลงไปใต้น้ำยางคอมปาด์ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr กวนจนเข้ากันดี

ตารางที่ 3.1 สูตรการผสมน้ำยางคอมเพาด์

สารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
60% น้ำยางข้น HA	100	167
20% โพแทสเซียมโอเลต	0.2	1
10% โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	0.25	2.5
50% กำมะถัน	1.0	2
50% ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไธโอะโซล	1.0	2
50% โลวีน็อกซ์ ซีพีแอล	0.75	1.5
50% ซิงค์ออกไซด์	0.5	1

3.3.3 การเตรียมชิ้นทดสอบ

นำน้ำยางคอมเพาด์และไขมันพริ้วที่กวนผสมกันตามหัวข้อ 3.3.2 เทลงในแบบพิมพ์ให้ได้ความหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ นำเข้าอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมงแล้วอบคงรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.3.4 วิธีการทดสอบ

3.3.4.1 ทดสอบหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบที่ได้จากหัวข้อ 3.3.3 ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ของชิ้นทดสอบแต่ละสูตร ชั่งชิ้นทดสอบในน้ำและในอากาศ คำนวณหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นสัมพัทธ์} = \frac{W_a - W_w}{W_a} \quad (17)$$

เมื่อ

W_a คือ น้ำหนักในอากาศ (กรัม)

W_w คือ น้ำหนักในน้ำ (กรัม)

3.3.4.2 ทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงของชิ้นทดสอบ

สมบัติการดูดซับเสียงของน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว ทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบที่ได้จากหัวข้อ 3.3.3 คัดให้ได้ชิ้นทดสอบเป็นแผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร นำมาติดตั้งกับฝาครอบที่อยู่ปลายสุดของท่อ โดยใช้ชุดทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงด้วยเทคนิคทอกลืนนิ่งตามมาตรฐานทดสอบ ASTM C384-03 ดังภาพที่ 3.2 เพื่อหาค่าความดันเสียงสูงสุดและต่ำสุดค่าแรก แล้วนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ทำการทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบติดตั้งที่ฝาครอบปลายท่อด้านขวา ให้ชิ้นทดสอบตั้งฉากกับความยาวท่อ แล้วเปิดเครื่องกำเนิดความถี่เสียง ตั้งค่าความถี่เสียงที่ 250 เฮิรตซ์ วัดค่าระดับความดันเสียงต่ำสุดและสูงสุดค่าแรก ทำการทดสอบซ้ำที่ความถี่ 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 เฮิรตซ์ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงตามสมการที่ (11), (12) และ (16)



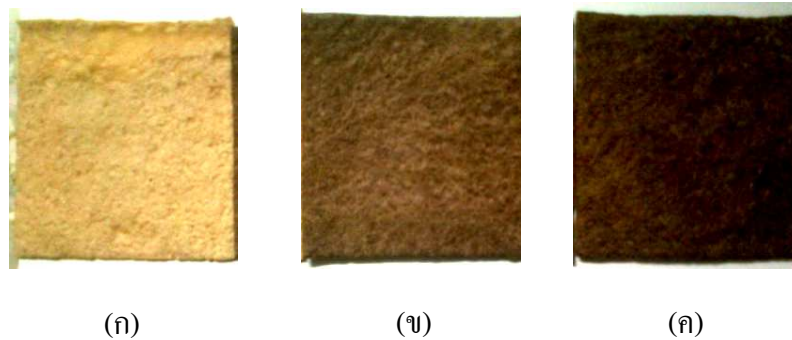
ภาพที่ 3.2 ชุดทดสอบสมบัติการดูดซับเสียง

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การศึกษาแผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าว ทดสอบสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของแผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางพาราเสริมเส้นใยมะพร้าวโดยมีปริมาณของเส้นใยมะพร้าว 0, 10 และ 20 phr ที่ความหนาของชั้นทดสอบ 1, 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร ได้ผลการทดลองดังนี้

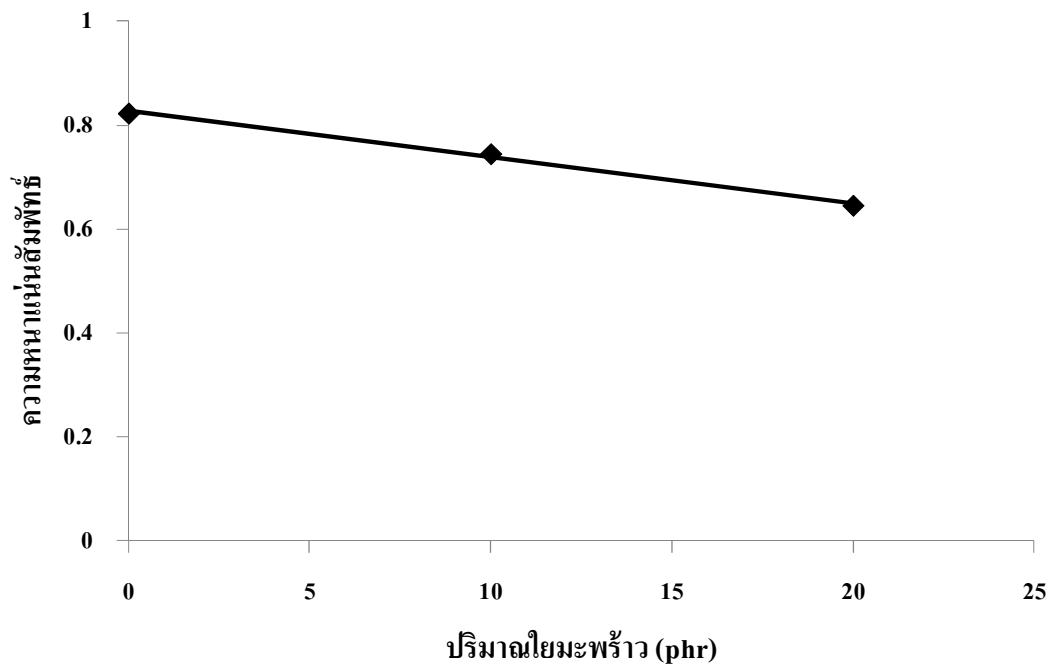
4.1 แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าว



ภาพที่ 4.1 แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าว
(ก) 0 phr (ข) 10 phr (ค) 20 phr ที่ความหนา 1 เซนติเมตร

น้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าวสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นดูดซับเสียงได้ดังภาพที่ 4.1 แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติที่ผสมไยมะพร้าว 0 phr จะมีลักษณะเป็นสีขาวนวล เมื่อเพิ่มปริมาณไยมะพร้าว 10 phr แผ่นดูดซับเสียงที่ได้มีลักษณะเป็นสีน้ำตาล ที่ปริมาณไยมะพร้าว 20 phr ขึ้นทดสอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม โดยสีของชั้นทดสอบมีความเข้มขึ้นตามปริมาณของไยมะพร้าว และผู้วิจัยพบว่าถ้าเพิ่มปริมาณไยมะพร้าวมากกว่า 20 phr จะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นดูดซับเสียงได้ ในงานวิจัยนี้จึงผสมไยมะพร้าวในปริมาณสูงสุดที่ 20 phr

4.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของแผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าว

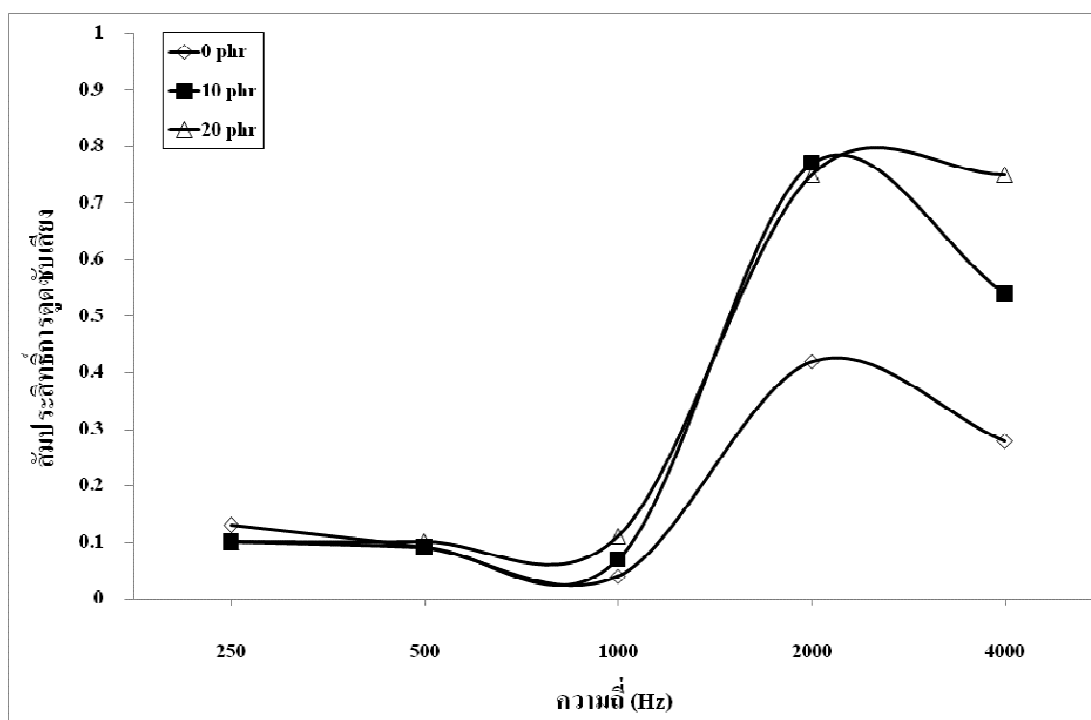


ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับปริมาณไยมะพร้าว

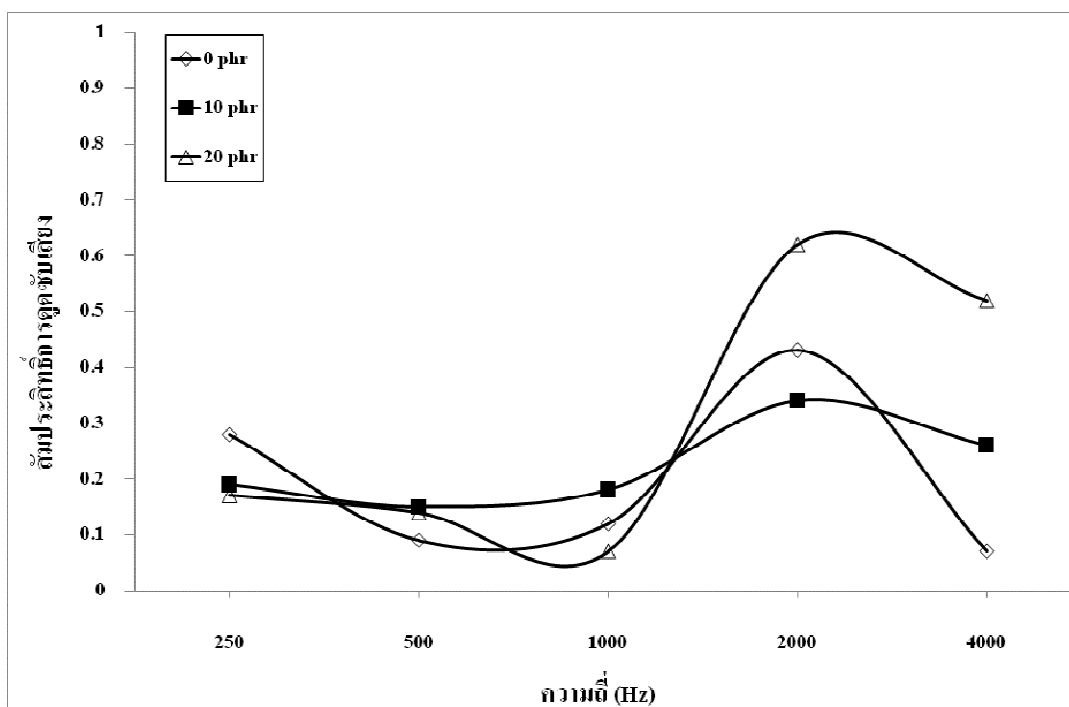
จากภาพที่ 4.2 พบว่า เมื่อปริมาณไยมะพร้าวที่ผสมในแผ่นดูดซับเสียงเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงในลักษณะเชิงเส้น เนื่องจากไยมะพร้าวมีลักษณะเป็นรูพรุน ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณไยมะพร้าวจึงเป็นการเพิ่มความเป็นรูพรุนให้กับวัสดุ วัสดุที่มีความเป็นรูพรุนมากจึงมีความหนาแน่นต่ำ

4.3 อิทธิพลของปริมาณไยมะพร้าวต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

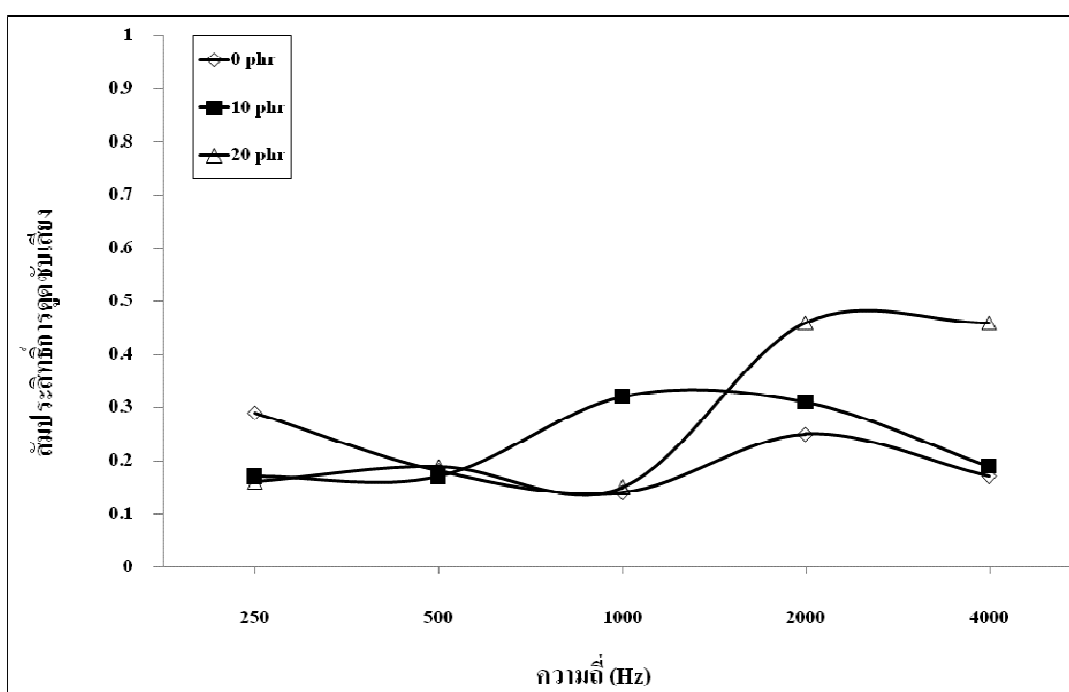
พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของแผ่นดูดซับเสียงผสมไยมะพร้าวดังภาพที่ 4.3-4.7 แผ่นดูดซับเสียงผสมไยมะพร้าวในปริมาณ 0 phr ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงจะมีค่าสูงที่ความถี่ 2,000 Hz ซึ่งเป็นความถี่เรโซแนนซ์ของน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำยางในเนื้อวัสดุเกิดการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ จึงเกิดการดูดซับเสียงสูงกว่าความถี่อื่นๆ ดังนั้นจึงไม่พิจารณาอิทธิพลของปริมาณไยมะพร้าวต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ความถี่ 2,000 Hz ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ชั้นทดสอบทุกความหนาจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน ที่ความถี่ 4,000 Hz ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงขึ้นตามปริมาณไยมะพร้าว อันเนื่องมาจากการที่ปริมาณไยมะพร้าวในเนื้อวัสดุมากขึ้นทำให้วัสดุมีความพรุนมาก โยโมเลกุลของน้ำยางจึงสามารถขยับตัวได้ง่าย ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานเสียงสูงขึ้น



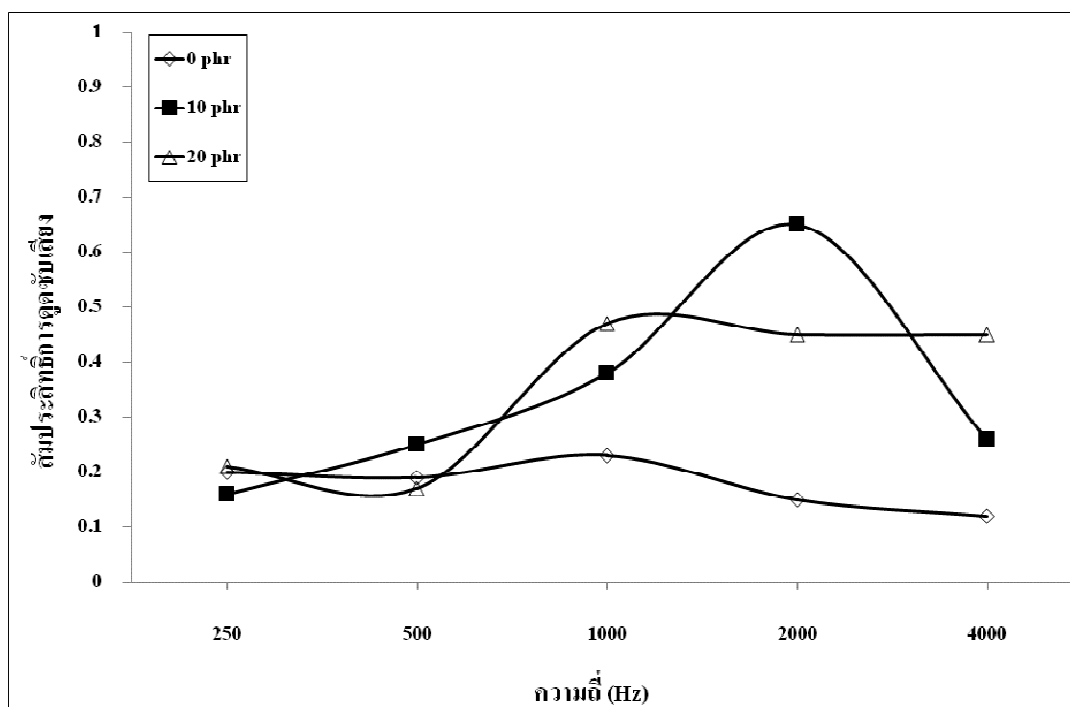
ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมไยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 1 เซนติเมตร



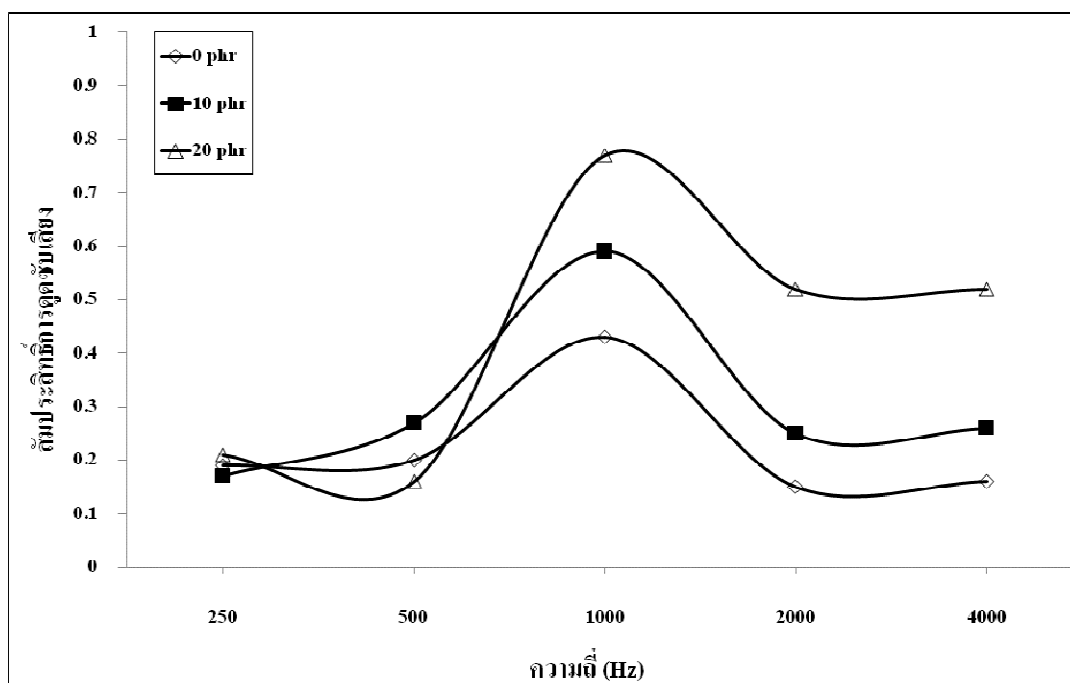
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมใยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 2 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมใยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 3 เซนติเมตร



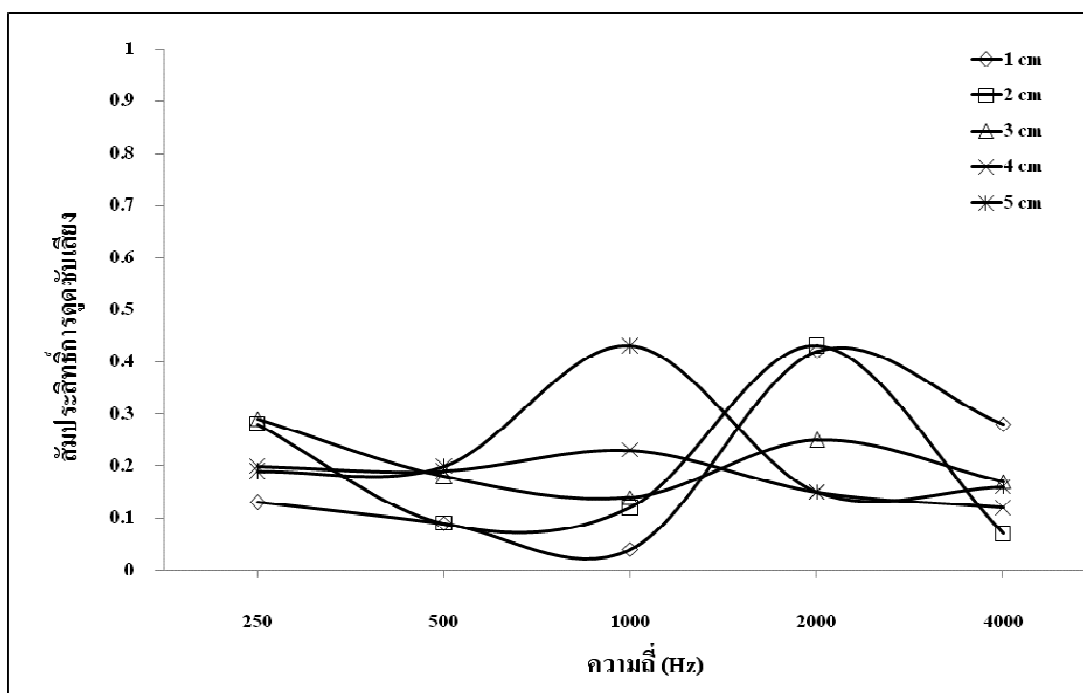
ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมใยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 4 เซนติเมตร



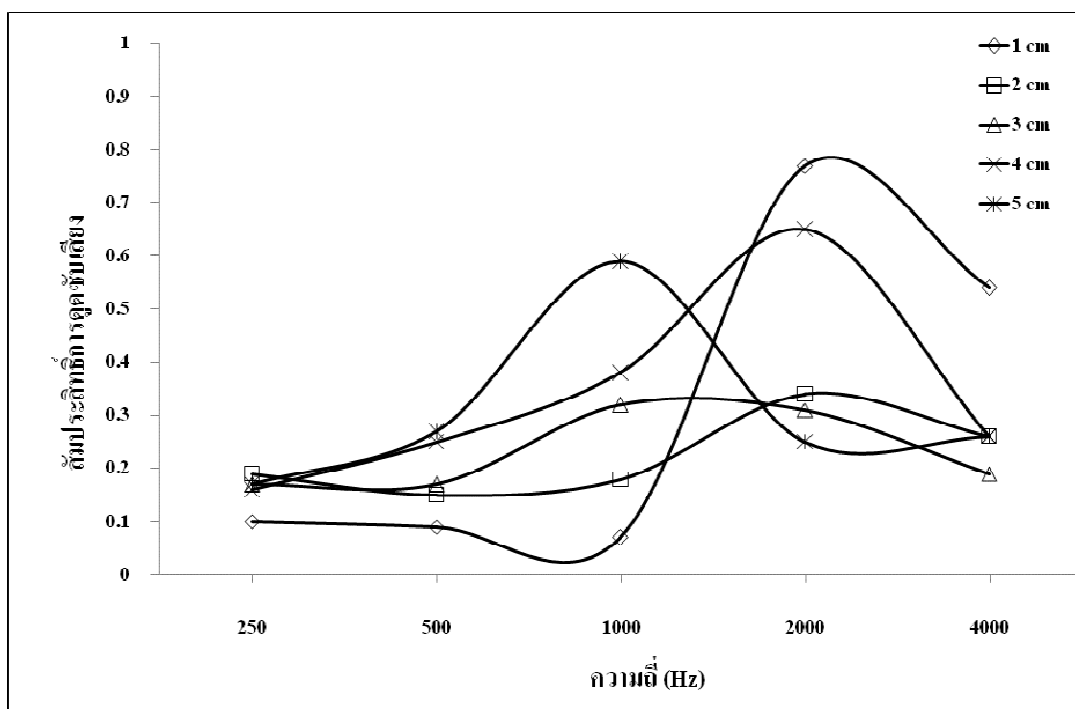
ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมใยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ ขนาดความหนา 5 เซนติเมตร

4.4 อิทธิพลของความหนาต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

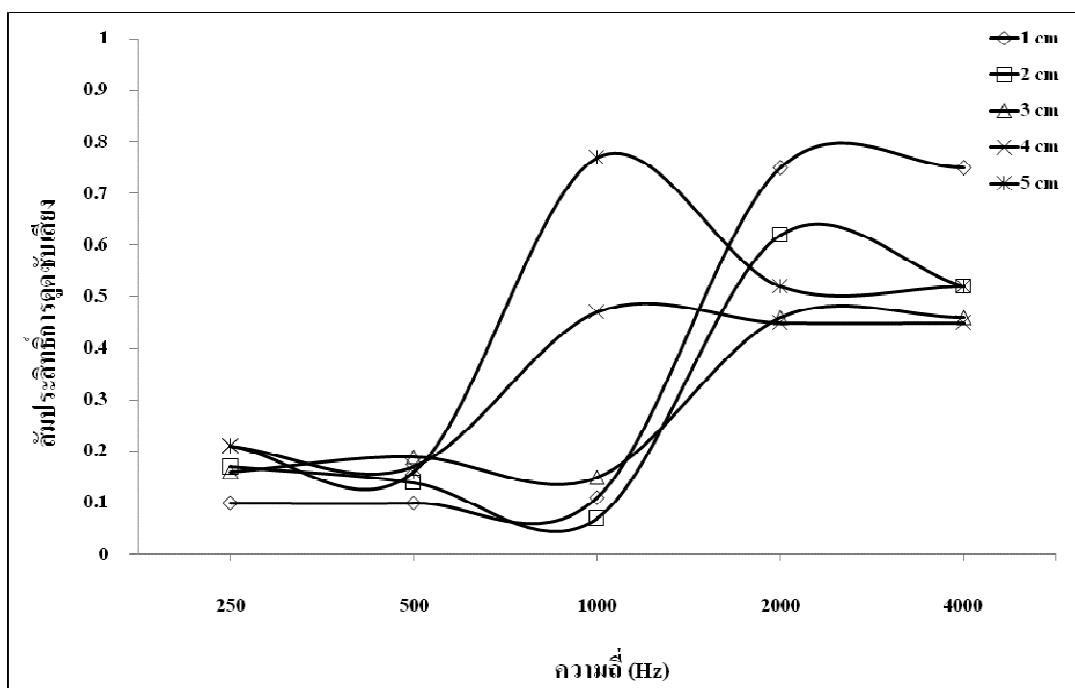
ผลการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงเป็นดังภาพที่ 4.8-4.10 ซึ่งพบว่าเมื่อขึ้นทดสอบมีความหนาน้อย (1 – 3 เซนติเมตร) แผ่นดูดซับเสียงจะสามารถดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ 2,000 Hz แต่เมื่อเพิ่มขนาดความหนาของขึ้นทดสอบ (4 – 5 เซนติเมตร) จะดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ต่ำกว่า คือที่ความถี่ 1,000 Hz และที่ความถี่ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงขึ้นเมื่อขึ้นทดสอบมีความหนามากขึ้น



ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงผสมใยมะพร้าว 0 phr ที่ความหนาต่างๆ



ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่
ของแผ่นดูดซับเสียงผสมไขมะพร้าว 10 phr ที่ความหนาต่างๆ



ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่
ของแผ่นดูดซับเสียงผสมไขมะพร้าว 20 phr ที่ความหนาต่างๆ

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผล

5.1.1 ผลการผสมและขึ้นรูปแผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว

น้ำยางธรรมชาติสามารถนำมาผสมใยมะพร้าวและขึ้นรูปเป็นแผ่นดูดซับเสียงได้ โดยผสมใยมะพร้าวในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ขึ้นทดสอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นสีเข้มขึ้นตามปริมาณของใยมะพร้าว และไม่สามารถขึ้นรูปแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมใยมะพร้าวในปริมาณสูงกว่า 20 phr ได้

5.1.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของแผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว

ความหนาแน่นสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงในลักษณะเชิงเส้น เมื่อปริมาณใยมะพร้าวที่ผสมในแผ่นดูดซับเสียงเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นสัมพัทธ์จะบ่งบอกถึงความเป็นรูพรุนในเนื้อวัสดุ ที่จะทำให้อากาศไหลผ่านได้มากขึ้นหรือลดลงตามปริมาณรูพรุน ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเสียงของวัสดุ

5.1.3 อิทธิพลของปริมาณใยมะพร้าวต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงขึ้นตามปริมาณใยมะพร้าว อันเนื่องมาจากการที่ปริมาณใยมะพร้าวในเนื้อวัสดุมากขึ้นทำให้อากาศมีความพรุนมาก อากาศสามารถไหลผ่านได้ง่าย ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานเสียงสูงขึ้น

5.1.4 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

ขึ้นทดสอบมีความหนา 1 – 3 เซนติเมตร แผ่นดูดซับเสียงจะสามารถดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ 2,000 Hz แต่เมื่อความหนาของขึ้นทดสอบมีขนาดเป็น 4 – 5 เซนติเมตร จะดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ 1,000 Hz และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงขึ้นเมื่อขึ้นทดสอบมีความหนามากขึ้น ทั้งนี้การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน (ดูได้จาก ภาคผนวก ก)

5.1.5 อิทธิพลของความถี่ต่อสมบัติการดูดซับเสียง

แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าวมีความสามารถในการดูดซับเสียงที่ความถี่ต่ำได้น้อยและมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนการผสม แต่สามารถดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ ตั้งแต่ 1,000 Hz ขึ้นไป โดยที่ความถี่ 1,000 Hz แผ่นดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมไยมะพร้าวในปริมาณ 20 phr ความหนา 5 เซนติเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงสุดเท่ากับ 0.75 ที่ความถี่ 2,000 แผ่นดูดซับเสียงที่ผสมไยมะพร้าวปริมาณ 10 phr ความหนา 1 เซนติเมตร และความถี่ 4,000 Hz แผ่นดูดซับเสียงที่ผสมไยมะพร้าวปริมาณ 20 phr ความหนา 1 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงสุดเท่ากับ 0.77 และ 0.75 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางที่จะต่อยอดเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงอุตสาหกรรมได้
- 5.2.2 อาจหาแนวทางในการผสมไยมะพร้าวเข้ากับน้ำยางธรรมชาติในปริมาณมากกว่า 20 phr โดยใช้สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticiser) เพื่อช่วยในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ
- 5.2.3 ผู้สนใจอาจใช้แนวทางจากงานวิจัยนี้สร้างสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ หรือปริมาณสารตัวเติมโดยใช้แฟกเตอร์ทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยได้

บรรณานุกรม

- เกศ ศรีวัฒนพล, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, พิชาญ สว่างวงศ์ และ สมพร ศรีวัฒนพล. 2545. วัสดุอุดกลืนเสียงจากใยกก. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45: สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- จุไรรัตน์ ระงับพิศม์. 2548. การสังเคราะห์โฟมวัสดุประกอบจากน้ำยางและเศษพวงหรีดเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฉนวนดูดซับเสียง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- มิ่ง โลกกิจแสงทอง และ พงษ์ศักดิ์ คำมูล. 2549. การหาสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุโดยใช้ท่อแบบคลื่นยืน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. จังหวัดนครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549.
- ฤทธิ์ หงส์สาคร, สุทัศน์ นาทอง, ชัชชัย โฉมงาม และ สมปอง เจริญทอง. 2549. แผ่นดูดซับเสียงจากยางพาราเสริมเส้นใยมะพร้าว. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม.
- วราภรณ์ ขจรไชยกุล. 2525. น้ำยาง. สถาบันวิจัยยาง สงขลา.
- สมบัติ พุทธจักร, ธรณิศ นาวารัตน์ และคาริกา จาเอาะ. 2551. การดูดซับเสียงในยางธรรมชาติผสมดินขาว. วิทยาศาสตร์ มข., 36(4):338-347
- Blackley, D.C. 1997. Polymer Latices Science and Technology, Volume 1: Fundamental Principles, 2nd ed., London : Chapman & Hall Publ.
- Blatrix, S., 2007. Sound (online). Available : www.iurc.montp.inserm.fr/cric51/audition/English/sound/sound.htm [January 3, 2009].
- Everest, F., and Pohlman, C., 2006. Master handbook of Acoustics (Online). Available : www.netlibrary.com/Reader [January 3, 2009].

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Hong, Z., Bo, L., Guangsu, H. and Jia, H. 2007. A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *Journal of sound and vibration*, 304 : 400-406
- Pfretzschner, J., and Rodriguez, R.M. 1999. Acoustic properties of rubber crumbs. *Polymer Testing*, 18 : 81-92.
- Russell, A. 2006. Absorption Coefficients and impedance (online). Available : www.kettering.edu/~drussel/GMI-Acoustics/Absorption.html [November 6, 2009].
- Swift, M.J., Brisl, P., and Horoshenkov, K.V. 1998. Acoustics absorption in re-cycled rubber granulate. *Applied Acoustics*, 5 : 203-212.
- Weng, S.S., Mun, S.S., Cheong, S.Y., Leong, S.Y., and Kwong, L.A. (2000) “Bloom & Psuedo-Bloom”, <http://www.sinrubtech.com.my/short%20notes\Short%20Notes%203-2.htm>. [March 22, 2011].

ภาคผนวก

แผนภูมิชนิดของเสียงตามความถี่

Approximate Frequency Ranges

